

# 特別研究報告

題目

操作者の認知バイアスを推定し支援する  
VR型訓練システムの実装と有効性の評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

大島 良介

2025年2月6日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

## 内容梗概

VR (Virtual Reality) 技術の向上やVR機器の普及に伴い、VRを用いたサービスへの注目が高まり、さまざまなVRサービスが新しく登場している。特に、現実世界では訓練が難しいものに対して、VR内で再現することによって、学習者がインタラクティブな体験を通して訓練を行うことができるVRトレーニングが医療や建築をはじめとする多分野において導入および普及されている。このVRトレーニングの分野では認知バイアスへの対応を試みる研究がいくつかなされている。認知バイアスは人が環境を認識し操作を行う際に避けられない事象であるが、非合理的な判断がなされるといった悪影響を及ぼす可能性がある。このような認知バイアスの影響による事故を起こさないための訓練を現実世界で行うことが高いリスクを伴う場合、仮想空間にて現実世界を再現し、認知バイアスの影響を低減できるように介入を行い、認知バイアスへの対応を支援するVRトレーニングシステムが有効である。

認知バイアスへの対応を試みる先行研究では、対象の個人の特性に関係なく一律の介入を行っている。しかし認知バイアスには個人差があり、その影響や操作者の特性を無視して介入を行った場合、過剰な情報提供による混乱や不十分な支援による学習効果の低下が生じる可能性がある。そのため、システムが個人の認知バイアスの影響度を推定し、推定に基づいた適切な介入を行う必要がある。

そこで本報告では、操作者の確認バイアスの影響度を推定し、その影響度を操作者自身が理解し、影響を低減できるように介入方法を変化させる介入システムを有するVRトレーニングシステムの有効性をユーザ実験によって評価する。VRトレーニングシステムとしてVR空間で重機の遠隔操作を訓練するシミュレータを実装し、確認バイアスが発生する状況下で、操作者の操作情報から操作者の確認バイアスの影響度を推定し、その影響度を低減するように介入方法を変化させる介入システムを実装する。ユーザ実験では、実装した介入システムによる介入を受けるグループと介入を受けないグループに分け、介入を受ける前後にて各被験者の操作効率を比較する。その結果、介入を受ける前後で介入なしグループと介入ありグループの操作効率の上昇率を比較し、介入ありグループの操作効率の上昇率が介入なしグループより高くなっており、個人の認知バイアスの影響度に応じた操作介入の効果があることが確認された。

## 主な用語

VR (Virtual Reality)

VR トレーニング

認知バイアス

確証バイアス

重機操作

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>個人の認知バイアスを考慮した介入システム</b>	<b>8</b>
2.1	認知バイアスのモデル化 . . . . .	8
2.2	認知バイアスの発生シナリオ . . . . .	9
2.3	操作者の認知バイアスの推定に応じた介入システム . . . . .	11
<b>3</b>	<b>重機遠隔操作の VR トレーニングシステムの実装</b>	<b>12</b>
3.1	重機遠隔操作の VR トレーニングシステムの基本仕様 . . . . .	12
3.2	介入システムの実装 . . . . .	16
<b>4</b>	<b>ユーザ実験</b>	<b>20</b>
4.1	実験手法 . . . . .	20
4.2	実験環境 . . . . .	21
4.3	評価手法 . . . . .	22
4.4	実験結果 . . . . .	23
<b>5</b>	<b>おわりに</b>	<b>28</b>
	<b>謝辞</b>	<b>29</b>
	<b>参考文献</b>	<b>30</b>

## 目 次

1	操作画面 (石をすくう場面) . . . . .	13
2	操作画面 (トレーラーに石を積み込む場面) . . . . .	14
3	ステージ構成 . . . . .	15
4	操作介入時の操作画面 . . . . .	19
5	Meta Quest 3 . . . . .	21
6	各被験者の操作完了時間の推移 . . . . .	24
7	各被験者の旋回操作入力回数の推移 . . . . .	24
8	各被験者のステージ B をもとにしたステージ D の操作完了時間の相対比率 . . . . .	26
9	各被験者のステージ B をもとにしたステージ D の旋回操作入力回数の相対比率 . . . . .	26

## 表 目 次

1	重機シミュレータのステージごとの目的 . . . . .	14
2	シミュレータの操作方法 . . . . .	15
3	各ステージで扱う重機の諸元 . . . . .	16
4	ミッションで指定する運搬する石の数 . . . . .	16
5	推定した $\gamma$ による介入強度の決定 . . . . .	18
6	操作介入時の旋回最高速度から停止するまでの移動角度 . . . . .	18
7	使用した Meta Quest 3 の性能 . . . . .	21
8	各被験者の操作完了時間のステージごとの平均値 . . . . .	25
9	各被験者の旋回操作入力回数のステージごとの平均値 . . . . .	25

## 1 はじめに

VR (Virtual Reality) 技術の向上や VR 機器の普及に伴い、VR を用いたサービスへの注目が高まり、さまざまな VR サービスが新しく登場している。その一例として VR トレーニングが挙げられる。VR トレーニングとは現実の環境や状況を再現した仮想空間にて、学習者がインタラクティブな体験を通して学習や技能習得、身体機能の向上を行うものである。このトレーニング手法は、医療、建築、教育、製造業、スポーツといった様々な分野で導入が行われている。特に医療の分野において、世界全体の VR 市場規模は 2023 年に 31 億 2000 万米ドルと評価されているが、この中でもトレーニングの分野が 2023 年に市場で最大の収益を生み出している。さらに、2024 年に 41.8 億米ドルから 2032 年までに 384.6 億米ドルに成長すると予測されており、32.0%の年平均成長率を示している [1]。

VR を用いることで、手術や災害時の対応などの現実世界で再現することが難しい作業、高所作業や消防訓練などの訓練者が危険な状況にある作業に対して、安全かつ効率的な模擬訓練環境を提供することができる利点がある。実際、VR トレーニングは従来のビデオ教育や講義形式に比べ、学習効果を高めることが実証されており、医療や建築などの分野でその効果が実験的に確認されている [2-4]。

また、VR サービスはデジタル化されていることから作業機器の遠隔操作も VR サービスの一例として挙げられる。危険な災害現場や高所作業など従来の方法では高リスクな環境やアクセス困難な場所での作業において、VR を用いて現場の状況をリアルタイムで確認しながら遠隔地にて操作を行うことで、現場に行かずとも作業を行うことができ、かつ作業の安全性が図られ、労働力の効率的な活用や操作者のリスクの軽減といった利点が得られる。この遠隔操作はネットワーク遅延による影響のため従来の実機での操作と比べて、操作を行ってから機械が反応するまでに時間がかかり、操作性や作業精度が落ちる課題がある。この遠隔操作の課題に対処するため、VR トレーニングと組み合わせて遠隔操作の VR トレーニングシステムが構築されている [5]。このシステムは仮想空間の遠隔運転席から別の仮想空間の建設機械を遠隔運転することによって、操作者が遠隔運転で生じる遅延に慣れることを目的としている。

人が環境を認識し操作を行う際に生じる認知バイアスは避けられない事象である。認知バイアスとは物事の判断を直感やこれまでの経験にもとづく先入観によって行う現象であり、認識に要する負荷を軽減する良い側面も有しているが、過度にバイアスがかかると非合理的な判断がなされるリスクが生じる。VR トレーニングの分野で認知バイアスへの対応を試みる研究がいくつかなされている。文献 [6] では、VR トレーニングによって認知バイアスの一種である正常性バイアスを考慮した意思決定の支援システムを開発している。このシステムでは認知バイアスの一つである正常性バイアスが生じる状況を仮想空間にて再現し、VR

上で選択肢を提供することによって訓練者の意思決定を支援している。

認知バイアスによる非合理的な判断が影響し、重大な事故に繋がる可能性がある [7]。重機操作を想定した場合、過去に操作経験がある重機と大きさや仕様が異なる重機を操作する際に認知バイアスが発生し、重心の位置や重機の安定性、移動速度などを誤って認識し、重機の転倒事故、衝突事故に繋がる事が挙げられる。上記のような認知バイアスの影響による事故を起こさないための訓練を現実世界で行うことはリスクが大きいため難しい。そのため、仮想空間にて現実世界を再現し、認知バイアスの影響を低減するように介入を行い、認知バイアスへの対応を支援する VR トレーニングシステムが有効であると考えられる。

認知バイアスへの対応の例として、文献 [8] ではバイナリ分類問題に対して AI 支援型意思決定を行う際に、機械学習型 AI の出力の信頼度が低い時に分類問題を解く時間を長く割り当てることで、アンカリングバイアスを低減する介入の手法を提案している。ただし、この文献の実験において介入手法は同じグループの被験者に対して同じ時間を割り当てており、認知バイアスの個人差を考慮した介入を行っていない。しかし、認知バイアスには個人差があり、その影響や操作者の特性を無視した一律の介入を行った場合、過剰な情報提供による混乱や不十分な支援による学習効果の低下が生じる可能性がある。このことより、システムが個人の認知バイアスの影響度を推定し、推定にもとづいた適切な介入を行う必要がある。

そこで本報告では、まず文献 [5] を参考とした重機の遠隔操作を訓練する VR トレーニングシステムを実装する。その VR トレーニングシステムにて、操作者の認知バイアスが発生する状況下で、操作者に提供する最適な介入方法が個人ごとに変化する場面を考える。その際に、操作情報から操作者の認知バイアスの影響度を推定し、認知バイアスの影響度を操作者自身が理解し、かつ影響を低減できるように介入方法を変化させることが、確認バイアスの影響を軽減させることへの有効性をユーザ実験によって評価する。

本報告の構成は以下の通りである。まず 2 章では個人の認知バイアスを推定し、その推定に基づいた介入を行う介入システムについて説明する。3 章では、2 章で説明する介入システムを有した重機の遠隔操作を訓練する VR トレーニングシステムについて説明する。4 章では、ユーザ実験の結果をもとに実装した介入システムを有する VR トレーニングシステムの評価を行う。最後に 5 章では本報告のまとめと今後の課題を述べる。

## 2 個人の認知バイアスを考慮した介入システム

実装する VR トレーニングシステムでは、操作者に認知バイアスが発生する状況において、操作者の認知バイアスの影響度を推定し、その推定に応じた操作対象の挙動に介入を行うシステムを実装する。以下では、認知バイアスを推定するための認知バイアスのモデル化、認知バイアスのモデルをもとに認知バイアスが発生するシナリオ、そしてその発生する認知バイアスを低減するための介入システムを述べる。

### 2.1 認知バイアスのモデル化

ベイズモデルを用いてヒトの意思決定の様相の説明を試みる研究がなされている [8–10]。文献 [8] では、ヒトと機械学習アルゴリズムが協力して意思決定を行う設定のもと、ヒトと機械学習型 AI が協力するプロセスで引き起こされるヒトの認知バイアスを考慮したベイズモデルを導出している。

文献 [8] の設定として、ヒトが特徴量のセットを2つのカテゴリーに正しく分類するバイナリ分類問題を考える。そのため、真のクラス  $y^*$  は条件として  $y^* \in \{0, 1\}$  が与えられる。意思決定および予測を行うためにヒトには特徴量  $D$  が提示され、ヒトは  $D$  のすべてについて利用可能である。また、ヒトには特徴量  $D$  に加えて機械学習アルゴリズムの出力全体  $f(M)$  も表示される。この出力は機械学習型 AI による予測 ( $\hat{y} \in \{0, 1\}$ ) や予測に対する機械生成の説明などによって構成されている。そして、与えられた特徴量と出力をもとにヒトが最終的に決定を下す。このヒトが下す意思決定  $\tilde{y}$  も条件として  $\tilde{y} \in \{0, 1\}$  が与えられる。

最初に、簡単な設定としてヒトが特徴量  $D$  を使用して決定を下す設定を考える。決定変数  $\tilde{Y}$  を用いて、意思決定を下すヒトは必ず合理的な判断をするうえでベイズ最適としてモデル化すると、ヒトは事後確率がより高いクラスを選択することになる。このことを定式化すると以下の式 1 のようになる。

$$\tilde{y} = \underset{i \in \{0, 1\}}{\operatorname{argmax}} \mathbb{P}(\tilde{Y} = i | D) \quad (1)$$

なお、式 1 で現れた事後確率  $\mathbb{P}(\tilde{Y} = i | D)$  はベイズの定理に適用することで、予測の事前確率  $\mathbb{P}_{pr}(\tilde{Y})$  とデータの尤度分布  $\mathbb{P}(D | \tilde{Y})$  を用いて、式 2 のように表せる。

$$\mathbb{P}(\tilde{Y} = i | D) = \frac{\mathbb{P}(D | \tilde{Y} = i) \mathbb{P}_{pr}(\tilde{Y} = i)}{\sum_{j \in \{0, 1\}} \mathbb{P}(D | \tilde{Y} = j) \mathbb{P}_{pr}(\tilde{Y} = j)} \quad (2)$$

さらに、今回の設定ではヒトは利用可能な特徴量に加えて機械学習型 AI の出力も考慮したうえで、意思決定を下すこととなっている。この設定に合わせて、式 2 を変形した場合、式 3 のような比例関係が成立する。

$$\mathbb{P}(\tilde{Y} | D, f(M)) \propto \mathbb{P}(D, f(M) | \tilde{Y}) \mathbb{P}_{pr}(\tilde{Y}) \quad (3)$$

意思決定者の決定  $\tilde{Y}$  に条件づけられた場合、意思決定を下すヒトは特微量と機械学習型 AI の出力を独立して認識すると仮定する。この仮定の下では式 3 は、意思決定者が認識した機械学習型 AI の出力の条件付き確率  $\mathbb{P}(f(M)|\tilde{Y})$  を用いて以下の式 4 のように変形可能である。

$$\mathbb{P}(\tilde{Y}|D, f(M)) \propto \mathbb{P}(D|\tilde{Y})\mathbb{P}(f(M)|\tilde{Y})\mathbb{P}_{pr}(\tilde{Y}) \quad (4)$$

式 4 では  $D$  と  $f(M)$  の間でのみ条件付き独立であると仮定しており、特微量  $D$  内の構成要素や  $f(M)$  内の構成要素の間の条件付き独立は仮定していない。この式 4 によって、機械学習型 AI に支援されたヒトによる合理的な意思決定のモデルが表される。

現実には、ヒトは自身の認知バイアスの影響を受けるため、必ずしも合理的な行動を選択するとは限らない。そのため、バイアスの程度を表現するのに有用であるベイズ推論に対する指数バイアス、すなわち逆温度パラメータを導入することで認知バイアスを説明する。認知バイアスを考慮したベイズ推定は以下の式 5 のようにモデル化できる。

$$\mathbb{P}(\tilde{Y}|D, f(M)) \propto \mathbb{P}(D|\tilde{Y})^\alpha \mathbb{P}(f(M)|\tilde{Y})^\beta \mathbb{P}_{pr}(\tilde{Y})^\gamma \quad (5)$$

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  はそれぞれ選択的アクセシビリティ、アンカリングバイアス、確証バイアスの影響度が反映されるパラメータである。

本報告では、選択的アクセシビリティは特定の情報や記憶が他の情報よりもアクセスしやすくなる傾向のこと、アンカリングバイアスは最初に提示された情報や先入観によって判断や意思決定に影響が与えられ、それ以降の情報を適切に処理できなくなる傾向のこと、確証バイアスは過去の経験に基づいてすでに持っている先入観や仮説を肯定するため、自分にとって都合のよい情報ばかりを集める傾向のこととして定義する。

## 2.2 認知バイアスの発生シナリオ

2.1 節の認知バイアスのベイズモデルを表した式 5 をもとに、重機操作に関連する、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  のパラメータそれぞれに対応する選択的アクセシビリティ、アンカリングバイアス、確証バイアスが発生すると考えられるシナリオを以下に挙げる。

### 2.2.1 選択的アクセシビリティの発生シナリオ

$\alpha$  によって影響度が表現される選択的アクセシビリティが発生するシナリオとしては、遠隔操作を行う際に、振動のフィードバックを誤って認識する状況が考えられる。重機の遠隔操作を行う操作者は実機に乗っていないため、実機に乗っている際には得られる機体の振動、バケットの振動といった振動によるフィードバックを直接得ることができない。その代

わりに、実機にかかっている負荷を数値として表示するといった代替のフィードバックが操作者に提供される状況を想定する。このとき、操作者は操作している実機の振動を数値情報のみで判断する必要がある。実機で操作する場合には直接振動を知覚することができるが、数値といった感覚的でないフィードバックは直接身体に伝わるものではないため、操作者は遠隔操作している実機の振動を正しく認識できない可能性がある。この状況では実機の振動の数値情報が式5の  $D$  に対応し、選択的アクセシビリティが発生すると考えられる。

### 2.2.2 アンカリングバイアスの発生シナリオ

$\beta$ によって影響度が表現されるアンカリングバイアスが発生するシナリオとしては、重機の周辺に障害物が存在する可能性があるという状況が考えられる。障害物を除去しないまま旋回などの操作を行った場合、障害物に衝突してしまい、重大な事故を引き起こす可能性がある。このとき、操作者は実際に目視で確認すれば、重機が障害物に衝突するかを間違いなく認識することができる。この状況において、物体認識を行う装置を用意し、その装置は重機の周辺に障害物が存在するかを識別し、旋回操作が可能であるか否かを操作者に出力することができるという状況を考える。操作者はこの装置の出力を得ることができ、その出力によって障害物の有無を目視による確認を行わずに、旋回操作の安全性を判断することが可能となる。この装置の出力が式の  $f(M)$  に対応する。この出力が誤っている場合には、この出力が操作者にとって誤ったアンカーとなる。そのため、出力が誤っている場合には操作者にアンカリングバイアスによる悪影響が発生すると考えられる。

### 2.2.3 確証バイアスの発生シナリオ

$\gamma$ によって影響度が表現される確証バイアスが発生するシナリオは操作する重機の大きさが異なる状況が考えられる。重機が大きいほど、旋回速度が小さくなり、また加速、減速も遅くなる。逆に重機が小さいほど、旋回速度が大きくなり、加速、減速も速くなる。そのため、重機の大きさが異なると、操作の感覚も異なることになる。

確証バイアスを重機シミュレータにて発生させるシナリオとして操作する重機の大きさが小さいステージと大きいステージの2つを用意する。以下ではそれぞれステージ1、ステージ2と呼ぶこととする。操作者は最初にステージ1を数回行うことによって、ステージ1の重機の操作に慣れ、それをもとに操作者の中で重機の操作の仮説が確立される。その後、ステージ2で操作を行うことで、ステージ1の操作での経験をもとにした仮説を立て、その仮説に基づいて操作を行うが、ステージ1より重機の大きさが増加した影響によって減速が遅くなり、目標としていた旋回位置を超えて旋回してしまうといった、操作者が想定していた動作と異なる動作が行われることになり、操作時間が長くなることが考えられる。このと

き、事前確率の  $\mathbb{P}_{pr}(\hat{Y})$  について影響が大きいと考えられ、確認バイアスが発生すると考えられる。

以上に挙げるように、選択的アクセシビリティやアンカリングバイアス、確認バイアスの軽減についてのシナリオが考えられるが、選択的アクセシビリティのシナリオは実機操作の経験がない人物では発生しにくく、アンカリングバイアスの軽減は文献 [8] によって実施されているため、本報告で取り上げるシナリオは確認バイアスのシナリオとし、確認バイアスの軽減についての研究を行う。そのため、本報告で実装する重機の遠隔操作を訓練する VR トレーニングシステムは、普段操作している重機と種類が異なる重機を操作するといった状況で発生する操作者の確認バイアスの軽減する介入システムを持つものとする。

### 2.3 操作者の認知バイアスの推定に応じた介入システム

介入の目的は、操作者が自身の確認バイアスについて理解することによって自身の確認バイアスによる影響の低減を補助することである。そして、認知バイアスには個人差があるため、介入システムが個人の認知バイアスの影響度を推定し、その推定にもとづいた適切な介入を行う必要がある。

介入システムの概要は、重機の操作情報から操作者が持つ確認バイアスの影響度として式 5 の  $\gamma$  の大きさを推定し、推定した  $\gamma$  の値から介入強度を決定、そして決定した介入強度で操作への介入を行うものである。操作への介入については、認知バイアスの影響を操作者に理解してもらう必要があるため、操作量の過多・不足をより強調し、操作者が操作量の過多・不足をもとに、操作量の増大、減少を自身で行うことができるようにする。具体的には回転移動が多く目標地点を超えて回転してしまう場合には、操作量を増大させ、通常時よりも目標地点を超えさせる。それにより操作量が多いことを操作者に強調することで、その情報をもとに操作者が操作量を減少するように促す。逆に、回転移動が少なく目標地点に足りない場合には、操作量を減少させ、通常時よりも目標地点に足りないようにする。それにより操作量が少ないことを操作者に強調することで、その情報をもとに操作者が操作量を増大するように促す。この介入システムによる操作量の増大、減少によって自身の確認バイアスによる影響を操作者自身が理解することができ、この影響の低減を補助することができると期待できる。また、確認バイアスを操作者が視覚的に理解できるように、介入システムによる操作への介入によって操作量が増大、減少していることを操作者の画面上に表示し、操作者に伝えることができるようにする。

### 3 重機遠隔操作の VR トレーニングシステムの実装

重機を VR 空間で再現して操作訓練を行うことができる「重機で Go」 [11] が VR トレーニングとして存在するが、旋回時の慣性、重機の重量などの操作重機の相違に細やかな違いを加えることが難しく、認知バイアスを発生させる道筋が得られなかった。そこで「重機で Go」を参考に、VR 空間で重機の遠隔操作を訓練する重機シミュレータを Unity [12] 上で実装する。実装した VR トレーニングシステムの実際の操作画面は図 1、2 に載せる。

#### 3.1 重機遠隔操作の VR トレーニングシステムの基本仕様

作成した重機シミュレータのステージのミッションは、「指定された数以上の石をトレーラーに積み込む」という簡易なものである。このミッションが達成されると操作完了となる。なお、確認バイアスの発生および介入システムの導入のため、重機が大きさがそれぞれ異なる 3 つのステージ、介入システムの有効性を評価するためのステージの合計 4 つのステージを用意する。以下では、それぞれステージ A、ステージ B、ステージ C、ステージ D としている。それぞれのステージの目的は表 1 の通りである。

実装した VR トレーニングシステムの詳細の仕様をシステム構成と表示仕様、シミュレーション諸元を分けて記載する。

##### 3.1.1 システム構成

- Meta Quest3 で実行する。
- 各ステージは図 3 の通りに石、重機、トレーラーを配置する。
- 開始時にタイトル画面を表示する。
- タイトル画面には 4 つのボタンを用意し、ボタンが押されるとそのボタンに対応するステージの説明画面に遷移する。
- 説明画面のボタンが押されると操作画面へ遷移する。
- 操作画面において指定された量以上の石がトレーラーへ積み込まれると結果画面を表示する。
- 結果画面のボタンが押されるとタイトル画面に遷移する。
- 操作は Meta Quest3 のコントローラを用い、操作方法は表 2 の通りとする。



図 1: 操作画面 (石をすくう場面)

- バケットの操作は重機が旋回していない時のみ受け付ける。
- タイトル画面、説明画面、結果画面において、スティック操作によって移動するポインタを表示する。
- ポインタが画面のボタン上にあり、コントローラの'A'ボタンが押された場合に、ボタンが押されたという判定を行う。
- 遠隔操作によるネットワーク遅延を組み込むために、事前に指定されたフレームだけ操作遅延が生じる。
- 操作者が操作の結果と目標地点との誤差を学習できるように、旋回操作の入力は旋回停止時のみ受け付ける。

### 3.1.2 表示仕様

- 操作者は VR ゴーグルの動きに合わせて視点を全方位に変えることが可能である。
- 操作者は重機の内部からの映像と重機の上部からの映像を見ることができる。



図 2: 操作画面 (トレーラーに石を積み込む場面)

表 1: 重機シミュレータのステージごとの目的

ステージ A	操作者がシミュレータの操作を習熟
ステージ B	介入システムが操作者の認知バイアスを推定
ステージ C	介入システムが推定した認知バイアスの影響度をもとにした介入の実行
ステージ D	介入システムの有効性を評価

- 機体の旋回に合わせて視点を移動させる。
- タイトル画面の下部に「ステージ A」、「ステージ B」、「ステージ C」、「ステージ D」に対応するボタンを表示する。
- 操作画面の下にアームの位置や角度、バケットの角度、機体の速度などを表示する。
- 操作画面の左下に操作開始からの経過時間と現在積み込んだ石の数および目標数を表示する。
- 説明画面の中央にミッション内容、下部に遷移用のボタンを表示する。
- 結果画面の中央にミッションに要した時間と旋回入力の操作回数、下部に遷移用のボタンを表示する。

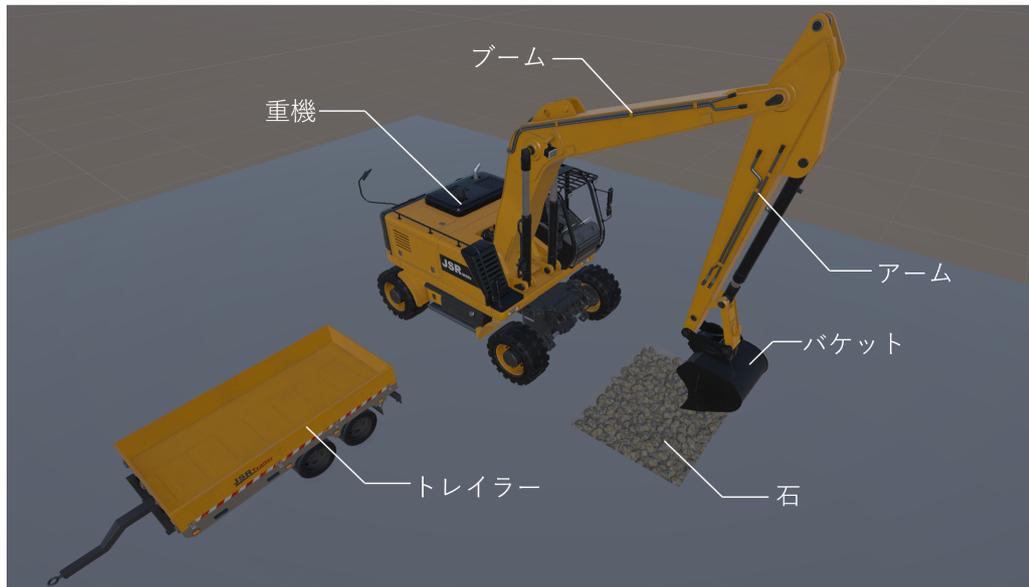


図 3: ステージ構成

表 2: シミュレータの操作方法

ポインタの移動	左スティック	ボタンの選択	A ボタン
走行/旋回モード切替	X ボタン	カメラ切り替え	Y ボタン
前進	左スティック: 上	後退	左スティック: 下
左に曲がる	左トリガー	右に曲がる	右トリガー
右に旋回	左スティック: 右	左に旋回	左スティック: 左
アームを伸ばす	左スティック: 上	アームを曲げる	左スティック: 下
バケットを開く	右スティック: 右	バケットを閉じる	右スティック: 左
アームを伸ばす	左スティック: 上	アームを曲げる	左スティック: 下
ブームを下げる	右スティック: 上	ブームを上げる	右スティック: 下

### 3.1.3 シミュレーション諸元

各ステージでの重機の諸元は表 3 に載せている。ステージ A の重機は住友建機株式会社の SH120-7、ステージ B の重機は同会社の SH470HD-7、ステージ C、D の重機はともに同会社の SH700LHD-7 [13] をモデルとしたものであり、重機の大きさがステージを進むごとに増加する。

また、その他の作成したシミュレータにかかわる数値として、石の重さは 1 個当たり 10 kg、操作遅延は約 0.1 秒とするために 15 フレームとしている。ミッションで指定するトレーラーに運搬する石の数については、1 回の旋回操作による運搬を行うことで操作完了とできるよ

表 3: 各ステージで扱う重機の諸元

	ステージ A	ステージ B	ステージ C	ステージ D
重機重量	12600 kg	47800 kg	70400 kg	70400 kg
モーター出力	76.4 kW	270 kW	382 kW	382 kW
回転数	2000 $min^{-1}$	2000 $min^{-1}$	1800 $min^{-1}$	1800 $min^{-1}$
旋回最高速度	14.3 $min^{-1}$	9.1 $min^{-1}$	6.7 $min^{-1}$	6.7 $min^{-1}$
バケット容量	0.5 $m^3$	1.8 $m^3$	2.9 $m^3$	2.9 $m^3$
バケット重量	480 kg	1240 kg	3680 kg	3680 kg
停止するまでの旋回角度	10 度	20 度	30 度	30 度

表 4: ミッションで指定する運搬する石の数

ステージ A	ステージ B	ステージ C	ステージ D
5 個	15 個	30 個	30 個

うに設定するために、各ステージの重機のバケット容量に合わせて、表 4 の通りの数値としている。

### 3.2 介入システムの実装

実装する介入システムは操作情報から操作者が持つ確証バイアスの影響度を式 5 の  $\gamma$  の大きさに推定し、推定した  $\gamma$  の値から介入強度を決定し、操作量の過多・不足をより強調できるように操作者の操作に介入を行うものである。また表 1 の通り、ステージ B で操作者の認知バイアスの影響度  $\gamma$  の大きさを推定し、ステージ C ではステージ B で推定した  $\gamma$  をもとに決定した介入強度で操作者の操作へ介入を行う。なお、本 VR トレーニングシステムの重機シミュレータは操作完了の条件に至るまでの重機操作において、旋回以外の操作は必要な操作量が少なく、介入システムの有効性が得られないと考えられるため旋回操作のみに介入を行う。

#### 3.2.1 認知バイアスの影響度 $\gamma$ の推定方法

本 VR トレーニングシステムでは、トレーラーに石を積み込む際にトレーラーまで重機を旋回させる必要があるが、その際トレーラーが存在する位置と重機のバケットの位置との距離が大きい、すなわちトレーラーの上部にバケットが存在する角度と停止した角度の差が大きいほど、認知バイアスの影響を受けており、 $\gamma$  の値が大きいと推定できる。逆に、角度の

差がほとんどない場合には $\gamma$ の値が小さくなると推定できる。そのため、トレーラーが存在する角度との誤差角度を $\gamma$ の推定指標として用いる。

具体的な推定方法として、トレーラーの上部にバケットが存在する角度と石を運搬している状態で $i$ 回目に旋回操作が停止した角度との誤差 $e_i$ を $w_i$ で重みづけした和、 $\gamma$ の値に補正するパラメータ $\lambda$ を用いて

$$\gamma = \frac{\sum e_i \times w_i}{\lambda} \quad (6)$$

と計算する。

また、 $e_i$ は回転がトレーラーのある位置よりも超えてしまった場合に正の値、回転がトレーラーの位置よりも足りない場合には負の値となる。重み $w_i$ は事前に設定した値とし、

$$w_i = \begin{cases} 3 & \text{if } i = 1, \\ 2 & \text{if } i = 2, \\ 1 & \text{if } i \geq 3. \end{cases}$$

のように設定している。各実行回において、1, 2回目の旋回動作が停止した際の誤差ほど、事前のステージで形成された確認バイアスの影響をより受けていると考えられる。そのため、1, 2回目の旋回動作が停止した際の誤差により大きい重みを与えつつ、その後の誤差の影響も反映することができるように重みを設定することで、単なる誤差の累計よりも確認バイアスを正しく推定できる。

ステージ間の重機の種類の違いにより、旋回が最高速度で行われている場面から停止するまでの旋回角度も表3のように異なっており、操作者の $\gamma$ を推定するステージBと事前に操作がされるステージAでは10度の差がある。そのため、ステージBにてその角度の差だけ誤差が生じた場合には操作者は十分に確認バイアスの影響を受けていると考えられ、 $\gamma$ の値が大きくなる。今回の設定では、1回目の誤差 $e_1$ が10、2回目以降の誤差が0の場合でも、十分に確認バイアスの影響を受けていると考え、 $\gamma = 3.0$ として推定できるようにする。そのため、式6で用いたパラメータ $\lambda$ では10を設定している。

### 3.2.2 操作への介入方法

ステージCでは、3.2.1節の推定方法を用いて、ステージBで推定した $\gamma$ の値をもとに操作への介入強度を決定する。操作への介入強度は介入なしを合わせて7段階としており、操作量を増大させる介入と減少させる介入がそれぞれ3段階である。推定した $\gamma$ による介入強度の決定については表5の通りである。

また、ステージの回数ごとに操作強度を変化させることで、より個人の認知バイアスに対応できると考えられるため、ステージCの1回目の運搬操作の介入強度はステージBの1

表 5: 推定した  $\gamma$  による介入強度の決定

条件	介入強度
$3.0 \leq \gamma$	増大介入 (強)
$2.0 \leq \gamma < 3.0$	増大介入 (中)
$1.0 \leq \gamma < 2.0$	増大介入 (弱)
$-1.0 < \gamma < 1.0$	介入なし
$-2.0 < \gamma \leq -1.0$	減少介入 (弱)
$-3.0 < \gamma \leq -2.0$	減少介入 (中)
$\gamma \leq -3.0$	減少介入 (強)

表 6: 操作介入時の旋回最高速度から停止するまでの移動角度

増大介入 (強)	50 度
増大介入 (中)	40 度
増大介入 (弱)	35 度
介入なし	30 度
減少介入 (弱)	25 度
減少介入 (中)	20 度
減少介入 (強)	10 度

回目の運搬の操作によって決定、ステージ C の 2 回目の運搬操作の介入強度はステージ B の 2 回目の運搬の操作によって決定、というようにステージの回数に対応し、推定した  $\gamma$  を用いて介入強度を決定するように実装した。操作介入は VR トレーニングシステムが受け付ける入力の時間、ブレーキの強さを変化させることによって停止するまでの旋回角度が変化され、より操作の過多・不足を強調できるようにする。それぞれの介入強度での旋回最高速度から停止するまでの移動角度を表 6 に載せる。

介入システムによる操作への介入時には、確証バイアスによる影響を操作者自身が理解することができるように、介入システムによる操作量の増大、減少といった介入が行われていることを操作画面の右下に表示し、操作者が介入の実行を知ることができる実装をした。また増大の介入がされている場合には操作量を減少する必要性があること、減少の介入がされている場合には操作量を増加する必要性があることを示すといったという簡易的な対応方法の操作者への表示も行う。

表示については、介入強度が強い場合には赤字で操作者へより強調できるようにする、介入強度が小さい場合には操作者に対応処理が僅かで良いことを示す、といったように介入強

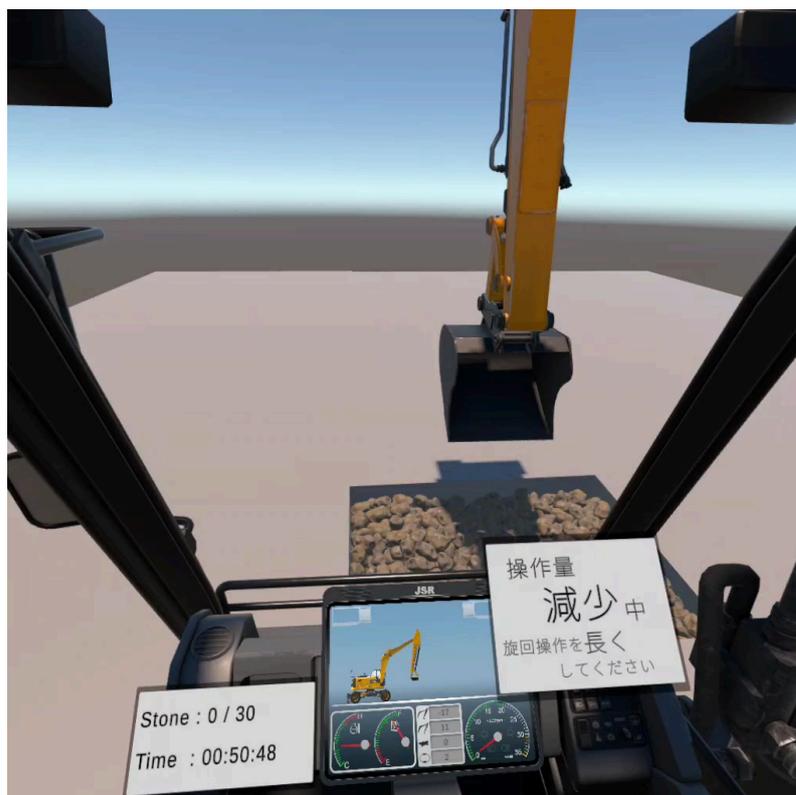


図 4: 操作介入時の操作画面

度の違いによって表示方法も異なるように実装している。図 4 は介入システムによる中程度の操作の減少介入が行われている場面での操作画面である。

## 4 ユーザ実験

3章にて実装した操作者の認知バイアスの影響度を推定し、その推定に基づいた介入を行う介入システムを有したVRトレーニングシステムを用いてユーザ実験を実施し、介入を行わない場合と実装した介入システムによる介入を行う場合の2つを比較し、操作者の確証バイアスの軽減に対する操作者の認知バイアスを推定し支援するVRトレーニングシステムの有効性を評価する。

### 4.1 実験手法

ユーザ実験では、被験者がMeta Quest3を装着した状態で、実装したVRトレーニングシステムを実行する。

被験者には、シミュレータを実行する前に事前説明として操作方法、システムの概要の説明を行う。被験者は無作為に2つのグループに分けられ、一方は介入なしのグループ、もう一方はステージCで介入システムが実装された状況で操作を行う介入ありのグループである。本報告ではそれぞれ介入なしグループ、介入ありグループとして記述する。どちらのグループの被験者もステージA、ステージB、ステージC、ステージDを順に実行する。なお、ステージCの操作にて、介入ありグループでは介入システムによる操作介入が行われるが、介入なしグループでは操作介入は行われなくなっている。

また、各ステージの実行回数については、ステージAは重機操作に慣れ、かつ以降の操作に影響を与える確証バイアスの形成を行うために15回実行する。そして、ステージBは介入システムによる確証バイアスの推定のために3回、そしてその後にステージC、Dにて操作に影響を与える確証バイアスの形成を行うために5回の合計8回実行する。ステージCはステージBでの確証バイアスの推定に基づく介入が行われるため、推定を行った回数と同じ3回実行する。ステージDは、ステージCの後に操作効率が上がったかを評価するために8回実行する。

ステージA、B、Cは重機の重さや速度などが連続で単調に変化するため、操作者が重機の変化を学ぶことによって、ステージBとステージCで発生する認知バイアスの強さが異なる可能性がある。そこで対策として、被験者がステージCを実行する前に30分から1時間の休憩を挟むようにし、ステージAからステージBに移った際の重機の変化に対する学習効果を低減させることを試みた。



図 5: Meta Quest 3

表 7: 使用した Meta Quest 3 の性能

OS	Meta Horizon OS
CPU	Qualcomm Snapdragon XR2 Gen 2
GPU	Adreno 740
DRAM	8GB
解像度	2064x2208

## 4.2 実験環境

被験者として所属研究室の学生 4 名に参加してもらった。4 名全員、重機操作経験および本 VR トレーニングシステムの操作経験は無かった。無作為に 4 名のうち 2 名を介入なしグループ、2 名を介入ありグループに分けて所属研究室内で実験を行った。

ユーザ実験にて、実装した VR トレーニングシステムは VR ヘッドセットである Meta Quest3(図 5) を用い、入力には Meta Quest3 付属のコントローラを用いた。なお、実験に使用した Meta Quest3 の性能は表 7 に載せている。

### 4.3 評価手法

ステージが変化し、重機が大きくなることによって確認バイアスが発生する。その影響により、旋回操作などにおいて目標の位置を超えて回転してしまうといった非効率的な操作がされ、操作完了に要する時間が長くなると考えられる。そして、ステージ C にて介入システムによる介入を受けることによって、ステージ D にて操作者は効率的な操作を行うことができるようになる。よって、このような操作の効率性を測るため、操作完了に要する時間を評価指標として利用する。なお、操作能力は操作者ごとに異なるため、ステージ D に要した操作完了時間に対して絶対的な評価するのは不適切であると考えられる。そのため、操作完了時間は、同じく重機の種類が異なった状態で操作するステージ B とステージ D との間で比較し、ステージ B をもとにしたステージ D の相対比率を用いることによって、介入前後の操作効率の上昇率を被験者ごとで比較する。このとき、介入ありの被験者の相対比率の値が介入なしの被験者と比較して小さくなっていれば、介入を受けることによって操作効率の上昇率が高くなっており、介入システムによる効果があると言える。

3.2 節で述べた通り、介入システムによる推定および介入の対象となる操作は旋回操作のみである。しかし、旋回操作以外の操作も操作完了の条件に必要であるため、旋回操作以外の操作が操作完了時間に影響を与える可能性がある。そのため操作完了時間に加え、評価指標として旋回操作の入力回数も用いることで、介入を行った旋回操作に対して、限定的に介入システムの有効度を測ることが期待できる。認知バイアスの影響が強いほど、目的の位置に合わせる事が難しくなり誤差が生じる。そして、その誤差を操作者が埋めるために追加操作を行う必要があるため、認知バイアスの影響が強いほど旋回操作の回数が多くなる。よって、旋回操作の入力回数を評価指標とすることで、効率的な旋回操作ができていないかを評価することが可能である。操作完了時間と同様に、操作能力によって旋回操作の入力回数も変化するため、ステージ B とステージ D の相対比率を用いて評価を行う。

以上のように本報告では、操作完了に要した時間と旋回操作のステージ B をもとにしたステージ D の相対比率を評価指標とし、被験者ごとに比較することで操作者の認知バイアスを推定し、その推定に基づく介入の有効性を評価する。

操作完了に要する時間の相対比率について、表 3 のようにステージ D で操作する重機はステージ B で操作する重機と比較して大きく、旋回速度が約 0.74 倍と遅くなっており、ステージ B とステージ D は同じ条件ではない。そのため、ステージ B と比較してステージ D の操作完了に要する時間は、確認バイアスの影響に関係ない場合でも長くなることが考えられる。旋回速度が 0.74 倍であることを考慮すると、ステージ D はステージ B と比較して  $\frac{1}{0.74} \approx 135\%$  だけ上昇している場合には操作効率が同じであると言える。そして、135% より小さい値であれば操作効率が上昇していると言える。なお、旋回操作の入力回数の相対比

率については、ステージ B とステージ D の重機の違いと旋回操作の入力回数に関係はないため、100% の場合に操作効率が同じであると言える。

#### 4.4 実験結果

図 6 は被験者ごとの操作完了に要した時間の推移のグラフである。また、図 7 は被験者ごとの旋回操作の入力回数の平均値の推移のグラフである。図 6, 7 ともに横軸は各ステージでの実行した回数を示しており、横軸はそれぞれ該当回での結果画面で出力された値である。介入なしグループの被験者を被験者 1 と被験者 2 とし、それぞれ被験者はグラフの水色と紺色の線に対応する。そして介入ありグループの被験者を被験者 3 と被験者 4 とし、それぞれの被験者はグラフの黄色と赤色の線に対応する。また、各被験者の操作完了時間および旋回操作入力回数のステージごとの平均値を表 8, 9 に載せている。数値は小数第 3 位を四捨五入し、小数第 2 位まで表示している。なお、ステージ A の 1 回目から 7 回目までの実行結果については操作に慣れていないものであり、評価に用いる箇所ではないため、図 6, 7 についてはグラフを省略している。

なお、操作者の意図に反した誤操作であり、かつその誤操作が重機の特性的の違いによるものではないと明確に判断できたもの、誤操作によってミッションの達成が不可能に陥った実行回について、評価指標の増大が評価方法に影響を与えるため、その操作が行われた際に得られたデータは除外した。除外したデータは、被験者 2 によるステージ B の 3 回目、被験者 3 によるステージ C の 5 回目の 2 つである。

図 6, 7 について、ステージ B の 1 回目の実行、ステージ C の 1 回目では操作完了時間、旋回操作入力回数の数値がともに周囲の実行回と比較して上昇している傾向があることが分かる。これはそれぞれステージが変化した 1 回目の実行、すなわち操作する重機の種類が異なった最初の実行となっており、想定していた通り認知バイアスの影響による数値の増大であると言える。また、ステージ A, B の全体を通して介入なしグループの被験者 1、被験者 2 のほうが介入ありグループの被験者 3、被験者 4 と比較して、操作完了時間、旋回操作入力回数の値が低い傾向にあり、ステージ A, B の実行時の条件は 2 つのグループで同じであるため、これは本 VR トレーニングシステムに対して、介入なしグループの被験者のほうが介入ありグループの被験者よりも操作能力が高かったためであると考えられる。

4.3 節に基づき、各被験者の操作完了時間および旋回操作の入力回数の相対比率を用いて評価する。図 8, 9 はそれぞれ表 8, 9 のステージ B とステージ D の値をもとに、被験者ごとのステージ B に対するステージ D の相対比率を表したグラフである。なお、介入なしグループの被験者 1、被験者 2 は青線、介入ありグループの被験者 3、被験者 4 は橙線で表している。

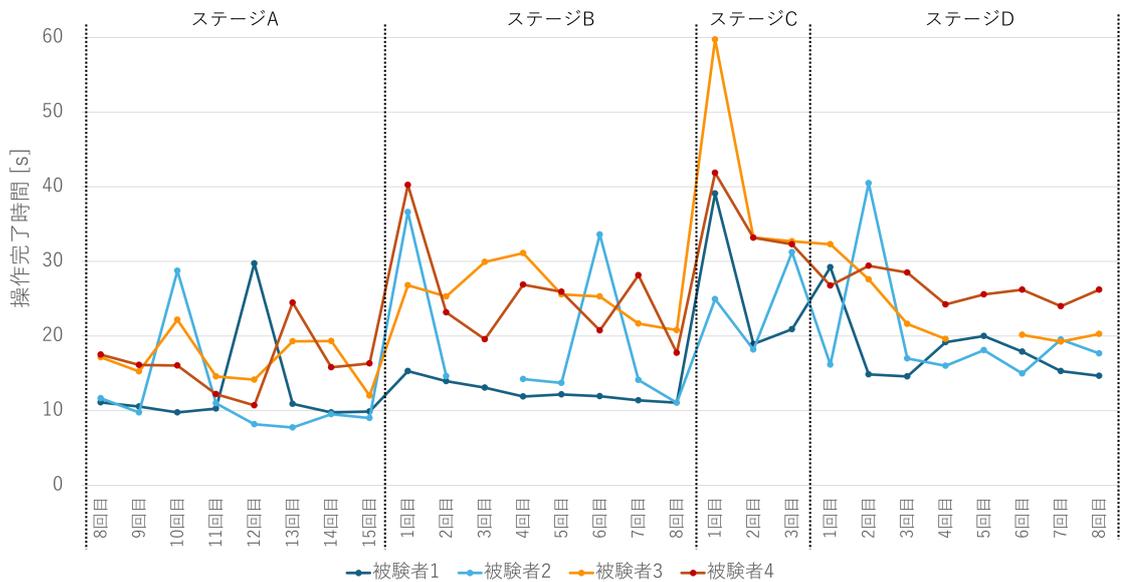


図 6: 各被験者の操作完了時間の推移

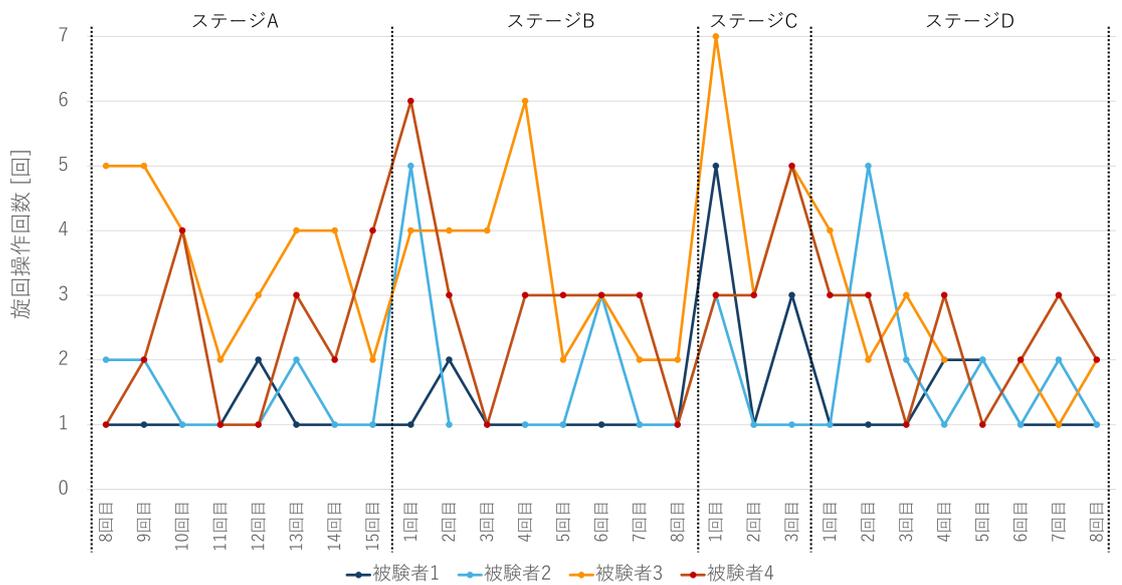


図 7: 各被験者の旋回操作入力回数の推移

被験者 3 について、図 8 での操作完了時間の相対比率、図 9 の旋回操作の入力回数の相対比率を見ると、介入なしグループの被験者 1、被験者 2 と比較して小さい値となっている。操作完了時間の相対比率では旋回操作の速度が遅くなるにも関わらず 89.02% をとっており、

表 8: 各被験者の操作完了時間のステージごとの平均値

	介入あり		介入なし	
	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4
ステージ A	18.19	12.07	24.18	21.36
ステージ B	12.61	19.72	25.82	25.32
ステージ C	26.33	24.81	41.88	35.77
ステージ D	18.23	20.01	22.98	26.38

表 9: 各被験者の旋回操作入力回数のステージごとの平均値

	介入あり		介入なし	
	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4
ステージ A	1.60	1.60	6.67	3.33
ステージ B	1.13	1.86	3.38	2.88
ステージ C	3.00	1.67	5.00	3.67
ステージ D	1.25	1.88	2.29	2.25

旋回操作の入力回数についても 100% 以下の 67.72% をとっており、ステージ C での介入による操作効率の上昇が表れていると言える。

被験者 4 について、図 8 での操作完了時間の相対比率を見ると、操作効率と同じである 135% 以下の値をとっているため全体的な操作効率は上昇していると言えるが、被験者 2 とおおよそ同じ値となっていた。しかし、図 9 での旋回操作の入力回数の相対比率を見ると、100% 以下の 78.26% の値をとっており、被験者 2 と比べても小さい値となっている。操作完了時間において被験者 2 と差がなかった理由としては、今回の介入手法では旋回操作のみに介入を行っており、被験者 3 は旋回操作の操作効率が上昇し、旋回操作以外の操作効率が上昇しなかった一方で、被験者 2 は介入を受けていないため、旋回操作の操作効率は上昇しなかったが、ステージを複数回実行することでステージ B よりも旋回操作以外の操作効率が上昇したためであると考えられる。

被験者 3 と被験者 4 との間で図 8, 9 の相対比率において差が存在している。これは介入を受けることによる操作効率の上昇、すなわち介入の学習効果が個人によって異なることを示していると言える。

介入なしグループと介入ありグループの全体の傾向で比較すると、操作完了に要した時間と旋回操作の入力回数の両方にて、ステージ B をもとにしたステージ D の相対比率の値が介入ありグループが介入なしグループと比較して小さい傾向であることが分かる。

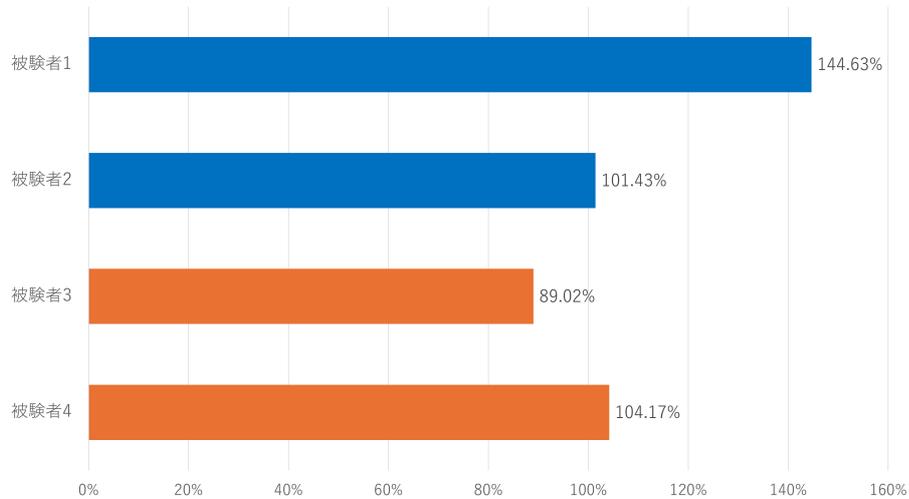


図 8: 各被験者のステージ B をもとにしたステージ D の操作完了時間の相対比率

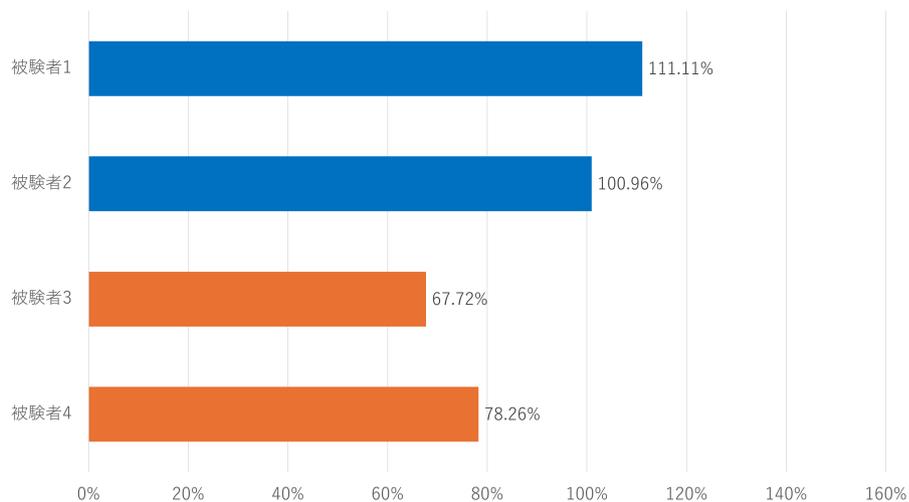


図 9: 各被験者のステージ B をもとにしたステージ D の巡回操作入力回数の相対比率

以上より、確証バイアスの影響により操作効率が落ちているステージ B 以降のステージにおいて、操作能力が高かった被験者に対して、操作能力が低かった被験者が推定した認知バイアスに基づいた介入をステージ C で受けることによって、ステージ D にて操作効率がステージ B の実行時よりも良くなっており、介入を受けていない被験者と比較して操作効率の上昇率が高くなっていることが結果から分かる。そのため得られた結果から、操作能力が低い操作者に対して、操作者の認知バイアスの軽減に対する操作者の認知バイアスを推定し支援する介入システムの有効性はあると考えられる。

実験結果から分かったことを以下にまとめる。操作する重機の種類が異なった最初の実行

にて周りの数値が上がっているため、操作の経験をした重機の大きさが変化し、操作感が異なる際に確認バイアスが発生していると言える。また、図 6, 7 にて各被験者のステージ B の結果を見ると、被験者 2 や被験者 4 は 1 回目と比較して 2 回目以降は大幅に小さい値となっており、確認バイアスの影響の低減が速いと言えるが、被験者 3 は減少度が低い傾向にあり、確認バイアスの低減が遅いと言える。そのため、確認バイアスの影響度は個人差があることが分かる。そして、操作能力が低い操作者に対して、実装した介入システムによる介入を提供することによって、その後の操作効率において介入がされていない操作能力が高い操作者よりも上昇率が高くなっており、個人の確認バイアスの影響度に応じた操作介入の効果があることが言える。最後に、介入を受けた被験者間で比較した場合、ステージ C による介入の前後での操作効率の上昇率が異なっており、介入による学習効果にも個人差があると言える。

## 5 おわりに

本報告では、操作者の確認バイアスが発生する状況下で、操作者の操作情報から操作者の確認バイアスの影響度を推定し、確認バイアスの影響度を理解できるように介入方法を変化させることによって確認バイアスの影響を軽減させることを目的としていた。そのため、重機の遠隔操作を訓練する VR トレーニングシステムを実装したうえで、操作する重機が変化することによって発生する確認バイアスを扱い、操作者の確認バイアスを推定し、操作者が自身の確認バイアスを理解できるように介入を行う介入システムを有した VR トレーニングシステムの有効性の評価を行った。その結果、操作能力が低い操作者が介入システムによる介入を受ける前後にて、操作能力が高い操作者と比較して操作効率の上昇率が高くなっていることを示した。

今後の課題として、介入を受ける操作者のグループと介入を受けない操作者のグループの能力の差異をなくした状況下で有効性を評価するために、被験者を増やしたうえで実験を行う必要がある。また本報告では介入を受けるグループと介入を受けないグループで比較を行ったが、操作者の認知バイアスを推定し、その推定に基づいて介入方法を変化させる介入システムの有効度をより測るために、操作者に関係なく一律の介入を行う手法との比較を行う必要がある。本報告では確認バイアスの軽減のための介入について取り上げたが、選択的アクセシビリティやアンカリングバイアスが発生するシナリオも考えられ、操作者のそれらの認知バイアスの影響を推定し、低減する介入システムを実装し、確認バイアス以外の認知バイアスに対して、操作者の認知バイアスを推定し、その推定に基づいた介入を行う VR トレーニングシステムの有効性の評価を行うことも今後の課題として挙げられる。また、本報告では仮想空間でのトレーニングについて想定しているが、実機に対して VR を介して遠隔操作を行う状況への対応も必要である。そのため、実機の遠隔操作を行う場合に生じる操作遅延や実機の周辺環境に対する認知バイアスが発生する状況下で、その認知バイアスに基づく操作への介入の評価も今後の課題である。

## 謝辞

本報告の遂行にあたり、大阪大学大学院情報科学研究科村田正幸教授にはご多忙の中、多大なるご指導とご助言を賜りました。ここに深謝の意を表します。また、大阪大学大学院情報科学研究科荒川伸一准教授には、研究方針から本報告の作成に至るまで、常に適切にご指導をいただきましたこと厚く御礼申し上げます。さらに、本報告の遂行にあたり、実験に快くご協力くださった村田研究室の皆様にご心より感謝申し上げます。最後に、村田研究室の皆様には本報告の遂行および本報告の作成において多大なご助言とご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Fortune Business Insights, “Virtual Reality (VR) in Healthcare Market Size, Share & Industry Analysis, By Component (Hardware, Software, and Content), By Application (Pain Management, Education & Training, Surgery, Patient Care Management, Rehabilitation & Therapy Procedures, and Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD)), and Regional Forecast, 2024-2032.” <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/virtual-reality-vr-in-healthcare-market-101679>. (Accessed: 2024-12-13).
- [2] G. Blumstein, B. Zukotynski, N. Cevallos, C. Ishmael, S. Zoller, Z. Burke, S. Clarkson, H. Park, N. Bernthal, and N. F. SooHoo, “Randomized Trial of a Virtual Reality Tool to Teach Surgical Technique for Tibial Shaft Fracture Intramedullary Nailing,” *Journal of Surgical Education*, vol. 77, no. 4, pp. 969–977, 2020.
- [3] K. Tsukada, Y. Yasui, S. Miyata, J. Fuyumuro, T. Kikuchi, T. Mizuno, S. Nakayama, H. Kawano, and W. Miyamoto, “Effectiveness of Virtual Reality Training in Teaching Personal Protective Equipment Skills: A Randomized Clinical Trial,” *JAMA Network Open*, vol. 7, pp. e2355358–e2355358, Feb. 2024.
- [4] A. P. Rafael Sacks and R. Barak, “Construction safety training using immersive virtual reality,” *Construction Management and Economics*, vol. 31, no. 9, pp. 1005–1017, 2013.
- [5] 西松建設株式会社, “建設機械の遠隔運転練習システムを仮想現実 (VR) 空間に構築.” <https://www.nishimatsu.co.jp/news/2023/vr.html>, 2023. (Accessed: 2024-12-18).
- [6] 弓指一心, 佐野睦夫, 大井翔, “VR 技術を用いた災害時における認知バイアスを考慮した意思決定支援システムの開発,” *インタラクシオン 2024 論文集*, pp. 1146–1151, 2024.
- [7] A. Murata, T. Nakamura, and W. Karwowski, “Influence of Cognitive Biases in Distorting Decision Making and Leading to Critical Unfavorable Incidents,” *Safety*, vol. 1, pp. 44–58, Nov. 2015.

- [8] C. Rastogi, Y. Zhang, D. Wei, K. R. Varshney, A. Dhurandhar, and R. Tomsett, “Deciding Fast and Slow: The Role of Cognitive Biases in AI-assisted Decision-making,” *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol. 6, Apr. 2022.
- [9] K. Matsumori, Y. Koike, and K. Matsumoto, “A Biased Bayesian Inference for Decision-Making and Cognitive Control,” *Frontiers in Neuroscience*, vol. 12, 2018.
- [10] N. Chater, J. B. Tenenbaum, and A. Yuille, “Probabilistic models of cognition: Conceptual foundations,” *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 10, no. 7, pp. 287–291, 2006. Special issue: Probabilistic models of cognition.
- [11] 重機で Go, “VR 版 - 重機で Go 公式サイト.” <https://www.juki-de-go.com/vr/>. (Accessed: 2024-12-13).
- [12] Unity, “Unity Real-Time Development Platform - 3D, 2D, VR & AR Engine.” <https://unity.com/>, 2024. (Accessed: 2025-02-06).
- [13] 住友建機株式会社, “油圧ショベル.” <https://www.sumitomokenki.co.jp/excavator/>. (Accessed: 2024-12-13).