

# 自律制御型建設機械の開発

## T-iROBO-Breaker (ブレーカ搭載自律制御型割岩油圧ショベル)

片山三郎

従来の無人化施工は、建設機械のオペレータが建設機械及び機械周辺に設置された複数の動画カメラの映像を見ながら、絶えず操縦桿を操作する映像依存・ラジコン操作型である。この方式では操作の熟練度・カメラ車など複数の支援機械・動画伝送のための高速通信網などが必要であった。そこでこれらの問題を解決するため、建設機械に、人間の五感に代わるセンサ類を搭載し、機械自ら判断・作業する自律制御型の無人化施工システムを開発した。

本論では、ブレーカを搭載した0.45 m<sup>3</sup>級油圧ショベルの割岩作業自律化の手法の紹介、さらに本自律化システムの作業能率を検証している。検証は、10 mほど離れたφ1,000 mm程度の岩の割岩作業を、熟練度の異なるオペレータによる従来のラジコン型作業と、本システムによる作業を同条件で各々おこない、能率を比較している。なお本件は、平成24～26年度国土交通省建設技術研究開発助成制度に採択され、その助成金を活用しておこなったものである。

キーワード：無人化施工、自律制御、油圧ショベル、ステレオカメラ

### 1. 背景および目的

雲仙普賢岳の災害復旧工事に代表される無人化施工技術は当初、火山災害に関する災害復旧工事への適用が主流であった。しかし、近年では大雨による土砂災害、東京電力福島第一原子力発電所構内での作業など、人間が立ち入ることが危険な工事全般に使われ、適用範囲を拡大している。無人化施工技術は災害復旧に関する工事が多いため件数こそ少ないものの必要不可欠な技術である。また、いつ起こるかかわからない災害に対して十分な備えをしていく必要がある技術であるが、対応機械の確保やオペレータの育成といった課題を抱えているのも現状である。

このような現状でこれらの問題を解決する一つの手段として、作業開始命令のみを与えれば自ら判断して作業を行う常時操作不要の「自律制御」を適用した次世代型の無人化施工システムを開発した。本論は平成25年度に実証した振動ローラの自律走行に引き続き平成26年度に研究した油圧ショベルの割岩作業の自律制御の研究について述べる。

### 2. 無人化施工における割岩作業について

油圧ショベルは先端のアタッチメントを交換するこ

とで、多様な作業が可能となる大変便利な建設機械である。遠隔操作による無人化施工においても、アタッチメントを交換してコンクリート構造物の破碎・圧碎、鉄骨・配管等の切断はもちろん、緑化のための大型樹木の把持やロボットアームとして資材の移動等にも用いられている。しかしながら最も多い作業はバケットによる土砂の掘削であることから大半の運転者は、操作の正確性は高く要求されない。そのためこういった作業には短時間で適応できる傾向にあるが、一定の正確性を求められる作業においては苦手意識を持っているオペレータが多い。このような中、無人化施工において油圧ショベルの土砂の掘削・積込作業に次いで使用頻度の高い「ブレーカ」の割岩作業に注目した。ブレーカによる割岩作業は、除石工等で大型の岩石をダンプトラックに積込が可能なφ500 mm程度迄の小割に必要な作業である。写真1にブレーカによる割岩状況を示す。割岩は岩の中心辺りを目がけて垂直にブレーカを当て、油圧ショベルの重量を掛けて打撃しないと割れないばかりか、中心を外れた場合は打撃開始後に岩がバランスを失って逃げてしまったり、空撃ちや無理に押し当てて打撃を開始するとブレーカ本体が損傷するという事態も考えられるため、無人化施工の中でも厄介な作業にあたる。そういった厄介な作業を人間が判断して操作をするシステムか

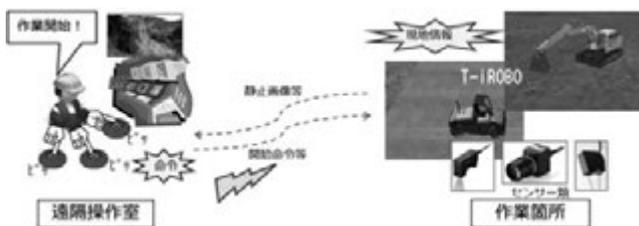


写真—1 割岩作業状況

ら、建設機械に搭載したセンサと演算により、人間が介在しないで実行できる事は無人化施工において画期的な事で、遠隔操作時のオペレータの負担軽減や熟練度不足対策、1人のオペレータで複数台の遠隔総操作も期待できる技術である。

### 3. 自律制御について

現行の無人化施工は、作業現場周辺に配置された複数台のカメラから送られてくる多角映像を見ながら常時、人間が操縦桿を握り遠隔操作をおこなう『常時操作型』の施工方法である。これに対して、『自律制御型』とは建設機械に人間の五感に代わるセンサ類を搭載することで、機械自らが周辺状況を把握して自律的に作業をおこなうことを可能にしたもので、人間の操作はスタートボタンを押すだけの「次世代無人化施工システム」である(図—1)。



図—1 次世代無人化施工システム

#### (1) 割岩作業における操作および自律制御アルゴリズム

本研究開発においては、0.45 m<sup>3</sup> 級油圧ショベルにおいて10 m 程度離れた場所から割岩対象の岩塊(以下、岩塊と記)を決定し、機械の作業可能範囲に入るまで接近後、打撃位置にブレイカーを当て割岩作業を実施する。これを自律制御によって図—2に示す4ステップによって実施している。また、これらのステップに移るまでの操作方法は建設機械に搭載したカメラからホスト PC 上に送られてくる静止画像上で、破碎



Step1 対象物までの距離検出



Step2 対象物までの自律走行

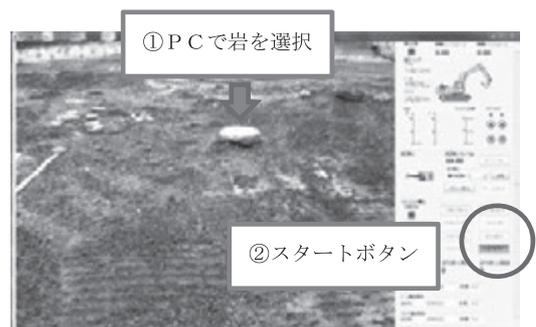


Step3 打撃位置の決定



Step4 割岩作業と割岩判定

図—2 自律制御フロー

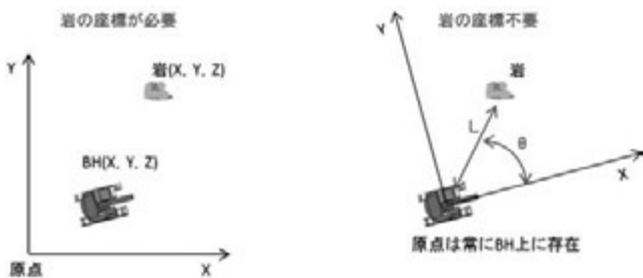


図—3 ホスト PC 操作イメージ

したい岩を選択し、スタートボタンを押すだけである。図一3にホストPCの操作イメージを示す。

(2) 相対座標制御方式の採用

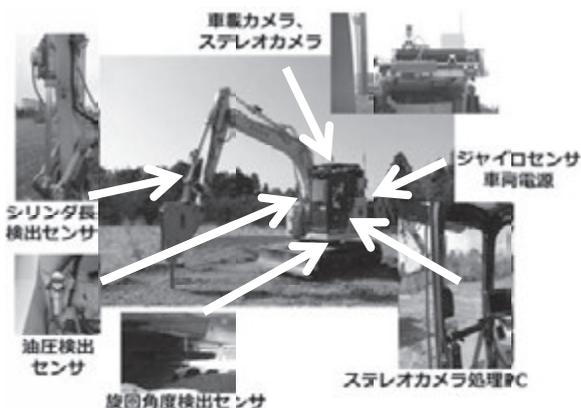
建設機械の制御技術の代表であるマシンガイダンスやマシンコントロール技術では、建設機械にGNSSを搭載し、自己位置と設計座標とを比較することで機械を制御する絶対座標制御を用いていることが一般的である。しかし除石工事のように災害で発生した岩は、設計データを持たないため、GNSSで建設機械の自己位置を把握しても、何らかの手段で岩の位置座標を入力しなければ座標制御できない。一方、人間が運転して割岩作業する場合、主に視覚情報を使って岩との大まかな距離と方向を認識しながら岩に近づき、打撃点に向けてマニピュレータを操作し作業する。このように我々人間が作業をおこなうとき通常、目で物を捉え自己位置と対象物との相対関係で作業をおこな



図一4 座標制御イメージ (左: 絶対座標, 右: 相対座標)

表一 搭載センサー一覧

分類	項目	適用センサー
機体状態	姿勢検出	MEMS3軸ジャイロ
	マニピュレータ位置検出	シリンダ長検出センサ
	旋回角検出	角度センサ
	割岩判定	油圧検出センサ
周辺状況	岩認識	ステレオカメラ
	車載カメラ	ネットワーク型カメラ



図一5 油圧ショベルへのセンサ搭載状況

う。これと同じ考え方を機械制御に取り入れるため、本件では絶対座標制御のツールであるGNSSではなく、主センサとして人間の目の代わりにステレオカメラを用いることで、建設機械と岩との相対関係の把握により割岩作業を実現する相対座標制御を採用した(図一4)。

(3) 搭載センサについて

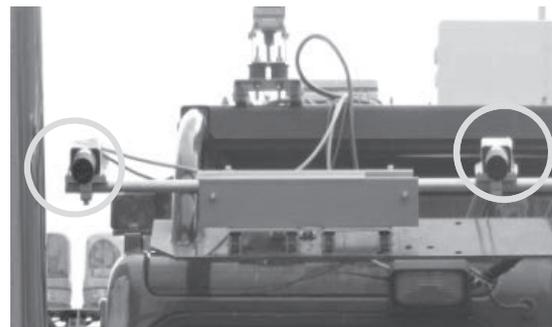
ベースマシンである油圧ショベルを制御して割岩作業を実現するために搭載したセンサー一覧を表一に、搭載状況を図一5に示す。センサは大きく2つに分類され、機械の姿勢やマニピュレータの位置を把握する機体状態把握センサと岩の位置等周辺状況を把握するセンサに分類できる。本自律制御は岩の位置をステレオカメラで検出することで機械と岩との相対位置を把握し、この岩認識を自動追尾しながら移動し、マニピュレータの届く作業範囲に達したら割岩作業を実施する。

(a) ステレオカメラによる岩認識

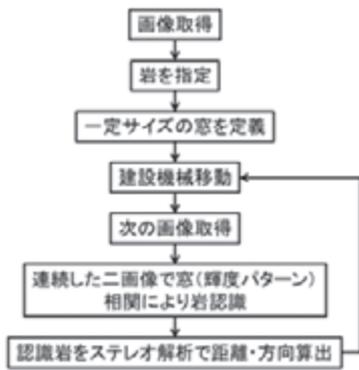
岩の認識センサとして使用したステレオカメラは2台のカメラを使って対象物を異なる方向から撮影し、「視差」を利用して平面情報を立体化する技術である。近年では乗用車の追突防止用の距離検出センサとして活用されている。図一6にステレオカメラ搭載状況を示す。今回このステレオカメラを利用して岩の認識をおこない、油圧ショベルと岩までの距離・方向の把握と岩の打撃点検出をおこなった。この時、岩までの距離・方向の把握と岩の打撃点の把握は各々独自のアルゴリズムでおこなっている。

① 距離・方向の検出アルゴリズム

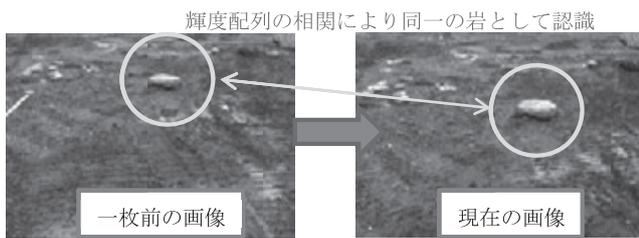
岩を選択した後、建設機械が岩に近づいていく時、対象の岩を自動追尾しながらリアルタイムに距離・方向を計算する。当然、この時建設機械が岩に近づくに従って、ステレオカメラの画像上の岩の映り方は変わるため、この常に変わる二次元の画像から同一岩として認識する手法が必要となる。そこで建設機械の移動



図一6 ステレオカメラ搭載状況



図一七 岩認識から距離・方向検出までのフロー



図一八 自動追尾イメージ

に伴う連続二画像データで岩の輝度パターンの相関を取ることで二画像間で映る岩を、同一の岩として認識することを実現している。そして認識した岩をステレオ解析し距離と方向を算出している。図一七に岩認識から距離・方向検出までのフローを、図一八に自動追尾における連続二画像イメージを示す。なお今回ステレオカメラによる画像の撮像は 10 fps でおこない、設置する二台のカメラ配置は精度検証した結果、最も精度の高かった基線長 750 mm と 22.5 度とした。

②打撃点算出アルゴリズム

通常作業における割岩作業時にブレイカ先端を当てる位置について、ベテランオペレータにヒアリングした結果、「岩塊の中心を狙う」というのが最も多い回答であった。理由は

- 1) 中心以外の他の部分を打撃しようとする、岩塊が回転して打撃ができなくなる。

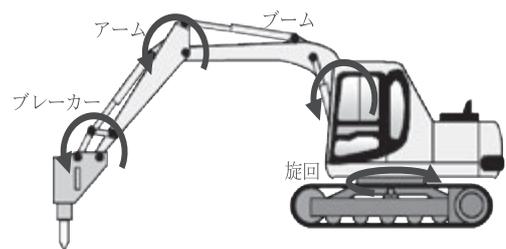
2) 中心付近を狙った方が小割の回数が減る。という回答であった。このようなベテランオペレータの作業方法を自律制御に反映し、打撃点を岩の中心とした。

これらを反映した岩の中心を演算するアルゴリズムはステレオカメラで得られる点群データの分布と、建設機械のカメラ設置位置を勘案して、一定高さ以上の点群データは除外し残った点群データから最小二乗法により想定地盤の平面方程式を定義する。この定義した地盤の平面方程式より、上方にある点群データと自動追尾している点周辺の点群の和集合を対象岩として認識する。この認識した岩の点群データを用いて岩塊の中心を演算し、その点の直上の岩表面の点を打撃点としている。図一九に打撃点算出までのステップを示す。

(b) 割岩動作

割岩するためにステレオカメラで打撃点を算出した後は、油圧ショベルの旋回、ブーム、アーム、ブレイカの4つの関節を(図一十)制御することでブレイカを打撃点(x, y, z)までアクチュエータ制御をする。

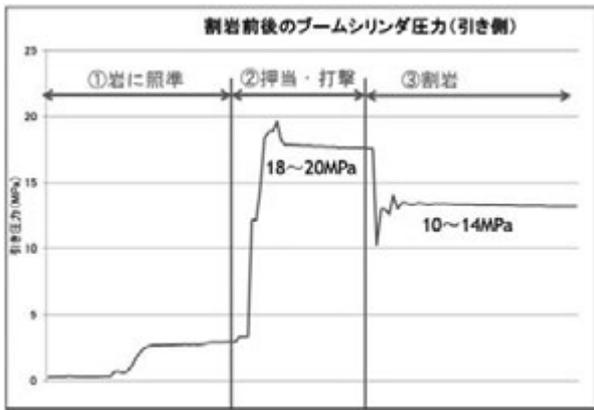
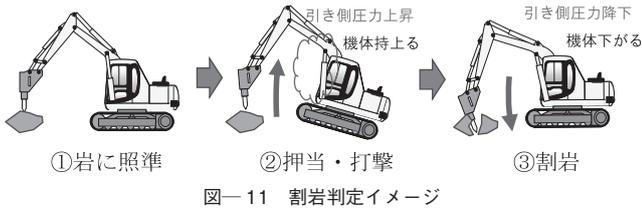
ブレイカを打撃位置に移動させた後、通常作業においても実施するように、機体重量が岩に掛かるように、機体が浮き上がるまでブレイカを岩に当てながら地面に向けて押し当てる。この動作によりブームシリンダに掛かる油圧が上昇するため、この油圧の上昇で割岩作業体勢の判断をし、油圧低下を検知すれば割岩完了判定することができる。図一十一に割岩判定イメージを、図一十二にブームシリンダの圧力変動を示す。



図一十 油圧ショベルの制御関節

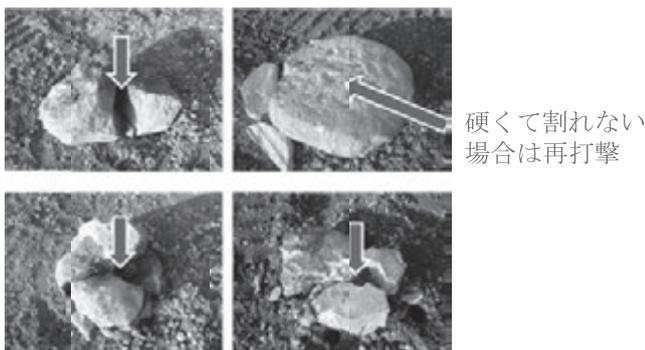


図一九 打撃点算出ステップ (左: イメージ図, 右: フロー図)



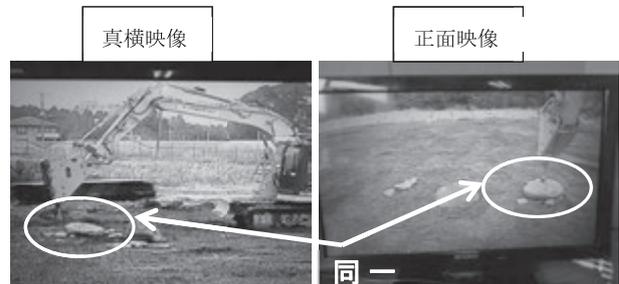
(4) 自律制御による割岩状況

写真一 2 に自律制御による割岩時の状況、図一 13 に破碎した岩を示す。図一 13 に示すように概ね岩の中心を捉えて破碎作業をおこなっていることがわかる。また本システムは一定時間打撃を加えて岩が硬くて割れない場合は一度打撃を止め、打撃点を再算出して再び打撃作業をおこなう。



4. 従来無人化施工との比較

従来の無人化施工では、作業機械に搭載したオペレータ目線のカメラ映像と作業場所が俯瞰できる数台のカメラ映像によって作業をおこなっている。しかしながら狭隘な場所や立地・地形等の条件によっては作業場所を俯瞰できる位置に移動式カメラ車が配置できない現場もあり、作業機械の車載カメラのみでは「奥行」が把握しにくいいため、作業効率が上がらないというケースもしばしば存在する。図一 14 は同一の状況を別の角度から見た映像であるが、正面からの映像だけでは奥行が判断できないことがわかる。こういった状況において、操作命令のみで一定の作業を実施できる本研究の利用が期待できる。



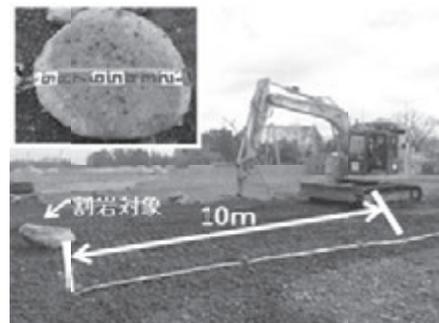
(1) 従来無人化施工との比較実験

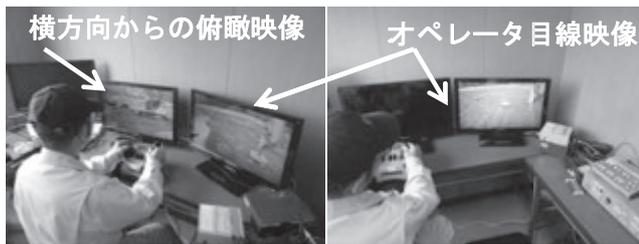
遠隔操作型の 0.45 m<sup>3</sup> 級油圧ショベルには本研究開発の自律化アルゴリズムを組込んである。

まず、通常のラジコンモードで

- ①無人化施工経験 20 年のベテランオペレータ
- ②一般施工経験 20 年の一般オペレータ
- ③本研究開発に従事した研究員

以上の三者にて自機から 10 m の位置に配置したφ 1,000 mm 程度の岩塊の割岩作業を、モニタのみを見て遠隔操作する作業時間を比較する実験をした(図一 15)。なお、時間はノミを岩塊に押し当てる「割岩体勢」としており、エンジン回転数は「低速」という条件とし、





図一 16 遠隔操作状況 (左: 2画面, 右: 1画面)

カメラ条件は下記の2パターンでおこなった(図一 16)。

- ①俯瞰映像と車載カメラの2画面
- ②俯瞰映像が無い車載カメラのみの1画面

これらの結果と自律制御でおこなった場合における作業時間のまとめを表一 2 に示す。

表一 2 実験結果

	ベテラン OP	一般Op	研究員	自律制御
2画面利用 【車載+横俯瞰】	35~45秒	40~50秒	50~60秒	
1画面のみ 【車載のみ、自律制御比較】	40~50秒	50~60秒	70~80秒	32~48秒

(2) 実験結果

表一 2 に各実験条件での所要時間を記してある。

その結果から、従来の無人化施工方式で実施した場合は、経験の差が如実に出る結果となっている。研究員はともかく、一般施工経験 20 年のオペレータといえども、無人化施工経験オペレータと差が付く結果となっており、遠隔操作が誰もが簡単に実施できるものではないという事を証明する結果になっている。

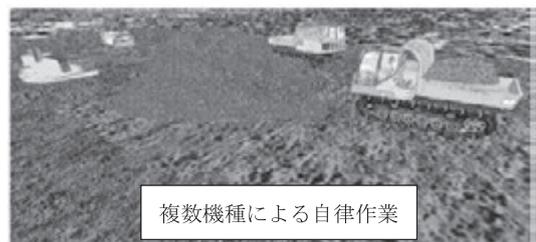
本研究開発である自律制御式と比較したいのが、俯瞰映像が無い車載カメラのみで作業した場合である。これも、経験の差の順に時間がかかっている事と、俯瞰画面が無いことによる奥行感の不透明さが各オペレータの作業効率を低下させている事がわかる。それらに対し、自律制御式は2画面使用時のベテランオペレータと同等の作業時間となっており、遠隔操作オペレータが確保できない現場において無人化施工をおこなうとき、支援する技術として本システムが期待ができるものであることが証明された。

本実験では、ベテランオペレータでさえ、1回でノミを岩に押し当てる事ができないという事も発生しており、俯瞰映像の重要性を改めて確認する事となったが、逆に俯瞰映像用機器が無くても、自律制御を用いればここまでできるという可能性を示すものとなっ

た。ベテランオペレータの作業時間は、今後の割岩自律制御の性能向上の指標としたい。また、自律制御された場合はノミを正確に岩塊の中心に当て、地面に向かって垂直に捉えているが、オペレータ操作の場合の正確さについては、本実験では定量的には測定していなかったが、恐らく自律制御の場合と比較してばらつきがあったようである。

5. おわりに

本技術は冒頭でも触れたように、従来の無人化施工技術を進化させた技術であり、オペレータ支援への可能性だけでなく、熟練工不足への対応としても期待が持てる技術である。また無人化施工技術は、雲仙普賢岳等でおこなってきた除石工・砂防堰堤構築等の土木工事の施工技術だけではなく、人間にとって苦渋な作業や、酷所環境における作業技術として多用され、改良・発展していくことが期待されている。本技術はこういったニーズに答えるために必要な技術であると考えている。今後は今回の様な単一作業の自律化で終わらず、複合作業の自律制御機械での協調作業により単工種を自律化することで従来技術を発展させた『次世代無人化施工システム』として技術の確立を目指していく(図一 17)。



図一 17 単工種の自律化イメージ

謝 辞

本技術開発にあたり技術的な支援を頂いております産官学委員会メンバーに感謝の意を表します。



《参考文献》

- 1) 宮崎裕道・青木浩章・片山三郎: 次世代無人化施工システムの開発—自律制御による割岩作業—, 第 15 回建設ロボットシンポジウム, 2015.

【筆者紹介】

片山 三郎 (かたやま さぶろう)  
大成建設(株)  
技術センター 土木技術開発部 先端技術開発室  
課長代理

