

油圧ショベルによる自律掘削と動作計画に関する研究

茂木正晴・山元 弘・大槻 崇・邵 輝・境田右軌

土木工事には、危険・苦渋作業がいまだに多く、作業環境を改善し、安全を確保することが課題となっている。また、今後の少子高齢化社会の進展により建設就業者の高齢化、若年者・熟練者の不足に備え着実に対処方策を講じておく必要がある。

そこで、ロボット等による IT 施工システムを実用化し、危険・苦渋作業の解消と作業の迅速化・効率化を目標として、その基礎技術の 1 つである油圧ショベルの自動制御技術に関する研究を行ったので報告する。

キーワード：油圧ショベル，自律化，IT 施工システム，動作計画，事象駆動型，軌跡追従型

1. はじめに

土木施工における危険・苦渋作業の解消や熟練者不足への対応として、基盤となるロボット技術 (RT) を中心とした要素技術に関する研究を進めているものである。

本研究では、油圧ショベルによる自動制御のための動作計画について、熟練オペレータに対して掘削作業における動作に関するヒアリング調査、そのヒアリング結果に基づく掘削作業効率を優先させた粗掘削と、出来形精度を優先させた仕上げ掘削の、2つの動作計画を構築した。これらの掘削作業については、粗掘削を事象駆動型の動作計画、仕上げ掘削を軌跡追従型の動作計画とし、自動制御のための動作計画とした。

これらの動作計画と掘削環境を 3次元で計測するシステムと組合せることにより、動作計画に基づく一連の掘削作業 (掘削～積込) について自律した自動制御が可能となった。

2. IT 施工システムの概要

IT 施工システムを搭載したプロトタイプの油圧ショベルは、施工状況の 3次元情報計測システム、IT 施工の操作システム、ロボット建設機械の自動制御システムの 3つのシステムから構成される

(1) 施工状況の 3次元情報計測システム

GPS、ジャイロ、レーザ等を利用し、掘削作業など

に伴い変化する地形の 3次元情報とベースマシンの自己位置、方位、傾きなどを計測し、リアルタイムに IT 施工の操作システムやロボット建設機械の自動制御システムに情報を提供するものである。

(2) IT 施工操作システム (マンマシンインターフェイス)

ベースマシンのオペレータ (遠隔操縦等) に、作業の目標と現況の 3次元情報と自機の位置などを提示して、作業を支援するシステムであり、自動制御時は監視支援システムとなる。

遠隔操作室内の IT 操作システムとベースマシンに搭載されている施工状況の 3次元情報計測システム、ロボット建設機械の自動制御システムの間は、様々なデータを無線で伝送している。実験で利用している無線伝送は、帯域により特定小電力無線 (429 MHz 帯)

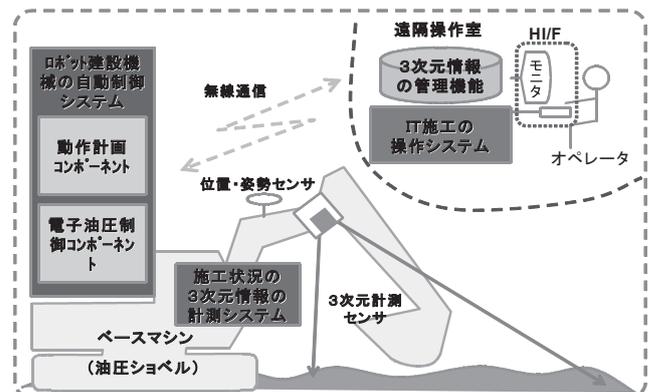


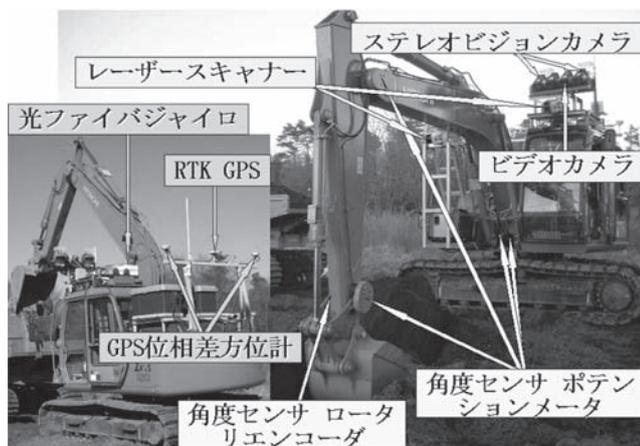
図-1 IT 施工システムの概要図

と無線 LAN (2.4GHz 帯) の 2 種類がある。

(3) ロボット建設機械の自動制御システム

遠隔でオペレータが作業位置などの簡単な作業指示を行うと、作業の目的（設計）と現況の 3 次元情報を基に、ベースマシンのバケット、アーム、ブーム等の油圧シリンダを自動制御し、掘削・積込・出来形計測の一連の繰り返し作業を自動化したシステムである。

ベースマシンは油圧ショベル 12 トン級（バケット容量 0.5 m³）であり、遠隔操作および PC 制御ができるように改造したものである。また、写真—1 に示す計測用の各種センサを取り付けている。



写真—1 各種センサ取付状況

3. プロトタイプによる実験と動作シナリオ

プロトタイプによる実験は、掘削とクローラダンプへの積込・放土作業を、遠隔操作および自動制御で行うものである。一連の施工作业は、設計の 3 次元情報（3D-CAD データ交換形式 DXF または国総研 XML 形式）に基づいて行われる。実験は、土木研究所内の屋外実験場（50 × 50 m）とし、掘削対象としては、実験場の既存土質（関東ローム）で実施した。

実験の動作シナリオは以下①～⑥までの作業を繰り返すように設定した。

なお、オペレータは、車載カメラの他、自動切替の複数の CG 画像を用いる。

- ①オペレータは、ベースマシンを遠隔操作で移動して、適切な位置（旋回中心から掘削箇所までが 7.5 m ～ 5.5 m に入る）に停止する。
- ②遠隔操作により、ベースマシンの上部旋回体を 360 deg 回転させ、レーザスキャナによって周辺の 3 次元情報を計測する。
- ③オペレータは、クローラダンプを遠隔操作で移動し

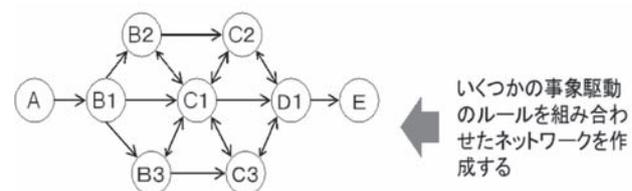
て、積込可能位置で停止する。

- ④ベースマシンを自動モードに切り替える。
- ⑤自動制御によりベースマシンは、掘削・積込を行う。作業が終わると自動的に遠隔操作状態に戻る。
- ⑥オペレータは、クローラダンプを遠隔操作して、放土する。

4. 事象駆動型動作計画

事象駆動型動作計画を、粗掘削用の動作計画として開発した。粗掘削では、作業速度、すなわち高い掘削効率求められる。制御をかけることによって細かい動作の補正が入ると、作業速度が低下してしまう。そのため、事象駆動型動作計画では、精度を求めずに、作業効率を向上させるために、Point-to-Point の指定による動作計画とした。

事象駆動型の動作計画は、ある事象が発生した時にある動作を駆動する動作計画である。いくつかの事象駆動のルールを組み合わせて、階層化したネットワークを作成することで、目的とする作業を実現する動作計画を作成した。図—2 にイメージを示す。○が状態、矢印が事象を示し、○状態 A ～ E の各状態に設定、選択され状況に応じて動作が切り替わる（B1 → B2, B1 → B3 のように）ことで、作業目的を達成することとした。



図—2 事象駆動ネットワークイメージ

(1) 事象駆動型動作計画の有用性

設計した事象駆動型動作計画は、検証実験を行い、おおむね良好なものであったが、想定していない条件での作業、例えば掘削時の掘削負荷が大きいなどの作業では、掘削が止まってしまう問題があった。

そこで、熟練オペレータによる掘削作業の操作計画実験の際に収集したデータを解析して、上述した問題を修正することを目指し、有用な掘削方法を探ることとした。

(2) 熟練オペレータの作業解析

実験は、熟練オペレータ 2 人に、それぞれ掘削に最

適だと判断する位置からの掘削（最適位置掘削）と、ブーム、アームおよびバケットを油圧ショベルの前方に最大限伸張した位置からの掘削（最遠位置掘削）の2ケースとし、幅はバケット幅、深さは1.2mと設定して行った。

掘削時における、アーム動作とバケット動作の関連を調べるために、ブーム-アーム角度（アーム角）とアーム-バケット角度（バケット角）の相関値を算出した（表-1、四回粗掘削の相関値）。各相関値の平均をとると、おおむね0.94以上であり、アームとバケットの動きには高い相関があることが確認できた。

また、掘削時における、掘削方向に対するバケットの姿勢を調べるために、バケット底面と掘削方向のなす角度を求めたグラフを作成した。例として1試行目

の1掘削目について、図-3および図-4を示す。

掘削開始時のバケット入射から、直線掘削への移行時に大きくなり、そこから掘削終了時までゆるやかに小さくなっており、バケット引上開始時にはほぼ0degになっている。すなわち、掘削開始時はバケット口側から掘削して徐々にバケットを抱えこむように動かしていることがわかる。これは、掘削開始時はバケットに多く土を入れるためにバケット口側から掘削し、バケットを引き上げる際にはできるだけ抵抗が少なくなるようにバケットを移動させるためであると推察できる。

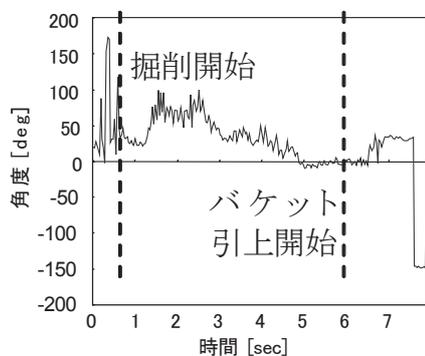
以上から、掘削時はアームとバケットの角度を協調して動作させ、バケットの姿勢は掘削の進捗に応じて徐々に抱え込むように動かしていることが判明した。これは、掘削の段階に応じてバケットの姿勢を変化させることで作業効率の向上を図っているものと推察できる。

表-1 アーム角とバケット角の相関値

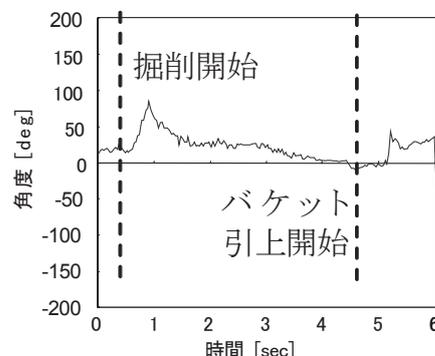
	最適位置掘削		最遠位置掘削	
	オペ A	オペ B	オペ A	オペ B
1 掘削目	0.955	0.988	0.969	0.938
2 掘削目	0.959	0.864	0.959	0.929
3 掘削目	0.964	0.995	0.953	0.963
4 掘削目	0.939	0.997	0.982	0.939
平均	0.95	0.96	0.97	0.94

(3) 事象駆動型動作計画の改良と評価

熟練オペレータの作業解析で得られたデータを用いて、事象駆動型動作計画を改良した。解析して得た目

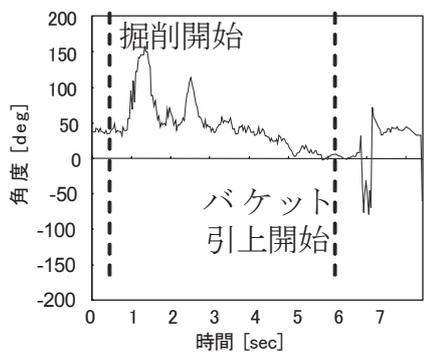


①最遠位置掘削

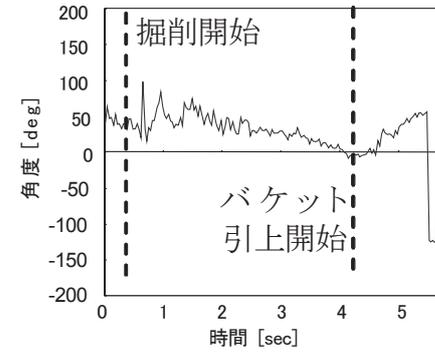


②最適位置掘削

図-3 掘削方向とバケット底面のなす角度（オペレータA）



①最遠位置掘削



②最適位置掘削

図-4 掘削方向とバケット底面のなす角度（オペレータB）

標値を、表-2にまとめた。掘削以外の作業においては、動作計画が良好に動作しているため、そのまま使用することとする。また、事象駆動ルールネットワークの掘削作業について、図-5のように改良した。

表-2 事象駆動型動作計画の目標値

項目	目標値
掘削開始時 バケツ接地角度	70deg
掘削時 掘削距離	4 m
掘削時 掘削深さ	0.250 m
引き上げ開始時 バケツ水平角	10deg

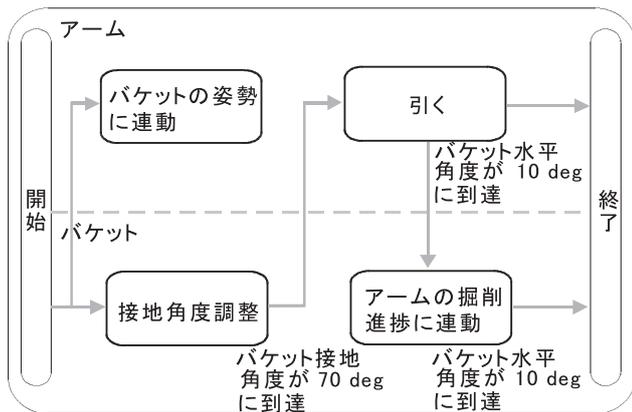


図-5 掘削作業時のルールネットワーク

この事象駆動型動作計画をベースマシンに実装し、実環境での掘削実験を実施して性能の検証を行った。実験条件は、ベースマシンの旋回中心より前方7mの位置から3mまでを、深さを0.25mずつ増加させながら3回掘削することとした。掘削幅はバケツ幅とした。

実験の結果、熟練オペレータの作業解析に基づく、事象駆動型動作計画により、繰り返し掘削を行い、掘削抵抗により作業が止まることもなく、おおむね良好といえる結果を確認した。

5. 軌跡追従型動作計画

掘削・積込作業の1サイクルに限定した動作計画を設計した。その成果に基づいて、連続掘削動作への対応、円滑な動作の実現、サイクルタイムの短縮を目的として軌跡追従型動作計画を作成した。さらに現況を計測する3次元計測システム等との連携から得られる3次元情報を利用した自律的な掘削・積込作業を計画した。

(1) 基本となる軌跡追従型動作計画

図-6に、実線は、掘削の基本となる台形軌跡であり、点線は目標溝の辺に沿って連続掘削設計のイメージ

である。予定掘削土量とバケツ容量により、斜面長さ w_1 、掘削長さ w_2 と深さ h を算出でき、連続掘削の台形軌跡を設定した。基本となる計画軌跡の設定にあたっては、熟練オペレータの操作計測データを参考とした。目標とする設計形状に応じて、掘削回数、掘削開始点、深さ、底面の距離および勾配を任意に設定可能とする。1サイクルの目標時間を短く設定したものを粗掘削、長く設定したものを仕上げ掘削として分けて設定し、作業効率の向上を図った。

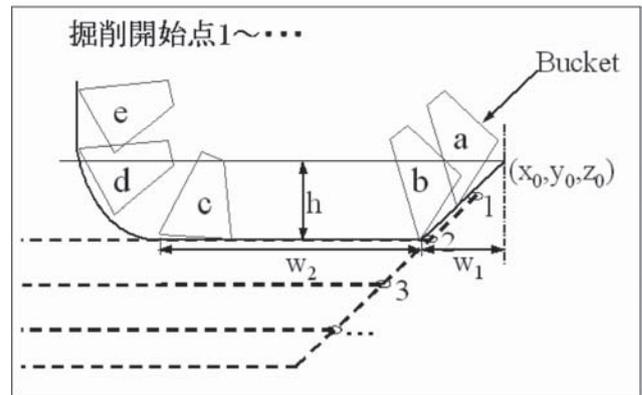


図-6 連続掘削イメージ

本研究では、斜面勾配 1:1.5、深さ 1 m、底面の距離 2 m を目標とした出来形設計 CAD 図面を利用した。この場合、出来形の土量は約 3 m^3 であり、掘削中にある程度ほぐれるものと考え、 3.5 m^3 程度となる。オペレータ操作データでは、バケツが掘削対象を通過する体積は、すくい取る量よりも多くなっており、効率よくほぐしなから満杯にすくい取っていることが想定される。1掘削の土量がバケツ容量 0.5 m^3 の 1.6 倍程度で満杯になると想定すると、粗掘削は満杯用に計画し、掘削回数は設計と地形情報により自動的に生成する。実際の自律掘削では、土の堅さにより毎回粗掘削の深さが設計より違いがあることから、そこで、毎回計画の掘削開始点、深さと長さを 3次元計測データにより調整することとした。

(2) 動作計画での3次元情報の活用

(a) 3次元情報の受信

自律掘削動作にともなう3次元情報は、以下の①~④作業の流れを繰り返し行うよう設定した。

一連の掘削積込作業の終了は、計測結果により判断され、終了後は遠隔操作状態に戻る。

①初期位置で自動制御に切替

設計(目標掘削形状)情報受信

②掘削方向へ旋回

掘削範囲の地表面現況形状情報受信

③掘削開始点へバケットを下げ、掘削・引上げ

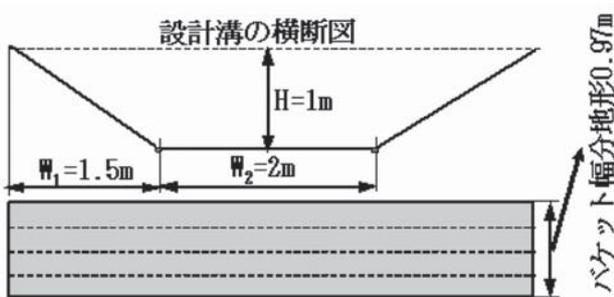
クローラダンプのベッセル情報受信

④クローラダンプ方向へ旋回、放土

設計情報受信

(b) 掘削軌跡での3次元情報の活用

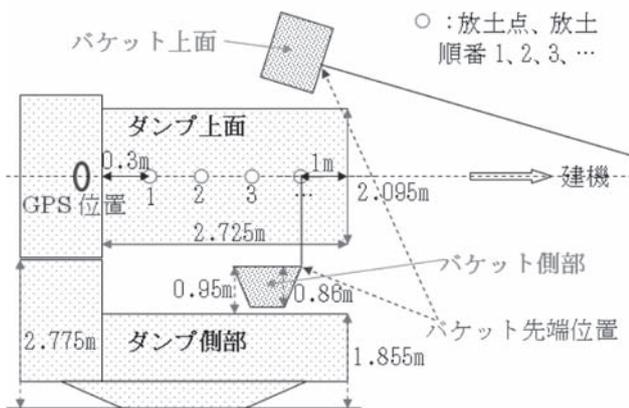
現況形状の3次元計測データは、粗掘削から仕上げ掘削へ、掘削終了の切り替え、および掘削開始点等を動的に判断するために用いている。計測データは、**図一七**に示すように、掘削溝の中心（バケット中心）の直線と左右0.2m等分に振り分けた1ラインずつの、計3直線を代表値として用いている。この計測データと、設計（目標掘削形状）の標高差を比較して判断を行うものとしている。



図一七 地形断面情報

(c) 放土軌跡での3次元情報の活用

放土前に受け取るクローラダンプの情報は、ベッセルの中心と、中心から左右0.5mの3直線をレーザスキャナで計測した高さである。受信したベッセル情報を現場座標系から建機座標系に変換して、**図一八**に示すようにダンプのベッセルの長さにより放土点1, 2...を算出する。なお、バケットとベッセルの接触を

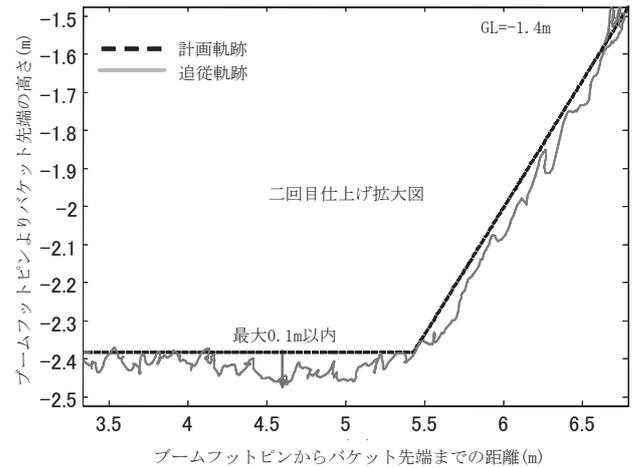


図一八 ダンプへの放土計画イメージ

確実に避けるように、ベッセルのあたり側より0.2～0.3mの安全距離と移動の余裕時間を設定した。

(3) 軌跡追従型動作計画の検証

検証実験の結果、現況地形と設計の掘削形を比較しながら、仕上げ掘削への切り替え、掘削終了を判断することや、状況により掘削位置を変更することを実験により検証した。**図一九**に計画した軌跡と、実際に動作したバケット先端の軌跡を示す。



図一九 掘削時の計画軌跡と実掘削軌跡 (例)

ここでは、ダンプへ安全・確実に放土するため、引上げ、旋回および積込放土動作の時間に余裕をみることで、粗掘削1サイクルを約30sec、仕上げ掘削1サイクルを約40secに設定した。

設計や現況地形の3次元情報を活用し、設計した台形軌跡により指定された掘削溝に関して粗掘削から仕上げ掘削までの自律連続動作を実証、実現することが



図一〇 一連の掘削作業状況

できた。また、粗掘削から仕上げ掘削までの掘削動作を検証した結果、0.1 m 以内の精度が確保できたことを確認した。また、クローラダンプへの自律積込作業を実現することができた。

6. 終わりに

本研究において、事象駆動型動作計画として熟練オペレータの作業解析に基づく動作計画の確認（作業効率は通常の作業と同等）、軌跡追従型動作計画として3次元計測システムとの連携による施工精度の向上（作業効率は同等）を図り、IT 施工システム全体としての有用性を検証した。

その結果、動作計画、掘削精度の確保（0.1 m 以内）を確認することができた。また設計や現況地形の3次元情報を活用し、状況に応じた動的対応可能な自律化掘削・積込作業を実現できた。

今後、多様な土質、掘削条件を想定した動作計画、クローラダンプへの積込情報を活用した、動的な自律計画を進めて行く必要がある。

最後に国土交通省、ロボット等によるIT 施工システム研究委員会（委員長：筑波大学油田教授）、東京大学人工物工学研究センター浅間研究室、建設無人化施工協会など多くの方々のご協力により本研究を進めることができたことを記し、謝意を申し上げます。

JCM A

【筆者紹介】



茂木 正晴（もてぎ まさはる）
（独）土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
主任研究員



山元 弘（やまもと ひろし）
（独）土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
主席研究員



大槻 崇（おおつき たかし）
（独）土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
研究員



邵 輝（しょう き）
（独）土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
専門研究員



境田 右軌（さかいだ ゆうき）
（独）理化学研究所
理研—東海ゴム人間共存ロボット連携センター
ロボット動作研究チーム

平成 20 年度版 建設機械等損料表

■内 容

- 国土交通省制定「建設機械等損料算定表」に基づいて編集
- 各機種の燃料消費量を掲載
- わかりやすい損料積算例や損料表の構成を解説
- 機械経費・機械損料に関係する通達類を掲載
- 各種建設機械の構造・特徴を図・写真で掲載
- 日本建設機械化協会発行「日本建設機械要覧」参照頁を掲載

■ B5 判 約 600 ページ

- 一般価格
7,700 円（本体 7,334 円）
- 会員価格（官公庁・学校関係含）
6,600 円（本体 6,286 円）
- 送料 沖縄県以外 600 円
沖縄県 450 円（但し県内に限る）
（複数お申込みの場合の送料は別途考慮）

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>