

バックホウ向け簡易遠隔操縦装置ロボ QS の開発

Development of Tele-Operated Robot Robo QS for Backhoes

埴 裕 彰 技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部
山 崎 峻 一 技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 主査
金 島 義 治 技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 課長
曾根原 光 治 技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 部長

二次災害の恐れがある危険な土砂災害現場において、安全、迅速な初動対応のために、通常バックホウに装着することで遠隔操縦を可能とする、簡易遠隔操縦装置の需要がある。バックホウ向け簡易遠隔操縦装置として、1999年に開発、現場投入された空圧式ロボQの老朽化に伴い、長年の運用実績から挙げられた課題を解決すべく、後継機種として電動式バックホウ向け簡易遠隔操縦装置ロボQSを開発した。本稿ではその開発内容を報告する。

There has been a demand for remote control backhoes that can be deployed rapidly for the initial response to landslide disasters without the risk of secondary disasters. To meet this expectation, pneumatic driven tele-operated robot Robo Q was developed in 1999, which enables the remote control of commonly-used backhoes by simply attaching the robot to the backhoe. However, the system has become too old for work, and at the same time some problems have emerged with “Robo Q”s that have been in operation for many years. Then, we have developed the electrically driven Robo QS as the next-generation model of Robo Q. The details of this system are introduced in this report.

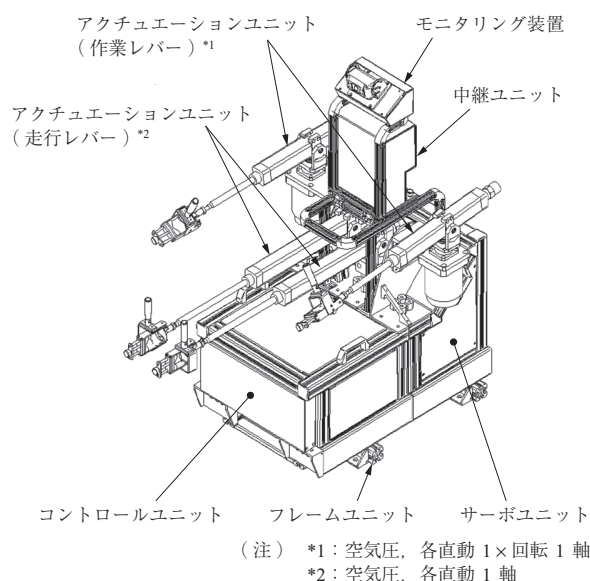
1. 緒 言

我が国は、世界的にみても自然災害の多い地域にあり、例年のように台風、大雨、火山の噴火、地震などが発生している。またこれらにより引き起こされる土砂災害の被害も大きく、土砂災害発生時の安全・迅速な初動対応と被害拡大の防止・復旧は、近年においても依然重要な課題となっている⁽¹⁾。

土砂災害への対応では、通常、土砂や瓦礫^{れき}の除去運搬のために、ショベルカーやダンプカーといった重機が用いられる。そのなかで、災害対応中にさらなる災害が発生し、対応者が巻き込まれる二次災害の危険性がある現場では、無線による遠隔操縦を可能とした重機（以下、遠隔建機）が使用される。操縦者（以下、オペレータ）が安全な場所から重機を遠隔操縦する技術は無人化施工と呼ばれ、建機メーカー各社から提供される遠隔建機のほか、オペレータに遠隔地の映像を提供するためのカメラ車、無線の伝送を補助するための無線中継車などの特殊車両が用いられる⁽²⁾。

土砂災害への備えとして、国土交通省ではこれらの災害対応用特殊車両を全国の地方整備局に配備している⁽³⁾。一方で、これらの特殊車両はいざ災害が起こったときのみ活用されるため、各地方整備局でも保有できる台数に限

りがある。したがって、特に大規模な土砂災害では、大型の災害対応用特殊車両を輸送用トレーラで搬送し、全国の地方整備局から集結させて対応しているのが実情である。この状況を踏まえ、人が乗って操作する汎用普及のバックホウに装着でき、遠隔操縦を可能とする装置ロボQ（第1図⁽⁴⁾）を、株式会社フジタ（以下、フジタ）と国土交通省九州地方整備局九州技術事務所（以下、九州技術事



第1図 簡易遠隔操縦装置ロボQの外観
Fig.1 Tele-operated robot Robo Q appearance

務所)が、1999年に開発している⁽⁴⁾。

ロボ Q は、遠隔建機と比較すると装着の手間や機能に制限がある。一方で、輸送が容易であることや汎用装着型であることから、災害現場の近くにある普及機が使えるため、遠隔建機が災害現場に到着するまでの初動対応において、特に強みを発揮する。ロボ Q は開発から主に西日本の各地方整備局に配備され、正式配備から 2018 年現在まで、2004 年の新潟県中越地震や 2016 年の熊本地震など、各地の大規模災害に出動した実績をもっている。

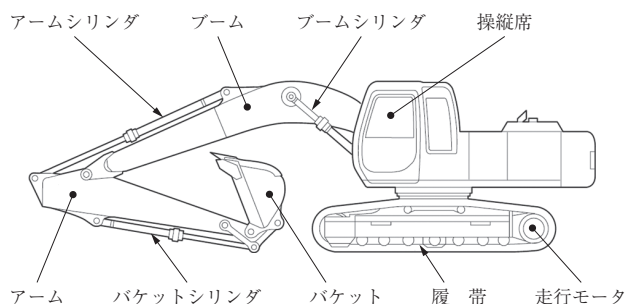
このロボ Q について、開発から 15 年が経過し、後述する運用上の課題が出てきたことにより、後継機種の新規開発を望む現場の強い要望があった。2013 年、機械メーカーとして遠隔操縦技術などに知見をもつ当社にフジタから技術協力の打診があり、九州技術事務所、フジタ、当社の 3 者で共同開発を行うことにした。本稿では、この後継機種であるロボ QS を開発した過程と開発内容を報告する。

2. バックホウの遠隔化

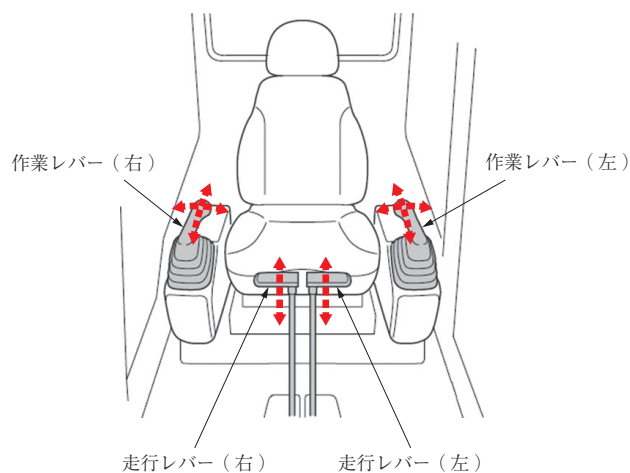
バックホウとは油圧ショベルの一種であり、地面を掘るバケットの部分を手前側を向いていることを特徴とする重機である。左右 2 本の履帯により前後進、左右旋回するとともに、下部の履帯部分に対して上体が旋回する。上体には操縦席の横にブーム、アーム、バケットを備えており、バケットを手前に引き寄せるように動かして地面を掘削する。第 2 図にバックホウ各部の名称を示す。

これらの可動部を操作するためのインタフェースとして、左右の履帯をそれぞれ前後に動かすための走行レバー（前後 1 自由度×2 本）と、旋回、ブーム、アーム、バケットを動かすための作業レバー（前後左右 2 自由度×2 本）がある（第 3 図）。

建機を遠隔化するには、車両などの遠隔化と同様に、駆動部を動かすための電気信号や油圧の制御系に直接介入する方法（電気式）と、アクチュエータを装着することで、



第 2 図 バックホウ各部名称
Fig. 2 Name of backhoe parts



第 3 図 バックホウの操縦レバー
Fig. 3 Backhoe control lever

ハンドルやレバーなどのインタフェースを人間と同じように操作する方法（機械式）がある。

近年では、バックホウをはじめとする建機も、自動車を代表として多くの車両系装置で使われている CAN (Controller Area Network) と呼ばれる通信プロトコルで制御されている。しかし現状では、CAN の通信仕様は各社個別で、かつ非公開情報のため、CAN への介入による電気式の遠隔化では、汎用性のあるシステムを構築することが難しい。したがって、汎用普及のバックホウを遠隔化する手法として、機械式を選ばざるを得ない状況である。

3. ロボ QS 開発のコンセプト

従来のロボ Q では、アクチュエータでレバーを押し引きし、レバーのストローク端部に押し当たった際のロバスト（堅牢^{ろう}）性を確保するため、空圧駆動を選択しており、動力源としてコンプレッサを必要としていた。また、装置が大きいため、操縦席の座席を外して取り付けていた。

ロボ QS を開発するに当たり、ロボ Q を長期間運用した実績から課題を抽出し、同課題を解決するための開発コンセプトを新たに設定した。ロボ Q の課題およびロボ QS の開発コンセプトを第 1 表に示す。なお、表には記載しないが、従来のロボ Q から踏襲したコンセプトとして、初動対応において強みを発揮する観点から、バックホウの改造はしないこと、雨天時の対応に備え、水にぬれても壊れないこと、などがある。

災害現場では、機材を準備する場所と実際に遠隔操縦する危険な場所が離れている場合が多い。遠隔操縦は、有人での搭乗運転に比べて操作性や効率が劣るため、装着後も搭乗運転したいという現場のニーズが強くあった。そこ

第 1 表 ロボ Q の課題およびロボ QS の開発コンセプト

Table 1 Issues of Robo Q and development concept of Robo QS

項目	ロボ Q の課題	ロボ QS の開発コンセプト
装着 組立	<ul style="list-style-type: none"> ・運転席の取り外しに時間が掛かる ・コンプレッサの設置にクレーンが必要 ・初期設定の手間が煩雑 ・装着状態で搭乗運転は不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・組立が容易で時間が掛からない ・コンプレッサなどの外部動力源が不要 ・初期設定が容易 ・バックホウの操縦席に装着した状態でも、オペレータの搭乗運転が可能
故障 トラブル	<ul style="list-style-type: none"> ・組立不良による誤動作が多い ・振動による部品の脱落がある ・空圧系部品の故障が多い ・故障原因の表示が不十分 	<ul style="list-style-type: none"> ・振動による部品の脱落がない ・構成部品の故障頻度が低く、メンテナンスが容易（特に故障が懸念される駆動系の部品は、入手性が高くユニット化された市販品を活用） ・故障原因の把握が容易
運用面	<ul style="list-style-type: none"> ・建機のモデルチェンジにより、搭載可能機種が減少 ・主要部品の製造中止品が増加 ・コンプレッサ内に内燃機関があり、ガソリンを使うため、空輸は不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・メーカ、機種を問わず、バケットサイズ 0.28 m³ 級以上の標準バックホウに搭載可能 ・空輸可能

で、装置を装着した状態で搭乗運転が可能なることをコンセプトに追加した。

4. 設 計

4.1 レバー駆動機構

開発コンセプトを踏まえ、具体的に作業レバーおよび走行レバーを駆動する機構を設計するため、要求事項を以下のとおり整理した。

(1) 位置決め精度

アクチュエータの位置決め精度を ± 3 mm 以下にする

(2) レバー保持性能

外部から 14 G 以下の衝撃加速度が加わった際に、レバーが動き、建機の誤動作が起きない

(3) 静定時間

アクチュエータを任意の位置に動かした際の静定時間を 1 s 以下にする

(4) 消費電力

バックホウの余剰電力で動作可能な消費電力（ただし、少ない方が望ましい）にする

位置決め精度や衝撃加速度、静定時間の数値は、従来のロボ Q の運用実績から算出した、オペレータが遠隔操縦するうえで必要となる数値の目安である。

4.1.1 作業レバー駆動機構の基本構成

バックホウの作業レバーを効率良く駆動できる機構を採用するため、アクチュエータの種類と機構案を複数比較検討した。なお、発動発電機やコンプレッサなどの外部動力源を使わない場合、動力源として利用できるのはバックホウに標準搭載されているバッテリー（DC24V）以外にないため、電動装置を前提とした。検討の結果、実現性や信頼性などの観点から、レバーの前後操作を直動シリンダで操作し、左右操作を旋回モータで操作する方式とした。

4.1.2 バックドライブ可能なアクチュエータ構成

バックホウの操縦席に装着した状態で、オペレータの搭乗運転も可能、というコンセプトを満足するため、アクチュエータがレバーに固定された装着状態でも、搭乗した人間がレバーを動かすことができるよう、バックドライブ可能な（出力側からの外力に対し、機械抵抗が少ない）アクチュエータを選定する必要がある。そのため、モータについては減速比の小さいもの（減速比 15）を、直動シリンダについてはリード角が大きいものを入手し、実際に出力側から外力を加えて十分に動かせるものを選定する方針とした。

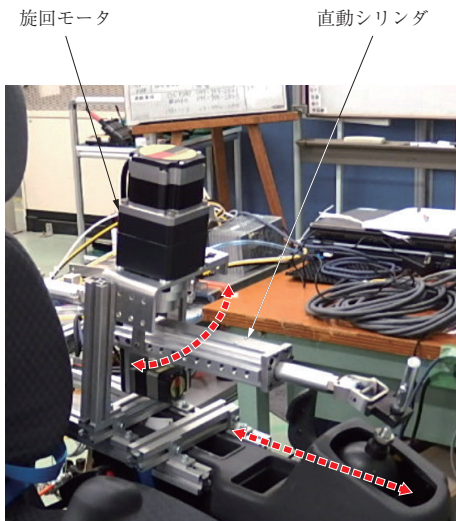
実際の機器選定に当たっては、上述のバックドライブ性能と 4.1 節の要求事項を満足し、かつ電源断で自己位置を喪失しないアブソリュート（絶対値）式のエンコーダを搭載しているものとした。また、外部からの衝撃で破損しにくい構造をもつなどの条件を加味したうえで、可能な限り小型軽量、安価で入手性が良い機器を仮選定した。

4.1.3 要素試験

採用した方式、選定した機器の成立性を確認するため、作業レバー駆動機構の試験モデル（第 4 図）を製作し、要求事項を確認するための要素試験を実施した。

試験の結果、いずれの要求事項についても、本機構でおおむね問題なく達成できる見込みが得られた。データの一例として、第 5 図にレバー保持状況を示す。これは、通電状態の直動シリンダでレバーを保持した状態（- (a)）と、レバーを保持していない状態（- (b)）のそれぞれについて、水平方向に衝撃加速度を与えたときに、レバーの倒れ角度を先端の移動距離に換算したものである。

レバー駆動機構は、4.1.2 項で述べたバックドライブ可能なアクチュエータ構成を採用したことから、十分余裕があるレバー保持性能を得ることが困難であった。しかし試験結果より、レバーを保持した状態で衝撃を与えても、ズ



第4図 作業レバー駆動機構の試験モデル
Fig. 4 Testing model of work lever drive mechanism

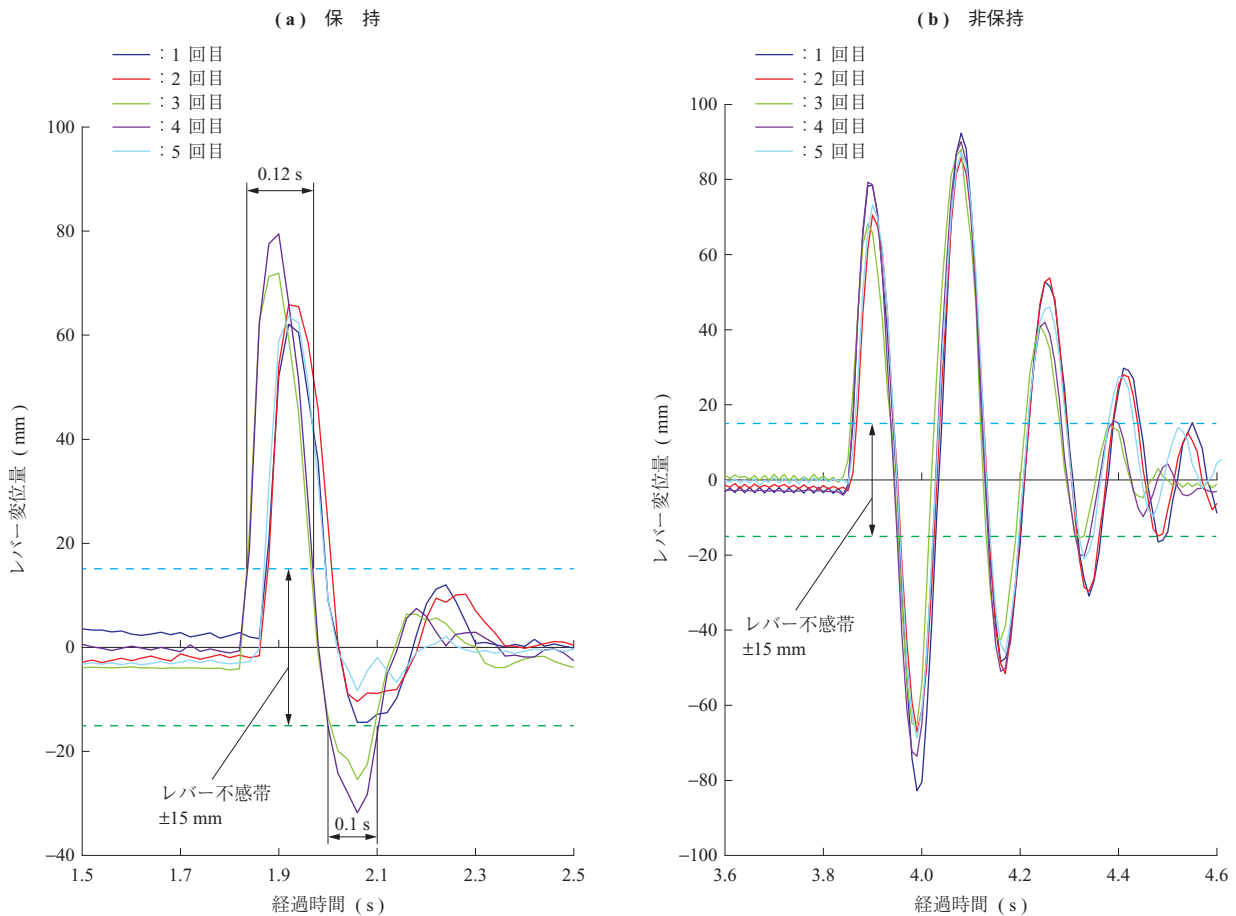
レなどが発生せずに不感帯に戻ること、レバー非保持の状態と比較して、減衰が大きく不感帯を超える時間を短くできていることが分かる。変位がレバーの不感帯を超えている時間があるが、0.12 s 程度の短い時間に戻っているため、建機の油圧による応答遅れを考慮すると誤動作は発生

しない。よって要求を満足していることが分かる。

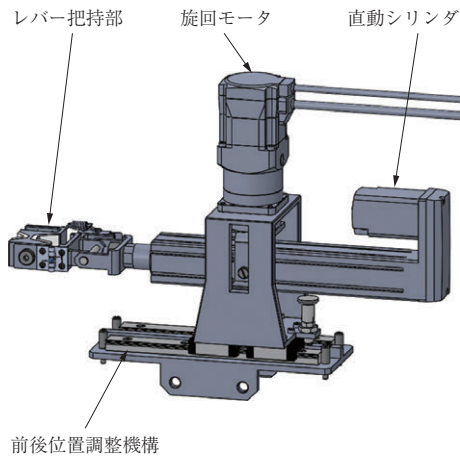
また、電源断の状態でも出力側から外力を加えて容易に動かせることを確認した。

要素試験により、採用した方式、選定した機器の成立性を確認できたため、レバー把持部を含む全体の構成を検討した。レバーを把持する部品は、スナップ錠を採用してワンタッチ着脱を可能とし、レバーを抑える部品を切り替えることで大径、小径のレバーに対応できる形状とした。また、後述するフレームユニットに対して前後位置を調整できるように、前後位置の調整機構を配置した。第6図に、作業レバー駆動機構を示す。

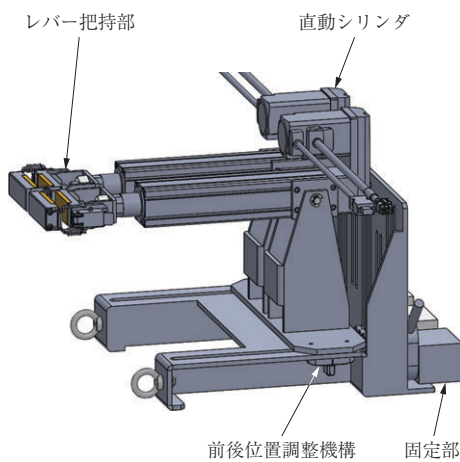
なお、走行レバーについては、作業レバー（前後左右2自由度）に対して前後1自由度しかないため、直動シリンダで押し引きするのみのシンプルな構造とした。また大型のバックホウと小型のバックホウで足元に配置できるスペースに大きな差があるため、作業レバー駆動機構と同様に前後位置の調整機構を配置した。第7図に走行レバー駆動機構を示す。



第5図 レバー保持状況
Fig. 5 Lever holding situation



第 6 図 作業レバー駆動機構
Fig. 6 Work lever drive mechanism



第 7 図 走行レバー駆動機構
Fig. 7 Traveling lever drive mechanism

4.2 フレームユニット

レバー駆動機構を操縦席周辺に固定するための、フレームユニットを設計するに当たり、前提となる設計条件を以下のとおり設定した。

- (1) レバー駆動機構を操縦席周辺に固定できる
- (2) 制御盤を固定できる
- (3) 各社各機種 of 操縦席周辺の形状に対応できる調整機構をもつ
- (4) 振動で外れない
- (5) 人が手で設置するため、軽量
- (6) 腐食に強い
- (7) 座席を取り外すことなく装着できる
- (8) 装着状態でも人が座れるスペースが確保できる

4.2.1 建機操縦席の寸法調査

建機各社の操縦席に対応するため、各バックホウ操縦席内のレバーや座席の主要寸法を計測した。この時点で、バックホウの操縦席内は、装置の固定に利用できる部位が

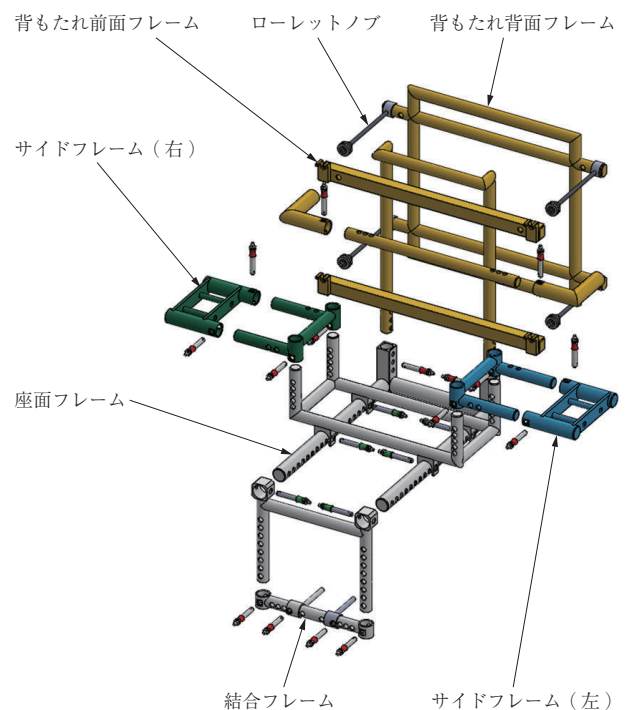
非常に限られている点と、メーカーや機種により操縦席周辺の寸法が異なる点が、課題として挙げられた。

4.2.2 フレーム構造

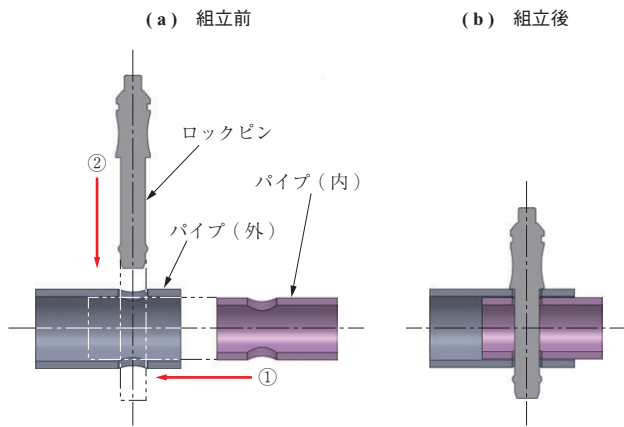
操縦席周辺の形状・構造から、操縦席内の壁面や床面と取り合うことは困難と判断し、座席にフレームを固定する方法とした。具体的には第 8 図のフレームユニット取合図に示すように、作業レバー駆動機構を搭載するサイドフレーム、座面フレームおよび背もたれ前面フレームを組み立てた状態で座席上に設置し、背もたれ部分を背もたれ背面フレームで前後に挟み込み、ローレットノブで締め付ける方式とした。また、寸法の異なる各社の座席に対応するため、各部を細かく分割することで、位置を調整可能な構造とした。

材料としては、軽量で腐食に強く、強度も担保でき、調達しやすいことからアルミニウム合金を採用した。位置調整の具体的な方法としては、第 9 図に示したフレーム構造断面のように、大径の丸パイプに小径の丸パイプを入れ込み、両パイプに空けた貫通穴にロックピンを通して固定する構造とした。

実際のバックホウに、フレームユニットと作業レバー駆動機構、制御盤を取り付けたユニット取付け状況を第 10 図に示す。なお、図に示したように、装着状態でも人が座れることを確認した。



第 8 図 フレームユニット取合図
Fig. 8 Frame unit mounting chart



第 9 図 フレーム構造断面
Fig. 9 Frame structure cross section

4.2.3 装着性確認

フレームユニットおよびレバー駆動機構の装着性に関する設計の妥当性を確認するため、市場流通量が多く、国内出荷額の約 7 割を占める、株式会社小松製作所、日本キャタピラー合同会社 (CAT)、日立建機株式会社の 3 社を取り上げ、バケットサイズ 0.28 m³ 以上のバックホウ計 6 機種に対し、装置が装着可能かどうかを確認した。その結果、フレームユニットと駆動機構に設けた調整代により、装着可能なことを確認した。

4.3 制御システム

従来のロボ Q で挙げた課題から、特に以下の点を考慮して制御システムを構築した。

- ・レバーの中立点やストローク情報の取得 (初期設定) が容易にできること
- ・エラー発生時に、バックホウが速やか、かつ確実に

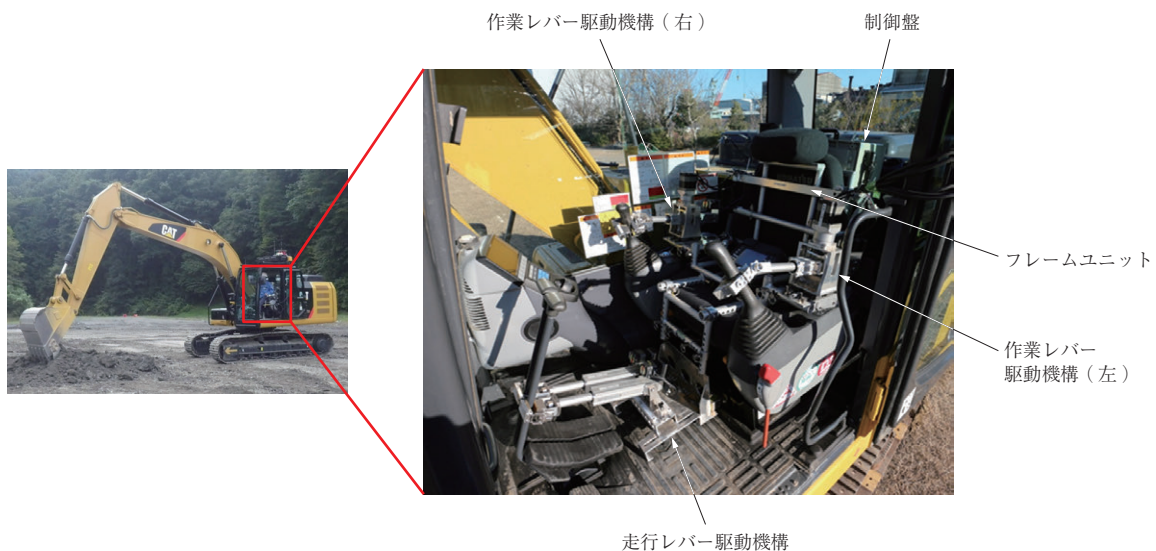
停止すること

- ・エラー発生時に、エラーの原因が容易に判断できること
- ・装置の設定情報や電圧・温度などの状態が簡単に確認できること

初期設定に関しては、本装置は現場ごとに適用する建機が異なるため、アクチュエータの動作範囲を運用開始時に設定する必要がある。この設定作業が煩雑になると、装着時間が長くなるだけでなく、普段ロボットに慣れていない建機オペレータにとって、運用のハードルが高くなってしまったため、可能な限り簡単にセットアップできるシステムにする必要があった。これを踏まえ、レバー 4 本の動作範囲をボタン一つで自動的に取得できるようにした。

次に、遠隔化した建機を安全に運用するためには、緊急停止信号を発報した際に、建機の動作を停止させる必要がある⁽⁵⁾。仮に緊急停止信号によって遠隔操縦装置の電源を遮断すると、アクチュエータの機械抵抗により、操縦レバーが中立以外の位置で停止してしまう恐れがあり、建機が停止しない可能性がある。また、通信不良や途絶、制御装置の暴走などがあっても、安全に建機が停止する機能が求められる。

これらを踏まえ、ロボ QS では緊急停止の手段として、油圧ロック信号に介入した。油圧ロックとは、バックホウに必ず搭載されている機能であり、オペレータが操縦席に乗り込んだ後、油圧ロックを解除しなければ、履帯もブームも一切動かない、名まえのとおり、油圧をロックするインタロックである。緊急停止ボタンは、冗長性をもたせる



第 10 図 ユニット取付け状況
Fig. 10 Unit installation status

ため、オペレータが持つ操作用無線機（送信機）を含む3か所に配備した。第11図に操作用無線機（送信機）を示す。加えて、エラー発報時にエラー原因を速やかに確認できるタッチパネル式液晶表示（コンディションモニタ）を操縦席内に配置した。

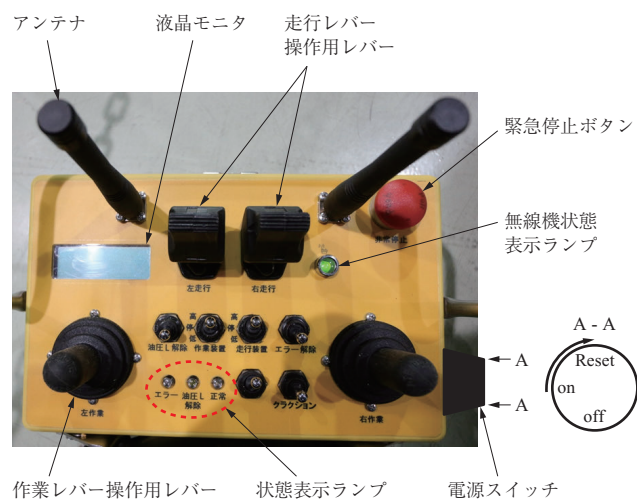
無線機に関しては従来のロボQを踏襲し、特定小電力無線を採用した。また、混信を避けるため、操作用無線と緊急停止用無線で周波数帯を分ける構成とした。受信機などをバックホウの屋根に設置した状況を第12図に示す。

5. 検 証

前述の詳細設計に基づき、装置一式を製作し、以下のような検証を行った。

5.1 温度試験

夏場のバックホウ操縦席内での使用を想定し、フレームユニットなどを除く電装系の部品一式を対象に、温度試験



第11図 操作用無線機（送信機）
Fig. 11 Operation radio (Transmitter)



第12図 無線機など設置状況
Fig. 12 Installation status of radio equipment

を実施した。試験には恒温槽を使用し、環境温度は最大50℃で、通電状態で実施した。数時間の試験時間中、一定時間ごとに無線機を操作した結果、すべての操作でアクチュエータが正常に動作することを確認した。また制御盤内温度が設定値を超えた場合に、温度高警告を発報する機能なども併せて確認した。

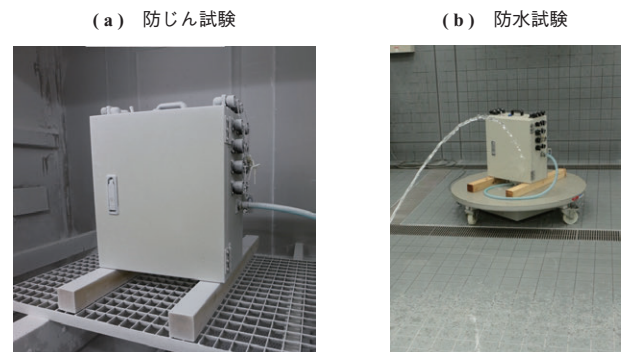
5.2 防じん試験および防水試験

装置に使用する部品は、基本的に防じん・防水性能が担保されたものを採用している。しかし制御盤は製作加工品のため、認証機関にて JIS C 0920/IEC 60529 に規定される保護等級 IP65 の防じん試験および防水試験を実施（第13図）し、満足することを確認した。

5.3 耐久性および耐衝撃性の確認

製作したロボQSの装置一式をCAT製の0.45m³級バックホウに搭載し、遠隔操縦で走行、旋回、掘削、埋戻しなどの動作を8時間×5日間実施、耐久性を確認した。また、試験フィールドに盛土を設け、盛土の上をバックホウが乗り上げて走行することで衝撃加速度（14G以上）を与え、耐衝撃性を確認した（第14図）。

試験の結果、耐久試験時の振動や、衝撃による部品の緩み、脱落、変形などは見られなかった。また、振動や衝撃



第13図 防じん試験および防水試験
Fig. 13 Dustproof test and waterproof test



第14図 衝撃試験状況
Fig. 14 Impact test status

第2表 ロボQおよびロボQSの主要諸元
Table 2 Main specification of Robo Q and Robo QS

項目	単位	ロボQ	ロボQS
取付調整員	人	2～3	2～3
取付時間	h	約3	約1
収納ケース数	個	大×6, 小×1, コンプレッサ×1	大×6
本体質量	kg	約180	約80
組立外形寸法	mm	幅620×奥行き1100×高さ1040	幅750×奥行き1300×高さ1050
動力源	-	エアーコンプレッサ	バックホウ付属バッテリー
アクチュエータ方式	作業レバー用	-	電動(2セット) 直動シリンダ×1+回転アクチュエータ×1
	走行レバー用	-	電動(1セット) 直動シリンダ×2
	位置決め精度	mm	±5
	位置決め所要時間	s	1以下
無線方式	-	特定小電力無線	特定小電力無線
遠隔操作距離	m	150(使用環境による)	150(使用環境による)
装着状態での搭乗運転	-	不可	可

に起因する誤動作、エラーもなく、実運用に当たって十分なロバスト性を有することが確認できた。

これらの検証を踏まえた、最終的なロボQSの仕様と従来のロボQの主要諸元を第2表に示す。

6. 結 言

汎用普及のバックホウに装着することにより、遠隔操縦を可能とする、バックホウ向け簡易遠隔操縦装置ロボQSを開発した。開発後、九州技術事務所に納品した1号機は、2017年5月に大分県豊後大野市で発生した地滑りの対策工事や、2018年4月に大分県中津市で発生した土砂崩落現場に出動している。

土砂災害現場では、大量の巨石、流木の撤去が大きな課題として挙げられている。バックホウには、地面を掘るためのバケットの代わりに、巨石破壊用の油圧ブレーカや、流木などを把持、あるいは伐採できるアタッチメント機能を有するものがある。今後、ロボQSをこのバックホウのアタッチメント機能に対応させ、土砂災害現場でのさらなる安全、迅速な初動対応に貢献していきたい。

また今後は、本開発をとおして得られた装着タイプの装置化技術、遠隔操縦技術をさらに発展させ、IHIグループの各種製品の遠隔化や、新しいソリューションの提案に向けた開発を進めていく。

— 謝 辞 —

本装置の開発に当たっては、株式会社フジタおよび国土交通省の皆さまに多大なるご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省：ホームページ「平成29年全国の土砂災害発生状況」(オンライン)入手先<<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h29dosha/H29dosyasaigai.pdf>>(参照2018-5-28)
- (2) 茂木正晴, 山元 弘：無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動 計測と制御 第55巻第6号 2016年6月 pp.495 - 500
- (3) 国土交通省：ホームページ「TEC-FORCE(緊急災害対策派遣隊)について」(オンライン)入手先<<http://www.mlit.go.jp/river/bousai/pch-tec/pdf/TEC-FORCE.pdf>>(参照2018-5-28)
- (4) 茶山和博, 河崎英己, 吉永勝彦, 藤岡 晃：遠隔操縦ロボット(ロボQ) 日本ロボット学会誌 第21巻第1号 2003年 pp.59 - 60
- (5) 平野高嗣, 川上勝彦, 石坂 仁, 山崎峻一, 埴裕彰：簡易遠隔操縦装置の開発 新型ロボQS 軽量・電動化・搭乗運転の実現 第17回建設ロボットシンポジウム 2017年8月