

16. 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

独立行政法人 土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム

○柳沢 雄二、山元 弘、野末 晃、邵 輝、山口 崇

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方策を講じておく必要がある。土木研究所では、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、その基礎技術の一つである油圧ショベルの自動制御技術を開発している。

建設機械の IT 施工システムの油圧ショベルの自動制御技術を実現する動作計画の方法として、事象駆動型と軌跡追従型の2通りの動作計画の方法を採用している。

- 1) 荒掘用の動作は、作業の目標となる設計形状などによる領域制限があるものの、その範囲内で自由な動作が可能な掘削動作である。作業目標となる設計と現況地形形状との差異が大きな段階での動作のため、より多くの土砂を短時間に掘削することを求められる。そのため、掘削負荷や地盤特性の影響が大きく、負荷変動の予測が困難である。事象駆動型と短周期の軌跡追従型（精度要求低）掘削動作が荒掘に対応する。
- 2) 仕上動作は、掘削作業が進み、設計と現況地形形状との差異が小さくなった段階での出来形を成形する掘削動作のため、バケットを作業目標の設計形状に合わせて精度良く掘削することが求められる。そのため、掘削負荷は小さく、地盤特性の影響が小さな動作である。より長い周期の軌跡追従型（精度要求高）掘削動作が最後の仕上げに対応する。

本報文は、上記2つの動作計画を用いた油圧ショベルによる掘削作業の自動制御実験結果を報告す

るものである。

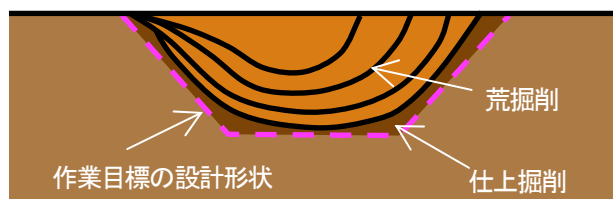


図-1 掘削動作の種類（イメージ図）

2. 自動制御油圧ショベルの概要

1) システム概要

ベースマシンとして、12ton 級、バケット容量が 0.5 m³のリモコン操作油圧ショベルを採用し、ブーム、アーム、バケット及び旋回用に角度センサ（ポテンショメータ）、メイン及びパイロット油圧用に圧力センサを取り付け、さらに PC からの制御用に PC 制御コントローラを搭載し電磁比例弁を駆動させる改造を施した。動作計画コンポーネントが目標座標値より、ブーム、アーム、バケットの角度を算出し、目標制御量を電子油圧制御コンポーネントが伝達して電磁比例バルブを開閉することで自動制御を行うシステムとなっている。図-2 にシステムの概要図、表-1 にベースマシンのカタログ値を示す。

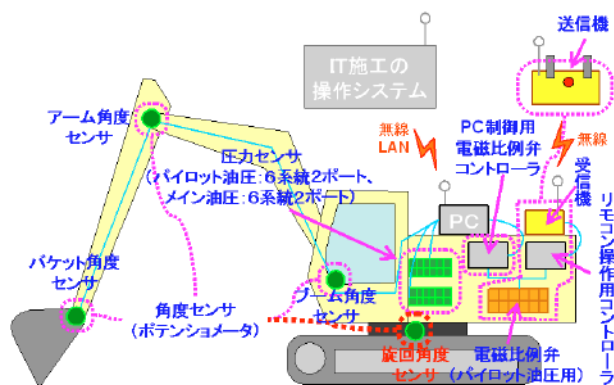


図-2 自動制御油圧ショベルの概要図

表-1 ベースマシンのカタログ値

項目	数値
ブーム長さ	4600mm
アーム長さ	2519mm
バケット長さ	1230mm
スウィング部角度範囲	-180° ~180°
ブーム部角度範囲	-70° ~45°
アーム部角度範囲	30° ~152°
バケット部角度範囲	-33° ~144°
バケット底面角度	50°
バケット容量	0.5m ³
角度センサー	4 個 (ポテンションメータ)
圧力センサー	24 個

2) 動作計画コンポーネントの構築

油圧ショベルの自動制御技術の試作・検証にあたり、下記の動作計画コンポーネントを試作し、動作検証の指標となる角度センサーの精度試験を行い、校正値を算出した。

① 動作計画コンポーネントの概要

動作計画コンポーネントは自動制御油圧ショベルを実現するため、掘削、旋回と放土など動作を計画する部品である。ここで、Matlab の xPC Target 環境を利用して、Master PC と Slave PC のようなコントロールシステムを構成する。プロトタイプの開発が容易な Matlab を採用し、SlavePC は、バス速度と拡張性から CompactPCI を採用した。

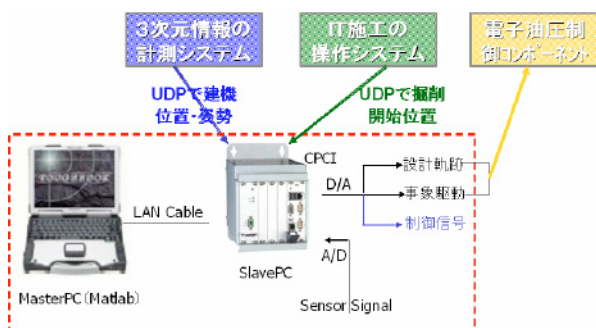


図-3 動作計画コンポーネントコントロールシステム

② 油圧ショベルの座標系

動作計画の分析をするために油圧ショベルの座標系（図-4）を設定する。座標系は、右手系の座標系としており、各軸回りの回転角度は、各軸の正方向に向かって右ねじが進む方向を正としている。旋回中心上のブームフットピンの高さを原点として座標系を利用している、原点から地面までの距離は約 1.5m である。

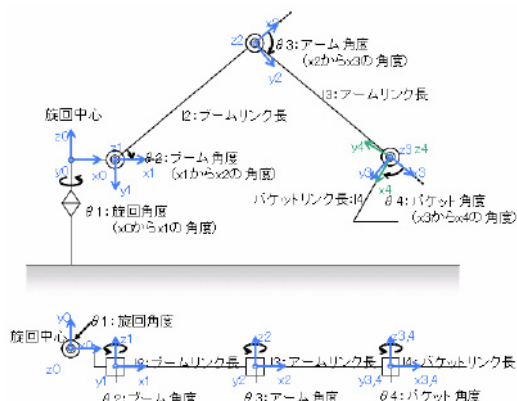


図-4 油圧ショベルの座標系

③ 角度センサーの精度試験及び校正値算出

油圧ショベルのブーム、アーム、バケットの角度および旋回体の旋回角度を計測するために、ポテンションメータを実験用油圧ショベルに取り付けている（図-2）。これら角度センサーの精度は制御性能に大きく影響するため、精度の把握と校正のため精度確認試験を行った。試験項目は、ポテンションメータのノイズ測定と各関節部にプリズムシートを貼りトータルステーションで測定を実施した。

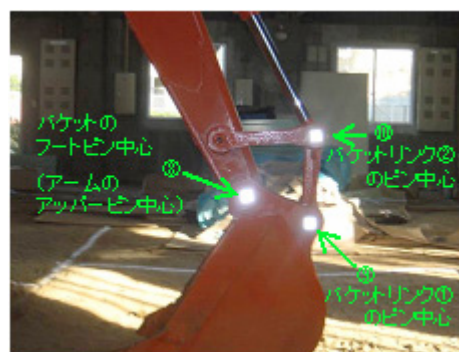


図-5 精度確認試験プリズムシート貼付け例

④ 角度センサーの精度試験後の校正値

仕様からの係数が 36 (deg/V) に対して、算出し

た校正係数は以下のとおりである。

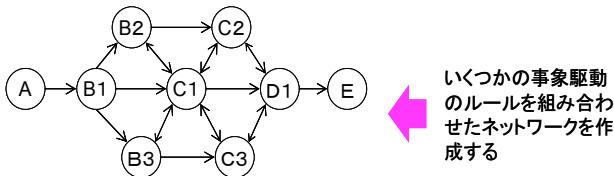
ブームリンク角度 : $Y = -36.6660X + 74.4315$

アームリンク角度 : $Y = 35.8107X + 5.2055$

バケットリンク角度 : $Y = -35.5448X + 175.5530$

3. 事象駆動型

1) 事象駆動型の概要



図－6 事象駆動型のネットワークのイメージ

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する。図－6にイメージを示す。○がある事象により駆動する状態を表しており、矢印が事象であり、それにより移り変わる状態を結んでいる。

2) 事象駆動型の作業階層

階層化したネットワークを形成するため、目的とする作業である油圧ショベルによる掘削・積み込み作業を以下の4段階の階層とする。

レベル1 単位作業

油圧ショベルによる掘削・積み込み作業

レベル2 要素作業

- ①バケットの移動（掘削開始位置へ）、
- ②掘削
- ③バケットの引き上げ（掬い上げ）
- ④バケットの移動（放土位置へ）
- ⑤放土

レベル3 単位動作

上記の要素作業を構成する動作

なお、図7で示した事象駆動のルールの例は、この階層のルールである。

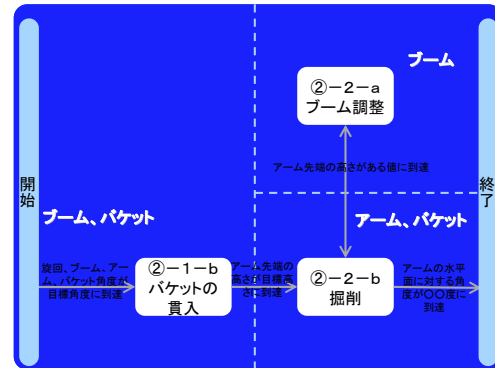
レベル4 動素

- 旋回（左／右）
- ブーム（上げ／下げ）
- アーム（引き／押し）

バケット（掘削／放土）

レベル5 制御量

ブーム、アーム、バケット、旋回の動素を実現するための油圧シリンダーや油圧ポンプの各アクチュエータの制御量。



図－7 掘削を構成する単位動作のネットワーク

3) 事象駆動型の実験

①機能検証実験その1

実際に掘削をせずに、掘削開始点の高さをブームフットピン高さ（履帯下部から約1.5m）の空中として動作を行う。そのときの掘削開始点の位置は、ブームフットピンの座標系の x1 軸方向に 7m、6.5m、6m、5.5m、y1 軸方向に 0m とし、それぞれの掘削開始点について連続5回の掘削・積み込み作業を実施した。そのときの各種センサ情報等を取得し、各掘削開始点位置と各動作において、ほぼ再現性があることが確認できた。また、動作計画による掘削・積み込み作業の動作を実現していることを確認した。

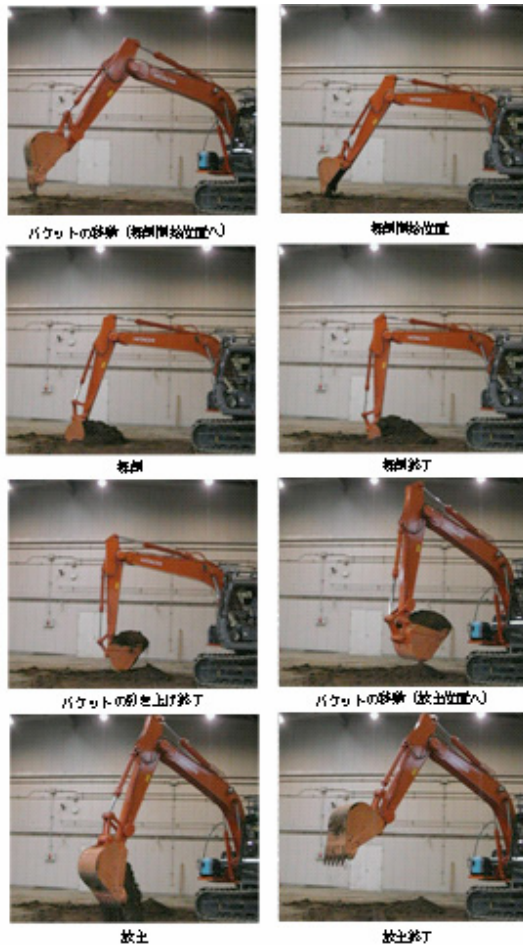
各掘削開始地点のサイクル時間は 16～18 秒であった。

②機能検証実験その2

現況地形が平面の場合に、掘削・積み込み作業の動作を行う。そのときの掘削開始点の位置は、ブームフットピンの座標系の x1 軸方向に 7m、6.5m、6m、5.5m、y1 軸方向に 1.45m とし、それぞれの掘削開始点について連続5回以上の掘削・積み込み作業を実施し、そのときの各種センサ情報等を取得し、機能を確認する。掘削開始位置 x1:6.5m、y1:1.45m の状況を写真－1に示す。

各掘削開始点において、掘削・積み込み作業が可能であることが確認できた。また、ほぐした土を掘削する条件においては、18～21 秒のサイクル時間

であり、熟練者と比較しても遜色ないサイクル時間を実現できた。



写真－１ 機能検証実験その２状況写真

4. 軌跡追従型

1) 軌跡追従型の概要

荒掘削動作と仕上げ掘削動作を計画するため、バケット先端動作の軌跡を計画し、計画軌跡に追従するためにブーム、アーム、バケットの角度を逆運動学から計算する軌跡追従型の動作計画コンポーネントを試作・検証する。計画軌跡は、バケットの先端位置座標がアーム可動範囲以内であることと、バケットの姿勢（傾き）が最大、最小姿勢角度以内であるという二つの制約条件内で設計する。

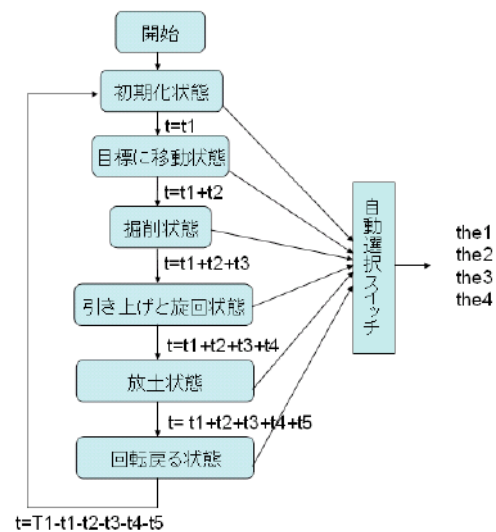
2) 軌跡追従型の作業

動作計画するためには、バケット先端の位置が決まった後にバケットの姿勢を決める必要がある。さらに、制御油量が油圧ポンプの吐出量を超えない

範囲で軌跡を設計する。また将来掘削過程でバケット先端の力を分析するため、ここで軌跡により各関節の流量変化を分析し、バケット先端の力の計算を行う。関節角度変化と必要な油流量変化を分析するため、また、各リンクと関節角度の間変化の非線形性を分析するため、関節角度とリンク長さの関係を計算した。今後は関節角度とその角速度だけではなく、シリンダの長さや速度に対して制御を行う事も想定しておく必要がある。

図－８に軌跡計画のフローチャートを示す。一サイクルの動作計画軌跡は、初期状態→掘削開始点に移動→掘削→引き上げ旋回→放土→次の掘削開始点、或いは初期位置に移動の順番に設計している。掘削の状態は計画軌跡から逆運動方程式によって各関節の角度を生成するが、他の状態は開始点から終了点まで各関節の角度が一定速度で動く軌跡を生成する。

熟練オペレータへのヒアリングと掘削作業の計測データを分析した結果を参考にして、軌跡計画の方法を検討した。荒掘削の場合はより多くの土をバケットに入れることを基準として設計する。図－９に仕上げ掘削の一例として台型掘削の軌跡を示す、掘削幅 L と深さ H はバケットの容量により、計算する。軌跡は一定速度で移動し、直線引きの部分はバケット姿勢がバケット底面を段々倒すように動かす。



図－８ 軌跡計画のフローチャート

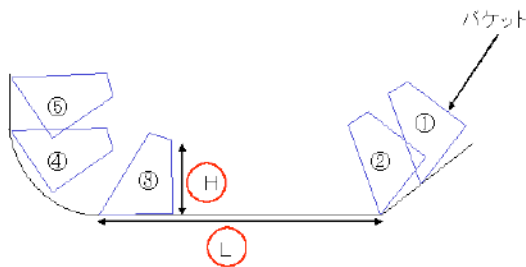


図-9 計画の台型軌跡の姿勢変化

移動は①から⑤の順番である。

また、今回の実験では、制御機器の追従精度の限界から、旋回速度 27deg/s 以下、ブーム制限速度 7deg/s 以下、アーム速度 18deg/s 以下、バケット制限速度 24deg/s 以下に収まるように、軌跡の各動作の時間と周期時間を選定した。

3) 軌跡追従型の実験

FF-PID 制御器を用い、まず空中における無負荷状態における幾何学形状の軌跡精度試験を行い、結果から z 軸の増加方向に誤差が大きくなっていることが確認できた。また、地中掘削軌跡追従精度試験を検証した、同時に、建機旋回中心から掘削開始点 6.5m ぐらい、掘削深さ 250mm と 400mm など変化条件で、より多く土砂を掘削できる条件を確認した。図-10 に掘削深さ 400mm の例を示し、点線は地面のレベルを示している。

掘削実験結果より、熟練オペレータの掘削軌跡を参考として設計した台型掘削軌跡が土を満杯に掘削でき、かなり有効な掘削方法であることがわかった。また、負荷の少ない仕上げ動作においては、精度が期待できる。今後、1 サイクルの作業時間を短縮して、掘削状態を確認することが必要である。建機のブーム関節の制御量は重心変化により、影響が大きいため、重心位置変化による制御量の補償器の設計に必要な可動範囲内の重心変化を分析した。

また、荒掘削 4 回、仕上げ掘削 2 回（掘削深さ 1 m、掘削底面長さ 2 m、一辺整形 (1 : 1)）の連続掘削実験も行った。図-11、図-12 に連続動作実験結果を、掘削後の状況を写真-2 に示す。作業時間 2 分 56 秒と良好なものとなった。

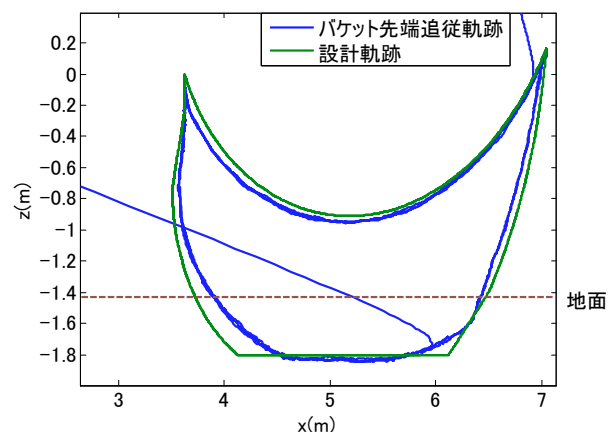


図-10 400mm 掘削の軌跡追従状況

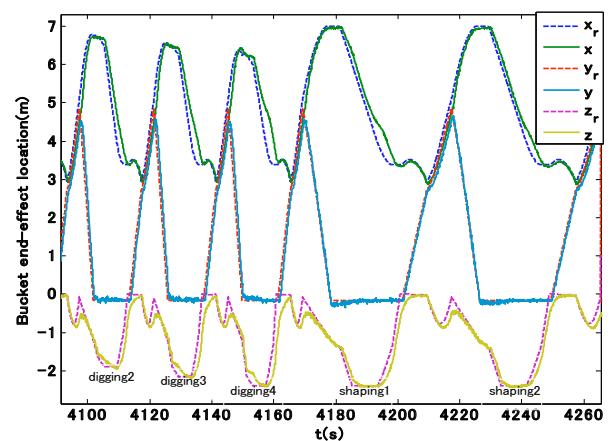


図-11 連続動作実験結果

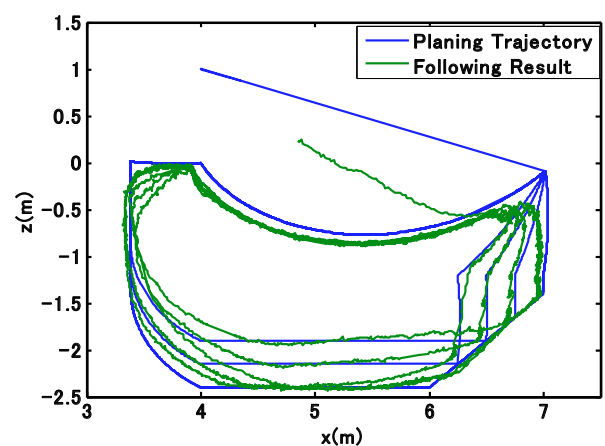


図-12 連続動作実験結果



写真－２ 連続掘削後の仕上がり状態

5. まとめ

1) 結果

- ① 油圧ショベルの掘削・積み込み作業を対象に事象駆動型の基本的な動作計画コンポーネントを試作し、限定した条件下で作業可能なことを確認した。1サイクルの作業時間および掘削量は、熟練のオペレータに遜色がない結果であり、荒掘削用の動作計画としては、事象駆動型の動作計画が有効であることが確認できた。
- ② 軌跡追従型動作計画コンポーネントを試作し、PID 制御器を用いて掘削実験を行い、バケット満杯の土を掘削できることを検証し、有効な掘削方法であることが確認できた。また、負荷の少ない仕上げ動作においては、より精度を期待できることを確認した。
- 2) 今後の課題と対応
 - ① 作業の精度を向上させるためには、角度センサーなどのセンサー精度向上及び追従精度向上のための制御システムの改良を行う必要がある。
 - ② 作業効率を向上するための作業サイクルタイムの短縮を検討する。
 - ③ 事象駆動型において、角度センサ情報のみでは、作業装置にかかる負荷や接地判断が困難なため、作業の継続が不可能になることが想定される。これらの対応として、油圧、速度などの情報を用いた調整機能を追加する。
 - ④ 作業を自律化するため、建機姿勢情報や現況地形情報を利用して、掘削開始位置の遠近や、現況地形や設計の形状により掘削深さを自動調

整するなど動作計画の調整機能を追加する。

- ⑤ クローラダンプ等への積み込み作業の動作計画を検討する。

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 I T 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、建設無人化施工協会など多くの方にご協力頂きました。記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所，平成 18 年度建設機械の I T 施工技術検討業務報告書，平成 19 年 3 月
- 2) H. SHAO, T. YAMAGUCHI, H. YAMAMOTO, Bucket Trajectory Planning of Hydraulic Excavator, 12th Robotics Symposia, 2007.
- 3) H. Yamamoto, ect. Introduction to the General Technology Development Project: Research and Development of Advanced Execution Technology by Remote Control Robot and Information Technology, 23rd ISARC, 2006.
- 4) P. S. Rowe, Adaptive Motion Planning for Autonomous Mass Excavation, Ph.D Thesis, Carnegie Mellon University, 1999.
- 5) S. Singh, Synthesis of Tactical Plans for Robotic Excavation, Ph.D Thesis, Carnegie Mellon University, 1995.
- 6) N. H. Quang, Robust Low Level Control of Robotic Excavation, Ph.D Thesis, Australian Center for Field Robotics, The University of Sydney, 2000.
- 7) T. Hirabayashi, ect. Experiment on Teleoperation of Underwater Backhoe with Haptic Information, 23rd ISARC, 2006.