

遠隔操縦用ロボットの開発

DOKAROBO2

角 和 樹・吉 崎 航

汎用建設機械の運転席に設置して遠隔操縦を可能とする人型ロボットである。近年、大規模な自然災害が多発傾向に有り、現地で調達可能な汎用建設機械を遠隔操縦することでの迅速な応急復旧が望まれている。2014年度の国土交通省公募における「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入現場実証（災害応急復旧）」においてDOKAROBO（以下「本ロボット開発機」という）で検証させて頂き、その評価を基に課題を改良したDOKAROBO2（以下「本ロボット」という）の紹介である。紹介する操縦ロボットは安全で小型・軽量、高機能を目指して開発してきたもので、汎用建設機械に即時対応できることが特徴である。
キーワード：汎用建設機械、人型ロボット、小型軽量、V-Sido（ブシドー）、サーボモーター

1. はじめに

災害現場は人の立ち入りが困難な場合や人命に危険を及ぼす状況が多く、人が安全に復旧作業を行うためには遠隔操作の建設機械が必要となる。普及するためには運用コストも重要であり、汎用機器を多用し安価で使いやすい遠隔操縦システムを目指している。本システムは2007年より開発を開始し、次世代社会インフラ用ロボット開発・導入現場実証に参加させて頂きながら、改良を加えて機能向上を目指している。

2. 開発の目的

現在、建設機械を遠隔操縦する必要性は、殆どが災害現場における人命に危険を及ぼす場所での迅速な復旧作業である。そのためには緊急時に対応できるシステムでなくてはならないが、いつ発生するかわからない災害に専用機械を待機させ、そのための訓練を行うのはコストが掛かり現実的ではない。将来的には遠隔操縦対応機が全国隅々まで配備される時代が来ると予測するが、それまでは汎用建設機械に遠隔操縦装置が必要な時に使いながら対応していくことになると思われる。通常の現場施工に使用できる遠隔操縦ロボットが有れば、特別な訓練無しに災害時の即応体制が整わずであり非常に有効な手段となる。災害現場は個々に条件が異なり作業手順や使用機械の種類も違うため、掘削、積込、運搬、整地等の多種多様な機械が必要となってくる。遠隔操縦ロボットの利用価値を

向上させるためには、ハードウェアはそのままソフトウェアによりあらゆる機械に対応できることが望ましいと考えている。

3. 本ロボットの改良点

2014年度の次世代社会インフラ用ロボット開発・導入現場実証に参加した1号機は、課題が多く現場活用には改善が必要という評価を頂いた。主な課題を下記に示す。

- ①衝撃により中立位置がズレることがある。
- ②操縦装置の操作性が悪くオペレータの疲労が懸念される。
- ③汎用無線LANを使用しているため混信による速度低下や通信が途切れやすい。
- ④車載カメラだけでは前方下部に死角ができ、振動も影響して見づらい。

上記の課題を含めた問題点により作業効率は従来技術より半分程度となった。

1号機は忠実に人型の構造としたためバックホウの操縦に不要なサーボモーターも多数存在した。そのため消費電力も大きく、制御的にも遅くなることから基本コンセプトを再考した。

下記に基本コンセプトを示す。

- ①ロボット本体の構成を見直し、サーボモーターの配置を最適化する。
ロボットの重量が軽減され、振動・衝撃に有利になる。

②通信の信頼性を向上させるため制御系と画像伝送系を別系統にする。

(1) ロボットの構造変更

今回の変更はバックホウに特化する目的でサーボモーター数を減らし信頼性を向上させることにある。

(a) 胴体部構造の見直し

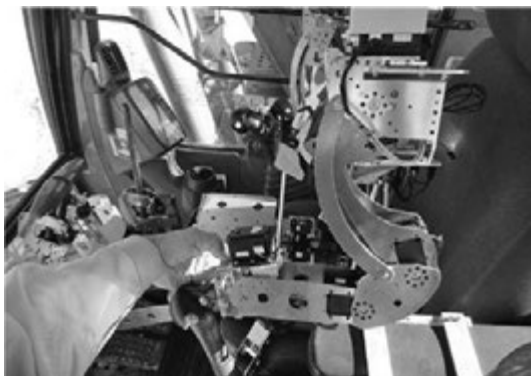
作業中の衝撃でロボットがズレてしまい予期せぬ動作が生じたため、胴体部の機構は衝撃を吸収するスチュワートプラットフォーム型とした。この機構の長所は、自由度が大きい、構造が簡単、剛性が高い、高速、高精度で、短所は動作範囲が狭いことである。胴体部底面にサーボモーターを三角形に6個配置する構造で6自由度（X, Y, Z, ロール, ピッチ, ヨー）を有し、両腕取付の肩部ユニットの上下, 左右, 振りの調整が可能である。この機構によりズレた場合でもロボットの姿勢をソフトウェアにて調整可能となる。V-Sido（以下「本ソフトウェア」という）の特徴である外部衝撃からの姿勢保持機能を使い振動, 衝撃を吸収し作業レバーへの影響を減少させることが可能となった。写真一1に胴体部のリンク機構を示す。

(b) 腕の構造

上腕部をリンク機構, 肘部を独立ピッチ軸, 手首部をピッチ軸とヨー軸の構造とした。実機操縦レバーを



写真一1 胴体部のリンク機構



写真一2 腕部の構造

前後に動かす場合に肘のサーボモーターに負荷が掛かるが, それを軽減するための構成である。これにより腕部のサーボモーターを11個から7個と大幅に削減できた。写真一2に腕部を示す。

4. 本ロボットの構成

(1) ハードウェアの構成

本ロボット本体は双腕, 双脚を持った人型をしており, バックホウの場合は双腕先端を実機作業レバーに取付けて掘削等の作業を行う。移動時の走行は双脚で実機走行レバーを操作することで可能となる。写真一3にロボット本体の写真を示す。写真一4は参考のために本ロボット開発機を示す。

本ロボット本体は上半身と下半身に分割されており組立てると一体化する。その他に制御ユニット, 通信ユニット, 電源供給ユニットから構成され運転席後部



写真一3 本ロボット本体



写真一4 本ロボット開発機本体

表一 本ロボットの主要諸元

項目	内容
全長／最大幅	150 cm／50 cm
操縦ロボット重量	18 kg／ロボット部
設置時間	60分／2人
動力	電力：12 V, 300 W
アクチュエータ	サーボモータ 34 個
自由度	26／全体
フレーム材料	ジュラルミン, アルミ
カメラ	FullHD (1920 × 1080) 2 台
無線方式	無線 LAN (IEEE802.11b/g/a/n) 特定小電力無線
操作距離	200 m (中継局により延長可能)

または前部に設置される。電源供給ユニットは動力源として建設機械のバッテリーから 12 V 及び 100 V を変換出力する電源装置で本体に取り付けられる。電圧安定化のため補助電源としてバッテリーを取り付ける。各部位のサイズは概ね身長 150 cm の成人と同じ構成で、肩から足先まで 140 cm である。キャビン付の運転席は機種にもよるが、人が座るとスペース的に余裕が少なく双腕双脚の場合は腕脚がスリムでないと操作時に干渉が起き目的の作業ができないという問題が生じる。2号機では腕や脚の断面を 10 cm × 10 cm 以下の断面となるように設計し可動範囲を確保している。本体のフレームは軽量化のためにアルミやジュラルミンを使用し接合部はアルミブロックにて強靱な構造としている。本ロボットの主要諸元を表一に示す。

(2) ソフトウェアの構成

本ロボットは本ロボット開発機と同じく主制御装置の基本ソフトウェアとして本ソフトウェアを採用している。本ソフトウェアはロボットの動作をリアルタイムに生成するための制御ソフトウェアであり、サーボモーター等を組み合わせた多関節ロボットに対して、様々な操作インターフェイスを提供する。本ソフトウェアはシミュレータとロボットをリアルタイムに同期させる独自のシステムにより、手脚の目標姿勢を計算しながらより安全な姿勢に自動変換し安全で正確な制御を可能としている。以下のような特徴を持っている。

- ①多様な入力機器に対応：ジョイスティック, Kinect やマウス, タッチパネル, スマートフォン, バイラテラル装置など, 様々な機器からの操縦が可能
- ②リアルタイム性：逆運動学などをリアルタイムに計算し, ロボットの動きに反映させる
- ③様々な駆動方法に対応：各種ロボット用サーボ

モータや油圧, 空圧などの制御が可能

- ④遠隔操縦・複数人での操縦に対応：ロボット自体を HTTP サーバ化することで, インターネットを通じた複数人での遠隔操縦および機器監視にも対応可能

本システムでは, この本ソフトウェアの機能を利用することで, 以下の機能を実装した。

- ①ジョイスティックを利用したロボットの操縦
- ②特定小電力無線やインターネットを通じた遠隔操縦
- ③ロボット本体に装着したジャイロセンサによる建設機械本体の姿勢把握
- ④操縦者の頭部に装着したジャイロセンサによるカメラのトラッキング
- ⑤ヘッドマウントディスプレイを利用した 2 眼カメラ映像の 3D 表示

5. 本ロボットの特徴

本ロボットの特徴を安全性, 仕様, 機能に分けて説明する。

(1) ハードウェアの安全性

(a) アクチュエータ

60 W 以下の小型電動サーボモータを使用して安全な動作が行える構造としている。肩や脚の主要な駆動部は最大トルク 100 kg・cm のサーボモータを 2 個連結およびリンク構造を採用している。サーボモータの内訳は肩, 胴, 首部の上半身で 22 個, 脚部に 10 個使用している。さらにキーの操作とエンジン回転数の調整用に 2 個が必要である。片腕の自由度は肩から手首部まで 6 自由度とし, 稼働範囲は狭いが人に近い動きが可能である。ハンドは省略して実機操作レバーに直接掴みやすい構造で作業時に外れない構造となっている。各部位の自由度は首 3, 双腕 12, 胴部 6, 双脚 5, 計 26 自由度である。起動時の待機電流は 4A 以下で, 操作時は最大 10 A 程度である。

(b) 安全装置

機械本体の実機安全レバー入切は操縦装置の非常停止ボタンにより行い, 緊急時には独立して作動することができる。ロボットの制御装置により通信が途絶えた場合や異常が発生した場合に自動で作動する。

(2) ソフトウェアの安全性

ソフトウェアによる多重安全システムを採用しており, 狭い運転席では色々な部分との干渉が起きるため

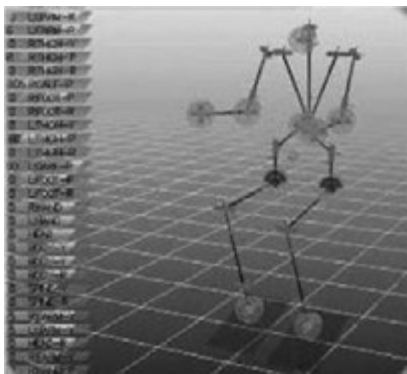
個々のサーボモーターの可動範囲設定や物理シミュレーションでの干渉回避設定を行っている。本ソフトウェアの多重安全システムを利用し、安全な操縦を行うために以下のような対策を取っている。

(a) サーボモータ単位での可動範囲設定

関節が想定外の角度に回転して関節を痛めてしまうのを防止するため、各サーボモータごとに、回転可能な角度範囲をあらかじめ指定している。また、トルクが必要ない関節には最大トルクの設定を低めに設定しておくことで、想定外の動きをしたときに周囲のものを破損する可能性を防ぐ。

(b) シミュレーションに基づいた各関節の可動範囲設定

各関節ごとに可動範囲を指定するだけでは、全身の姿勢によっては干渉などを起こす可能性が高い。そこで、ロボットの動きをリアルタイムにシミュレートし、全身の動きが問題なく行える範囲での動作を生成する。本ソフトウェアのシミュレータ画像を写真—5に示す。



写真—5 シミュレータ画像

(c) コンプライアンス（柔軟性）の設定

シミュレーションに基づいた各関節のコンプライアンス設定をして現在の姿勢に合わせた適切なコンプライアンス値を随時各関節に指定することで、腕の柔らかな動きを実現する。

(d) コマンドプロトコル

サーボモータの制御はRS485のシリアル通信により行われ、主制御装置からコマンドが送受信されている。コマンドは通信エラー等で異常がないかのチェックを行っている。

(e) 通信エラー時の設定

通信が途絶えた場合は安全な位置で停止する機能を設定している。以上のような安全対策を行っている。

(3) 仕様（小型・軽量・容易）

2号機本体は運転席に一人で運べるように全長



写真—6 設置状況

150 cm、重量 18 kg と扱いやすくなっている。腕と胴体部の上半身が 10 kg、下半身の脚部が 8 kg である。これは狭い運転席に片側のドア越で設置する場合に複数人での作業は困難であることから2分割としている。一人で搬入し設置している状況を写真—6に示す。

(a) 容易な運搬

人型であるため乗用車に人と同じ座らせた姿勢で運搬が可能であり、クッション材で保護しベルトで固定する。梱包する場合は上下2分割で運搬することも可能である。車載した状況を写真—7に示す。



写真—7 運搬状況

(b) 短時間で建設機械に設置・撤去が可能

運転席のシートに 30 cm 角の鉄板を敷き専用ベルトにて固定するため部品の取外しがなく改造が不要である。2人で60分程度の作業で設置が完了し、撤去も2人で30分程度である。設置完了状況を写真—8に示す。



写真—8 設置完了状況

(4) 機能

現地にある汎用機械を対象に製造会社、機種問わずに使用できることを目標としており、現在3社のバックホウの操縦が可能である。

(a) 製造会社、機種問わずに使用できる

多種類の建設機械を操作可能にするためには運転席からのレバーの位置（距離、高さ、方向）が異なっても十分な作動範囲が確保できなければならない。片腕の自由度は6軸あり人と同じ動作がほぼ可能である。胴体はスチュワートプラットフォームにより6自由度の動作が可能であるため、ソフトウェアで機種に合わせた対応が可能となる。また、規格による実機作業レバーの変換が可能で操縦者が慣れている操作を選定することもできる。

(b) 操縦装置の仕様

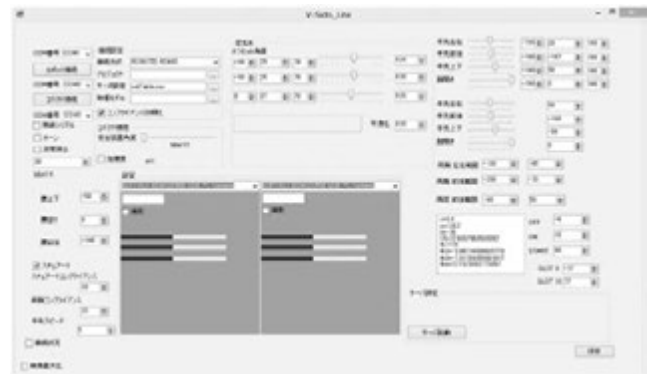
操縦装置にはブーム、アーム、バケット、旋回を行うための操縦用作業レバー2本と移動時のクローラを動かす操縦用走行レバー2本及び岩盤破碎用アタッチメントの操作ペダル用の各種操作モーションを起動するボタンスイッチが付いている。操縦用作業レバーは倒れ角に対応した実機作業レバーの目標位置を計算し、搭乗時と同じ操作になるよう制御されている。ロボットにはジャイロセンサが取付けてあり機械本体の傾斜等を把握することで作業中の転倒防止が可能である。操作状況を写真—9に示す。



写真—9 操作状況

(c) 教示機能により位置校正が容易

ロボット設置後に両腕と両脚にレバーやペダルの位置及び稼働範囲を教え込まなければならないため、教示機能モードにより位置校正を容易に行うことができるようになっている。本ソフトウェアを起動し校正モードで実機作業レバーと実機走行レバーの位置を人の手でそれぞれ教示させ設定する。中立位置が確定すれば各レバーの可動範囲を前後左右に動かして教示させ作動を確認する。写真—10に本ソフトウェアの設定画面を示す。



写真—10 本ソフトウェアの設定画面

(d) 3D映像により操作が可能

ロボットの頭部には2台のFullHD（1920×1080）カメラが装着されており操縦装置側に3D画像化し伝送する。合成画像とすることによりデータ量を減らし遅延の少ないシステムにすることが可能となる。ヘッドマウントディスプレイに表示させれば立体感を感じることができ、バケットの位置の判定がし易くなる。2眼カメラの画像を処理し結合したものを写真—11に示す。この画像がヘッドマウントディスプレイで左右それぞれの目に表示される。

人の頭部に相当するカメラの雲台はピッチ、ロール、旋回の3軸仕様となっており操縦者頭部のジャイロセンサにより視点をトラッキングすることも可能と



写真—11 立体画像



写真-12 頭部カメラ



写真-13 破碎作業用のバックホウ

なっている。この機能により操縦者は搭乗して操作している時と同じ目線での作業が可能となる。頭部カメラを写真-12に示す。

(e) 遠隔操縦距離

特定小電力無線と無線LANにより200m程度離れた場所から操作が可能である。操作データと視覚情報データを別々に送ることで円滑な操作を可能としている。また、それぞれ中継局を設置すれば操作距離を延長できる。遠隔操縦用無線及び映像伝送用無線は特定小電力無線と無線LANを使用するため基本的に資格、免許は不要である。

6. 課題と展開

現在、本ロボットの動作は本ロボット開発機と比較すると遅延が短くなっているため、作業効率も良くなっている。作業効率の向上には確実な動作と、操作側と実機側の動作遅延と視覚情報遅延を少なくすることが必須条件であり、そのためには確実な通信回線の確保が必要である。視覚情報を補足するには作業位置や周りの状況判断ができる距離や起伏の情報が必要であり、それにはロボットの頭部もしくは機械本体に距離センサや測域センサを設置し情報を画面にインポートすることにより作業の効率化を促すことができる。現在、破碎機による作業も可能となっており、今後は地盤改良機のアタッチメントやブルドーザー、不整地運搬車の遠隔操縦も予定している。写真-13に破碎作業用のバックホウに設置した例を示す。

7. おわりに

本ロボット DOKAROBO2 は小型・軽量なロボットに高機能なソフトウェアを実装し、汎用建設機械を安全に効率よく遠隔操作することを目標に開発を進めている。基本的な作業が確実・安全に行え、誰もが安心して使用できるロボットを開発し、災害復旧などの危険な作業での活用を図っていきたいと思っている。

JICMA

《参考文献》

- 1) ROBO-ONE 委員会：“ROBO-ONE で進化する二足歩行ロボットの造り方”，(株) オーム社
- 2) 草薙洋平：“JAPANESE MAKERS”，(株) 学研教育出版

【筆者紹介】

角 和樹 (すみ かずき)
 (株)富士建
 専務取締役



吉崎 航 (よしざき わたる)
 アスラテック (株)
 チーフロボットクリエイター

