

2. 油圧ショベルによる IT 施工システムに関する研究

(独) 土木研究所 山元 弘、○邵 輝、茂木 正晴、大槻 崇、柳沢 雄二

(株) フジタ 野末 晃

理化学研究所 境田 右軌

環境省 山口 崇

1. はじめに

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。¹⁾

本研究では、油圧ショベル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。

また、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軌跡追従型動作計画の改良開発を行い、動作シナリオに基づく全体的な動作の流れ(掘削～積込)を実作業によって自動制御技術の検証を行った。

2. IT 施工システムの概要

開発した油圧ショベルに IT 施工システムを搭載したプロトタイプ(以下「プロトタイプ」)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。(図-1 参照)¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

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。

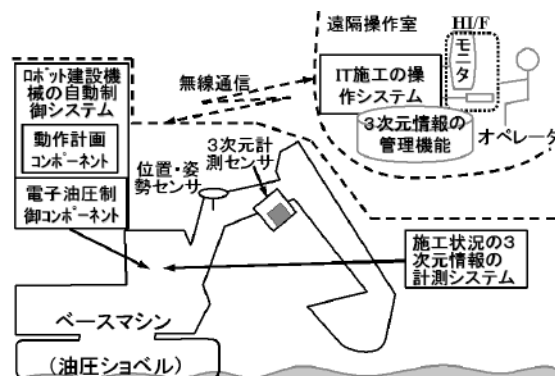


図-1 IT 施工システムのプロタイプ概要図

2) IT 施工の操作システム (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 2 種類がある。²⁾

① 特定小電力無線 (429MHz 帯)

油圧ショベルとクローラダンプを遠隔で操作するラジコンの 2 波と油圧ショベルの緊急停止装置用の 1 波、RTK-GPS の基地局から位置補正情

報の1波（ブロードキャスト）の4波に使用している。

② 無線LAN (2.4GHz帯)

ビデオカメラの映像データ、ベースマシンとクローラダンプの位置、方位、レーザスキャナやステレオカメラで計測した地形情報を無線で伝送することを使用している。

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、遠隔操作及びP C制御ができるように改造したものである。また、以下に示す計測用の各種センサを取り付けている。（図-2 参照）

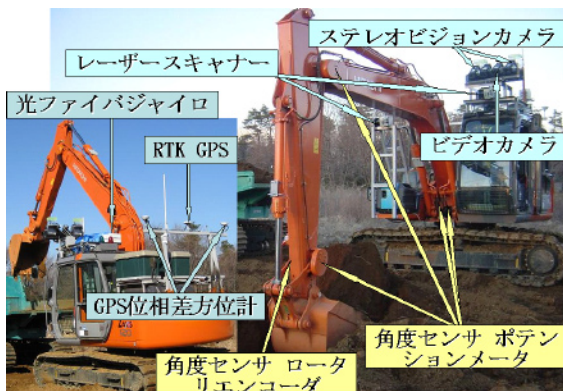


図-2 センサ取り付け図

- ①各関節の回転角度：ポテンシオメータ、ロータリエンコーダ
- ②建機の傾き：光ファイバジャイロ
- ③建機の位置：RTK-GPS
- ④建機の方位：光ファイバジャイロ、GPS位相差方位計
- ⑤地形計測：レーザスキャナ、ステレオカメラ
- ⑥前方映像：ビデオカメラ

3. 連携実験における条件と全体動作シナリオ

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、遠隔操作及び自動制御で

行うものである。一連の施工作業は、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⁷⁾）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）、掘削対象の条件はこの実験場の既存土質（関東ローム）で行った。

実験の動作シナリオは以下のように設定した。なお、オペレータは、車載カメラの他、自動切替の複数のCG画像を用いるが、一例を図-3に示す。³⁾

- 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。

以上、1)～6)作業を繰り返す。

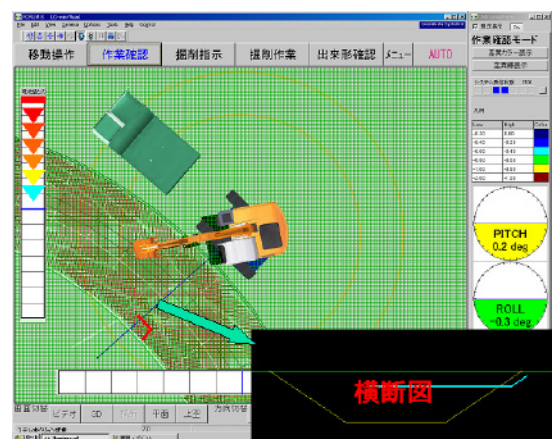


図-3 IT 操作システムの画面

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、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、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-4 にイメージを示す。

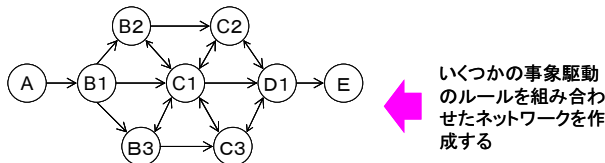


図-4 事象駆動ネットワーク

○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 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、4.2 で述べるように、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。

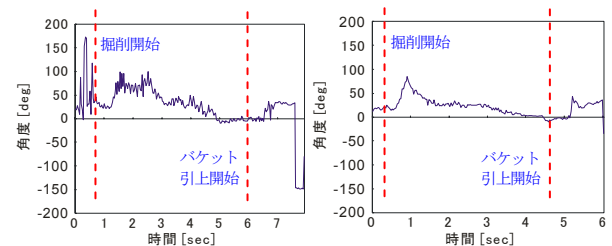
4. 2 熟練オペレータの作業解析

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、ブームーアーム角度(アーム角)とアームーバケット角度(バケット角)の相関値を算出した。(表-1 参照、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。

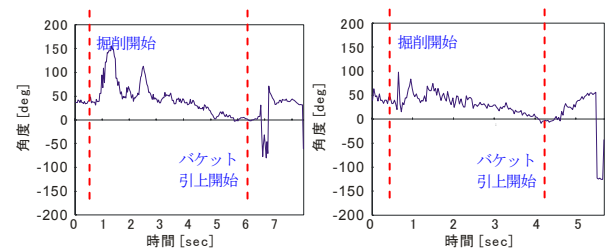
表-1 アーム角とバケット角の相関値

	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



(a) 最遠位置掘削 (b) 最適位置掘削

図-5 掘削方向とバケット底面のなす角度
(オペレータ 1)



(a) 最遠位置掘削 (b) 最適位置掘削

図-6 掘削方向とバケット底面のなす角度
(オペレータ 2)

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-5 および図-6 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、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。

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、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-7 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 バケット接地角度	70 deg
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 バケット水平角	10 deg

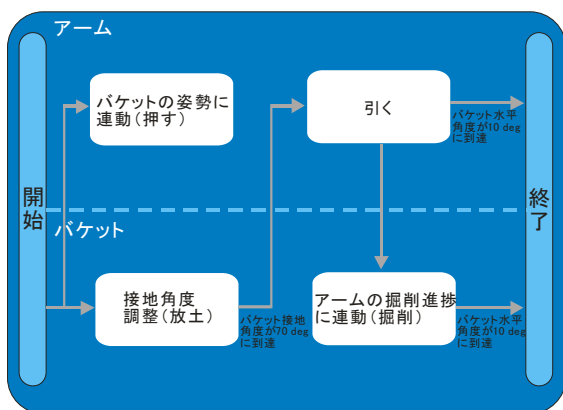


図-7 掘削作業時の事象駆動ルールネットワークの改良

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から前方に7 mの位置から3 mの位置までを、深さを0.25

m 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。

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。

5. 1 基本となる軌跡追従型動作計画

図-8 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ット容量により、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。⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁸⁾ 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。

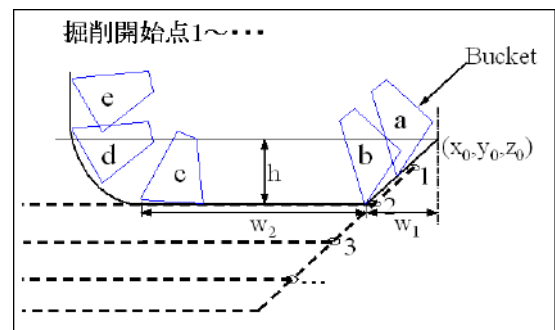


図-8 連続掘削イメージ

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、バケット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 掘削の土量がバケット容量 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。

5. 2 動作計画での 3 次元情報の活用

5. 2. 1 3 次元情報の受信

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。²⁾⁴⁾

- 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掘削、引き上げ
 - (c) 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
 - (d) 設計情報受信

以上、2)～4) 作業を繰り返す

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、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-9 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

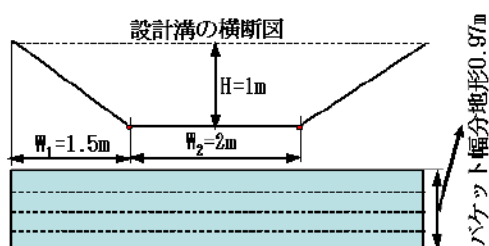


図-9 地形断面情報

の、計 3 ライン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

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 0.5 m 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。なお、バケットとベッセルの接触を確実に避けるように、ベッセルのあおり側より $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ の安全距離と移動の余裕時間を設定した。

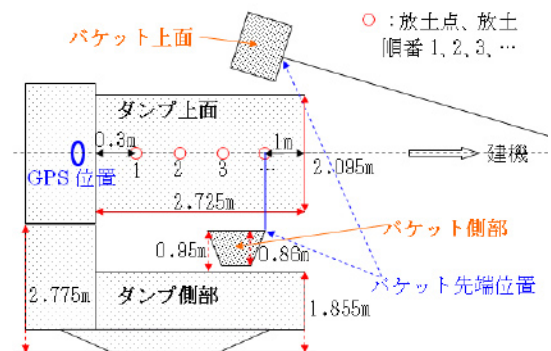


図-10 放土計画イメージ

5. 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-11 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。

ここでは、ダンプへ安全・確実に放土するため、引き上げ、旋回及び積込放土動作の時間に余裕を見ることとして、粗掘削における 1 サイクルを約 31 sec～33 sec、仕上げ掘削における 1 サイクルを約 37 sec～39 sec に設定した。

図-12 に作業終了後の出来形を示す。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、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出来た。

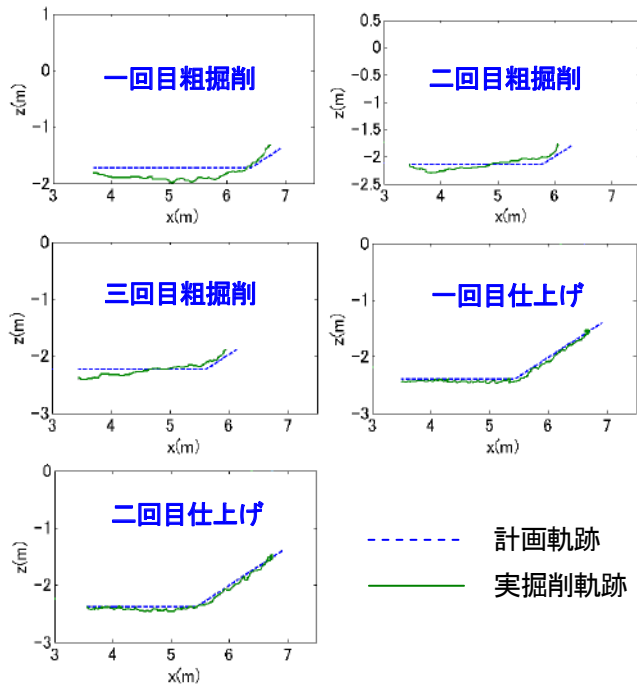


図-11 掘削時の計画軌跡と実掘削軌跡



図-12 自動掘削作業終了後の出来形

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。

その結果として、動作計画、掘削精度の確保（0.1 m 以内）を確認することが出来た。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出来たことを記し、謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 山元弘, 柳沢雄二, 野末晃, 邵輝, 境田右軌, 山口崇: “油圧ショベルの自律化に向けた基盤技術について”, 第11回建設ロボットシンポジウム, 2008.9
- 2) 野末晃, 山元弘, 境田右軌, 邵輝, 柳沢雄二: “油圧ショベルのIT施工技術の開発における通信情報システムの適用について”, 第11回建設ロボットシンポジウム, 2008.9
- 3) 柳沢雄二, 山元弘, 邵輝, 境田右軌, 野末晃, 山口崇: “作業機械の遠隔操作におけるマンマシンインターフェイスに関する研究”, 第11回建設ロボットシンポジウム, 2008.9
- 4) 邵輝, 山元弘, 柳沢雄二, 境田右軌, 野末晃: “油圧掘削機の自律掘削と積み込み動作計画に関する研究”, 第11回建設ロボットシンポ, 2008.9
- 5) H. Shao, T. Yamaguchi, H. Yamamoto: Bucket Trajectory Planning of Hydraulic Excavator, 12th Robotics Symposia, 2007.
- 6) H. Shao, H. Yamamoto, Y. Yanagisawa, A. Nozue, The 25th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 2007.
- 7) 田中洋一 他: 施工現場で利用する施工管理データの構築, 第11回建設ロボットシンポジウム, 日本ロボット工業会, 2008.9
- 8) 境田右軌, 山元弘, 邵輝, 柳沢雄二, 野末晃: “熟練オペレータによる油圧ショベルの掘削操作解析”, 第11回建設ロボットシンポジウム, 2008.9