

1. 遠隔操縦装置（バックホウ用）の開発

ロボQS ～ 軽量・電動化・搭乗運転の実現 ～

株式会社フジタ ○平野 高嗣・川上 勝彦
株式会社IHI 山崎 峻一・塙 裕彰

1. はじめに

土砂崩れ等の有事の際の災害復旧は一刻を争うが、一般の建設機械に搭乗しての作業は、二次災害の危険性から困難であり、遠隔操縦での作業が必須となる。建機メーカーからは遠隔操縦型重機（無人化施工専用機）が販売されているが、遠隔操縦型重機は台数も少なく大型であり、かつ重機本体ごと運搬する必要があり、緊急時の機動性や調達に課題がある。これらを解決すべく、一般のバックホウに装置を取り付けるだけで遠隔操縦が可能となる、遠隔操縦装置『ロボQ』を平成9年に国土交通省九州地方整備局九州技術事務所と共同開発した。しかし開発から20年が経ち、部品の製造中止や経年劣化等の問題が発生している。

そこで更なる機能向上（安全性・組立性・メンテナンス性・機器を装着した状態での有人搭乗運転）を目標に、概略設計・詳細設計、機能検証・製造と3年掛けて新型遠隔操縦装置『ロボQS』を開発・製造した。尚、設計・製造は㈱フジタと㈱IHIが共同で行った。

本論はロボQSの開発経緯について報告する。

2. ロボQS開発検討

2.1 初代ロボQの課題

初代ロボQの開発から20年が経ち、次の問題・課題が顕著になってきた。

- (1) 搭載可能機種数の減少
 - ・重機のセキュリティ向上によりエンジン発停制御が困難に
 - ・空圧制御のため、エンジンコンプレッサーが必要だが、重機の旋回体上への設置余地が無くなってきた
- (2) 部品の経年劣化による故障
 - ・特注部品の在庫が希薄に。また、特注のため代替品が無い
- (3) 設置・撤去・維持管理が困難
 - ・重機の運転席を取外す必要があり、更には機器構成が複雑で、設置には取付知識のある人間が必要

これらを解決すべくニーズ・シーズ調査を実施した。写真-1に初代ロボQを示す。



写真-1 初代ロボQ

2.2 新型ロボQSに求められる機能

初代ロボQの課題に対してのニーズ・シーズ調査の結果を以下に示す。

- (1) 遠隔操縦性の向上：実機に近い感覚、レバー配置で運転できること。重機の傾斜が分かること。
- (2) 搭乗運転と遠隔操縦の切り替えの簡素化：遠隔操縦装置を装着したまま搭乗運転が可能な構造とし、切り替えが容易に出来ること。
- (3) 運転及び故障状況の把握：装置の運転状況や故障状況が把握できること。
- (4) ライフサイクルコストの低減：定期点検等のメンテナンス費の縮減。
- (5) 環境性能の向上：エア駆動のロボQはコンプレッサーの作動音が大きいため低減する。
- (6) 組立の簡素化、部品点数の削減
- (7) 空輸可能・乗用車に収納可能な大きさにすること。

3. 基本仕様の検討

ロボ QS の基本仕様を検討するにあたり、適用規則及び標準は以下の通りとし準拠する。

- ・規則：電波法（施工規則）を遵守する。
- ・標準：ISO 規格（国際標準化機構規格）
：JIS（日本工業規格）
：IEC 規格（国際電気標準化会議規格）

規則・標準を踏まえ、かつ求められる機能を満足する設計条件を次のように決定した。

- (1) 分解組立式でパーツ重量に上限を設ける。
(ユニット最大重量 15kg 以下)
- (2) 工具を使用しないで搭載が可能とする。
(調整機能を含む)
- (3) 現地組立時にトルク管理や増し締めが必要なネジ・ボルト締結を避ける。
- (4) 動力は重機の DC24V から得る。容量は重機バッテリーの許容電流値以内とする。
- (5) バックホウの運転席を外さずに搭載が可能とする。
- (6) 調達が容易で信頼性の高い市販機器を採用する。制御盤は開閉と機器交換が容易な製品を採用する。
- (7) 装置の状態が分かるコンディションモニタを使用し、状況把握が出来るようにする。
- (8) 装置を搭載した状態での搭乗運転が問題ない空間を確保する。(配置検討・小型化)
- (9) 物理的な重機の破損を除き、遠隔で緊急停止の ON/OFF が出来る。

以上をもとに基本仕様を検討・決定した。表-1 に基本仕様を示す。

4. 概略設計

概略設計を行うにあたり、装置の構成を要素の異なる次の3つに分けて検討した。

4.1 アクチュエーションユニット

バックホウの走行・作業レバーを動かすアクチュエータとそれを固定するフレームで構成される。

近年、重機の運転席はクッションシートが主流であり、運転席と作業レバーが連動して上下に動き、衝撃を吸収する構造となっている。アクチュエータユニットはバックホウのキャビンと一体で振動する走行ユニットと、クッションシートと一体で振動する作業ユニットで別体とし、走行ユニットは、運転席下部のクッションシート外の鉄部に強力なネオジム磁石を用いて固定する。作業ユニットを固定するためのフレームは運転席上に設置し、運転席の揺れと同調する。

走行レバーは前後倒立のため直動シリンダを、作業レバーは前後左右に倒立するため直動シリンダと旋回モータの組み合わせとした。写真-2・3 に走行・作業アクチュエーションユニットを示す。

表-1 基本仕様

項目	仕様
環境仕様	・防水防塵性能：IP65
形状、サイズ、重量	・ユニット分割型 ・クッションシートへの装着対応 ・サイズ W50cm×D50cm×H30cm ・重量1ユニット15kg以下
制御方法	・フィードバック方式 ・初期設定：原点取得 ・アクチュエータ動作エラー監視二重化（コントローラ、メインCPUによる） ・レバー制御速度：通常モード(100%) / 精密作業モード(60%) 2段切り替え
制御機器	・制御盤内配置（平面配置） ・制御機器：スロットタイプ PLC, 耐振仕様
非常停止方法	・停止方法：油圧ロック・アクチュエータ中立 ・停止条件（4方式のOR判断） ①機側の緊急停止（CPUを介さないハード） ②ラジコン緊急停止ボタン（ソフト） ③制御機器自己判断（ソフト） ④専用緊急停止無線（受信機→ハード） ・機器：リレー2重化
無線操縦装置 周波数等	・操縦用無線機：双方向通信によるモニタ機能付）400MHz 帯 ・緊急停止無線機：1.2GHz 帯
アクチュエータ	・電動：ボールネジタイプ +ステッピングモータ



写真-2 走行アクチュエーションユニット



写真-3 作業アクチュエーションユニット

走行・作業アクチュエーションユニットをバックホウに搭載するため、建機メーカー及び機種によるサイズやレバーの配置・可動範囲を把握する必要があります。そこで今回、複数の建機メーカーのバックホウの運転席について、A～dの実測を行った。尚、ロボQSを搭載するバックホウは、一般的な0.28m³級以上のバックホウを対象とした。計測結果を元に走行・作業レバー用ユニットを固定するフレーム寸法や、ユニットの取付位置を決定した。図-1に測定箇所、表-2に計測結果の一例を、図-2にロボQSの搭載イメージを示す。

表-2 運転席測定例

実測項目	単位	実測箇所	実測値			
シートベース部長さ	mm	A	530			
シートベース部取り付けボルト間距離	mm	B	270			
走行レバー	シートベース部から走行レバー間距離	mm	C	620		
	可動範囲	中立→前方	度	D	11.3	
		中立→後方	度	E	11	
	アクチュエータ把持部可動範囲	中立→前方	mm	F	45	
		中立→後方	mm	G	45	
	レバー根元太さ	mm	H	17.5		
	左右レバー間距離	mm	I	45		
	作業レバー	可動範囲	中立→前方	度	J	17.6
			中立→後方	度	K	18.5
中立→右方			度	L	17.7	
中立→左方			度	M	18.4	
レバー先端可動範囲			mm	N	90	
		mm	O	90		
		mm	P	90		
		mm	Q	95		
レバー高さ		mm	R	310		
レバー太さ		mm	S	14		
左右レバー間距離	mm	T	620			
シート背もたれから作業レバー間距離	mm	U	630			
レバー部長さ	mm	V	157			
レバー部幅	mm	W	110			
運転席シート	幅(最狭部)	mm	X	430		
	長さ	mm	Y	440		
	背もたれ上部幅	mm	Z	300		
	背もたれ高さ	mm	a	510		
	背もたれ厚さ	mm	b	135		
	背もたれ上部厚さ	mm	c	78		
	裏側スペース距離	mm	d	310		

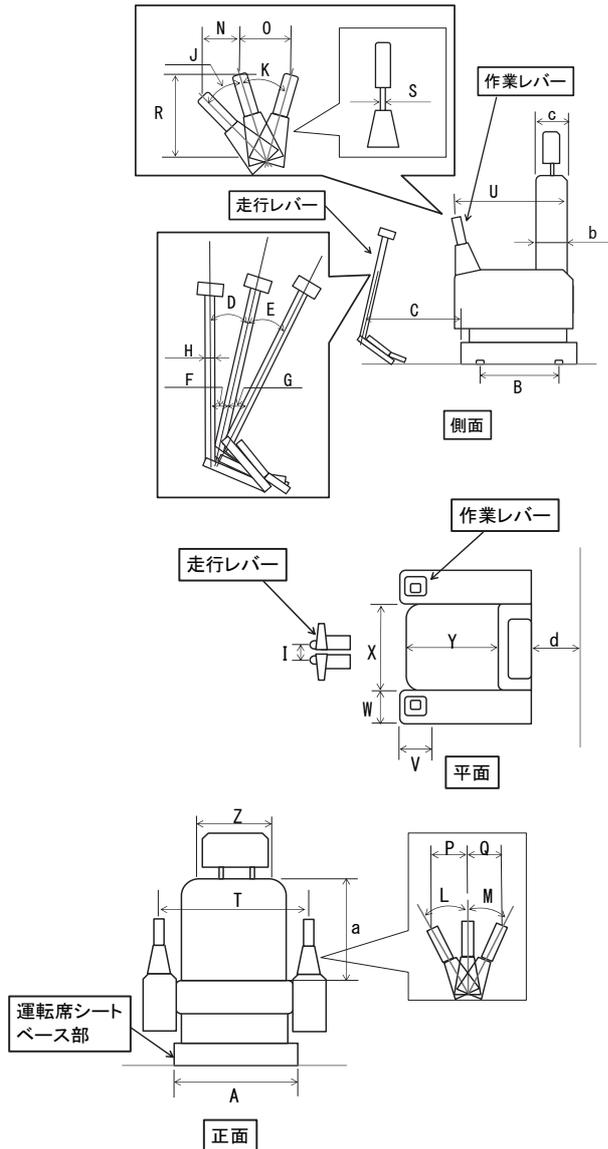


図-1 運転席計測箇所

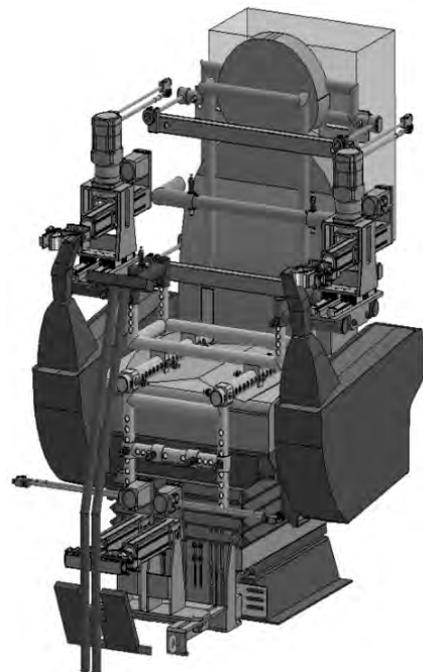


図-2 ロボQS搭載イメージ

4.2 遠隔操縦ユニット

遠隔で操縦するための操縦用ラジコンと緊急停止用のラジコン、各々の受信機で構成される。使用する電波は、共に電波法による免許を要しない

特定小電力方式とした。操縦用ラジコンはチャンネル数の多い400MHz帯とし、空きチャンネルを自動で探索する機能を装備した。また装置の状態を確認できるフィードバックモニタを装備した。

緊急停止用ラジコンは1.2GHz帯とし、操縦用ラジコンと周波数帯を変えることで万が一混信が発生してもどちらかの電波が届くようにした。緊急停止用ラジコンはバックホウ操縦者以外が携帯し、安全性を高めることが望ましい。写真-4に操縦用ラジコン、写真-5に緊急停止用ラジコンを示す。



写真-4 操縦用ラジコン



写真-5 緊急停止用ラジコン

4.3 コントロールユニット

ラジコンからのデータを位置情報へセンシングするモータドライバや、装置全体の制御を行うプログラマブルコントローラ（以下 PLC）、制御リレー等で構成される。コントロールユニットは、クッションシート背もたれ部を挟みこんだフレームに背負う構造とし、シートで衝撃を吸収し大きな衝撃がかからないようにした。

コントロールユニットの電源元として重機のバッテリーを使用するが、バッテリーの新旧やエンジン回転数で電圧が変動する。そこで安定した24V電圧を供給するため直流安定化電源を装備した。尚、遠隔操縦にて作業を行う際は、別途に映像装置を搭載することが多く、これらの電源も重機のバッテリーからとるため、電源容量に限界がある。よって映像装置の搭載を考慮し、0.28m³級バックホウの最大許容電流の半分程度となるよう機器を選定した。

5. 詳細設計

概略設計を元に、安全性能・環境性能を含めた詳細設計を実施した。

5.1 アクチュエーションユニット

走行・作業ユニットとフレームを複数の建機メーカーやモデルに搭載するにあたって、バックホウごとにアクチュエータの固定場所と作業レバーとの距離が異なるため、搭載時に固定位置の調整が必要である。そのため、作業ユニットのフレームは、パイプフレーム構造の5分割とし、それぞれを差込式+使用箇所別に色分けしたロックピン固定方式とし、位置調整用のピン穴を多数開け微

調整可能な構造とした。

走行ユニットについては、磁力のON/OFFが可能な強力ネオジム磁石に、上下スライド式の位置調整機構を設け、最適箇所固定可能な方式とした。レバーの把持方法についても、ワンタッチでの取付・取外しが可能なキャッチクリップを採用した。これらによりボルトレス・工具レスでの組立と複数の建機メーカーへの装着に対応した。

アクチュエータは初代ロボQの課題であったエア式に換え、電動ボールネジの直動シリンダと回転モータを採用した。電動式アクチュエータはトルク制御が可能であり、重機レバーの可動端部まで押し付けても過負荷でトリップしない制御が可能である。

遠隔操縦を行うにあたり、走行・作業レバーの可動範囲をPLCに認識させるため、中立位置を制御原点とし、レバーの端部を確認する初期設定を最初に行う必要がある。トルク制御によりレバーがストローク端部に接触し、トルクが上昇した時点を端部と判断することでレバーの前後（左右）の可動範囲を設定する。

初期設定で検出した可動範囲に対し、実作業での衝撃発生時のストローク端部衝突によるアクチュエータ破損を防止するため、ストローク端部から5mmを除いた範囲を実作業の可動領域とするプログラムとした。これにより操縦用ラジコンのレバーとバックホウの作業レバーの倒立比を同調させ、スムーズな操縦を実現した。また、プログラム上でシリンダ速度や押し付けトルクを自由に設定出来るため、ラジコン操作に対するレバーの反応を任意に設定することが可能である。

搭乗運転を行うために、座面に配置したパイプフレームの上に簡易座席を設置した。遠隔操縦と搭乗運転の切り替えは、配線1本をワンタッチで切り替えるだけで完了する。写真-6に搭乗運転状況を示す。



写真-6 搭乗運転

5.2 遠隔操縦ユニット

操縦用ラジコンの走行・作業レバーについては、通常の作業で使用する『通常モード』と微小な操縦が可能な『精密作業モード』の切替スイッチを設け、精密作業モードではラジコンのレバーストロークに対し、実機レバーの可動範囲を狭め、微小な作業を可能とした。また、バックホウのキャビン天井にクラクションを設置し、遠方から警笛を鳴らせるようにした。

その他、緊急停止ボタンやエラー解除スイッチ、油圧ロック解除スイッチを設け、遠隔からこれらを制御可能な機構とした。ラジコンには LCD モニタを配置し、遠隔操縦装置のコンディションデータ（バックホウ電圧・ローリング、ピッチング・コントロールユニット内部温度等）をフィードバックし、バックホウの状態がラジコンで分かるようにした。

操縦用・緊急停止用ラジコンの受信機は、バックホウのキャビン天井に設置するが、回転時にアンテナがブームやアームの死角に入って電波が途絶え無いよう、受信はダイバーシティ方式とし、2本のアンテナをバックホウの左右離れた場所に設置し信号の安定化を図った。写真-7 にバックホウ天井機器搭載状況を示す。

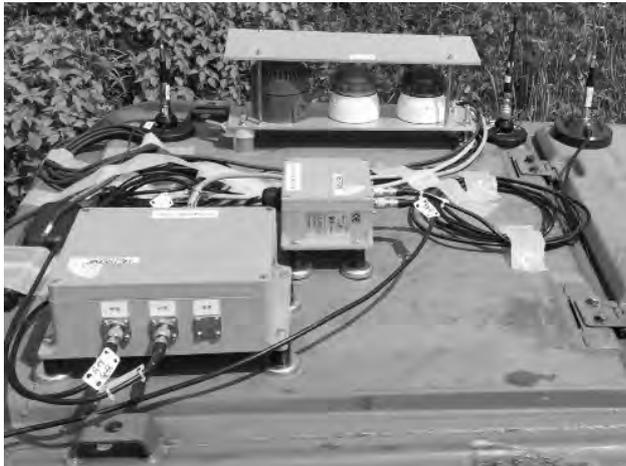


写真-7 バックホウ天井機器搭載状況

5.3 コントロールユニット

バックホウの操縦は4本のレバーを6軸方向（走行レバーは前後方向、作業レバーは前後左右方向）に複数同時に動かすことで行う。操縦用ラジコンからの操作信号の入力に対し、各軸への出力にタイムラグが生じると、特に走行操作は動き始めにズレが生じ、扱い辛い装置になってしまう。その為、アクチュエータを制御するモータドライバは、多軸同時制御が可能な物を選定した。PLCの通信方式は処理速度が速い方式を採用し、信号送受信の伝達速度は100msec以内を目標とした。

また、ノイズによる誤操作を防ぐために、幅広

アース線の使用や、アルミ板をユニット内全面に貼り付けることによる盤内へのノイズ侵入防護、アースの等電位化、電源線と信号線の離隔を確保する等の対策を実施した。写真-8 にコントロールユニット内部を示す。



写真-8 コントロールユニット内部

5.4 安全設計

遠隔操縦装置は事故が発生した場合のリスクの高いバックホウをコントロールする装置であるため、『機械の包括的安全基準に関する指針』に則り、PL法の対象とならないように慎重に検討した。バックホウ自体の改造は、メーカー保障やPL法対策上、行わない事とした。

また、非常停止はJISの規程により、バックホウに対して停止カテゴリ0又は1で実施した。

停止カテゴリ0は『機械駆動部への電源供給を即時に直接遮断する停止機能』、停止カテゴリ1は『制御回路からの運転停止信号により機械駆動部の停止機能が働きその後電源供給が遮断される停止機能』である。遠隔操縦装置の停止機能は、バックホウの油圧を停止させる（油圧ロックと称する）＝機械駆動部への電源遮断とした。

緊急停止は制御機器の自己判断、操縦用ラジコン、緊急停止用ラジコンと更にもう一系統バックホウ両側面に押しボタン式のスイッチを配置し4系統とした。

安全性を考慮して油圧ロック回路に対して信号が出ていない状態が油圧ロックとなる回路構成とし、バックホウを動かす為には油圧ロック解除信号を出し続ける必要があるプログラムとした。

停止カテゴリ0は、PLCを解さずリレーのみで構成された回路とし、緊急停止用ラジコンや操縦用ラジコンの緊急停止ボタン、両側面の押しボタンスイッチからのB接点信号回路をリレー入力側に直接接続し、油圧ロック解除回路に割り込ませる方法である。これは回路切断状態が緊急停止とな

るため、万一断線が起きた時は緊急停止となり信頼性が高い。尚、リレーは接点固着の可能性が低いソリッドステートリレーを使用した。

停止カテゴリ 1 は、緊急停止信号を PLC に取り込み、その情報に PLC が異常と判断した場合を加えて、油圧ロック解除信号の出力停止機能を持たせた。また、PLC は自己が故障した場合には全出力が停止する設定とした。

バックハウのキャビン天井には緊急停止の作動、油圧ロックの作動状態を確認するための表示灯を設置し、目視で装置の状態を把握出来るようにした。

5.5 環境性能・消費電流・その他

環境性能の IP65 を満たす為、装置で使用する部品は全て既製品の IP65 をクリアした製品を選定した。ただしコントロールユニットはコネクタ接続用に穴あけ加工をしたため、公的機関にて IP65 試験を行い、防水防塵性能に問題が無いことを確認した。また、耐衝撃性能を確認するため、実際にバックハウに遠隔操縦装置を搭載し、段差を激しく乗り越えた時の衝撃を加速度計で計測することで確認した。最大 27G を記録したが、装置に異常は見られなかった。

ユニットで使用する電子部品は、LED ランプ等の極力省電力機器を選定した。操縦レバーを 6 方向全て同時に操縦した全負荷状態での最大電流値も、目標値以内を達成した。

その他、ロボ QS は運搬を考慮して装置全てを宅急便での配送が可能なボックス 6 個に分割収納出来るようにした。6 個のボックスはワンボックス車であれば積込可能である。写真-9 へ運搬状況を示す。



写真-9 ロボ QS 運搬状況

今回、装置を電動式とした事でエンジン式のエアコンプレッサが不要となり、空輸も可能となっ

た。(ガソリン・エンジンオイル・バッテリーが空輸不可品)尚、一番重いユニットはコントロールユニットの 13kg であった。また、工具レスでの組立、フレームロックピンの色分けによる使用箇所の視覚化、運転席の脱着を無くしたことで、組立時間は 2~3 人で約 30 分程度と初代ロボ Q の 3 人・3 時間を大幅に短縮すると共に、メンテナンス性の向上や点検の簡略化を達成した。写真-10 にロボ QS の搭載状況を示す。



写真-10 ロボ QS 搭載状況

6. おわりに

今回、新型ロボ QS を 3 年掛けて完成させた。初代ロボ Q からの改善要望をすべて網羅し、九州技術事務所からも「災害時の迅速な対応につながる」と期待していると非常に高い評価を頂いた。

ロボ QS は殆どの機種に搭載可能なこと以外に、ロングアーム仕様や泥濘池仕様等のバックハウにも搭載できるのが強みである。今後、更なるブラッシュアップとしてアタッチメント対応等に取組んで行く所存である。最後にロボ QS 開発にあたり、多くの助言をして頂いた国立研究開発法人土木研究所をはじめ関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平成 13 年 6 月 1 日 (基発第 501 号) 厚生労働省労働基準局長
『機械類の包括的な安全基準に関する指針』
- 2) 平成 21 年度中央労働災害防止協会
『機械設備のリスクアセスメントマニュアル』
- 3) JIS B 9703 機械類の安全・非常停止