

# レトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムの開発

## Development of Retrofit Type Backhoe Remote Control System

○学 西浦悠生 (九大) 中嶋一斗 (九大)  
正 倉爪 亮 (九大)

Yuki NISHIURA, Kyushu University, nishiura@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Kazuto NAKASHIMA, Kyushu University

Ryo KURAZUME, Kyushu University

This paper presents a retrofit backhoe remote control system that is inexpensive, compact, and easy to install. The system consists of a remote control system using a teleoperation system embedded by a construction machinery manufacturer and a small robot arm, and a remote sensing system using a multi-core microcomputer.

**Key Words:** Construction robot, Tele-operation, Backhoe

### 1 緒言

長年、様々な産業で、労働災害を減少させるための取り組みが活発に行われている。しかし、厚生労働省の調査によると [1], 令和 2 年度の労働災害によって発生した休業 4 日以上死傷者数は近年増加傾向にあり、令和 2 年度は平成 14 年以降で過去最多となった。

特に土木建設業では労働災害による死者が最も多く深刻な状態である。建設業労働災害防止協会の調査によると [2], 建機による事故は死者数全体の約 35 % を占め、改善が急がれる。その改善策の一つとして、現場から離れた安全な場所からの建機の遠隔操縦が挙げられる。

本研究では、建機の中でも死者数が多いバックホウに焦点を当て、遠隔操縦システムの開発を進める。遠隔操縦システムは、重機の動作を制御する装置と、重機の状態を計測する装置の二つの構成要素からなる。現状、これらは建機メーカーによる組み込み型と、建設業者らが開発したレトロフィット(後付け)型の二種類に大別される。しかし、組み込み型の多くが目視内に限定した遠隔操縦システムであり、内部の仕様も非公開のため、ユーザによる機能追加は困難である。一方、レトロフィット型も、通常は建機の内部状態が非開示であるため、油圧制御との接続が難しい。そのため、多くの先行研究では、操縦席にロボット等を後付けで搭載するシステムが提案されている。しかし、これらの機器は大型で、取り付けの手間が大きく、また一般に極めて高価である。

本研究では、これらの問題点の解決を目的に、メーカーの組み込み型の一部を利用した制御装置と、安価で高性能なマイコンからなる計測装置の二つを提案する。開発した制御装置は、メーカーの組み込み装置に小型のロボットアームを接続することで、システムの小型化および取り付けの簡易化を実現した。また、計測装置は高性能マルチコアマイコンを利用することで、従来に比べて大幅にコストを抑えた。

また、重機を用いた動作確認実験を行い、開発した制御装置の動作を確認した。また、操縦に必要なデータのインターネットを介した送受信、および開発した計測装置による重機周辺・本体情報の収集とモニタへの提示も確認した。さらに、主に通信時とロボットアームによる入力時に発生する時間遅延について実験を行った結果と評価について報告する。

### 2 提案するレトロフィット可能な遠隔操縦システム

提案するレトロフィット可能な遠隔操縦システムのシステム構成を図 1 に示す。本システムは、遠隔地の操縦者からバックホウへ指令を送信する遠隔制御システムと、重機や周辺の状態を操縦者へ提示する後付けセンシングシステムからなる。

### 3 後付け遠隔制御システム

まず、提案する後付け遠隔制御システムについて説明する。

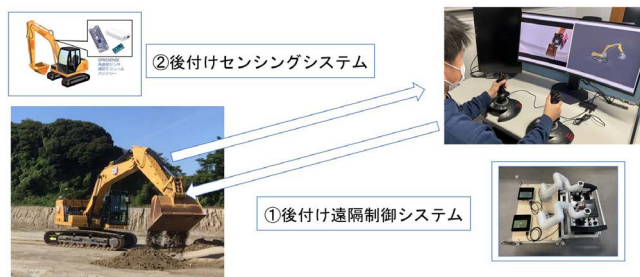


Fig.1 Overall view of the proposed system.

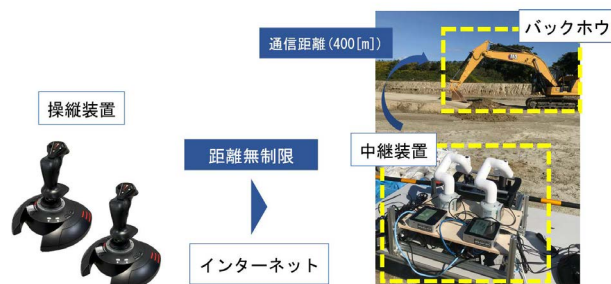


Fig.2 Overall view of the retrofit remote control system.

開発した後付け遠隔制御システムは、遠隔地にいる建機の操縦者から現場にある建機へと入力を伝達するシステム(以下「操縦装置」と、入力を現地にある建機メーカーが提供する組み込みシステムへ操縦者に代わって入力するシステム(以下「中継装置」)の二つからなる。システム全体の処理の流れを図 2 に示す。

まず、操縦装置について説明する。このシステムは、Suenagaら(文献 [3])によって提案された通信フレームワークである Rowma を用いて実装を行った。Rowma は、ロボットあるいはアプリケーション間でやり取りされる ROS メッセージに対し、インターネット上のコネクションマネージャを介すことで、遠隔地間での ROS メッセージのやり取りが可能になる。本研究ではこれを利用し、遠隔地にいる操縦者が入力した内容を、離れた現場に置かれた中継装置へインターネットを介して伝送する。

つぎに、中継装置について説明する。本研究で用いる組み込みシステムは、Cat Command (キャタピラー社) (図 3) である。このシステムは、対応したバックホウと約 400[m] の範囲で無線による通信を行うことができ、油圧等の制御を考慮する必要なく

操縦レバー等を利用した建機への入力を行うことができる。

本研究では、この組み込みシステムへ 6 軸小型汎用ロボットアーム (myCobot 280) を取り付けることで、組み立ておよび取り付けが簡易な遠隔操縦装置を開発した。開発した中継装置の外観を図 4 に示す。取り付けは図 5 に示す組み込みシステムとロボットアームを接続するためのジョイント一つであり、非常に簡易に行うことができる。



Fig.3 The embedded systems (Cat Command, Caterpillar Inc.) used in the proposed retrofit system.

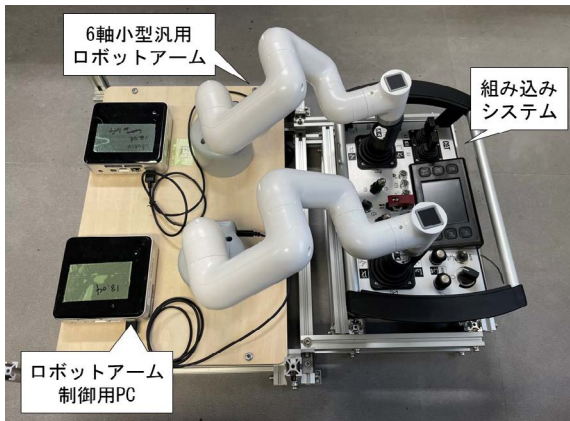


Fig.4 Appearance of the retrofit remote control system.



Fig.5 Mounting device used for retrofitting.

#### 4 後付けセンシングシステム

次に、後付けセンシングシステムについて説明する。このシステムは、従来高価であるバックホウ用のセンシングシステムを安価で高性能なマイクロコンピュータ (以下マイコン) によって実装することで、コストを大幅に抑えることを目指した。本研究で開発したセンシングシステムの処理の流れを図 6 に示す。

開発した後付けセンシングシステムでは、バックホウに取り付けた高性能マイコンからなるセンサシステムにより、重機の状態および重機周辺の状況をセンシングし、インターネットを介して操縦者側にあるモニタまで情報を送信する。

開発したセンシングシステムの構成を図 7 に示す。高性能マイコンはバックホウの状態 (本体の姿勢およびアームの関節角度) を計測し、Wi-Fi を用いて PC に送信する。PC 側ではこれらの情報を、5G 回線等を利用して、操縦者側に用意されたモニタへと送信する。インターネットを介した通信には、後付け遠隔制御システムと同様に、Rowma を用いて行った。また、現場の状況の把握は、多くの先行研究と同様に、カメラによる映像配信により行った。

次に、後付けセンシングシステムを構成するマイコンについて説明する。本研究では高性能マイコンである Spresense (Sony) を用いた。Spresense は、安価かつハイレゾ音源や QZSS (SLAS) 受信機が内蔵され、またカメラやセンサ、Wi-Fi などのアドオンボードも多く市販されている。また、最大の特徴として、6 コア搭載 CPU (Arm Cortex-M4F) によるマルチコア処理が利用できる。本研究では、6 軸 IMU アドオンボードによるバックホウの姿勢およびアーム関節角度の推定と、Wi-Fi アドオンボードによる無線送信を、それぞれ別々のコアで実行するマルチコア処理を実現した。バックホウの姿勢およびアーム角度の推定には、Madgwick フィルタ [4] を用いた。Madgwick フィルタを用いた際の角度推定誤差は約 2.38 [deg] であった。

また、後付けセンシングシステムによってセンシングした情報を操縦者へ提示する操縦者モニタも開発した。模型を用いた操縦者モニタの様子を図 8 に示す。

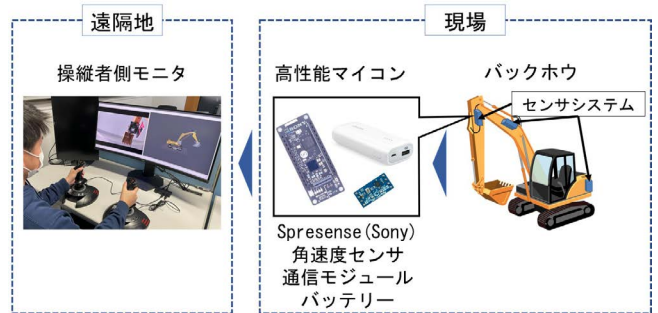


Fig.6 Process flow of the retrofit sensing system.

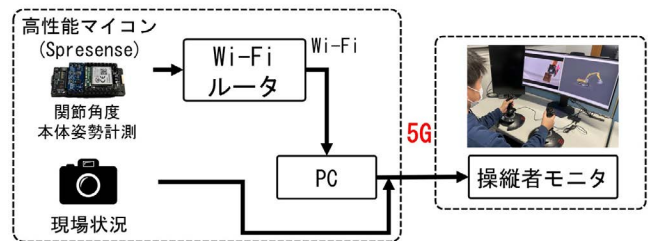


Fig.7 Configuration of the retrofit sensing system.

#### 5 後付け遠隔制御システムの動作確認実験

本研究では、実装した後付け遠隔制御システムの動作確認およびシステム単体での動作の遅延を計測するために、バックホウを用いた実験を行った。実験時の構成を図 9 に示す。本実験はインターネットを介さず、有線で操縦者からの入力を中継システムに伝達した。

実験の結果、本研究で開発した後付け遠隔制御システムは概ねエラーなく動作した (図 10)。しかし、主に以下の示す 2 つの問題点が判明した。

- ロボットアームがジョイスティックを傾ける角度 (図 11) が小さく、建機の動作が遅い
- 操縦者から入力を受けてからバックホウが実際に動き始めるまでに約 1 秒の遅延がある



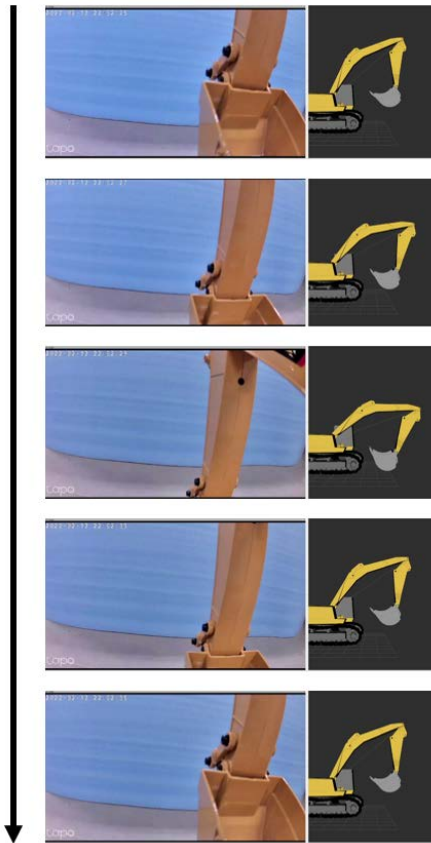


Fig.8 The video displayed in the monitor for the operator.

これらが発生した原因と対策に関して考察する。

まず、ロボットアームが組込みシステムのジョイスティックを傾ける角度が小さい要因は、ロボットアームの動作中の干渉である。そこで今後、ロボットアームと組込みシステムの位置を変更し、この問題を解決する。

次に、操縦者の入力からバックホウの動作までに約1秒の遅延がある問題については、複数の問題が考えられるため追加で調査した。その結果、ロボットが入力を受け取ってから、手先の軌道の計画、軌道上の各地点における逆運動学の解を導出する計算は約60~75 [ms]で行われていた。よって問題の原因は、干渉チェックなどアームの動作前に行う処理が原因であると判明した。この問題の対策としては、本システムを動作させる上で必要のない演算を省略する等が挙げられる。

## 6 通信遅延測定実験

本研究では、Rowmaを用いて、インターネットを介した遠隔地の操縦者と現場重機間での情報の送受信を行う。そこで本システムの通信遅延について調査した。

実験環境は図12に示すように、同一のNTPサーバで時間同期を行った二台のコンピュータとRowmaサーバで構成されるネットワーク内で、操縦者が用いるジョイスティックの入力を二台のPC間で送受信する。

実験の結果を表1および図13に示す。実験の結果より、Rowmaを用いることによって約5 [ms]程度での通信が可能であることが示された。

## 7 システム全体の評価

R.S. Allisonら[5]によると、VRシステムが有する通信遅延の許容値は、約60~200[ms]程度とされている。第5章と第6章の実験結果では、本システムの有するシステム全体の時間遅延は後付け遠隔制御システムの入力遅延によって1秒を超えており、先ほど述べた時間遅延の要件を満たしていない。よって、今後は



Fig.9 The experiments using the backhoe operated by the proposed system.

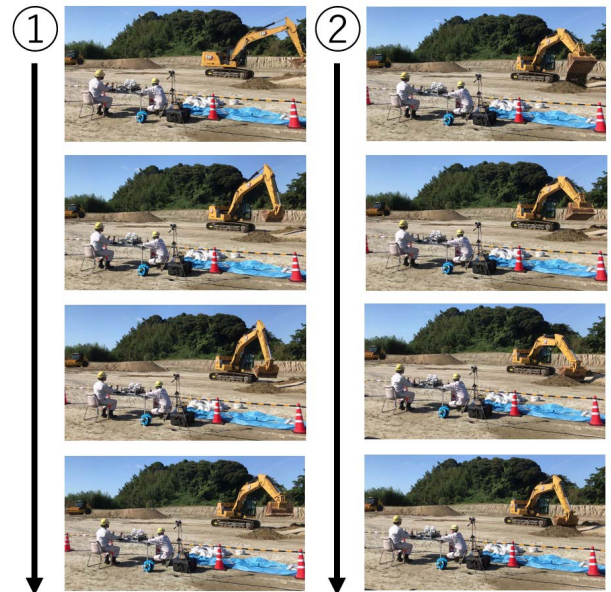


Fig.10 The results of the field experiments. The Backhoe was properly operated by the proposed system.

主にロボットアームの逆運動学の再生の仕様に起因する時間遅延を改良することが必要である。

## 8 まとめ

本稿では建機メーカーが開発した組込みシステムの一部を利用して、レトロフィット可能な遠隔操縦システムの開発を行った。本システムの特徴を以下に示す。

- 組み込みシステムを利用することで、組み立ておよび取付が非常に簡易なレトロフィット型遠隔操縦システムを開発した
- インターネットを介した通信によって、距離に制限のない遠隔操縦システムを開発した
- 高性能なマルチコアマイコンを利用した、低価格なバックホウ向けレトロフィット型センシングシステムを開発した

また、今後は本稿で提案したレトロフィット可能な遠隔操縦システムの通信遅延の主な原因となっているロボットアームの動作の改善を進める予定である。

## 9 謝辞

本研究の一部は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。また一部はソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社から機材・技術支援を受けて実施されました。

### 参考文献

- [1] 労働災害発生状況 | 厚生労働省. <https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei11/rousai-hassei/>. アクセス日 2022年2月19日.
- [2] 建設業労働災害防止対策実施事項. [https://www.kensaibou.or.jp/public\\_relations/enforcement\\_plan/](https://www.kensaibou.or.jp/public_relations/enforcement_plan/). アクセス日 2022年2月19日.
- [3] Ryota Suenaga and Kazuyuki Morioka. Rowma: A reconfigurable robot network construction system. In *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 537–542. IEEE, 2021.
- [4] Sebastian Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report x-io and University of Bristol (UK)*, Vol. 25, pp. 113–118, 2010.
- [5] R.S. Allison, L.R. Harris, M. Jenkin, U. Jasiobedzka, and J.E. Zacher. Tolerance of temporal delay in virtual environments. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, pp. 247–254, 2001.

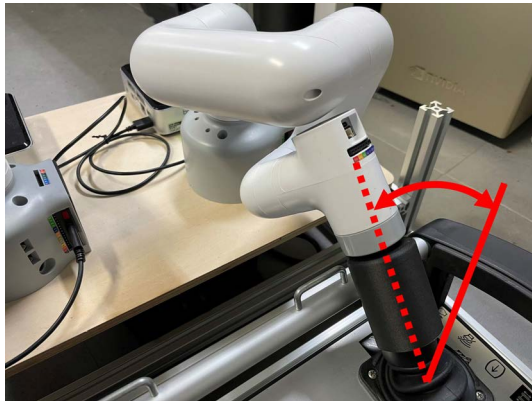


Fig.11 The tilt angle is insufficient because the arms interfere during operation.

Table 1 Results of communication latency measurement experiments when using Rowma server for communication.

	Result
Number of measurements	200
Bandwidth[kB/s]	1.65
Average of latency [ms]	4.5
Standard deviation [ms]	1.5

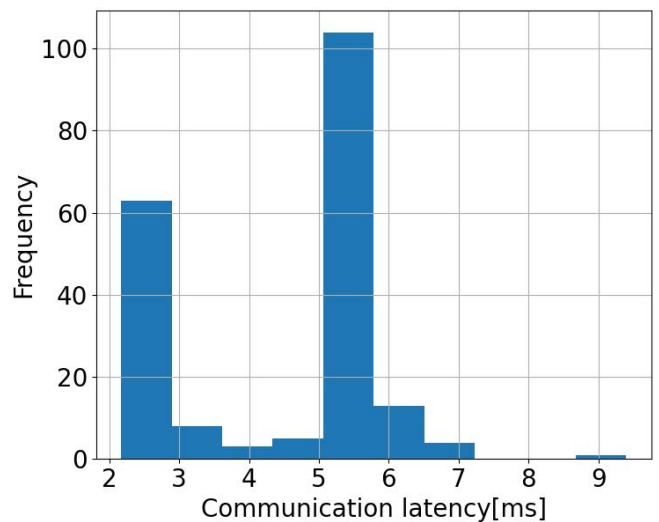


Fig.13 Results of an experiment to measure the communication latency when performing remote control.

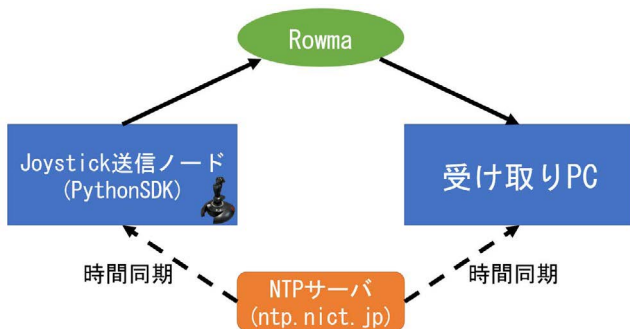


Fig.12 System configuration for an experiment to measure the latency in sending control commands.