



高臨場かつ直観的な遠隔作業を可能とするショベルカーの トレイグジスタンスシステム

早川達也¹⁾, 齊藤充行¹⁾, 小林康秀¹⁾, 脇田 航¹⁾

1) 広島市立大学 (〒731-3194 広島県広島市安佐南区大塚三丁目 4 番 1 号, hayakawa@ics.info.hiroshima-cu.ac.jp)

概要 : 近年, 災害現場の 2 次災害防止のため, ショベルカーの遠隔操作に関する研究が行われている. しかしながら, ショベルカーの遠隔操作をすることができるオペレータが減少している. そこで, 本研究では簡易モーションベースを用いて慣性力を呈示することや直観的な操作を可能とすることで, 初心者者の技能訓練のための高臨場かつ直観的な遠隔作業を可能なトレイグジスタンスシステムを提案する.

キーワード : 簡易モーションベース, テレイグジスタンス, HMD, 前庭感覚

1. はじめに

近年, 日本では地震や津波, 火山噴火による火砕流, 台風や集中豪雨による土石流や崖崩れなどの自然災害が増加している. 災害直後は 2 次災害の恐れがあるため, 復旧・復興作業には様々な危険が伴う. 作業員の安全を確保と作業の遂行の両立を目指して, ショベルカーなどの建設機械を遠隔地から操作する無人化施工の技術開発が進められている. [1-9]

無人化施工技術は年々機能や操作性も進歩し, 東日本大震災や熊本地震などの数多くの現場で利用されてきているが, 無線遠隔操作に基づく無人化施工では, ショベルカーに搭乗し操作した場合に比べ, 現場の情報量(臨場感)の不足より作業効率は大きく低下すると言われており[7,8], 遠隔操縦式建設機械を円滑に操縦できるオペレータが少ないことが無人化施工を導入するうえでの課題となっている. このような作業効率の低下は様々な要因から複合的に発生すると考えられる. 個別に列挙するならば, 搭乗操作と遠隔操作では, 操縦桿の配置や操作量などのヒューマンインタフェースが異なるため新たな学習を要すること, 操作信号送信時と映像信号受信時の伝送遅延が操作性を悪化させること, 映像や音響, 振動などのフィードバック情報が搭乗時とは異なることなどが考えられる.

臨場感を増すために, 視覚情報の呈示[1,2]や力覚情報の呈示[3], 体性感覚の呈示する手法[4-6]が提案されている. また, 作業効率を上げるため, 遠隔操作が得意なオペレー

タの選定する手法[7]が提案されている. しかしながら, 従来の手法では初心者者のオペレータは無人化施工の技術を簡単に会得することができない. 初心者が訓練する際には直観的に操作可能である方がよい.

そこで本研究では, 遠隔地のショベルカーを高臨場かつ直観的に操作可能なトレイグジスタンスシステムを実現することによってこの問題の解決を試みる. 具体的には, ラジコンのショベルカーにステレオカメラと加速度センサを取り付けリアルタイムに取得した映像と慣性力・振動・傾斜などの情報を操作者に呈示する. また, ハプティックデバイスでショベルカーのアームを制御可能とする. これにより, ショベルカーを高臨場かつ直観的に操作することが可能となり, ショベルカーの無人化施工の人材育成への応用が期待できる.

2. 関連研究

ショベルカーの遠隔操作の概念は古くから提案されており, これまで様々な研究開発が進められている. 源らは自分の代わりとなるロボットを建設機械に改造を加えることなく建設機械に搭載可能とすることで遠隔操縦を実現した[1]. また, 佐藤らは複数のカメラを用いて建設機械からの映像と第三者視点の映像を操作者に呈示することで施工作業のしやすい映像の呈示を実現した[2]. しかしながら, これらは操縦者には視覚映像遠隔操縦を行っており, その場に自分が存在しているような高い臨場感や没入感は得られない.

また, 黄らは対象物からの反力を, ジョイスティックへの力覚提示として操作者へフィードバック可能とした[3]. 一方, 古屋らは無人化施工用に建機の姿勢に応じて傾く操

Tatsuya HAYAKAWA, Mitsuyuki SAITO, Yasuhide KOBAYASHI, and Wataru WAKITA

縦席や 3D 映像による体感型操作環境を構築している[4]. これらの手法は災害後の計画的な復旧には向いているが、操縦桿の配置や操作量などのヒューマンインタフェースが異なるため新たな学習を要する.

また、藤野らは建設機械の遠隔操作時の視線解析を行い、無人化施工に最適なオペレータの選抜手法を明らかにした. しかしながら、初心者のオペレータは無人化施工の技術を簡単に会得することができない.

この点、本研究では初心者のオペレータが無人化施工の技術を会得するために、遠隔地のショベルカーを高臨場かつ直観的に操作可能なレイグジュランスシステムを実現することを目指す.

3. 提案システム

図 1(a)に提案システムの概要を示す. 操作者がステレオカメラと加速度センサを取り付けたラジコンをハプティックデバイスとペダルなどのコントローラで制御する.

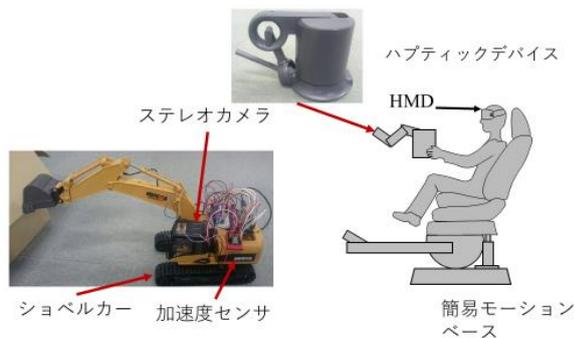


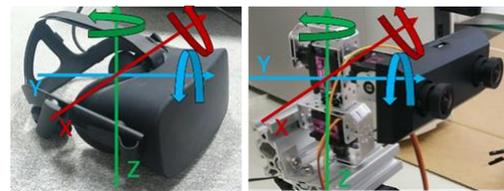
図 1: 提案システムの概要

ステレオカメラで取得した立体視映像をリアルタイムにHMDに呈示し、サーボモータ3つを用いて首ふり制御することで操作者は首ふり動作に応じた立体視映像を見渡すことができる. また、操作者の操作量であるハプティックデバイスの値を用いてショベルカーのアームの制御をすることで力覚の呈示をする. 同時にペダルの値に応じてショベルカーを前進後退する. そして、ショベルカーに取り付けられた加速度センサから傾斜角を取得し、簡易モーションベースを制御することで慣性力を呈示する.

3.1 ステレオカメラを用いた立体視映像呈示

PCとステレオカメラを無線接続する. 次にステレオカメラから得られる立体視映像をHMDに呈示する. さらに、HMDのヘッドトラッキング機能を用いて頭の向きを取得し、サーボモータ3つを首ふり制御することで操作者の頭の向きとステレオカメラの向きを同期させる. これにより、操作者はHMDで首ふり動作に応じた立体視映像を見渡すことが可能となる.

本研究で用いるHMDと首ふりロボットの座標軸は図2の通りである.



(a)ローカル座標 (b)マーカ取り付け位置

図 2: HMDと首ふりロボットの座標軸

得られた角度 φ_i [deg]をシリアル通信により Arduino に送り、サーボモータ3つを首ふり制御する. これにより、操作者とステレオカメラの向きを同期させ、操作者の首ふり動作に応じた立体視映像をインタラクティブに見渡すことが可能になる(図3).

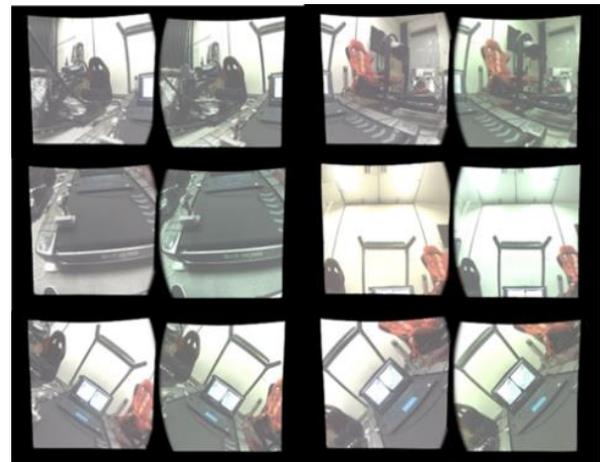


図 3: 全周立体視映像呈示

3.2 モーションベースによる慣性力および傾斜角呈示

本研究ではショベルカーに取り付けた加速度センサからショベルカーの慣性力および傾斜角を取得し、簡易モーションベース[10]を制御することで操作者に傾きを呈示する.

本研究で用いる簡易モーションベースを図4に示す.



図 4: 簡易モーションベース

本研究では図4に取り付けられているハンドルは用いず、ペダルのみ用いる。

加速度センサから得られた加速度 $A_i(Ax_i, Ay_i, Az_i)$ および角度 $k_i(kx_i, ky_i, kz_i)$ をシリアル通信によりArduinoに送り、簡易モーションベースを傾斜させることで慣性力および傾きを操作者に呈示する。

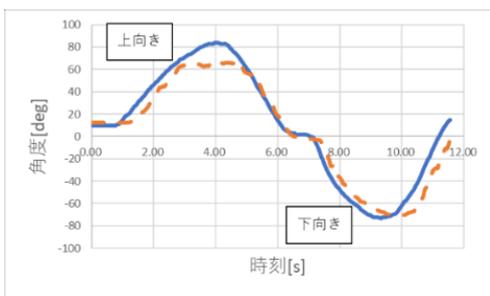
4. 実験結果

4.1 実験

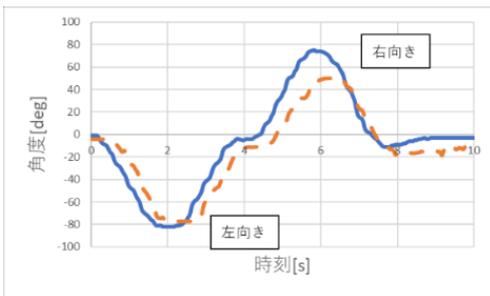
本研究では遠隔地のショベルカーを高臨場かつ直観的に操作可能なテレグジスタンスシステムの構築に向けて、本来は無線接続したステレオカメラを首ふり制御することで映像呈示するが今後の課題とし、現状、有線接続した首ふりロボットの追従性について定量評価を行い、次に、慣性力呈示の際の時間遅れについて定量評価を行う。

4.2 3軸首ふり制御による立体視映像の追従性

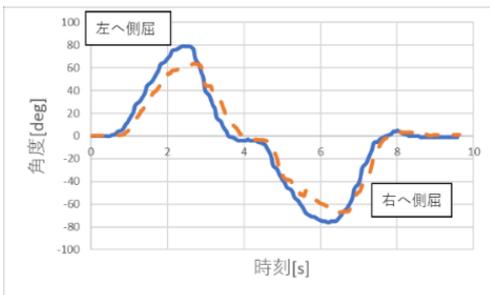
操作者の向いている方向であるHMDの角度とサーボモータを用いた首ふり制御時の角度を比較することにより、追従性の検証結果を図5に示す。なお、首ふりロボットの角度はステレオカメラに加速度センサを取り付け取得した。ここで、実線はHMDの角度、点線は首ふりロボットの角度を示す。



(a) 上下方向時の比較結果



(b) 左右方向時の比較結果



(c) 左右側屈方向時の比較結果

図5：HMDと首ふりロボットの角度比較

図5より、それぞれの首ふりロボットの時間遅れを以下の式を用いて相関関数 $R_x(\tau), R_y(\tau), R_z(\tau)$ を求めた。

$$R_x(\tau) = \sum_i(x(t_i), \hat{x}(t_i-\tau)) \dots\dots\dots (1)$$

$$R_y(\tau) = \sum_i(y(t_i), \hat{y}(t_i-\tau)) \dots\dots\dots (2)$$

$$R_z(\tau) = \sum_i(z(t_i), \hat{z}(t_i-\tau)) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、HMDの角度を $x(t_i), y(t_i), z(t_i)$ 、ロボットの角度を $\hat{x}(t_i-\tau), \hat{y}(t_i-\tau), \hat{z}(t_i-\tau)$ とする。

結果、首ふりロボットの時間遅れは約0.203秒であった。また、HMDと首ふりロボットの最大角度誤差は約 10° であった。

4.3 加速度センサを用いた慣性力呈示の時間遅れ

本研究で用いる簡易モーションベースの制御パラメータはアクチュエータの移動速度、加速度を設定できる。アクチュエータの性能限界を超えた数値を与えるとモーションベース全体が振動し、危険を伴うため、本研究ではモーションベースのパラメータを低めに移動速度、加速度をそれぞれ(17500[mm/s], 30[mm/s²])と設定した。ここで、用いる移動体は加速度変化を大きいランドクルーザーに加速度センサを取り付け検証する。ラジコンが前進した際に簡易モーションベースを制御した時の時間遅れの検証結果を図6に示す。なお、簡易モーションベースが傾斜している角度はモーションキャプチャを用いて取得した。ここで、図6の実線は算出した慣性力に応じた目標傾斜角、点線は実際の簡易モーションベースの傾斜角を表す。

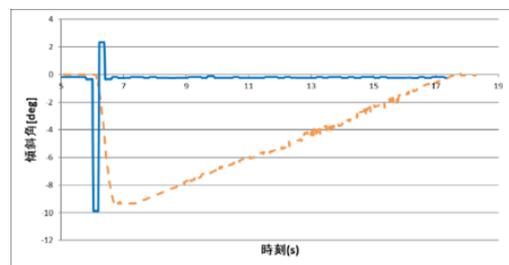


図6：傾斜角算出結果

本研究では、ラジコンに取り付けた加速度センサで得られる加速度から慣性力を推定し、算出したモーションベースの目標傾斜角がある一定の閾値を超えないとモーションベースが動かない仕様となっている。このため、閾値を超えてからモーションベースが動き出すまでに0.09秒程度の時間遅れが生じていることがわかる。また、最大目標傾斜角が求まってモーションベースの傾斜角が最大になるまでの時間遅れは0.707秒であった。そこで、アクチュエータのパラメータを大きくすることで、時間遅れを減少させる最適なパラメータの設定は今後の課題とする。また、同時に加速度センサから得られる傾斜角の呈示することによる路面の凸凹やエンジンの振動の呈示も今後の課題とする。

5. まとめ

本研究では、ショベルカーの無人化施工の人材育成への

応用を目的とし、遠隔地のショベルカーを高臨場かつ直観的に操作可能なテレグジスタンスシステムの構築を試みた。現在、図1の提案システムにおいてステレオカメラから得られた立体視映像をHMDで見渡すことを可能としている。また、加速度センサから得られた加速度を用いてモーションベースを傾斜させることで、慣性力の呈示することを実現している。今後の課題として、ショベルカーのアームをハプティックデバイスで操作可能にすることによる直観的なアーム操作および力覚呈示が挙げられる。また、加速度センサから得られる加速度を用いてモーションベースを傾斜させることで、遠心力の呈示をすることが挙げられる。また、加速度センサから得られる傾斜角を用いてモーションベースを傾斜させることで、振動・傾きの呈示することが挙げられる。さらに、映像の無線化や構築したシステムの評価実験を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] 源 雅彦, 松永勝也, 篠原 眞, 河崎英己, 吉永勝彦: 建設機械用遠隔操縦ロボットの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.9-14, 2002.
- [2] 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, 浅間 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, 2015.
- [3] 黄 玲寿, 加藤英寿, 川村拓也, 山田宏尚: 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, 日本フルードパワーシステム学会論文集, pp.53-59, 2011.
- [4] 古屋 弘, 栗生暢雄, 清水千春: 3D 画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施行システム」, 大林組技術研究所報, No.76,2012.
- [5] 山田宏尚: 建設機械の遠隔操作のためのヒューマンインタフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6, pp.400-403, 2015.
- [6] H. Yamada, T. Kawamura and K. Ootsubo: "Development of a Teleoperation System for a Construction Robot" Journal of Robotics and Mechatronics, vol.26, no.1, pp.110-111, 2014.
- [7] 藤野健一, 橋本 毅, 油田信一, 建山和由: 無人化施工に最適なオペレータの選手法法に関する研究, 土木学会論文集, pp.11-17, 2018.
- [8] 萬徳昌昭, 宮元 洋, 堀之内義博, 松井宗廣, 櫻井一也, 岡村祐介, 吉田 貴, 井澤昌佳, 小川正博: 砂防における無人化施工技術の発展にむけて—実態調査・アンケート結果に基づく一考察—, 第 62 回 砂防学会研究発表会概要集, pp. B142-B143, 2013.
- [9] 茂木正晴, 藤野健一, 油田信: 無人化施行におけるヒューマンインタフェースの作業効率評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 6, pp.426-429, 2015.
- [10] 脇田 航: 簡易モーションベースの提案および試作, 知覚情報研究会・複合現実型実応用および一般, PI-17-088, 2017.