

5. ジャイアントブレイカ搭載油圧ショベルの自律割岩作業の実証

一次世代無人化施工システムの開発

大成建設株式会社技術センター
大成建設株式会社関西支店栗平地区砂防堰堤他工事
大成建設株式会社技術センター

宮崎 裕道
青木 浩章
〇片山 三郎

1. はじめに

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が、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。また火山災害など大規模災害だけでなく、無人化施工の最大の特徴である安全の確保という観点から小規模な土砂災害においても適用され、ごく短期間で施工する事例も出てきている。この様に工事件数こそ一般工事と比較して圧倒的に少ない無人化施工ではあるが、なくてはならない技術の一つであると言える。しかしながら無人化施工は自然災害に端を発する場合が多く、いつどこで必要か予測することは困難で、対応機械の確保やオペレータの育成といったハード面の課題を抱えているのが現状である。このため必要な時に、対応機械や運転操作できるオペレータがいないといった事態が発生することがあり得る。

こういった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。なお本件は国土交通省の建設技術開発助成制度を活用し開発した技術である。

2. 自律型制御について

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(図-1)。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ー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-2)



図-1 無人化施工イメージ



図-2 次世代無人化施工システム

3. 自律割岩対応ブレイカ搭載油圧ショベル

3.1 搭載センサ

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-1に、搭載状況を図-3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。

表-1 搭載センサー一覧

分類	項目	適用センサ
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-3 油圧ショベルへのセンサ搭載状況

カメラの設置角度や基線長を今回の作業に適合させる必要があるため様々な実験（図-4）を行い、 0.45m^3 級油圧ショベルにおける $\phi 1000\text{mm}$ 程度の岩石に対する割岩作業の最適なステレオカメラの設置角度と基線長を求めた。実験は油圧ショベルキャビン上方にステレオカメラを設置し、模擬岩を使用して油圧ショベルとの距離とカメラの設置角・基線長との関係から好適な設置を選んだ。結果として設置角度 22.5° 、基線長を 750mm となった。



図-4 ステレオカメラ実験状況

3.2 ステレオカメラによる岩認識

自律制御する上で最重要な人間の五感部分である「視覚」情報の取得として、対物計測等に利用する距離画像センサであるステレオカメラを使用した。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-4 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の把握と岩の打撃点検出をおこなった。



図-4 ステレオカメラ搭載状況

(1) 距離検出

ステレオカメラ設置で重要視されるのは「基線長」である。これは設置する2台のカメラの間隔であり、この間隔が検出精度と検出範囲等を決定するための重要な要素となる。そこで、ステレオ

(2) 打撃点算出

通常作業における割岩作業時にブレー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」と言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出来なくなる。
- 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。ただし、明らかに中心以外に大きな層目や凹凸が有る場合は、中心以外でもそこを打撃するという回答も有った。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するため打撃位置算出方法としてステレオカメラで計測した点群データから中心位置を演算し、直上の岩塊表面を打撃位置とすることとした(図-5)。



図-5 打撃点算出イメージ

3.3 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、ブレーカの4つの関節を(図-6)制御することでブレーカを打撃点(x, y, z)まで移動制御する。

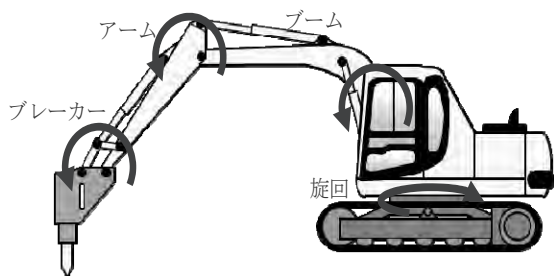


図-6 油圧ショベルの制御関節

ブレー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ーカを岩に当てながら地面に向けて更に圧接する。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制の判断をして、油圧変動を検知すれば割岩判定することができる。図-7に割岩判定イメージを図-8にブームシリンダの圧力変動を示す。



図-7 割岩判定イメージ

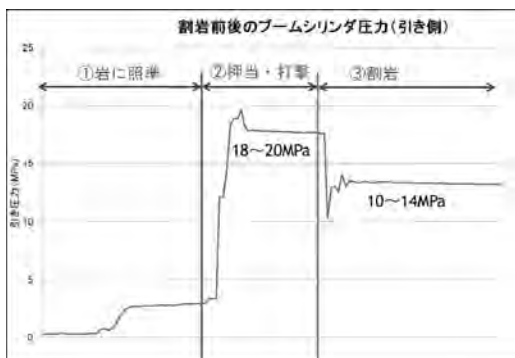


図-8 ブームシリンダの圧力変動

3.4 自律制御割岩フロー

本研究開発では、0.45m³級油圧ショベルにおいて前述までの個別動作を統合して、10m程度離れた場所から割岩対象の岩を決定し、機械の作業可能範囲に入るまで接近後、打撃位置にブレーカを圧接し割岩作業をする自律制御アルゴリズムとした。(図-9)なお一定時間で打撃しても岩が割れない場合は同一場所で打撃点を再計算し、打撃作業を継続できるようにした。図-10に自律制御により破碎した岩を示す。



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-9 自律制御割岩フロー



図-10 破碎した岩 (φ700~1000mm)

4. 従来無人化施工との比較実験

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行っている。しかしながら場所の狭隘さや立地や地形等の条件から作業場所を俯瞰できる位置に移動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-11 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。こういったとき、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。



図-11 遠近感の把握

4.1 実験条件

本研究開発のアルゴリズムを着脱式遠隔操作方式 0.45m³ 級油圧ショベルに適用し

- 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 10m の位置に設置した φ1,000mm 程度の割岩作業を、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-12)。なお、時間はノミを岩塊に圧接する「割岩体勢」迄としており、エンジン回転数は「低速」という条件とし、カメラ条件は下記の 2 パターンでおこなった。(図-13)

- 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行った場合における作業時間のまとめを表-2 に示す。



図-12 実験状況



図-13 遠隔操作状況 (左: 2画面, 右: 1画面)

表-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

4.2 まとめ

表-2 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た。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、無人化施工が如何に特殊な技量を必要とするかが明白となった。

一方、本研究開発の自律制御式と比較したのが、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ことと、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ことがわかる。それらに対し、自律制御式はベテランオペレータと同等の作業時間という結果が得られた。本実験では、俯瞰映像の重要性を改めて確認することとなったが、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出来るという可能性を示すものとなった。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、地面に対して垂直に捉えているようであったが、オペレータ操作の場合の正確さについては、本実験では評価の対象としていなかったが、恐らく自律制御の場合と比較してばらつきが有ったものと考ええる。

謝辞

最後に、本テーマを建設技術開発助成制度へ採択頂いた国土交通省様ならびに、本技術開発にあたり技術的な支援を頂きました産官学委員会メンバーの皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡部信也, “油圧ショベル大全”, 日本工業出版 pp112. 2007.
- 2) 村木広和, 田中成典, 古田均, “デジタル測量入門 POD 版”, 森北出版 pp43. 2012.