

油圧ショベルの自律掘削技術の開発

茂木正晴* 山元 弘** 大槻 崇*** 邵 輝****

1. はじめに

災害復旧現場等では危険・苦渋作業がいまだに多い。そこで、安全対策として災害復旧現場等に無人化施工技術（遠隔操作方式による施工や自律した施工技術）の研究開発が進められている。

本研究で対象とする建設機械は、諸工種に共通する土工などに用いられている汎用的で数の多い油圧ショベルであり、遠隔操作や自律化に関する技術開発について、過去にも取組まれてきたが、難易度と期待性能、費用、現場実態等から市場性が見えないことや、近年の不況などから民間での新技术開発が進んでいない状況にある。

一方、情報・通信・計測・制御技術の高速・高精度・安価化が昨今進んでおり、国土交通省総合技術開発プロジェクト「ロボット等による IT 施工システムの開発」（H15～H19）において建設機械（油圧ショベル）の基盤技術向上のため、情報技術（IT）・ロボット技術（RT）を活用した IT 施工システムを研究開発し、また、今後の見通しを含めた課題を明らかにすることを要請された。

本報告では、IT・RTを活用したIT施工システムによる油圧ショベルの自律掘削作業に関する研究開発の概要と技術開発によって得られた知見と今後の見通しを含めた課題について述べる。

2. 研究内容

本研究では、油圧ショベルにおける IT 施工システムの実用化を目的として、その基盤となる以下の要素技術の研究開発を行うとともに IT 施工システムのプロトタイプの開発を行った。

- 施工状況の 3 次元情報の計測システム
 - IT 施工操作システム (マンマシンインターフェイス)
 - 油圧ショベルの自動制御システム
- 図-1にIT施工システムの構成を示す。

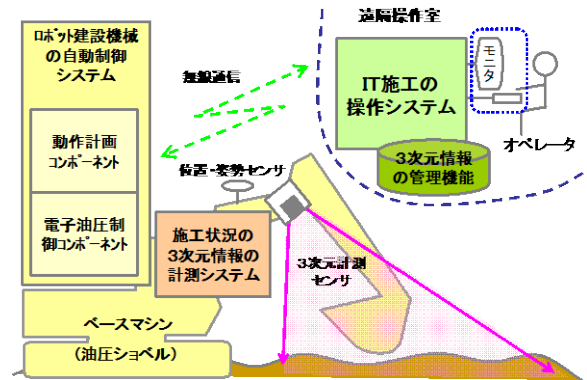


図-1 IT施工システムの概要図

2.1 施工状況の3次元情報の計測システム

油圧ショベルを自律作業させるためには、作業中に変化する地形の3次元情報を把握する必要がある。このため、揺動する油圧ショベルに設置したレーザスキャナなどの3次元計測器で3次元情報を計測・座標変換する技術開発が必要となる。開発した計測システムは、計測精度を目標5cm以内として開発を進め、通常の使用ではセンサ単体の最大誤差が累積せず、GPSにて正しい計測値となることを確認した。写真-1に示すように計測用の各種センサを取り付けている。

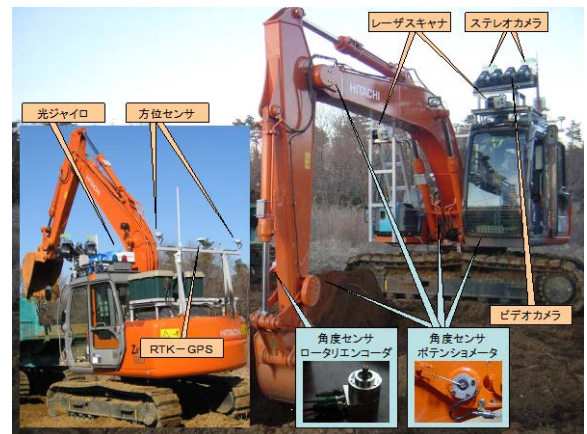


写真-1 3次元計測のための各種センサ取付状況

2.2 IT施工操作システム (マンマシンインターフェイス)

油圧ショベルを自律作業させるため、作業状況を計測、3次元情報として座標変換された情報を把握し、作業状況が設計データに対して適切であ

るかを確保する監視支援システムを開発した。

また、オペレータによる油圧ショベルの遠隔操作として必要となる、作業目標・現況の 3 次元情報・自機の位置などを提示して、作業を支援する IT 施工操作システムを開発した。

また、油圧ショベルに搭載している自動制御システムは遠隔操作室と、様々なデータを無線で伝送することから、実験で利用する無線伝送は、帯域により特定小電力無線（429MHz 帯）と無線 LAN（2.4GHz 帯）の 2 種類とした。

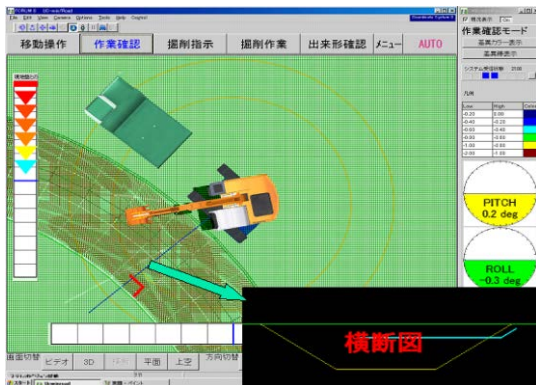


図-2 IT 施工操作システム

2.3 油圧ショベルの自動制御システム

自動制御システムは、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、油圧ショベルのバケット、アーム、ブーム等の油圧シリンダを自動制御し、掘削・積込・3 次元情報計測の一連の繰り返し作業を自動制御するシステムである。なお、使用する油圧ショベルは、12 トン級（バケット容量 0.5m³）であり、PC（パーソナルコンピュータ）による自律制御及び遠隔操作ができるように改造したものである。

3. プロトタイプによる実験・検証

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、遠隔操作及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 又は国総研 XML 形式）に基づいて行った。実験は、土木研究所内の屋外実験場（50×50m）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、オペレータは遠方監視室内にて、車載カメラ画像の他、自動切替される複数の CG 画像を用いて、操作・確認を行った。

- ①オペレータは、油圧ショベル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 7.5m～5.5m に入る）に停止させる。
- ②遠隔操作により、油圧ショベルの上部旋回体を 360° 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させる。
- ④油圧ショベルを自動モードに切り替える。
- ⑤自動制御により油圧ショベルは、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。

3.1 自動制御の基本となる動作計画

油圧ショベルによる自動制御のための基本となる動作計画は、掘削土量を多く設定し、掘削時間を短く設定することにより作業効率を優先させた粗掘削と掘削時間を長く設定することによって出来形精度を優先させた仕上げ掘削の 2 つの動作計画による構成とした。

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を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なものとなった。

図-3 で示すように、実線は、掘削の基本となる台形軌跡であり、点線は目標となる台形軌跡の辺に沿って掘削する設計のイメージである。台形軌跡の設定としては、予定掘削土量とバケット容量（斜面長さ w_1 、掘削長さ w_2 と深さ h を算出）によるものとした。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なものとした。

次に自動制御による掘削作業としての動作計画を構築するうえで、斜面勾配 1:1.5、深さ 1m、底面の幅 2m を目標とした出来形設計 CAD 図面を利用した。この際、出来形の土量は約 3m³ で

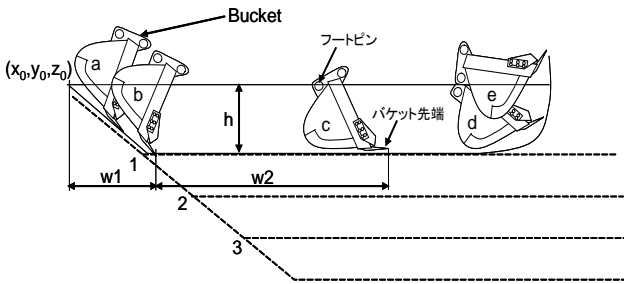


図-3 掘削のイメージ

あるが、掘削中にある程度ほぐれるものと考え、 3.5m^3 程度となる。なお、事前に掘削土量把握するうえで確認したオペレータによる操作データでは、バケットが掘削対象を通過する体積は、計算上ですくい取る量よりも多くなっており、ほぐされながらすくい取られていることが確認されている。また、事前の操作データより、1 掘削の土量がバケット容量 0.5m^3 の 1.6 倍程度で満杯になると想定し、粗掘削を計画した。掘削回数は設計と地形情報により自動的に生成するものとした。なお、実験での自律掘削において、土の堅さにより粗掘削の深さが実測と自動生成とに差異があったことから、毎計画時に掘削開始点、深さと長さを 3 次元計測データにより補正することとした。

3.2 自律掘削に伴う3次元情報の計測

(1) 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作業の流れに基づき計測を繰り返すように設定した。所定の掘削終了後は遠隔操作状態に戻るものとした。

- 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
クローラダンプ荷台部の情報受信
- ④ クローラダンプ方向へ旋回、放土
設計情報受信

(2) 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、掘削開始点を動的に判断、掘削開始、粗掘削から仕上げ掘削へ、掘削終了の切り替えをするために用いている。計測データは、図-4 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。

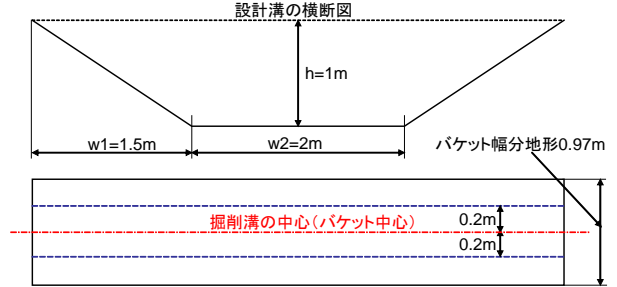


図-4 地形断面情報

3.3 放土に伴う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、ダンプ荷台の中心と、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。受信したダンプ荷台の情報を現場座標系から建機座標系に変換して、図-5 に示すようにダンプ荷台の長さにより放土点 1、2...を算出する。なお、バケットとダンプ荷台の接触を確実に避けるように、ダンプ荷台のあたり側より $0.2\sim 0.3\text{m}$ の安全距離と移動の余裕時間を設定した。

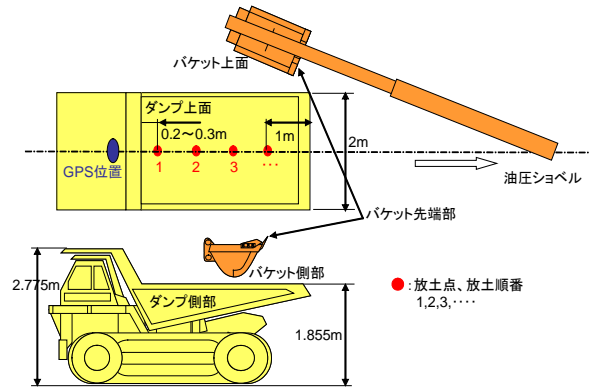


図-5 ダンプへの放土計画イメージ

3.4 実験・検証結果

現況地形と設計の掘削形を比較しながら、プロトタイプにより自律掘削を実験・検証した。実験・検証に当たっては、ダンプへ安全・確実に放土するため、引上げ、旋回及び積込放土動作の時間に余裕を見ることとして、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。写真-2 に一連の掘削作業状況を示す。

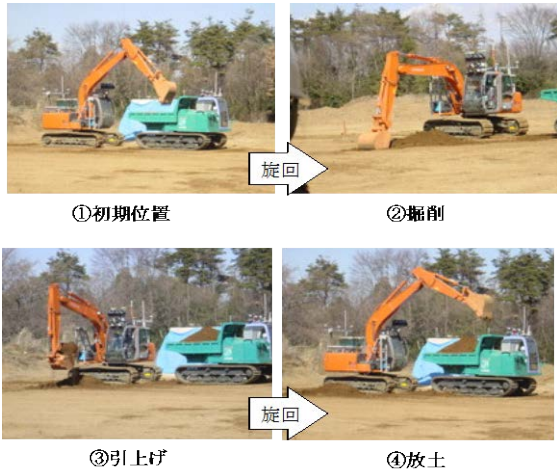


写真-2 一連の掘削作業状況

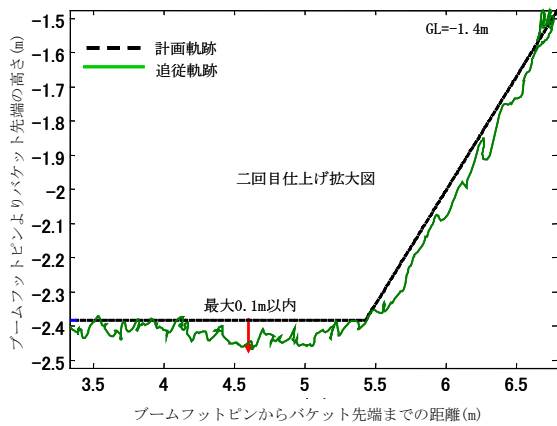


図-6 掘削時の計画軌跡と実掘削軌跡 (例)

実験・検証結果として、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、実現することが出来た。

また、図-6 に示すように計画した軌跡と、実際に動作したバケット先端の軌跡例で示すように、粗掘削から仕上げ掘削までの掘削動作を検証した結果、0.1m 以内の精度が確保できたことを確認した。積込みに関しても、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、一定の成果を得たものと考えている。

4. まとめ

本研究開発では、代表的な汎用建設機械である油圧ショベルについて、IT・RTをIT施工システムとして構成し、基盤となる要素技術を開発することによって、自律化した掘削作業を可能とした。

今後は、土質条件を考慮しながら、作業内容・形状・範囲等への条件にも対応するシステムを実現するよう、さらに研究を進める必要がある。

また、ここで可能性の見てきた自律機能を活用するための操作支援や施工方法への取組も今後必要となる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり国土交通省、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）、東京大学人工工学研究センター浅間研究室、(社)日本建設機械化協会、(財)先端建設技術センター、土木学会建設用ロボット委員会、建設無人化施工協会をはじめ多くの方々にご指導頂きました。お礼申し上げます。また、実験にご協力いただいた方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 「油圧ショベルによるIT施工システムに関する研究」建設施工と建設機械シンポジウム 2008
- 2) 「Automatic Excavation Planning of Hydraulic Excavator」Intelligent Robotics and Applications, 2008
- 3) 「遠隔操作を支援する油圧ショベルの自律掘削・積込動作計画」日本ロボット学会 学術講演会 2008

茂木正晴*



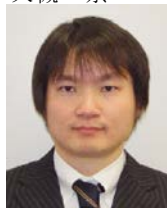
独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推
進本部先端技術チーム
主任研究員
Masaharu MOTEKI

山元 弘**



国土交通省大臣官房付
(前独立行政法人土木研究
所つくば中央研究所技術
推進本部先端技術チーム
主席研究員)
Hiroshi YAMAMOTO

大槻 崇***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推
進本部先端技術チーム
研究員
Takashi OOTSUKI

邵 輝****



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推
進本部先端技術チーム
専門研究員、工博
Dr. Shao HUI