

## 戦-3 油圧ショベルによる掘削作業の自動制御技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：技術推進本部 先端技術 T

研究担当者：山元弘、柳沢雄二、野末晃、邵輝、境田右軌

### 【要旨】

本研究は、土木工事における危険・苦渋作業を解消すること、自動化による施工の効率化と品質向上を図ることや若年労働者や熟練オペレータ不足への対応を目的に、遠隔からの簡単な作業指示により、自律した施工を行うロボット建設機械（油圧ショベル）を用いた IT 施工技術の研究開発を行うものである。

平成 18 年度までの成果として IT 施工システム（プロトタイプ）を構成する複数のコンポーネントの内、油圧ショベルの掘削・積込作業を対象とした動作計画について、掘削開始位置情報に基づき事象駆動型と軌跡追従型の動作計画を自動生成するとともに熟練オペレータに対して掘削作業に関する調査を実施し、その結果に基づく動作計画の粗掘削・仕上げ掘削作業を実現させた。

平成 19 年度は、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改良による作業効率の向上、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を図り、IT 施工システム全体としての評価を行った。

キーワード：無人化施工、油圧ショベル、自動施工システム、動作計画

### 1. はじめに

土木工事は、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喫緊の課題となっている。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策を講じておく必要がある。そこで、ロボットテクノロジーを活用した油圧ショベルによる IT 施工システムを示し、危険・苦渋作業の解消と作業の迅速化・高効率化を将来的な目的として、その基盤技術のひとつである油圧ショベルの自動制御技術を開発する。平成 19 年度は、平成 18 年度までの自動制御システムの試作の成果に基づいて自動制御システムを改良し、機能を検証した。

平成 18 年度では、自動制御のための動作計画の指針とすべく、熟練オペレータに対して掘削作業に関するヒアリング調査を行った。その結果に基づき掘削効率優先作業の粗掘削と、作業終了後の出来形精度優先作業の仕上げ掘削の、2 つの作業を切り替えた動作計画を構築した。粗掘削は事象駆動型の動作計画、仕上げ掘削は軌跡追従型の動作計画とした。平成 19 年度は、昨年度までの事象駆動型動作計画の改良、掘削環境を 3 次元で計測するシステムとの連携作業に伴う動作計画の改良、動作シナリオに基づき全体的な動作の流れにおける実作業によってシステム全体を検証した。

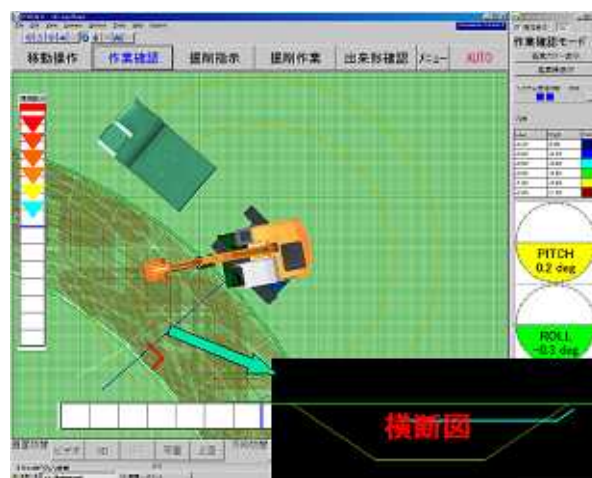


図-1 IT 操作システムの画面

### 2. 全体的な動作の流れ

本システムで想定している動作シナリオを以下のように設定した。ここで、オペレータが遠隔操作時に用いるのは、図-1 に示す画面である。

- 1) オペレータが油圧ショベルを遠隔操作して、掘削位置が旋回半径 7.5[m]～5.5[m]に入るように油圧ショベルを移動する
- 2) 遠隔操作により、油圧ショベルの上部旋回体を 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



図-2 油圧ショベルの外観

- 3) ダンプを遠隔操作して、積込可能位置まで移動する
- 4) 油圧ショベルを自動制御に切り替える
- 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に戻る
- 6) オペレータはダンプを遠隔操作し、放土する  
以上、1)～6)作業をくり返す

### 3. 油圧ショベルの概要

自動制御の対象となる油圧ショベルの外観を図2に示す。各部の動作状態を計測するために可動部に角度センサ、傾きを検知するために光ファイバジャイロ、IT操作システムとして状況の確認をするためにビデオカメラ、掘削後の出来形を計測するためにステレオビジョン、また外部から現在地と方向を獲得するためにGPSを油圧ショベル各部に実装した。

### 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、平成18年度までに試作した。粗掘削では作業速度、すなわち高い掘削効率が求められる。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、ある程度の精度を犠牲にして制御を低減させ、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、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3にイメージを示す。

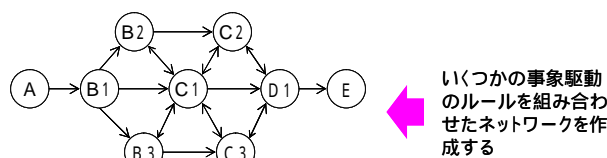


図-3 事象駆動ネットワーク

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
5 掘削目	0.856	0.988	0.837	0.864
平均	0.94	0.97	0.94	0.93

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。

#### 4. 1 平成19年度の研究方針

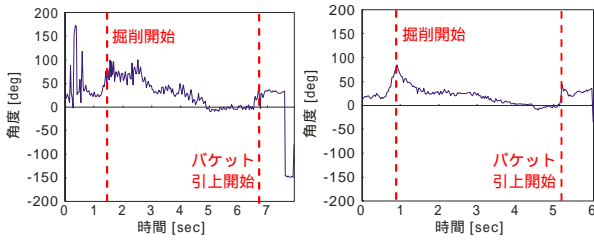
平成18年度に設計した事象駆動型動作計画は、検証実験の結果、おおむね良好な成果を達成した。しかし、想定していない条件での作業、例えば掘削時の掘削負荷が大きいなどの作業では、掘削が止まってしまう問題が存在する。

そこで、平成19年度では、平成18年度に行った、熟練オペレータによる掘削作業の操作計測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。

#### 4. 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1.2[m]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に示す。各相関値の平均をとると、おおむね0.93以上であり、アームとバケットの動きに



(a) 遠い位置掘削 (b) 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 1)

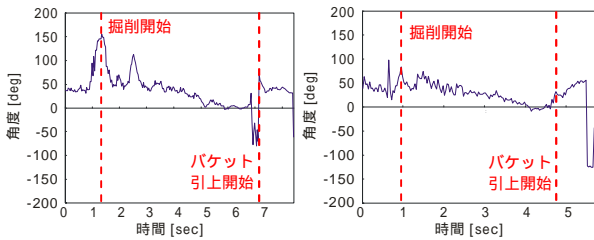


図-5 掘削方向とバケット底面のなす角度  
 (オペレータ 2)

は高い相関があることが確認できた。仕上げ掘削時には、バケットの姿勢を優先させて作業するために、相関値は若干減少している。

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。グラフ枚数が膨大となるため、例として1試行目の1掘削目についてのみ図4および図5に示す。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0[deg]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、掘削抵抗とバケットに入る土量を巧みに調節す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-2 事象駆動型動作計画の目標値

項目	目標値
掘削開始時 バケット接地角度	70 deg
掘削時 掘削距離	4000 mm
掘削時 掘削深さ	250 mm
引き上げ開始時 バケット水平角	10 deg

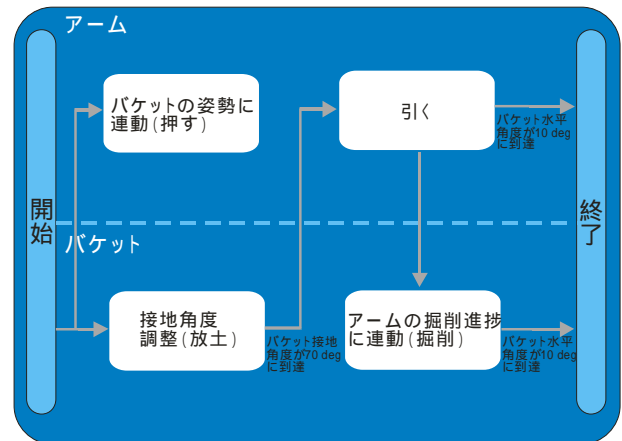


図-6 掘削作業時の事象駆動ルールネットワークの改良

### 4.3 事象駆動型動作計画の改良と評価

4.2で解析したデータを用いて、事象駆動型動作計画を改良した。解析して得た目標値を、表2にまとめた。掘削以外の作業においては、平成18年度の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、平成18年度に試作した事象駆動ルールネットワークの掘削作業について、図6のように改良した。

この事象駆動型動作計画を油圧ショベルに実装し、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、油圧ショベルの旋回中心から前方に7000[mm]の位置から3000[mm]の位置までを、深さを250[mm]ずつ増加させながら3回掘削することとした。掘削幅はバケット幅とした。掘削実験を繰り返した結果、掘削抵抗によって作業が止まることもなく、おおむね良好といえる結果となった。

### 5. 軌跡追従型動作計画

平成18年度において、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

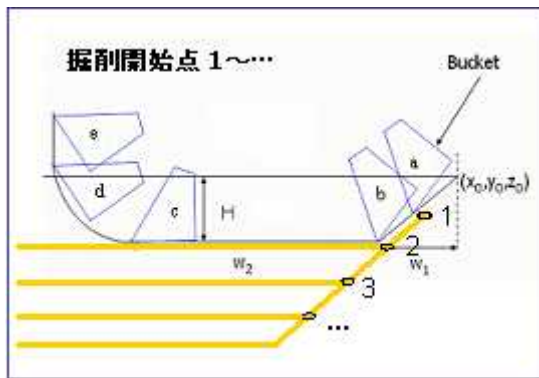


図-7 連続掘削イメージ

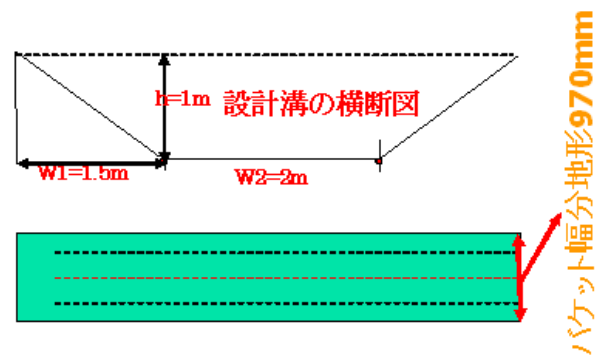


図-8 地形断面情報

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改良した。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、自律的な掘削および放土を計画した。

### 5.1 基本となる軌跡追従型動作計画

図-7に示すように、掘削長さLと深さHから算出できる予定掘削土量とバケット容量の関係から、ベースとなる黒線の台形軌跡を設計した。目標とする設計形状に対して、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。勾配をなくすことによって矩形の出来形に対しても対処できるものとした。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計し、作業効率の向上を図った。

一例として、斜面勾配1:1、深さ1[m]、底面の距離2[m]を目標の出来形と想定する。この場合、出来形の土量は約3[m<sup>3</sup>]であり、掘削中にある程度ほぐれるものと考え、3.5[m<sup>3</sup>]程度となる。1掘削の土量がバケット容量0.5[m<sup>3</sup>]の2割増程度の満杯を想定すると、最小掘削回数は6回と想定され、これを仮に粗掘削4回、仕上げ掘削2回と設定した。実際の自律掘削では、3次元計測データにより調整することになる。オペレータ操作データでは、バケットが掘削対象を通過する体積は、掬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掬い取っていることが想定される。この通過体積は、バケット容量の1.6倍程度である。これも勘案し、1掘削の深さHは0.25[m]を基本とした。

仕上げ動作の場合は、制御精度を向上させるために、27[deg/s]以下、ブーム角速度7[deg/s]以下、アーム角速度18[deg/s]以下、バケット角速度

24[deg/s]以下に制限して、軌跡の各動作の時間と周期時間を調整するものとした。

### 5.2 動作計画での3次元情報の活用

#### 5.2.1 3次元情報の授受

自律掘削動作にともなう3次元情報の授受は、以下の流れで行うように設定した。

- 1) 初期位置で自動制御に切替  
(a) 設計(目標掘削形状)情報受信
- 2) 掘削方向へ旋回  
(b) 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て掘削、引き上げ  
(c) ダンプのベッセル情報受信
- 4) ダンプ方向へ旋回、放土  
(a) 設計情報受信  
以上、2)~4)作業をくり返す

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。

#### 5.2.2 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、掘削終了、粗掘削から仕上げ掘削への切り替え、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-8に示すように、掘削溝の中心(バケット中心)のラインと左右等分に振り分けた1ラインずつの、計3ライン(5ラインの実験も実施している。)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。

#### 5.2.3 放土軌跡での3次元情報の活用

図-9に積込対象であるクローラダンプの外観を

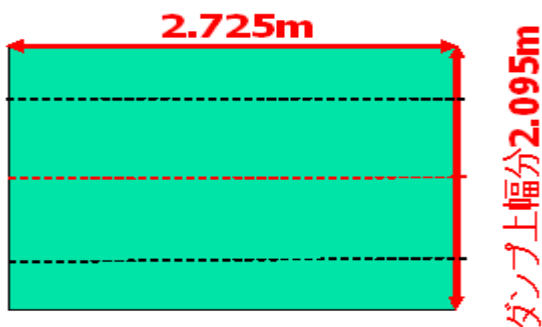


図-9 クローラダンプの外観とベッセルの面積

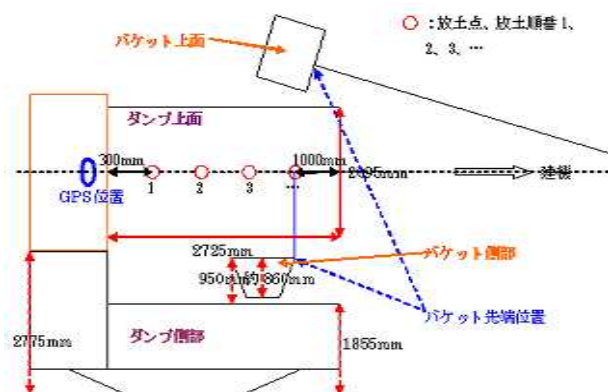


図-10 放土計画イメージ

示す。放土前に受け取るダンプの情報は、ベッセルの中心と、中心から左右 50[cm]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-10 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。バケットとベッセルが接触しないように、ベッセルのあおり側より 20~30cm の安全距離を保って設定した。

### 5.3 軌跡追従型動作計画の評価

#### 5.3.1 3次元情報を用いない場合の評価

動作計画の掘削性能を確認するために、掘削実験

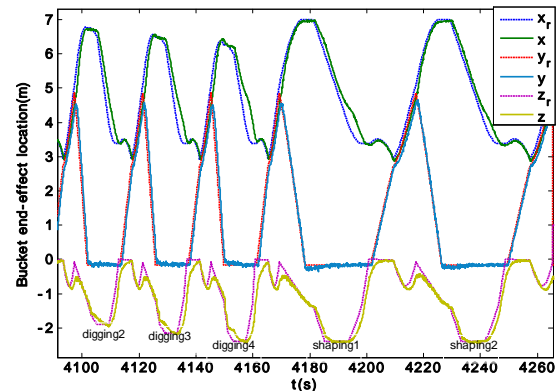


図-11 バケット先端の時間変化

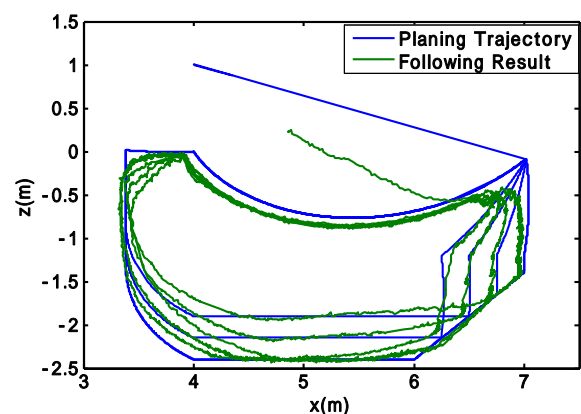


図-12 バケット先端の x - z 平面変化

を行った。第一段階として、掘削性能のみに注目するため、3次元情報を用いずに掘削・放土を行った。作業は、地表面から掘削することと設定し、油圧ショベルに対して正面で掘削して、左旋回 45[deg]の地表面に放土する。設計掘削形の勾配は 1:1、深さは 1[m]、底面の距離は 2[m]で設定した。粗掘削は 4回(1サイクル 24[sec])、仕上掘削は 2回(1サイクル 48[sec])とした。

バケット先端位置の  $x$  方向、 $y$  方向および  $z$  方向の、時間に対する変化を図-11 で示す。また、バケット先端位置の  $x-z$  平面での変化を図-12 で示す。ドットライン  $x_r$ 、 $y_r$  および  $z_r$  は設計の軌跡である ( $r$  が添字のパラメータは設計した目標軌跡である)、実線は追従した結果であり、概ね良好であった。

実験により、軌跡追従型動作計画で、一連の溝掘削が可能であることを確認した。またここでは、ブーム下げで揺れが発生しやすく、高速化の障害となる課題として明らかとなった。

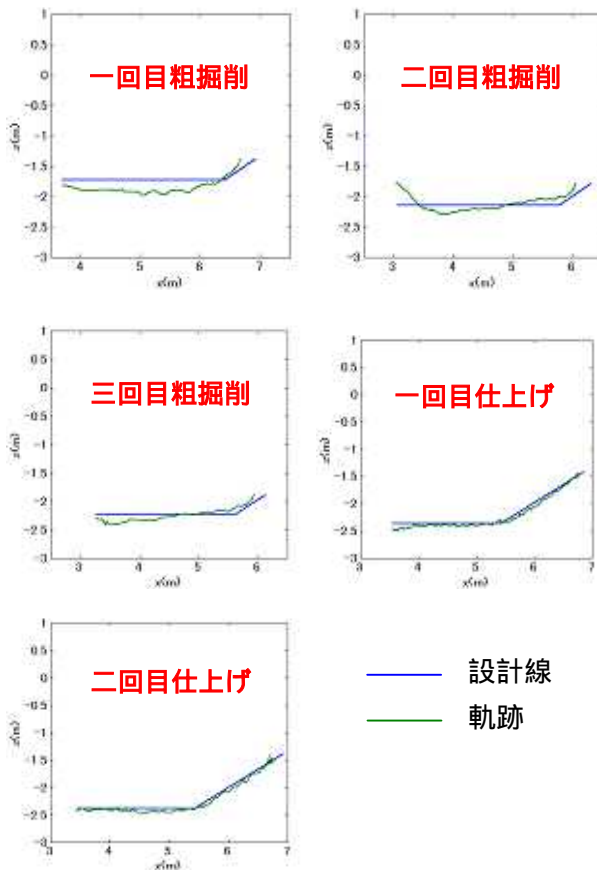


図-13 掘削時の計画軌跡と実掘削軌跡



図-14 実験中の様子

### 5.3.2 3次元情報を用いた場合の評価

5.2 で述べたように、3次元情報計測システムからの情報を用いて、掘削軌跡を自動的に作成し、放土点を決定する。

ここでは、ダンプに安全・確実に放土するため、引き上げ、旋回及び放土動作の時間に余裕を見ることとして、粗掘削は1サイクル約31[sec]～33[sec]、仕上げ掘削は37[sec]～39[sec]と設定した。

5.2 で述べた、現況の地形と設計の掘削形を比較して、仕上げ掘削に切り替える判定、掘削終了の判定、また状況により掘削位置を変更することは、達成された。図-13 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。また図14 に実験中の様子、図15 に作業終了後の出来形を示す。



図-15 自動掘削作業終了後の出来形

後の精度はない。

## 6. まとめ

### 6.1 結果

1) 粗掘削のサイクル時間(44[s] 22[s])を短縮し、全体のサイクル時間を短縮することができた。この時、粗掘削の精度は低下するが、仕上げのサイクル時間(44[s])を確保すれば、仕上げ

2) 平成18年度までは、一定の溝を掘るような連続的な動作確認をしていなかったが、平成19年度については、ベースとなる台形軌跡を設計し、平らな地表面での連続掘削動作を実証・実現した。粗掘削から仕上げまでの掘削動作を検証した結果、10[cm]以内の精度が確保できたことを確認した。

- 3) 設計や現況地形の3次元情報を活用し、状況に応じてある程度動的に対応可能な、自律化掘削積込作業を実現した。

## 6.2 課題

本研究から展開される課題は広範にあるが、今後の期間中での主な技術的課題としては、以下がある。

- 1) 土木研究所構内の比較的掘削容易な土質条件とした検証である。そのため、多様な土質、掘削条件を想定した仕様となっていない。今後、現場での適用を考えた場合、各関節の角速度等を用いた調整機能を追加した改良及び検証が必要となる。
- 2) ダンプへの放土(積込)情報を活用したものとなっていない。3次元情報を用いて、放土(積込)情報を活用した、動的な自律放土計画を構築する

必要がある。

- 3) バケット幅分の一ヶ所掘削のみではなく、指定する作業エリアに対して旋回も加えた広い範囲の掘削計画を構築する必要がある。
- 4) 動作計画で、揺れが小さく、かつ速い動きにより、作業速度を向上する必要がある。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所, 平成19年度建設機械のIT施工技術検討業務報告書, 平成20年3月

## **Research on Automatic Control Technology of Hydraulic Excavator**

### **Abstract :**

This study proposes construction technology using autonomous construction robot with IT supporting by utilizing simple command from far distance against shortage of young laborer and skillful operator. This technology prevents workers from dangerous and poor working environment and increase efficiency and productivity.

In 2006, automatic excavating/loading motion planning component that is one of components composing IT construction system was constructed and tested. The motion planning component consists of event driven type and trajectory planning type. Besides, investigation of skillful operator for excavating work was executed. Based on these results, the excavation work was achieved.

In 2007, as event driven type motion planning, it aimed that increase work efficiency by improving motion planning based on analysis of skillful operator. As trajectory planning type, it aimed that increase accuracy of work in cooperation with circumstances measurement system. Based on designed scenario, autonomous excavation and truck loading process of IT construction system were implemented and evaluated.

**Key words :** Automatic Hydraulic Excavator, Motion Planning