レトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムの開発（第２報　操作性の向上と後付センシングシステムの開発）

○柴田　航志（九州大学），西浦　悠生（九州大学），倉爪　亮（九州大学）

Development of Retrofit Type Backhoe Remote Control System (Second report: Improvement of operability and development of retrofit sensing system)

○ Koshi Shibata (Kyushu University), Yuki Nishiura (Kyushu University), and Ryo Kurazume (Kyushu University)

Abstract : This paper presents the improvement of the retrofit backhoe remote control system we proposed. The improved system consists of a remote control system and a remote sensing system. For the remote control system, we worked on extending the movable range of the steering angle of the analog stick and implementing a remote control function for the crawler. For the remote sensing system, we worked on improving the accuracy of angle estimation and adding a self-position estimation using GNSS. We confirmed the operation of the developed systems through experiments using a 2.9t backhoe CAT 320.

1.　緒言

厚生労働省の調査 [1] によると，労働災害による休業 4 日以上の死傷者数は近年増加傾向にあり，令和 3 年度では平成 14 年以降で過去最多を記録した．特に建設業は全産業中で死亡者数が最多であり，建設業労働災害防止協会の調査 [2] によると，建設機械・クレーン等災害による死亡災害は，建設業における死亡者数全体の約 40 %を占める．建機による死亡災害の防止は急務であり，対応策として，建機の遠隔操縦システムが挙げられる．本研究では，建機の中でも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ている．

遠隔操縦システムは組込型とレトロフィット（後付け）型の 2 種類に大別される．組込型は建機メーカにより開発され，内部の仕様が非公開である場合が多いため，利用者による機能追加が困難である．また，操縦者による目視を前提としたシステムである場合が多い．そこで，建設業者らによりレトロフィット型が開発されており，先行研究では，操縦席にロボットを後付けするシステム [3] が提案されている．しかし，大型の装置は取付の手間が大きく，また，極めて高価である．そこで，本研究では以上の課題の解決を目的として，既存の組込型の装置の一部を利用した遠隔制御システムと，安価なマイクロコンピュータ（以降「マイコン」と表記）およびセンサからなるセンシングシステムの開発を進めている．

第 1 報 [4] にて提案したレトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムは，遠隔制御システムとセンシングシステムからなる．現状，それぞれのシステムには以下の課題が存在する．

1) バックホウのクローラの制御が不可能
2) Cat Command のアナログスティックの可動域に制約が存在
3) センシングシステムにおける推定角度の精度の不足
4) センシングデバイスの防水・防塵性の不足

そこで，本稿ではこれらの課題を解決するためにこれまでに提案したレトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムを拡張した新たなシステムを提案する．

新たな遠隔制御システムでは，既存の組込装置に電動シリンダを取り付け，遠隔地におけるバックホウのクローラの制御を実現した．また，Cat Command に対するロボットアームの取付位置と従来のソフトウェアの変更により，ロボットアームの可動域を拡張した．

新たなセンシングシステムでは，使用する加速度センサの変更により，角度の推定精度の向上を実現した．また，Spresense（Sony）の GNSS 受信機能を利用し，センシングデバイスに自己位置推定機能を追加した．そして，防水性と防塵性，利便性を高めた筐体を開発した．

以上のシステムの動作確認は，2.9t バックホウ（CAT 320）を用いて行った．

2.　従来のレトロフィット型バックホウ遠隔操縦システム

本章では，第 1 報にて提案した遠隔操縦システム（以降「旧システム」と表記）について説明する．旧システムの構成を Fig.1 に示す．旧システムは，遠隔地からバックホウを操縦するための遠隔制御システムとバックホウの姿勢

SY0010/22/0000 - 2803 © 2022 SICE

および周辺環境を操縦者に伝達するためのセンシングシステムからなる．

Fig. 1: Overall view of the retrofit type backhoe remote control system.

2.1　遠隔制御システム

本節では，遠隔制御システムについて説明する．遠隔制御システムは，遠隔地に存在する操縦者の入力を建機に伝達するシステム（以降「操縦装置」と表記）と入力を操縦者に代わって入力するシステム（以降「中継装置」と表記）からなる．遠隔制御システム全体の構成を Fig.2 に示す．本稿では，特に中継装置に焦点を当てる．

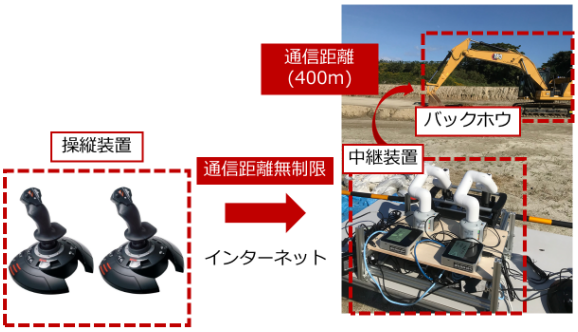

Fig. 2: Overall view of the remote control system.

中継装置は，Fig.3 に示す組込システムである Cat Command（キャタピラー社）に，6 軸小型汎用ロボットアーム myCobot 280 M5（Elephant Robot, M5stack）を用いて，操縦装置から伝達された入力を反映する装置である．

旧システムにおける中継装置には 2 点の課題が存在する．1 点目は，ソフトウェア上の問題と，ロボットアームおよび Cat Command の物理的な干渉により，バックホウを制御するためのアナログスティックの傾斜可能な角度が 33 度であり，アナログスティックの最大傾斜角度である 45 度が実現できない点である．このため，アームの動作が遅い問題が存在した．2 点目は，バックホウのクローラを制御するための装置が存在しないため，バックホウの移動が不

Fig. 3: The embedded systems (Cat Command, Caterpillar Inc.).

可能な点である．本稿では，以上の課題を克服するために機能を拡張した中継装置を提案する．

2.2　センシングシステム

本節では，センシングシステムについて説明する．まず，本システムの処理の流れを Fig.4 に示す．本システムでは，バックホウのキャビン，ブーム，アーム，バケットのそれぞれに，Spresense，6 軸 IMU を搭載したアドオンボード，Wi-Fi アドオンボード，バッテリーを搭載したセンシングデバイスを取り付け，各部の角度を推定することでバックホウの姿勢を推定する．なお，角度推定は，計測した加速度と角速度に Madgwick フィルタ [5] を適用することで行う．また，キャビンにカメラを取り付け，バックホウの操縦席から観測される作業の様子の映像を配信する．以上のバックホウの姿勢情報と操縦席からの映像を無線通信により操縦者側のモニタに表示することで，遠隔地から現場の状況把握を実現する．

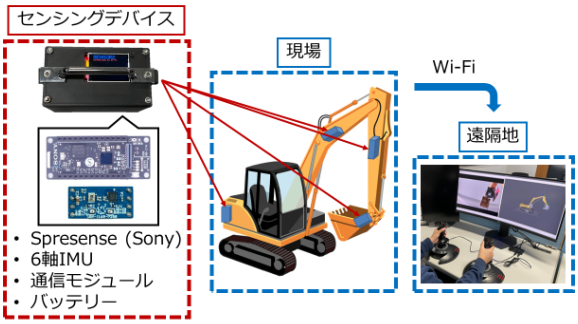

Fig. 4: Process flow of the retrofit sensing system.

現状では，旧システムにおけるセンシングシステムには 2 点の課題が存在する．1 点目は，推定角度の二乗平均平方根誤差が 2.39 度と大きい点である．2 点目は，遠隔地からバックホウの位置が把握不可能な点である．本稿では，以上の課題への対応策を実装したセンシングシステムを提案する．

3. レトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムの拡張

本章では，従来の遠隔操縦システムを拡張したシステムを提案する．はじめに，遠隔制御システムにおける新たな中継装置を提案する．次に，改良したセンシングシステムについて説明する．

3.1 遠隔制御システムの拡張

本節では，拡張した遠隔制御システムについて説明する．

従来の中継装置では，ソフトウェア上の問題と，ロボットアームと Cat Command 間の物理的な干渉によりロボットアームの可動域が不十分であった．そこで，ロボットアームの取付位置とアナログスティックとロボットアームの接続部品を変更し，物理的な干渉を解消した．加えて，ソフトウェアの修正を行った結果，ロボットアームの可動域が拡大し，上下左右で，アナログスティックの最大傾斜角度を従来の 33 度から上限の 45 度まで改善できた．

次に，バックホウのクローラを制御する機能の追加について説明する．Cat Command に電動シリンダを取り付け，クローラの制御を実現した．装置の動作時における物理的な干渉の発生を防ぐために，Fig.5 に示す機構を設計した．この機構により，クローラの制御レバーを，元々の Cat Command に存在する限界まで傾斜可能である．

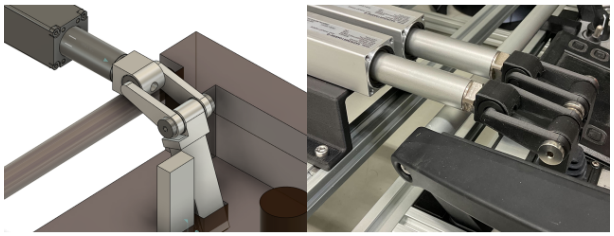

Fig. 5: The mechanism to move a lever to control the crawler.

最後に，新たに拡張した中継装置の外観を Fig.6 に示す．

3.2 センシングシステムの改良

本節では，改良したセンシングシステムについて説明する．

従来のセンシングシステムでは，Spresense 用の 6 軸 IMU を内蔵したアドオンボードを使用し，取得した加速度と角速度に Madgwick フィルタを適用することで角度を推定していた．しかし，従来のシステムでは，推定角度

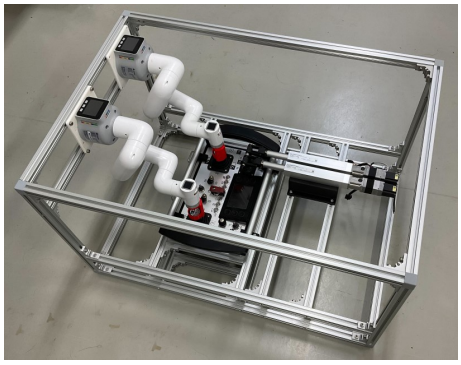

Fig. 6: The new repeater in the remote control system.

の二乗平均平方根誤差が 2.39 度と大きい問題が存在した．誤差の原因を調べるために，センシングデバイスを一定周期で傾斜，静止させ，加速度，角速度，推定角度を計測した．計測値では，静止状態において推定角度の誤差が大きくなる傾向が観察されたため，加速度センサの精度が不十分であると考え，加速度センサを搭載したアドオンボード（ROAM, SPRESENSE-SENSOR-EVK-701）を追加で使用した．なお，ジャイロセンサボードと加速度センサボードの 2 つのセンサアドオンボードを Spresense に搭載するために，新たな拡張ボードを製作した．2 つのアドオンボードを搭載した Spresense の外観を Fig.7 に示す．新たな構成で推定角度の二乗平均平方根誤差を計測したところ，1.35 度まで改善できた．

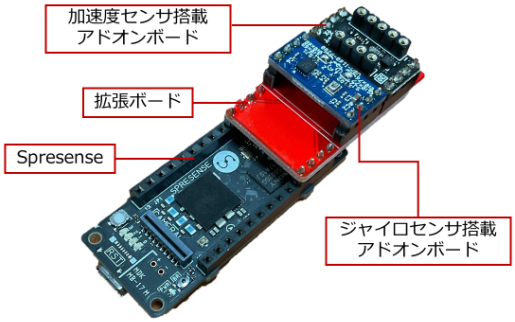

Fig. 7: Overall view of the new sensor module to estimate angle.

次に，自己位置推定機能の追加について説明する．センシングシステムにて使用している Spresense に搭載された GNSS 受信機能を利用し，センシングデバイスに自己位置推定機能を追加した．これにより，バックホウの自己位置推定が可能となった．

最後に，改良したセンシングデバイスの筐体について説明する．従来のセンシングデバイスでは，上蓋にディスプレイを嵌め込むために隙間が生じ，浸水の可能性が存在する．さらに，筐体は熱溶解積層方式の 3D プリンタを用いて製作するため，筐体全体に微小な隙間が存在し，防水性

に欠けている．また，センシングデバイスを充電する際に，筐体を分解する必要があり，利便性に欠けている．そこで，以上の課題を克服する新たな筐体を開発した．新たに開発した筐体を Fig.8 に示す．新たに開発した筐体では，ディスプレイを筐体の内部に収納し，上蓋に透明なアクリル板を使用することで，従来の筐体に存在した隙間を排除した．さらに，アクリル系のコーティング材を全体に塗布することで，防塵性と防水性が向上した．また，筐体の側面から充電用のケーブルを常に露出させることで，充電時の分解を不要とした．

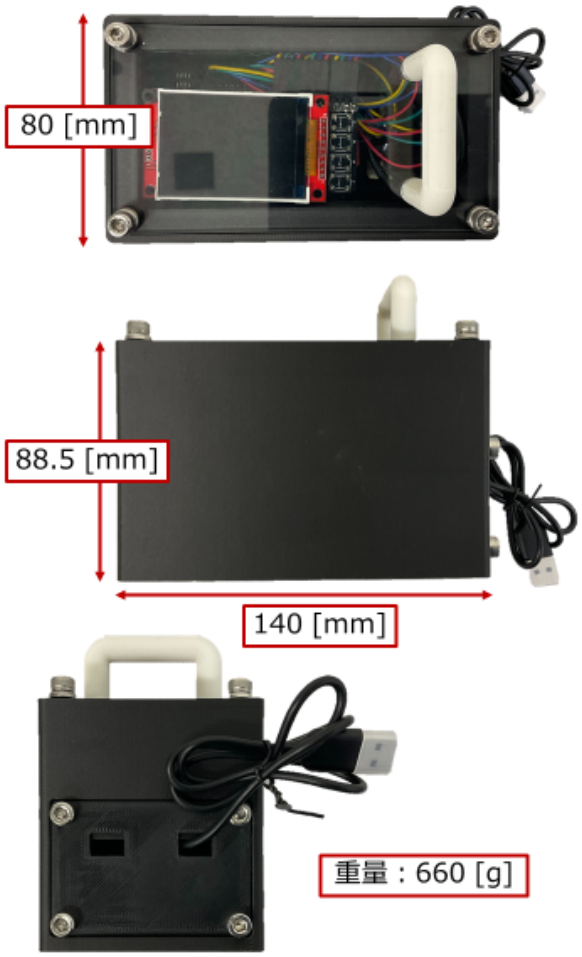

Fig. 8: The new enclosure of the sensing device.

4. 動作確認実験

本節では，開発したシステムの動作確認のために行った実験について説明する．本実験では，遠隔制御システムにおける操縦装置と中継装置間の通信は有線で行った．本実験の様子を Fig.9 に示す．操縦者は Fig.9 の右下に示す，バックホウの操縦席に設置されたカメラから配信された映像と推定されたバックホウの姿勢を見つつ掘削作業を行った．

Fig. 9: The experiment using the backhoe operated by the proposed system. The repeater (upper left), the operator (upper right), the backhoe (CAT 320) (lower left), and the screen on the operator's display (lower right).

実験の結果，Fig.10 に示すように拡張した遠隔操縦システムは概ね問題無く動作した．一方で，センシングデバイスと操縦者側のパソコン間の通信が断続的となる問題が発生した．また，カメラの視野角が不足しているために，現場や作業状況の把握が困難になる場合があった．さらに，従来のシステムから引き続き，入力からロボットアームの動作までに遅延が存在するため改善が必要である．

5. 結言

本稿では，従来のレトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムを拡張したシステムを提案した．従来のシステムから拡張，改良した内容を以下に示す．

1) Cat Command のアナログスティックの最大傾斜角度を最大化する中継装置の開発
2) クローラを制御可能にするための電動シリンダを中継装置に追加
3) センシングデバイスの推定角度の精度を向上
4) センシングデバイスに自己位置推定機能を追加

今後は，遠隔操縦システムの操縦装置におけるロボットアームの動作遅延の改善を試みる予定である．

謝辞

本研究は，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．

Fig. 10: The results of the experiment. The backhoe was properly operated.

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 09/09/2022).

[2] 建設業労働災害防止対策実施事項 — 建災防. https://www.kensaibou.or.jp/public_relations/enforcement_plan/. (アクセス日 09/09/2022).

[3] 三村洋一. 遠隔操縦ロボット（ロボ Q II）. 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 9, pp. 601–602, 2016.

[4] 西浦悠生, 中嶋一斗, 倉爪亮. レトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムの開発. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2022, pp. 1P1–C07, 2022.

[5] Sebastian Madgwick, et al. 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.