

後付け型遠隔操縦装置「ロボQS」の自動化に関する基礎開発

伏見 光

概 要

近年、建設作業の業務効率化のためにICTの現場導入が進んでおり、その取り組みの1つとしてICT建機の導入が挙げられる。現在現場に導入されているICT建機は多数のセンサーを内蔵しているため機体自体が高価であり、特に中小規模の現場においては導入が進んでいないのが現状である。また、半自動化によってオペレーターの操作を補助することが目的であり、完全な自動化の実現には至っていない。そのような状況の中で、建機の自動化についてはゼネコン各社が独自開発している事例が報告されている。弊社が開発した後付け型の遠隔操縦装置「ロボQS」は、既存の重機に取り付けることで重機の遠隔操作を可能にする装置である。機体に設置した少数のセンサーで取得した情報を基に、このロボQSの操作信号を生成することで、既存の重機を自動化制御するシステムの開発を行った。本報では開発したシステムの概要と、実際の建設現場にて行った実証実験の結果について報告する。

Basic Development on Automation of Simple Remote-Control System "Robo QS"

Abstract

In recent years, the introduction of ICT to construction sites has been increasing to improve the operational efficiency of construction work, and one such initiative is the introduction of ICT construction equipment. The ICT construction equipment currently deployed in the field is expensive because it contains many sensors, and its installation has not progressed particularly in small- and medium-sized facilities. It is also aimed at assisting operator operations through semi-automation, and full automation has not yet been realized. Under such circumstances, it has been reported that general contractors are independently developing automation of construction equipment. The Robo QS remote control system, developed by our company, enables remote control of heavy machinery by attaching it to existing heavy machinery. We developed an automated control system for existing heavy machinery by generating the Robo QS control signals based on information obtained from a small number of sensors installed on the machine. In this paper, the outline of the developed system and the results of a demonstration experiment at an actual construction site are reported.

キーワード: 自動化、ICT建機、生産性向上

§1. はじめに

1.1 背景

建設業が抱える問題として、少子高齢化、若年層の就職の減少に伴う労働力の不足が挙げられる。一方で建設需要の増加は今後も見込まれており、労働力の確保、現場作業の効率化は大きな課題である。この問題に対して国土交通省では全ての建設プロセスにICT (Information and Communication Technology)を活用した「i-Construction」¹⁾を推進している。

「i-Construction」の取り組みとして、主にドローンによる測量、CIMデータ、そして、ICT建機²⁾による施工が挙げられる。ICT技術の現場活用とは情報化、つまり測位データや設計データなどの電子情報を活用することで、現場作業の効率化、高精度化を図る取り組みである。その中でも、ICT建機には衛星からの測位システムであるGNSSや地上に設置したTSからの測位データによってオペレーターによる操作をガイドするマシンガイダンス、さらに、重機の掘削作業を補助するマシンコントロールが用いられている。これらのICT技術の補助により若年オペレーターは熟年オペレーターとの経験の差を縮めることができ、ICT建機は現場作業の効率化に貢献している。

一方でICT建機の普及率は5%程度にとどまっております³⁾、業界全体の生産性向上には結びついていないのが現状である。導入が進まない大きな原因として、導入コストが高価である点が挙げられる。ICT建機の高度な機能の実現には高価なセンサーが多数必要であり、導入コストは既存の重機に比べ高くなる。このことは、特に費用対効果の得られにくい中小規模の建設現場におけるICT建機の普及が進まない要因になっている。

また、現在のICT建機に用いられている技術はオペレーターによる操作の補助として設計されており、重機の無人化には至っていない。もし、オペレーターが指示を与えれば自動で作業をする重機を安価で導入できれば、大きな省力化、効率化が見込める。

本研究では、当社の持つ遠隔操作ロボット「ロボQS」を活用し、その操作を自動化することで、バックホウによる掘削、積込作業の自動化を行い、その効果について検証した。

1.2 遠隔操作装置「ロボQS」

当社では、主に災害地におけるバックホウの遠隔操作を目的とし、後付け型の遠隔操作装置である「ロボQS」を開発し、運用を続けている。バックホウに搭載した「ロボQS」を図1に示す。「ロボQS」の大きな特徴として、既存のバックホウへ搭載可能であることが挙げられる。「ロボQS」本体は座席の背後に搭載されており、必要に応じて搭乗での操作も可

能とすることで、遠隔操作では困難な作業にも対応することが可能となっている。また、容易に分解・組立が可能であり、災害発生時には分解した「ロボQS」を空輸などの手段で被災地へ輸送し、現地のバックホウに搭載することで迅速な運用が可能となる。実際に「ロボQS」を分解、梱包した様子を図2に示す。

本研究では、既存のバックホウに後付けで搭載可能であるという「ロボQS」の特徴を生かし、少数のセンサーを組み合わせることで自動化を実現することで、バックホウ自体を改造することなく実現可能な自動化システムの構築を目指し、開発を行った。



図 1. 操縦席に設置したロボQS



図 2. 分解・梱包状態

§2. 自動化システムの構成

本研究で構築したシステムは主に、機体に搭載した各種センサーのデータを統合し、機体や周辺の地形等状態を認識する「認識部」、認識した状態に応じて重機の動作内容を決定する「制御部」、及び制御部で生成した操作内容に従って機体を制御するための操作信号を「ロボQS」に送信する「操作部」からなっており、それらを統合して制御するベースシステムとして、ロボティクス分野で広く用いられているROS (Robot Operating System)を採用した。システム構成図を図3に示す。

2.1 「認識部」における処理内容

(1) 機体状態の取得

機体の傾斜、及び作業機の状態を取得するため、FRABA社製のMEMS式傾斜計を用いた。機体の傾斜取得のため、キャビン上部へ2軸(ロール/ピッチ)対応のセンサーを1台、作業機部の状態取得には1軸(ピッチ)のセンサーを、ブーム、アーム、及びバケットにそれぞれ1台設置した。傾斜計の設置状況を図4に示す。これらの傾斜計で計測したデータを統合し、“地面とブームのなす角”、“ブームとアームのなす角”、及び“アームとバケットのなす角”の各角度を算出することで作業機の状態を認識した。各関節角の認識状況を図5に示す。作業機は旋回部の旋回に応じてヨー方向の回転が生じるが、傾斜計ではヨー角を取得することはできない。その為、VECTORNAV社製のGPSコンパス搭載小型慣性航法装置(INS)を使用した。このセンサーはMEMS式IMUと2基のGNSSを組み合わせることで、旋回角度を正確に把握することが可能である。旋回部後端に設置したINSの設置状況を図6に示す。

(2) 周辺状況の認識

掘削対象とする地面の形状、及び積込を行うダンプ等の周辺状況の認識を行うため、Livox社製のLiDARを使用した。掘削面の認識には水平方向、垂直方向共に広範囲の認識が必要となるため、広域のFOV(水平81.7° / 垂直25.1°)を持つ”Horizon”センサーを2台組み合わせ、キャビン上に俯角を取って設置した。LiDARの設置状況を図7に示す。キャビン上に設置した場合、作業機が画角に入ってしまう。また、雨や粉塵などが映り込んでしまうことが想定されるため、一定距離以内のデータをノイズとして除去する処理を実装し、その影響を排除した。積込動作を行う際、掘削する地表面と、積込対象となるダンプは距離が離れており、一度に画角に納めることは困難である。そのため、積込動作を実施する前に旋回操作を行い、その間に連続的に取得したデータを繋ぎ合わせることで、機体周辺の状況をマップとして広範囲に取得する処理を実装した(図8)。

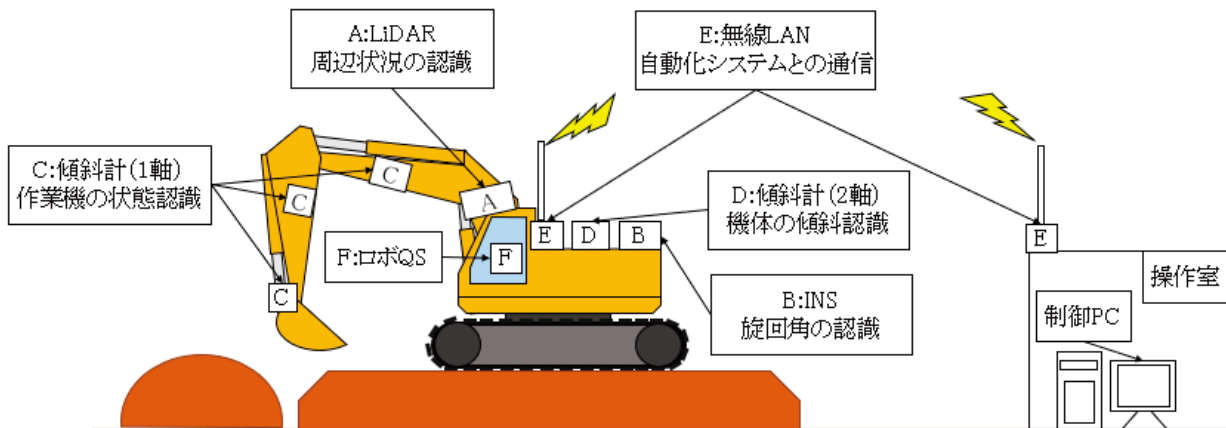


図 3. システム構成図

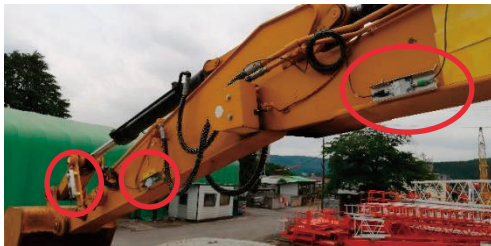


図 4. 作業機に設置した傾斜計

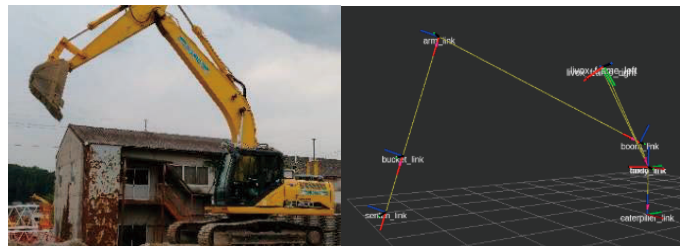


図 5. 作業機の角度認識結果



図 6. 旋回部に設置したINS



図 7. キャビン上に設置したLiDAR

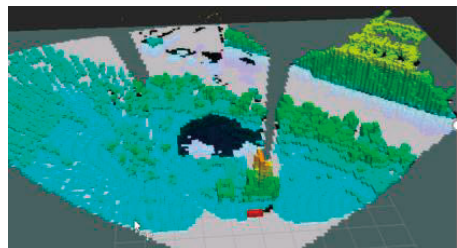


図 8. LiDARで認識した周辺状況

(3) ダンプの認識

ダンプへの積込作業を、土をこぼさないよう正確に行うためには、ベッセル部分の位置、及び向きを正確に認識する必要がある。LiDARによって取得した機体周辺のマップを構成する点群データから、ダンプに該当する点群を抽出するため、ニューラルネットワークを用いた機械学習モデルを構築して利用した。点群中から抽出したベッセル部分にバウンディングボックスを表示した様子を図9に示す。また、抽出したダンプ部分の点群の情報から、ベッセル上に積まれている土砂の量を推定し、ダンプへの積込余力があるか否かの判定に利用した。認識したベッセル部分から土に該当する点群を抽出した様子を図10に示す。

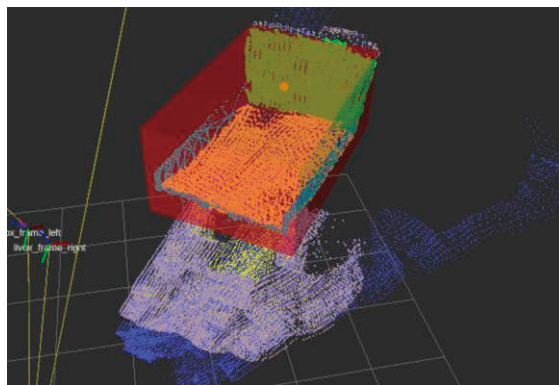


図 9. LiDARの点群中から抽出したダンプ位置

2.2 「制御部」における処理内容

(1) 掘削方法の決定

制御部では主に、認識部で取得した周辺マップの情報に基づき、以下の手順で最適な掘削方法を決定する処理を行った。

- ① 掘削時に旋回可能な角度を、掘削可能範囲として予め設定する
 - ② 掘削可能範囲内の周辺マップについて、一定間隔で複数の掘削断面を生成する
 - ③ それぞれの断面について、複数の判断基準でスコアを算出し、最もスコアの高い場所を掘削対象とする
 - ④ 決定した掘削場所に於いて、最も多くの土を掘削できる刃先の動きの軌跡を生成し、掘削パスとする
- ③で用いた判断基準としては、「掘削時に取得可能な土量」、「掘削、積込に必要な旋回量」等の値を用いた。この処理によって生成された掘削パスを、LiDARで取得した周辺マップ上に表示した様子を図11に示す。

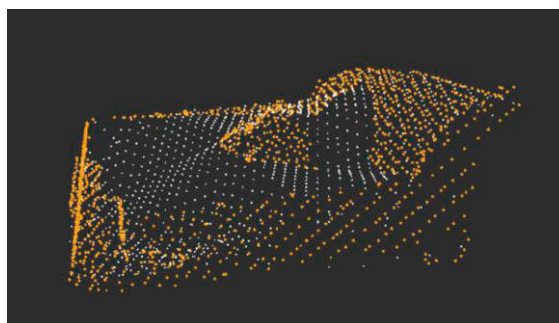


図 10. ベッセル上の土の点群データ

(2) 操作信号の生成

決定した掘削パスに対して、それを追従する操作信号を生成するには、操作信号の強度に対して、実際に機体がどのような挙動を示すかを予め把握する必要がある。そのため、入力した操作信号と各関節の動作(角速度)の対応を予め調査し、パラメータとして利用した。また、掘削パスになめらかに追従させるため、車両の軌道追従等に用いられる手法である「Pure pursuit」を利用した。

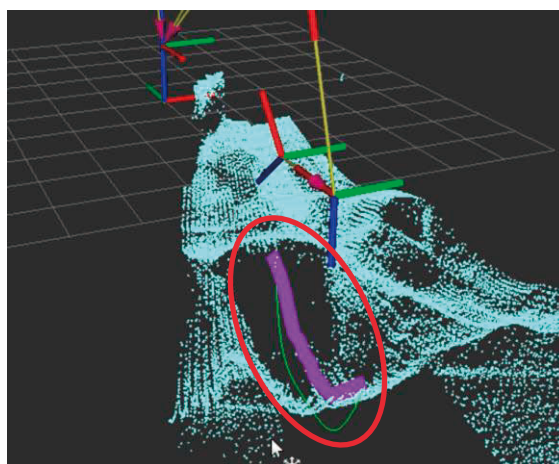


図 11. 周辺マップ上に表示した掘削パス

2.3 「操作部」における操作信号の送信方法

制御部において、操作信号は「レバーの操作量」として生成される。生成された操作信号を「ロボQS」に送信するため、自動化システム専用のラジコン送信機を作成した(図12)。



図 12. 自動操作ラジコン送信機

§3. 現場実験の実施

3.1 実験の概要

開発した自動化システムの有効性を評価するため、造成土木現場において実証実験を実施した。実験場所として、26m x 31m 程の平坦な地盤上に、高さ1mの盛土を作成した。実験場所の俯瞰図を図13に示す。バックホウは盛土の上に設置し、地盤面上に盛られた土砂(図中A地点)を、同じく地盤面上に配置したキャリアダンプに積み込む作業を行った。積込時、盛土上に設置したバックホウ、及びキャリアダンプの位置関係を図14に示す。キャリアダンプのベッセル上に土砂が一杯になった場合は一旦動作を停止し、土砂を盛土の反対側(図中B地点)に下ろした後再び積込を行い、A地点の全ての土砂を積込完了した後にバックホウを移動させ、B地点の土砂を積み込む、という動作を繰り返し行った。なお、安全性確保の観点から、キャリアダンプには操作時以外オペレーターは搭乗せず無人の状態とし、バックホウの移動操作はラジコンによる手動操作にて行った。実験において、自動化システムの作業効率、及び連続稼働時における可用性について確認した。

3.2 実験結果

(1) 作業効率

バックホウをオペレーターが手動で遠隔操作した場合の作業効率に関して、搭乗での操作と比較して約1.7倍程度の時間を要することが報告されている⁴⁾。今回の実験において、自動化システムを用いた場合、2倍以上の時間を要することが明らかとなった。作業効率が手動での遠隔操作に及ばない要因として、1回転あたりの積込量が少ないことが大きく影響している。この原因として、手動での操作の場合、バケットが一杯になるよう複数回掘削動作を行ってから旋回動作に入るのに対し、自動化システムでは1回の掘削後、バケットに入った土の量に関わらず、必ず旋回、積込操作を行う仕様となっていることが挙げられる。改善策としては、バケット内の土量をLiDARのデータから判定して複数回の掘削を可能にすることや、パス生成時により掘削量の多いパスを生成可能とすることが考えられる。

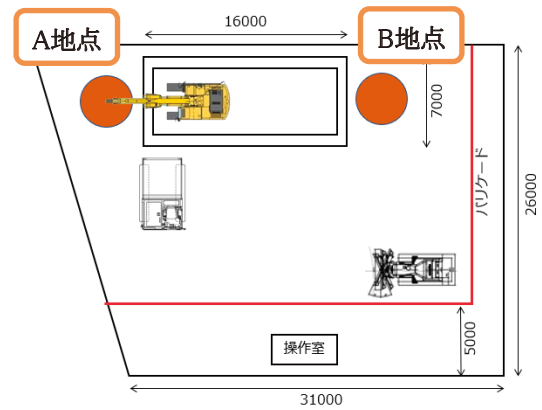


図 13. 実験フィールド俯瞰図



図 14. 積込作業の様子

(2) 可用性

実験中、ハードウェア、もしくはソフトウェアの異常が原因となり、システムが停止する場面があった。発生した事象とその原因を表1に示す。ハードウェアに関する異常はロボQSによるものがほとんどであった。オペレーターが手動で操作している場合は、エラー発生時にリモコン操作によってエラー解除を行ったうえで操作を継続することが可能であるため問題となることはないが、自動化システムにおいてはプログラムの再実行が必要となる。ロボQSのエラー自体を無くすことは困難であるため、システム側でエラー内容を判断した上で自動的に解除する、もしくは手動で解除後に動作を継続可能とする機能の実装が必要である。ソフトウェアに起因する要因としては、掘削パスが正しく生成されないケースがその大半を占めた。繰り返し掘削を行った際、掘削対象

表 1. 実験中に発生した主なシステム停止要因

種別	発生した事象	事象の内容、原因
ハード	ロボQSの通信エラー	何らかの原因により通信が途絶。詳細な原因は不明。
	ロボQSのハード異常	アクチュエーターに必要以上の負荷がかかる等して停止。
ソフト	掘削パスの生成不良	土が存在しない場所を掘削するパスや、追従不可能なパスが生成される。掘削済みの領域がLiDARの死角となった際に、土が有るものと判断されていた。
	ダンプの誤検知	ダンプの向きやバックホウからの距離によって正しく認識できないケースが発生。

領域の地表面の凹凸が大きくなり、LiDARの死角となる領域が発生する場合があります、パス生成時に死角を十分に考慮できていなかったことが主な原因であった。

§4. まとめ 今後の展望

本稿は、当社の持つ後付け型の重機遠隔操縦装置である「ロボQS」の操作を、各種のセンサーによって認識した機体の状態、及び周辺環境の情報に応じて自動的に行うシステムの開発に関して記述した。また、実際の建設現場において積込作業の実証実験を行った結果について報告した。今回の実証実験において、実際の建設現場における現時点での作業効率、及びシステムの可用性を確認するとともに、改善すべき点が明らかとなった。

今後の展望として、より多様な環境に適応可能な掘削パス生成アルゴリズムを作成し可用性の向上を図ること、土の物理挙動を考慮した掘削操作を行うことで掘削効率を向上すること等が挙げられる。

謝辞

本システムの開発にあたり、株式会社DeepXIには多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

商標

本文中に記載されている会社名・商品名等は各社の商標および登録商標です。

- ロボQSは平成29年 国土交通省九州地方整備局九州技術事務所・(株)IHIと共同で開発しました。
- Horizonは、LIVOX社の登録商標です。

参考文献

- 1) 「i-Construction」,国土交通省
<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- 2) 「ICT建設機械による施工について」, 国土交通省 2016年8月
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000654178.pdf
- 3) 日刊 建設工業新聞 2021年3月5日1面
- 4) 茂木正晴、油田信一、藤野健一:油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案、建設機械施工、Vol.66、No.8、pp.71~79、2014
- 5) Livox社Horizon
<https://www.livoxtech.com/jp/horizon>
- 6) コーンズテクノロジー VECTORNAV社NV-300
https://www.comestech.co.jp/tech/products/products_vn_300/

ひとこと

自動化の可能性を確認すると共に、課題が明らかになった。今後も検証を進めていき、現場の生産性向上に貢献したい。



伏見 光