

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K20093

研究課題名（和文）身体性が拡張する建機遠隔操作システムの研究開発

研究課題名（英文）Research and Development of a Remote-Controlled Construction Machinery System with Extended Embodiment

研究代表者

佐藤 勇起（Sato, Yuki）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・助教

研究者番号：10635395

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：災害現場での二次災害防止などを目的に、建設機械の遠隔操作が研究されているが、従来の固定座席システムでは映像酔いや操作性の低下が問題となる。本研究では、回転座席を導入した遠隔操作システムを開発し、その影響を検証した。システムは、回転座席、カメラ付き建機（ラジコン）、ヘッドマウントディスプレイ、コントローラーなどで構成され、操作時に座席と建機が同期して回転した。実験の結果、座席回転なしで映像酔いが重症化した人は、座席回転ありで軽減した。また、操作性（運動主体感）の値は、座席回転ありの場合にのみ有意に高くなった。これらの結果から、座席回転が映像酔い軽減と操作性向上に有効である可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、建設機械の遠隔操作システムにおける映像酔いと操作性の問題を解決する新たな方法を提供した点で重要である。従来の固定座席システムに対し、回転座席を導入することで、視覚と前庭感覚の不一致を解消し、運動主体感を生じさせることができることを実証した。これにより、遠隔操作技術の改良に寄与し、将来的な研究や技術開発の基盤を提供する。また、本研究は、災害現場での作業員の安全性向上と効率的な作業の実現に寄与する。回転座席を導入することで、映像酔いの軽減と操作性の向上が期待され、作業員の負担が軽減される。また、この技術は、災害現場以外の遠隔操作が必要な分野でも応用可能であり、広範な社会的利益をもたらす。

研究成果の概要（英文）：To prevent secondary disasters at disaster sites, research on the remote control of construction machinery is being conducted. However, traditional fixed-seat systems have problems with motion sickness and reduced operability. This study developed a remote control system with a rotating seat and evaluated its impact. The system consists of a rotating seat, a camera-equipped construction machine (radio-controlled), a head-mounted display, and a controller. During operation, the seat and the construction machine rotated synchronously. The experiment results showed that participants who experienced severe motion sickness without seat rotation had reduced symptoms with seat rotation. Additionally, operability, as assessed by the sense of agency, significantly increased only with seat rotation. These results suggest that seat rotation may be effective in reducing motion sickness and improving operability.

研究分野：身体性認知科学

キーワード：建設機械 遠隔操作 回転座席 映像酔い 操作性 災害現場 ヘッドマウントディスプレイ スマートグラス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、建設機械業界は労働力不足と災害現場での二次災害防止という重要な課題に直面している。これらの問題に対処するため、建設機械の遠隔操作技術が注目されている。遠隔操作技術は、オペレーターが直接危険な環境に立ち入ることなく機械を操作できるため、作業の安全性を大幅に向上させる可能性がある。しかし、従来の建設機械の遠隔操作システムにはいくつかの欠点が存在する。

特に、操縦座席が固定されているため、操作時に視覚と前庭感覚から得られる情報の間に矛盾が生じ、シミュレーター酔いや操作性の低下を引き起こすことが問題となっている。視覚情報とは、オペレーターがディスプレイを通じて得る映像であり、前庭感覚情報とは、身体（頭部）の動きやバランスを感じる感覚である。この矛盾は、オペレーターが視覚的には動きを感じながらも、身体的には動きを感じないために発生する。この状態が続くと、オペレーターは強い不快感を覚え、シミュレーター酔いや操作性の低下を引き起こす。

シミュレーター酔いは、車酔いや船酔いと同様の症状を引き起こし、頭痛、吐き気、めまいなどの不快感を伴う。これにより、オペレーターの作業効率が低下し、長時間の操作が困難になる。さらに、操作性の低下は、建設機械の正確な制御を妨げ、作業の精度や安全性に影響を与える可能性がある。

建機遠隔操作システムに関する先行研究では、操縦席が固定されている場合、遠隔操作時のシミュレーター酔いが搭乗操作時よりも高く、一般的なオペレーターが許容できるレベルではないため、改善が必要であることが示されている（松山，2019）。また、回転加速度が大きい場合、操縦席の固定により前庭・体性感覚への回転情報入力がないと反応が遅れることが示されている（奥田，2019）。

さらに、ラバーハンド錯覚などの身体性に関する研究により、我々の身体感覚は人工物にまで拡張することが明らかになっている。従来の遠隔操作システムでは、その場に存在しているような臨場感や没入感が得られず、作業効率が低下すると言われている。この原因は、身体性拡張の観点からは、遠隔操作の送受信信号の遅延や前庭感覚、体性感覚情報の不足により、運動主体感と身体所有感が喪失したためであると考えられる。運動主体感とは、自分が手を動かしているといった「行為を引き起しているのは自分だ」という感覚のことであり、身体所有感とは、痛いのは自分の歯だといった「経験を受けているのが自分だ」という感覚のことである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、建設機械の遠隔操作システムにおいて操縦座席を建機と同期して回転させることにより、視覚情報と前庭感覚情報の不一致を解消し、シミュレーター酔いの軽減と操作性（運動主体感）の向上を図ることで、オペレーターが快適に操作できるシステムを開発することである。

具体的な目的：

- 操縦席が回転する建機遠隔操作システムの開発：操縦席が建機と同期して回転する建機遠隔操作システムを開発する。また、建機に取り付けたリアルタイムのカメラ映像を、操作者が装着したヘッドマウントディスプレイ（HMD）に提示する。
- 視覚と前庭感覚の一致：操縦座席を建機と同期して回転させることで、操作者が HMD を通じて得る視覚情報と、頭部の動きから感じる前庭感覚情報を一致させ、操作時の違和感を減少させる。
- シミュレーター酔いの軽減：視覚情報と前庭感覚の一致を図ることで、シミュレーター酔いの発症を防ぎ、長時間の操作を可能にし、作業効率を向上させる。
- 操作性の向上：運動主体感（自分の思い通り操作している感覚）を高め、建設機械の精密な操作を可能にし、作業の精度と安全性を向上させる。
- 快適な操作環境の提供：HMDなどを改良することで、操作者の疲労感を軽減し、作業の持続可能性を高める。

### 3. 研究の方法

本研究では、操縦席を建機と同期して回転させることがシミュレーター酔いと操作性に与える影響を検証するため、以下の方法を採用した。

- 参加者
  - 12名（平均年齢 21.0 歳，SD=0.5 歳）。
- 建機遠隔操作システム
  - 回転座席：操縦者が座る座席が回転可能で、コントローラの操作に応じて座席が建機と同期して動くように設計。
  - ラジコンショベルカー：遠隔操作する建機として使用。
  - カメラ：ショベルカーに取り付け、リアルタイムの映像を操縦者に提供。
  - ヘッドマウントディスプレイ（HMD）：操縦者が装着し、ショベルカーに取り付け

たカメラ映像を表示。

- 位置決め課題
  - 参加者は、 $\pm 45^\circ$  の位置に配置された目標物にショベルカーのバケットを合わせる位置決め課題を 10 分間実施した。目標角度と到達角度の誤差が $\pm 5^\circ$  以内を成功とした。
  - 参加者には、できるだけ多く正確に往復運動するように指示した。
- 実験要因
  - 実験要因は、建機を操作する際の座席回転であり、座席がショベルカーと同期して回転する条件（回転あり）と座席が固定された条件（回転なし）の 2 条件であった。
- 評価指標
  - シミュレーター酔いの重症度を、Simulation Sickness Questionnaire (SSQ) のスコアで評価した。
  - 操作性を、運動主体感（自分の思い通り操作している感覚）のアンケートのスコアで評価した。
- 統計解析
  - 座席回転の有無がシミュレーター酔いと操作性に与える影響を比較するために、ノンパラメトリックのウィルコクソンの符号順位検定を用いた。

#### 4. 研究成果

- シミュレーター酔い (SSQ スコア) の軽減
  - 座席回転なし条件でシミュレーター酔いが重症化した (SSQ スコアが 30 以上の) 参加者は、シミュレーター酔いが重症化しなかった (SSQ スコアが 30 以下の) 参加者と比較して、座席回転あり条件で SSQ スコアが低下する傾向が見られた ( $p = 0.0584$ , ウィルコクソンの順位和検定)。
  - 具体的には、座席回転なし条件で重度のシミュレーター酔いを経験した (SSQ スコアが 30 以上の) 参加者の 80%以上 (5/6 人) が座席回転あり条件で軽減化した。一方、座席回転なし条件で重度の映像酔いを経験しなかった (SSQ スコアが 30 以下の) 参加者の 20%以下 (1/6 人) しか座席回転あり条件で軽減化しなかった。
  - これらの結果は、座席回転なしでシミュレーター酔いが重症化するかどうかによって、座席回転によるシミュレーター酔いの軽減効果が異なる可能性を示唆している。
  - つまり、座席回転なしで映像酔いが重症化した人の方が、座席回転による映像酔いの軽減が期待できる一方、座席回転なしで映像酔いが重症化しない人は、座席回転によりかえって動揺病が重症化する可能性があるが、そもそも座席回転なしでシミュレーター酔いが重症化しないので、座席回転を使用する必要はないと考えられる。
- 操作性 (運動主体感スコア) の向上
  - $\pm 45^\circ$  の位置に配置された目標物にショベルカーのバケットを合わせる位置決め課題における運動主体感の評価を行った結果、座席回転あり条件での運動主体感のスコアが 0 より有意に高くなった ( $p = 0.0068$ , ウィルコクソンの符号順位検定)。一方、座席回転なし条件では 0 より有意に高くならなかった。
  - これにより、座席回転あり条件では運動主体感が生じることが示された。
- 快適な操作環境の提供
  - 軽量なスマートグラスや高解像度のカメラ映像を提示可能な HMD などを用いてシステムを改良することで、操作者の疲労感軽減や、作業の持続可能性を高めた。
- 示唆と意義
  - 本研究の結果から、操縦座席の回転がシミュレーター酔いの軽減と運動主体感の向上に寄与する可能性が示された。
  - 特に、座席回転がない場合にシミュレーター酔いの重症度が高い操作者にとって、座席回転が有効であることが明らかになった。また、運動主体感の向上により、操作者が建機の操作をより直感的に行えるようになる可能性が示唆された。
  - 学術的意義：本研究は、建設機械の遠隔操作システムにおけるシミュレーター酔いと操作性の問題を解決する新たな方法を提供した点で重要である。従来の固定座席システムに対し、回転座席を導入することで、視覚と前庭感覚の不一致を解消し、運動主体感を向上させることができる可能性を示した。これにより、遠隔操作技術の改良に寄与し、将来的な研究や技術開発の基盤を提供する。
  - 社会的意義：本研究の成果は、建設機械の遠隔操作システムの改良に貢献し、労働力不足や災害現場での安全性向上に寄与する可能性がある。特に、危険な環境での作業において、オペレーターの負担を軽減し、作業効率を向上させることが期待される。また、この技術は、自動車や医療用ロボット、水中探査ロボットなど、他の遠隔操作分野にも応用可能であり、広範な社会的利益をもたらすことが期待される。

〈引用文献〉

- 松山秋絵, 蓑島光宣, 渡邊洋, 氏家弘裕, 遠藤博史, “遠隔操作油圧ショベルの映像酔いの研究”, 第19回建設ロボットシンポジウム, 2019
- 奥田浩詞, 近藤大祐, 大畠陽二郎, “建設機械旋回操作時の前庭感覚の知覚に関する研究”, 第19回建設ロボットシンポジウム, 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuki Sato, Hiroaki Matsumoto, Takahiro Wada
2. 発表標題 Effect of seat rotation of a remote-control system for construction machinery on simulator sickness and sense of agency
3. 学会等名 The 44rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本紘明, 佐藤勇起, 和田隆広
2. 発表標題 建機遠隔操作システムにおける座席回転が動揺病と操作性に与える影響
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤勇起
2. 発表標題 身体性拡張と建機遠隔操作システム
3. 学会等名 第14回 テレイグジスタンス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤勇起, 和田隆広, 滝下竜夫, 高橋究, 田中友幸, 樋口隆司
2. 発表標題 油圧ショベル操作の主観的ストレスの心拍数による評価
3. 学会等名 第19回建設ロボットシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------