

建設機械の改造が不要で着脱可能な装置による 無人化施工技術の開発

熊本城崩落石撤去へ汎用遠隔操縦装置「サロゲート」の適用事例

森 直 樹・古 屋 弘・宮 内 賢 治

建設分野でのロボット化は、危険作業の代替や調査点検などを目的として開発され、近年無人化施工機は一般的になり、その他多くのロボットが開発されている。筆者らはこれらのロボットのの一つとして、主に災害対応を目的とした、既存の建設機械に大きな改造を施すことなく容易に装着可能な汎用遠隔操縦装置「サロゲート」（以下「本装置」という）を開発し、熊本城飯田丸五階櫓石垣復旧工事にて崩落石の回収に適用した。本報では、この開発概要と適用事例に関して報告する。

キーワード：無人化施工，遠隔操縦，建設ロボット，震災復興，石垣復旧

1. はじめに

近年、①社会インフラの老朽化の進行、②地震・風水害等の災害への備え、③人口減少・少子高齢化を背景に、建設分野におけるロボット化によって、社会インフラの維持管理の合理化、および災害対応の効果・効率を格段に高めることが期待されている。特に、①に示した社会インフラの老朽化に対する調査点検は、その重要性が再認識され、新しい調査点検手法が幾つか提案されており、調査点検用ロボットの開発提案もなされている¹⁾。これらの開発技術は、調査点検など高齢化や減少が進む技能工の代替であるが、建設ロボットは②に示した災害復旧に代表される危険作業の代替としての「無人化施工」が出发点であり、長年数多くの現場で活躍している^{2), 3)}。この「無人化施工」では、遠隔操縦専用の建機を用いるか装置を後付けする方法でシステム構築を行う事になるが、無人化施工機器自体が少ないことやコストが高いことから調達が課題となっている。

そこで筆者らは、既存の建設機械に大きな改造を施すことなく容易に装着可能な汎用遠隔操縦装置本装置を大裕株と共同開発した。本装置は軽量かつコンパクトであり、建設機械の運転席に容易に後付けできるようなことで、機種間の汎用性を向上させるとともに、装置を装着したままで遠隔操縦から搭乗操縦に容易に切り替えられることも特徴である。

本報告では、この開発概要と実際の現場適用に関して報告する。

2. 開発の背景

建設分野におけるロボット化は、最近の i-Construction の取組みにより開発が進展し、今日さまざまな現場で活躍するに至っているが、特に近年は地震、豪雨、噴火災害など大規模災害が各地で発生し、それに対する対策に無人化施工が数多く適用されている。近年、我が国は不幸なことに、表—1に示すような数多くの自然災害にさらされ（1993年から2016年まで記載）、多くの被害を受けている。これらの災害復旧や社会インフラの再構築に無人化施工技術は大いに活躍している。しかし、国土交通省の地方整備局への無人化施工重機の配備やレンタル建機も増加しているとは言え、コストの増加や調達の難しさなどの課題が導入の妨げになっている。コストの増加に至る主な要因には、油圧システムへの大がかりな改造を要することが挙げられ、この点を解決できる安価で装着が容易な装置があれば、無人化施工機械の導入が推進されと考え本装置を開発することとした。開発のコンセプトは以下の通りである（写真—1～3参照）。

- ①建設機械に大規模な改造を施すことなく、運転席に容易に後付けできる
- ②装着する建設機械を問わず汎用的に取り付けが可能
- ③装置を取り付けたままでも迅速容易に遠隔操縦と搭乗操縦を切り替えられる
- ④装置の可搬性の向上と低コスト化

上記のうち③に関しては本装置の大きな特徴である。災害復旧現場のような危険な場所では遠隔操縦を、比較的安全な場所では作業効率に優れる搭乗操縦

表—1 近年の大規模災害（1993～2016）

年	大規模災害
1993	北海道南西沖地震（7月） 平成5年8月豪雨（鹿児島県）（8月）
1994	北海道東方沖地震（10月） 三陸はるか沖地震（12月）
1995	兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）（1月）
1997	鹿児島県出水市針原川土石流災害
1998	高知豪雨（9月）
1999	6.29 豪雨災害（福岡・中国地方）（6月）
2000	有珠山噴火（3月～） 三宅島噴火：全島避難（7月～） 東海豪雨（9月） 鳥取県西部地震（10月）
2003	宮城県北部地震（7月） 十勝沖地震（9月）
2004	新潟・福島豪雨／福井豪雨（7月） 新潟県中越地震（10月）
2006	平成18年豪雪（日本海側） 平成18年7月豪雨（九州・中部）（7月）
2007	能登半島地震（3月） 新潟県中越沖地震（7月） 福岡県西方沖地震（9月）
2008	岩手・宮城内陸地震（6月） 平成20年8月末豪雨（紀伊半島から関東）（8月）
2009	平成21年7月中国・九州北部豪雨（7月）
2010	西日本豪雨災害
2011	東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）（3月） 紀伊半島豪雨災害（9月）
2012	平成24年梅雨前線豪雨（九州から近畿）（7月） 三陸沖地震（12月） 平成24年豪雪（11月～平成25年3月）
2013	平成25年台風26号（大島土石流）（10月）
2014	伊豆大島近海地震（5月） 平成26年8月豪雨による広島市の土砂災害（8月） 御嶽山噴火（9月）
2015	箱根山で火山活動が活発化（5月） 鬼怒川の氾濫（9月）
2016	平成28年（2016年）熊本地震（4月） 平成28年台風第10号（8月）



写真—1 汎用遠隔操縦装置『本装置』の装着状況



写真—3 運搬時の状態



写真—2 装置の装着状況（操縦席）

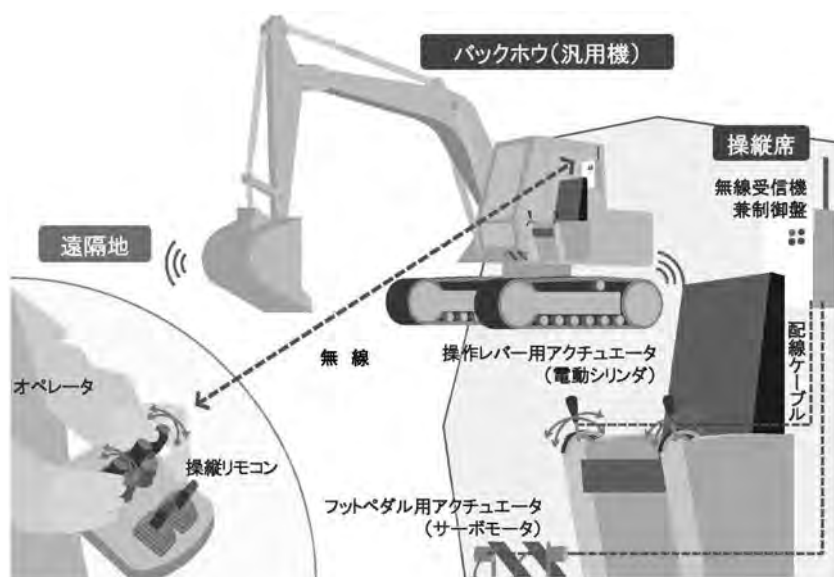
3. システム構成

本装置は、操作レバー用アクチュエータ、フットペダル用アクチュエータ、操縦リモコン、無線受信機兼制御盤で構成されており、2つのアクチュエータを例えば一般的なバックホウの操縦席に取付けることによって、安全な場所から遠隔操縦を行うことを可能とする。システムの概要を図—1に、諸元を表—2に示す。一般的な利用状況を写真—4に示す。

(1) 機器の取付けと可搬性

装置サイズを簡単に持ち運べるユニット（写真—3）に分割することで、容易に運搬と組み立てができる仕様である。また、建設機械操縦席への装着には、ボル

を選択できるため、作業環境に応じた柔軟な運用が可能となり、より多くの現場で利用する事を可能としている。



図一 本装置の概要

表一 2 使用機器の諸元

項 目	仕 様
操作レバー用アクチュエータ	電動シリンダ方式 重量 13 kg × 2 式
フットペダル用アクチュエータ	サーボモータ方式 重量 8 kg × 2 式
無線方式	特定小電力無線 (429 MHz)
遠隔操縦距離	100 m (無線の使用環境による)



写真一 4 本装置の利用状況



写真一 5 操作レバー側アクチュエータ

ト締めおよび配線ケーブルの接続のみであり、特殊な工具や技能は不要で、さらに取り付け金具を変更することで、様々なメーカーや機種への装着を可能とした。

(2) 各アクチュエータの解説

操作レバー用アクチュエータ (写真一 5) は、操作レバーと直交する 2 本のガイドレールにて挟むようにして装着し、これが全方向の操作を可能とする機構とした。オペレータが遠隔操縦用リモコンで入力した操作は、電動シリンダから操作レバーを介して建設機械に伝達されることとなる。2 本のガイドレールは円弧状となっており、オペレータの手の動きと同様に三次

元的な動きを再現することで操作性の向上を図っている。この機構により、操作レバーに入力情報を伝達する電動シリンダは、遠隔操縦するオペレータのリモコン入力に対して俊敏に反応する。さらに、リモコン入力に対する電動シリンダの操作量は、任意に動作特性を変更でき、オペレータ個々の好みに調整することも可能である。

クローラ走行操作に用いるフットペダル用アクチュエータ (写真一 6) は、フットペダルに装着したステー



写真—6 フットレバー側アクチュエータ

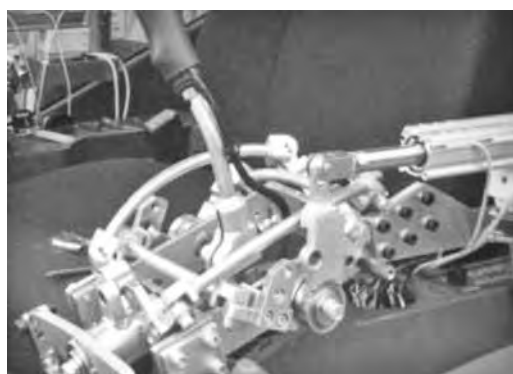
先端の内歯車を操縦席フロアに設置したサーボモータにより駆動させる。オペレータが操作用リモコンで入力した操作量は、フットペダルを介して建設機械に伝達される機構である。なお、フットペダル用アクチュエータは、泥等で汚れる恐れがあるため高い防水性と防塵性を確保している。

(3) 操縦方式の切り替え

従来の着脱可能な遠隔操縦装置では、遠隔操縦用ロボットがオペレータの操縦席を占有するため、即座に搭乗操縦に切替えることが難しいシステムである。本装置では、搭乗操縦と遠隔操縦の切り替えを操作レバーガイドのピン（写真—7、8）を着脱することの



写真—7 操作方法切り替え状況



写真—8 搭乗操作状態（動力伝達解放）

みで行えるため、搭乗操縦への変更が容易で、遠隔操縦と作業効率の高い搭乗操作を簡単に切り替えられ、様々な現場での対応を可能とした。装置の転換は約3分で切り替えが可能であり、切り替えによる作業時間の遅延は非常に少ないことも大きな特徴である。

(4) 安全対策

従来の無人化施工機は災害地等の特殊環境での使用に特化していたのに対し、本装置は一般工事などより多くの現場への適応を想定している。このため、遠隔操縦中の暴走防止等のフェールセーフ機能については、対象とする重機の電装系システムに直接介入して制御信号を入力し、操縦中の無線通信の断絶や機器故障による暴走を未然に防止することとした。

4. 熊本城崩落石撤去適用事例

平成28年4月に発生した熊本地震により損壊した熊本城のうち、飯田丸五階櫓の崩落石を回収する工事に本装置を適用した事例を紹介する。この現場の崩落石回収工事においては、今なお続く余震の影響により建屋や石垣のさらなる倒壊の可能性があるため、付近で人員を要する作業を行うことが困難であった。そこで、現場状況を勘案し本装置を使用して無人化施工による崩落石回収工事を行うことを検討し、実施することとした。

この工事は、損壊した熊本城のうち飯田丸五階櫓石垣の復旧工事であり、石垣の復旧と五階櫓建屋の解体を行う。写真—9、10に崩壊後の飯田丸五階櫓の状況を示す。石垣は25%程度崩壊しており、建築工事にて建屋を解体したのち石垣崩壊部分の解体、復旧に移行する。建屋に関しては、従前の工事にて設置した仮受構台により支持されているが、この仮受構台を存置したままでは建屋の解体作業が不可能であるため、解体時に建屋を下から支持する倒壊防止受構台に受け



写真—9 南面崩壊後全景（約21%崩落）



写真—10 東面崩壊後全景 (37% 崩落)

替える必要がある。そこで、倒壊防止受構台の設置に支障となる崩落石垣の回収を行う事となったが、安全の確保の点から建屋の下の作業に無人化施工を採用することとなった。

なお、回収対象となる崩落石は特別史跡内石垣の石材であるため、回収作業中に損傷させないように丁寧に扱うことが求められた。

本工事にて石回収の無人化を実現するにあたり、本装置に施した改造内容を以下に記す。

(1) ベースマシンの選定

本装置を搭載するベースマシンは、最大1t近くある石垣を撤去でき、かつ地震の影響で脆弱となった作業地盤の崩落リスク軽減のため、可能な限り重量の小さい機体とした。なお、アタッチメントについては、狭隘な作業場所において石垣を1つずつ確実に回収できるものとして、回転機構を備えた5本爪油圧グラップルを選定している。

- ・ベースマシン：0.5 m³ 級バックホウ解体機仕様
- ・アタッチメント：回転機構付5本爪油圧グラップル (写真—11)



写真—11 油圧グラップル

本装置は、実証試験の段階では通常のバックホウ(バケット)に搭載していたが、上記アタッチメントの操作においては回転(左右)、把持(開閉)の2系統4操作が加わるため、追加機能としてこれらを遠隔操縦に対応させる改造を行った。特殊仕様の解体機に遠隔操縦機は存在しないため、後付け可能な本装置が非常に有用であった。

(2) 各操作に対する個別応答性の設定

操作性の向上を図るために、ブーム、アーム、アタッチメント、旋回、アタッチメントの回転、掴みの各動作について個別にその応答性を設定できるようプログラムを追加した。これにより、オペレータの好みに合わせて各動作の応答速度を変更することを可能とした。さらに、現場納入前に実施した石掴み実証試験にてオペレータの操作感をヒアリングし、より崩落石を撤去しやすいスムーズな動作となるよう調整を行った。

(3) 崩落石損傷防止策としての把持力調整・緩衝材の取付け

把持力調整については、グラップルの掴み動作を制御する油圧ラインの上限圧力を設定する機能を設けて、強く把持したことによる崩落石の圧砕を未然に防止した(写真—12)。また、鋼製のグラップルにて崩落石を掴んで撤去する際、崩落石の表面を損傷させる可能性があるため、接触面保護として緩衝材を取付けた。

最も崩落石に接触する爪先端部は損耗したら直ちに取替える部品という位置づけで、交換が容易かつ市場性のあるゴムホースを採用した。ゴムホースの断面形状は円形であるため、ゴム自体の弾力および円形のホースが変形することによる弾力をもって崩落石を保



写真—12 緩衝材取付状況

護することが可能となる。なお、固定用の部材は耐久性を考慮し、ゴムより硬質でかつ崩落石を損傷させないウレタン樹脂を選定した。ウレタン部材に加工した座繰り孔にボルト・ナット類が収まるよう設計し、金属類が露出しないよう配慮した。

(4) 施工結果

上記の損傷防止対策を実施することにより、様々な大きさ、形状の崩落石について損傷させることなく回収を行うことができ、機械搬入等の準備工を経て、実作業日 22 日間で 466 個の崩落石およびすべての栗石の回収を遅滞なく完了することができた。結果として、無事故で当初予定から 4 日の工程短縮となった(写真—13)。



写真—13 崩落石回収状況

5. おわりに

建設においても、近年の IoT、AI など様々な新しい技術の適用と開発が試みられている。このような中で、無人化施工は成熟したロボット技術として社会貢献を果たしていると言える。工学的な観点から、適用する技術は、対象とするものの成果と費用対効果の両者を最適化する必要があり、コストは重要な検討項目となる。今回紹介した本装置「サロゲート」はこのような点をクリアする一つの提案技術である。機器のコスト低減や可搬性のさらなる向上など改良点は少なくないが、適用機会を増やし、さらに新しい技術も付加して技術をブラッシュアップさせたいと考える。

J C M A

《参考文献》

- 1) 災害調査技術の現場検証・評価の結果：次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会災害調査部会，2015.3.19
- 2) 建設無人化施工協会 技術委員会：無人化施工の推移と展望，建設の施工企画，2006.11
- 3) 猪原幸司他：災害復旧における遠隔操作式建設機械の現状と最新の工事事例，建設機械，2005.5

【筆者紹介】

森 直樹（もり なおき）
 ㈱大林組
 本社機械部
 担当課長



古屋 弘（ふるや ひろし）
 ㈱大林組
 技術研究所
 上級主席技師



宮内 賢治（みやうち けんじ）
 ㈱大林組
 大阪機械工場

