

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チーム

研究担当者：藤野健一、茂木正晴、大槻崇、邵輝

【要旨】

土木工事は危険苦渋作業が多く、作業環境や施工法等を改善して安全を確保することが課題となっている。また若年労働者や熟練オペレータの不足により生じると予想されている施工効率と品質の悪化に対する方策も求められている。これらへの対応を目的に、遠隔地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進めている。

本研究では、指示情報として出来形形状の提示を受けた後、その情報を基にロボット建設機械にて、作業を行うために必要な動作の計画を自動で生成し、それに従い自動制御を行う技術を平成19年度までに開発した。また、数次に渡り機械性能をより活用した作業を行うべく、動作計画・制御プログラムの改良を行った。さらに、多様な地盤条件等に対応するために必要な障害物検知の技術検討を行いその手法の有効性を確認した。これらの研究を通じて、建設機械の自動化についての具体的な技術課題も確認した。

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、平成15年度から19年度まで行っていた国土交通省技術開発総合プロジェクト「建設機械のIT施工技術の開発」（以下、総プロと呼ぶ）の研究成果と連携し、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した。

本研究は特に、油圧ショベルにおける施工動作の自動化技術の開発を行ったものであり、設計情報を含む指示情報を基に油圧ショベルの動作計画を自動生成する技術、その動作計画を基に油圧ショベルの動きを自動制御する技術の開発を、熟練オペレータに対して掘削作業に関する作業形態に関する実態調査などを通じて行った。そしてこれらの技術成果を上記成果と共に油圧ショベルをベースマシンとしたプロトタイプの自動施工システム(図-1)に実装し、その機能の検証を行った。

さらに、多様な作業内容・地盤条件に対応するた

め、動作計画・制御方法の改良による出力限界の向上を図ったほか、バケットリンクの歪みを利用した掘削負荷の推定手法及び自動制御に用いている既存のセンサー類での障害物検知手法の可能性について検討を行ったうえ、障害物回避動作を開発し検証実験を行った。

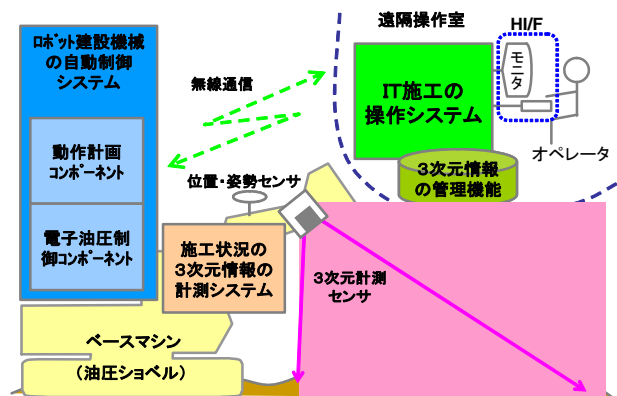


図-1 システム概要図

2. システムの基本的な考え方

2.1 粗掘削と仕上げ掘削及び多様な地盤への対応

施工動作のシステムにおいては、設計情報を含む指示情報のおりの施工をいかに素早く（効率的に）、性格に（精度良く）行うかが要点である。また、掘削時に障害物などにバケット刃先が接触した際には、その回避かその状況を示してオペレータの指

示を仰ぐ機能が求められる。

これらのシステム要件に基づき考察を進めると、図-2に示すとおり、示された設計形状を正確に作り出す仕上げ掘削と、現地盤形状から設計形状までの形を粗く効率重視で削りだしていく粗掘削の二つの掘削作業が分かれることになる。

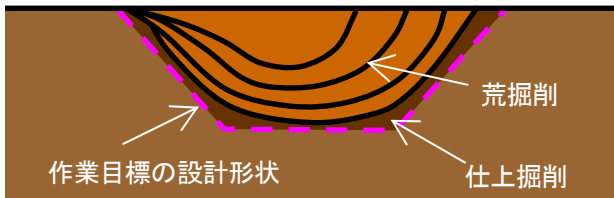


図-2 掘削動作の種類 (イメージ図)

また、ロボット工学の観点から考えると、機械に必要な動作で動かすときには、その求められる動作の計画と、その計画の通りに機械を動かすための制御プログラムに分けて開発することが一般的である。動作計画と制御プログラムの関係を別の言葉で表現すると、アウトプットであるのが求められる動作であり、そしてそのアウトプットを作り出すために機械をどのように操るかというインプットないしはシステムが制御プログラムであるともいえる。

すると、具体的な議論としては、目的の異なった動作のセットである粗掘削と仕上げ掘削について、それぞれどのような動作計画と制御プログラムのセット（以下、特に制御プログラムと述べないときには、このセットを「動作計画」と呼ぶ。）を用意すべきかという議論となる。それぞれについて整理すると以下のとおりとなる。

1) 仕上げ掘削と精度重視の軌跡追従型動作計画

この作業の特徴は、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。また、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、掘削負荷は小さく、地盤特性の影響が小さいといった特徴も動作である。

そこで動作計画は、設計形状上に油圧ショベルのバケット刃先の通過点を設定してその通過点を実現するブーム・アーム・バケットの角度ないしは油圧シリンダー長さのセットとし、この通過点を細かく設定し、その通過点の間はより直線に近く正確に動くことを実現する。幸いに掘削負荷が小さいといった環境であるため、単純にこの通過点によって表された目標軌跡をバケット刃先が追従していく制御を

行う方式の適用を検討する。これを以降では、「精度重視の軌跡追従型動作計画」と呼ぶ。

2) 粗掘削と2つの動作計画

この作業の特徴は、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、掘削負荷が大きく、地盤特性の影響によって掘削負荷の違いも大きい場合、負荷変動の予測が困難である。ただし、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つまりバケット刃先の軌跡がある程度許容される掘削動作でもある。

これらの特徴から、個別の基本動作ごとに油圧ショベルの動作能力を最大限に発揮させてバケット刃先を動かす入力信号のセットを組み合わせる動作計画（以降、「事象駆動型動作計画」とよぶ）を検討する。

また、仕上げ掘削に対応する「軌跡追従型動作計画」について、精度要求の低い方式も合わせて採用を検討することにする。

なお、掘削時に障害物などにバケット刃先が接触した際の対応については、5.においてあらためてその基本的な考え方について述べる。

2. 2 システムの構成概要

本研究において使用するベースマシンおよび動作計画のシステム概要について述べる。

1) システム概要

ベースマシンとしては、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（ロータリエンコーダ）、メイン及びパイロット油圧用に圧力センサを取り付けている。

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-3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。

2) 動作計画コンポーネントの概要

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た。

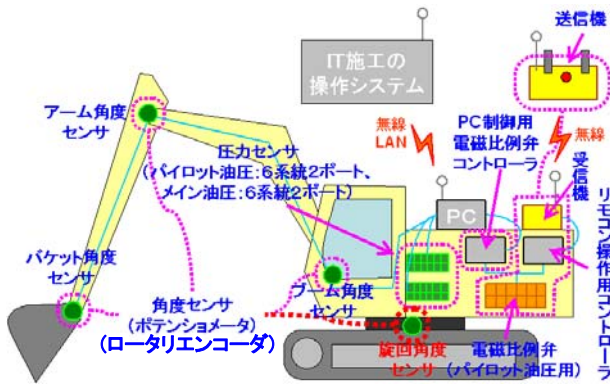


図-3 自動制御油圧ショベルの概要図

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	3個(ロータリエンコーダ) ※ブーム・アーム・バケット 1個(ポテンシオメータ) ※旋回台
圧力センサー	24個

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

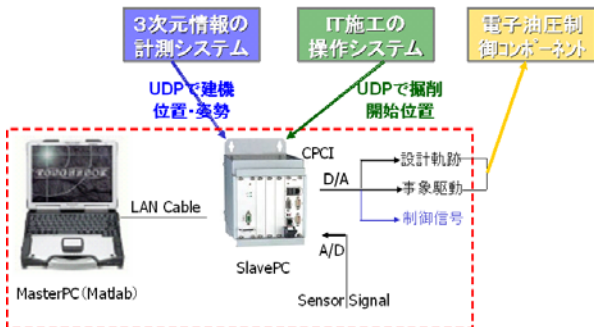


図-4 動作計画コンポーネントコントロールシステム

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。

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機械座標系(図-5)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。

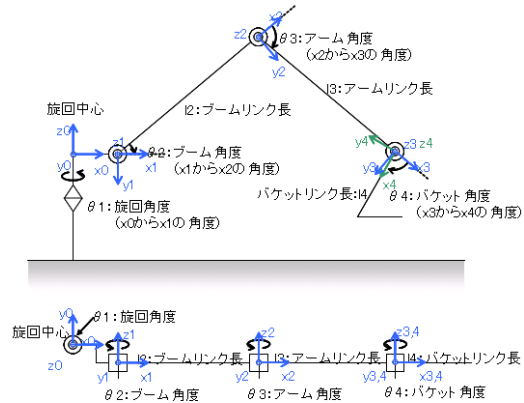


図-5 油圧ショベルから見た機械座標系

3. 動作計画と制御プログラムの開発

2.1でのシステムの考え方にに基づき、仕上げ掘削については「精度重視の軌跡追従型動作計画」、粗掘削については「事象駆動型動作計画」と「精度要求の低い軌跡追従型動作計画」について開発した。

なおそれらに並行して、熟練オペレータによる油圧ショベルの搭乗時の作業について計測・解析を行いそこでの成果を各動作計画の開発に活用した。

3.1 熟練オペレータの作業解析

熟練オペレータによる掘削作業の操作計測実験を行い、そこから得られたデータをもとに、掘削作業の構成におけるブーム・アーム・バケットの動作の連動、それらの動作が持つ特徴について分析を行い、有用な掘削方法を探ることとした。

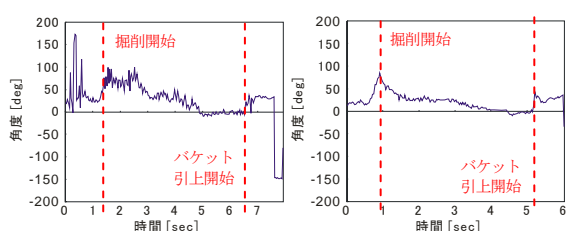
実験は、熟練オペレータ2人に、それぞれ掘削に最適だと判断する位置からの掘削(最適位置掘削)と、ブーム、アームおよびバケットを油圧ショベルの前方に最大限伸張した位置からの掘削(最遠位置掘削)の2ケースとし、幅はバケット幅、深さは1.2[m]と設定して行った。

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-2に示す。

表-2 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

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。



(a) 遠い位置掘削 (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 A)

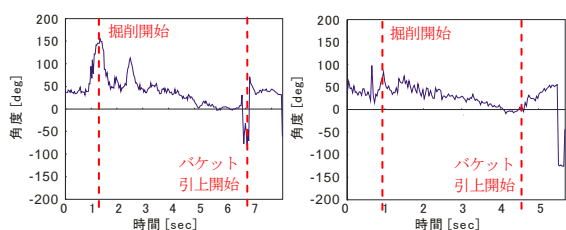


図-7 掘削方向とバケット底面のなす角度

(※オペレータ B)

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-6および図-7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。

3.2 仕上げ掘削用の動作計画

1) 軌跡追従型動作計画の概要と必要条件

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・検証した。

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。

動作を計画するためには、バケット先端の位置が決まった後に、機構上バケットの姿勢も決定する必要性があり、熟練オペレータの経験と掘削作業の計測データを分析した結果を参考にして、バケットの進行方向に対するバケット姿勢角などについて決定している。

なお動作計画コンポーネントにおいては、ブーム・アーム・バケットの状態を角度センサとストレロクセンサのどちらでも行えるように、各リンク間について関節角度とシリンダー長さの関係を計算できるようにしている。

2) 軌跡追従型動作計画の動作ステップ

図-8に掘削部分の軌跡として、台型掘削の軌跡を示す。バケット刃先の移動は①から⑤までの順に動かす。熟練オペレータの作業データの分析から、掘削幅Lと深さHはバケットの容量により計算されることがわかっており、ここでもそれを採用した。ただし、仕上げ掘削として軌跡追従型動作計画を使用するには、掘削深さのHはバケットのサイズとは別に掘削負荷の少ない値の範囲内に決定する。

なお、②から③への直線引きの部分はバケット姿勢がバケット底面を各速度一定に倒すように動かす。

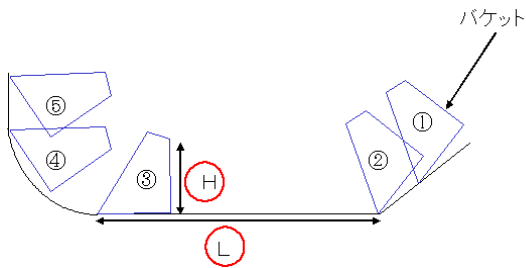


図-8 計画の台型軌跡の姿勢変化

前記の必要条件と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ている。なお、制御機器については、国土技術開発総合プロジェクト「建設機械のIT施工技術の開発」において仕様を開発したFF-PID制御器を用いた。

3) 軌跡追従型の実験

まず空中における無負荷状態で、その後、地中掘削での動作実験を行った。図-9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。

実験結果から、軌跡追従型動作計画による掘削動作の実現を確認した。なお、建機のブーム関節の制御量は重心変化による影響が大きいため、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も行った。

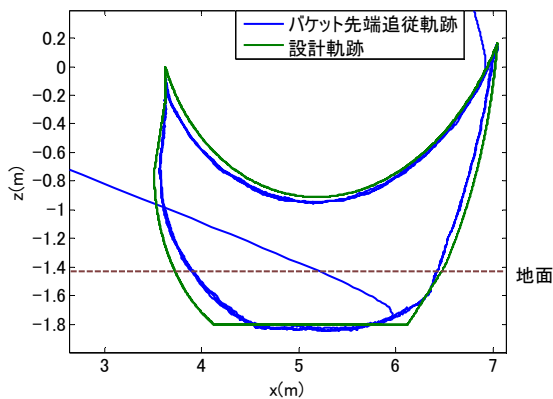


図-9 400mm掘削の軌跡追従状況

3.3 粗掘削用の動作計画

3.3.1 作業動作を分割して抽出される動作の要素(動素)による事象駆動型動作計画

1) 事象駆動型の概要

事象駆動型動作計画とは、ロボット工学における一般的な意味としては、ある事象が発生した時にある動作を駆動する動作計画を意味している。いくつかの事象駆動(○がその動作状態を表す)の遷移ル

ール(図-10中、矢印(→)で表される)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。

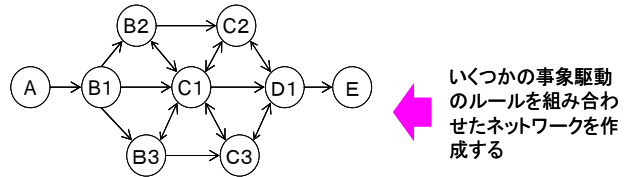


図-10 事象駆動型のネットワークのイメージ

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。

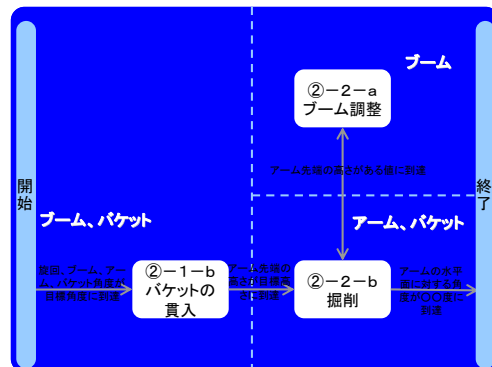


図-11 掘削を構成する単位動作のネットワーク

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。

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

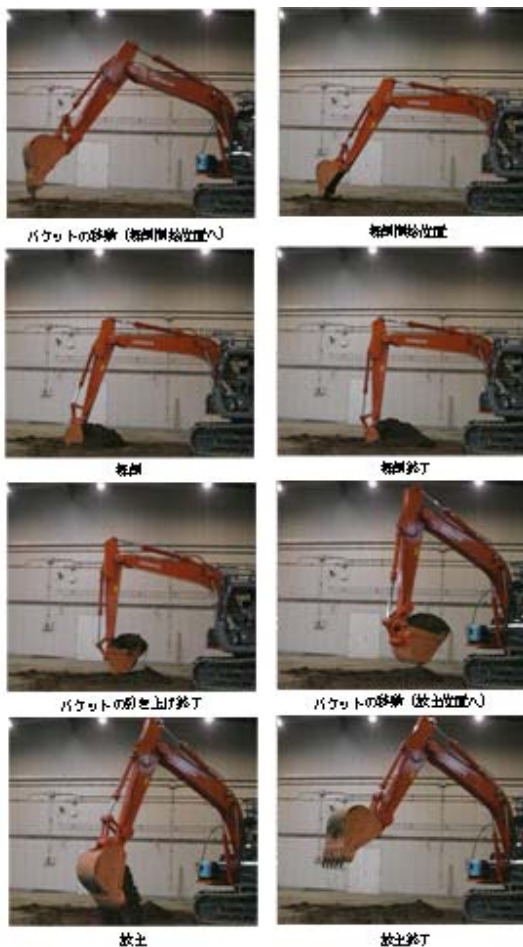


写真-1 機能検証実験の状況写真

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 で示す。

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、空中での動作と同程度のサイクル時間を確認することができた。

4) 事象駆動型動作計画の改良

上記開発を行った後、3.1 の熟練オペレータの作業解析で得たデータを用いて、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、2) で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-12 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。

表-3 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

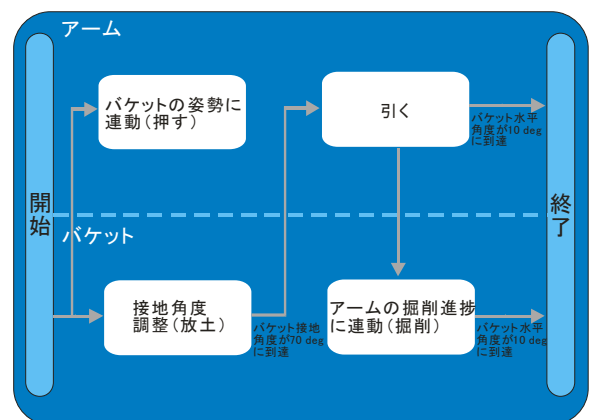


図-12 事象駆動ルールネットワークの改良

3. 3. 2 粗掘削用の軌跡追従型動作計画

3.1 において仕上げ掘削用の軌跡追従型動作計画を開発したが、その動作計画に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実現する事とした。

1) 軌跡追従型動作計画の改良

3.2 においては、図-8 中の黒線で表現されている、台形軌跡形状の動作計画を作成したが、ここに施工中リアルタイムで計測される掘削中の地盤面のデータと設計形状データを照らし合わせ、設定された掘削深さから、掘削開始点、掘削する底面延長を計算して、規定された深度になるまで繰り返し連続して掘削を行う改良を行った。なお、目標とする設計形状に対する掘削作業でのバケット刃先の軌跡精度に対する要求は低いので、サイクルタイムの設定を短く設定した。

設計形状データから設定された厚み分までの深度に達した後は、精度の良い（サイクルタイムの長く設定した）軌跡追従型動作計画を実施することとした。

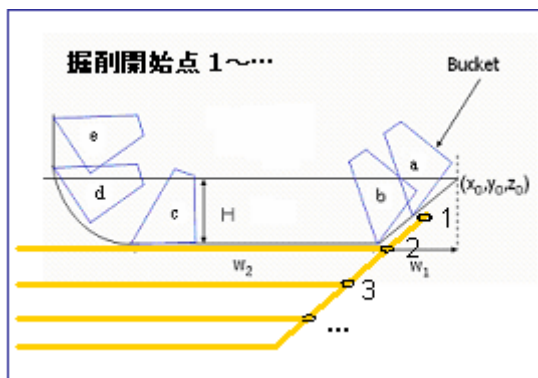


図-13 連続掘削イメージ

ここで、この繰り返し動作の一例を述べる。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と、出来形の土量は約 3[m³]であり、掘削中にある程度ほぐれるものと考え、概ね 3.5[m³]程度となる。1 掘削の土量がバケット容量 0.5[m³]の 2 割増程度の満杯を想定すると、最小掘削回数は 6 回と想定されるが、概ね、粗掘削は 4 回、仕上げ掘削は 2 回が予想される。実際の自律掘削では、次節で述べる 3 次元計測データにより調整することになる。熟練オペレータの作業解析からは、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。

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る。この 3 次元計測データは、総プロにおける研究成果である現況形状の 3 次元計測システムを用いる。

現況地形の 3 次元計測システムにおいては、その形状計測にレーザースキャナーを用いて膨大なデータが計測されるが、掘削・放土・掘削開始点への移動を油圧ショベルが行う間に、そこから得られるデータをどのようにその短時間に処理し動作計画コンポーネントに渡すかについては工夫が必要である。

計測データの処理に当たっては、は、図-14 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おり、15cm×15cm の中にあるレーザースキャナーの計測データの平均値を 1 点当たりの代表とした。ここでえられた計測データと、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。

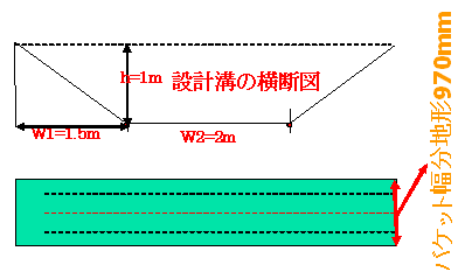


図-14 地形断面情報

4. プロトタイプシステムの開発

3. で開発した仕上げ及び粗掘削用の動作計画を総プロで開発した他のシステムと組み合わせ、ベースマシンである油圧ショベルに実装した。実装に当たっては、プロトタイプシステムで自動掘削を行う動作シナリオを作成し、その動作シナリオを実現する上で必要な動作計画について改良・開発し、システムの掘削実験を行った。

4. 1. プロトタイプ動作シナリオ

システムの概要は、図-1 で示したとおりであるが、自動施工を行う上で、当システムにおいて想定しているシナリオは以下の通りである。

- 1) オペレータが油圧ショベルを遠隔操作して、掘削位置が回転半径 7.5[m]~5.5[m]に入るように油圧ショベルを移動する
(※オペレータが遠隔操作時に用いるのは、図-14 に示す画面である。)
- 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、レーザースキャナによって周辺の 3 次元情報を計測する。
- 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。

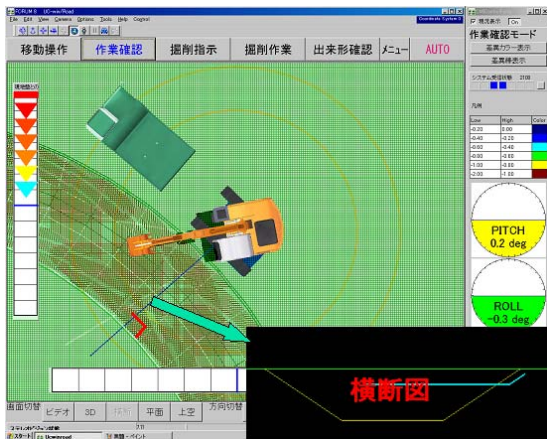


図-15 IT 操作システムの画面

4. 2. プロトタイプ実装のための追加開発

4. 2. 1. シナリオ内の掘削作業を行う動作計画

4.1 においてシステム全体の動作シナリオを述べた。その中の 4) で自動掘削に入り、5) において設計情報をもとに掘削作業を自動で行うこととなるが、その 5) での掘削・放土作業のフローチャートを図-16 に示す。

このフローに従い、掘削・放土作業を繰り返していくことになるが、それぞれの動作状態における油圧ショベルのブーム・アーム・バケットの姿勢と上部体の回転角度について、「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」の順に設定した動作計画を繰り返し実行する。各動作の遷移における状態変数は図中、「t」という変数で与えられている。各動作の完了が行われるたびに変数の更新がなされ、新たな動作が行われていく。

なお、図中の掘削状態における掘削動作については、粗掘削を 3.2.2 での精度要求の少ない軌跡追従型動作計画、仕上げ掘削を 3.1 での軌跡追従型動作計画を採用した。

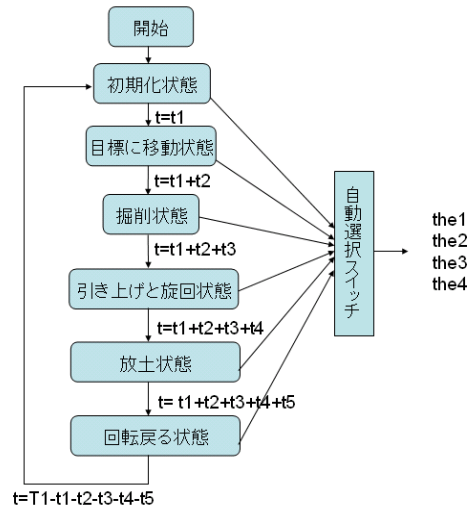


図-16 軌跡計画のフローチャート

また、自律掘削動作における、3次元情報の動作計画コンポーネントへのデータ授受は、以下の流れで行う。

- 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) 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。

なお、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。

4. 2. 2. 放土軌跡の動作計画と 3次元情報の利用

4.2 の動作計画の中で、油圧ショベルのダンプへの旋回とダンプベッセルへの放土動作が述べられているが、その動作計画と動作計画生成に用いるダンプベッセルの 3次元情報の処理・利用方法について述べる。

図-17 に積込対象であるクローラダンプの外観を

示す。放土前に受け取るダンプの情報、ベッセルの中心と、中心から左右 50[cm]の 3 直線をレーザー スキャナー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-18 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。

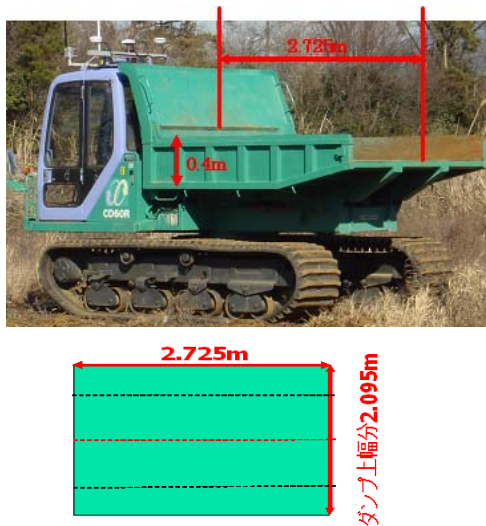


図-17 クローラダンプの外観とベッセルの面積

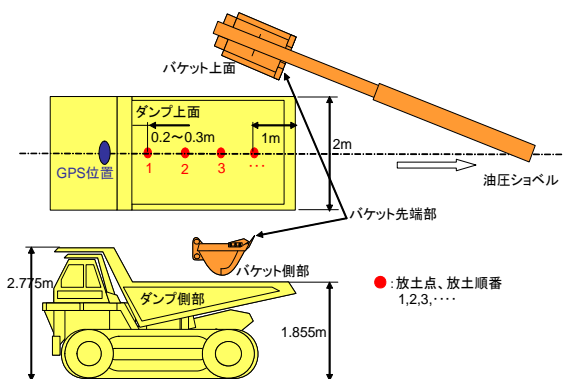


図-18 ダンプへの放土計画イメージ

4. 3. プロトタイプの掘削実験

4. 3. 1. 掘削実験の概要

4. 1 および 4. 2 で述べたシナリオ及び動作計画の追加開発を組み込んで構成したプロトタイプシステムについて、3 次元情報計測システムからの情報を用いて動作を行うプロトタイプシステムの掘削実験を行った。

粗掘削及び仕上げ掘削の精度及び効率に関わる重要な設定パラメータのサイクルタイムについては、掘削及び放土作業までの一連の 1 サイクルについてを設定する必要がある。FF-PID 制御器の使用におい

てはその制御特性から出力限界値が設定されているため、サイクルタイムの設定が短すぎると十分な動作が行われず、油圧ショベルのバケットがダンプのベッセルの高さを超えられずに、ベッセルに衝突を起こしてしまう危険などがある。

実験に当たっては、繰り返し動作のすりあわせ確認を行い、十分に安全が確保される中で最短のサイクルタイムを設定して動作実験を行った。

4. 3. 2. 実験結果

施工中に掘削毎に変化する現況地形の情報を元に掘削動作の計画を行えること、現況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、掘削終了の判定について動作の確認ができた。写真-2 に掘削作業中の様子を、写真-3 に出来形の写真を示す。

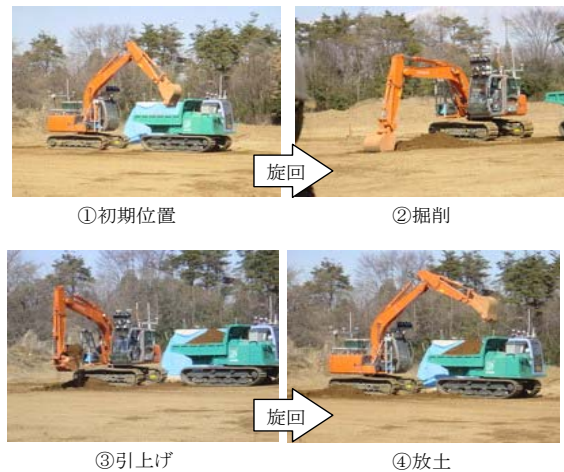


写真-2 一連の掘削作業状況



写真-3 自動掘削作業終了後の出来形

図-19 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。粗掘削においては、計画軌跡から若干離れた軌跡を動いているが、仕上げ掘削においてはかなり正確に追従が行われていることが確認され、2 回目仕上げにおける計画軌跡と追従軌跡の差並びに追従軌跡の変動差は 10cm 以内に収まっている (図-20)。

国土交通省の地方整備局などの出来形管理基準に

おける河川・海岸・砂防土工及び道路土工の掘削工に関する規格値は±50mm となっており、両側あわせた変動差が 10cm であることから、計画軌跡を出来形の基準高に対して+50mm に設定すれば、理論上は概ね出来形管理基準を満たす精度での施工が可能であると言える。

また結果としてのサイクルタイムは、粗掘削で約 40s、仕上げ掘削で約 50s となり、オペレータ搭乗運転における台形形状の掘削のサイクルタイムと概ね同等の結果を得ており、本研究におけるシステム構成での自動施工システムの有効性が確認されたと言える。

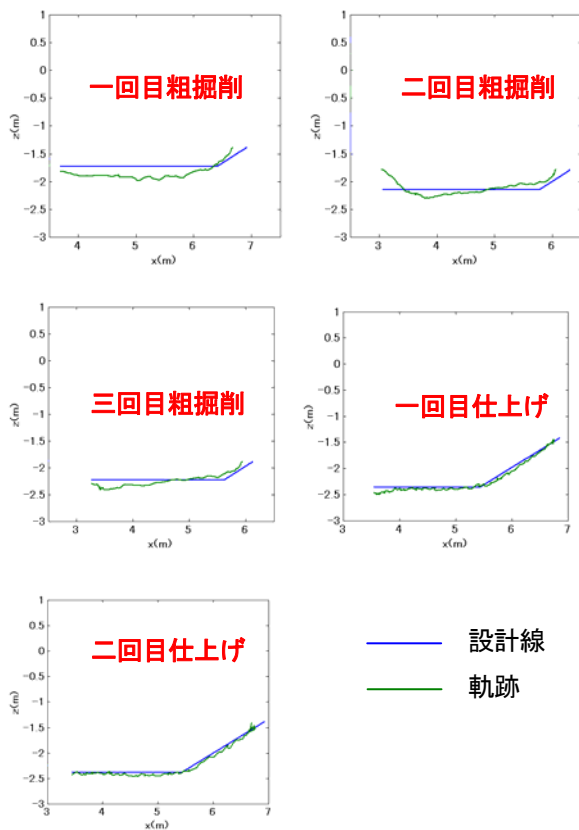


図-19 掘削時の計画軌跡と実掘削軌跡

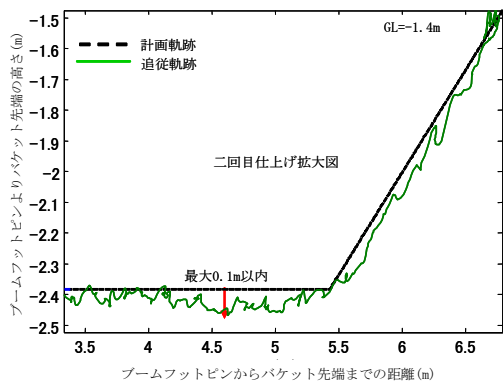


図-20 2回目仕上げの計画と実掘削軌跡の拡大

5. 多様な作業内容・地盤条件への対応

4. での検証実験ではプロトタイプシステムとして、一定の成果を上げることができた。

一方で、このシステムがすぐにあらゆる現場において導入することが可能であるかと言うことについては、実験場所が土木研究所構内の掘削の容易な土質条件（関東ローム）による検証であったことで、災害現場での復旧（地震・降雨等による土砂災害、火山による災害）作業を含め、多様な土質、掘削条件に対応できるものとなっていないのではないのかという課題が浮き彫りになった。

実際、将来的に現場での適用を想定した場合、現行の動作計画では事象の変化に対応することが難しいと思われる。

この問題への課題は2つで、1つ目の課題は大出力の油圧システムの制御をPID制御（より正確にはFF(Feed-Forward)-PID制御）によるコントロール下におくために、その出力の最大値に制限を与えており、機械本来の出力が十分に活かせておらず、それがシステムの対応できる土質に限界を与えていることである。2つ目の課題は、障害物などにバケット刃先がぶつかったときにそれを検知し、そのうえでその状況に対応した動作を行う動作計画になっていないということである。

そこで平成 20 年度および 21 年度においては、油圧ショベルを高い出力レベルでも制御できるよう動作計画と制御プログラムの改良とともに、多様な地盤条件・作業内容への対応として、障害物等地盤情報の把握を行う手法や障害物回避動作の開発にとり組んだ。

5. 1 粗掘削用の動作計画の改良

プロトタイプシステムにおいて動作計画の実現にあたり、制御プログラムに関しては、FF-PID制御プログラムの開発・実装を行った。

この制御手法は、本来線形系の制御系において高い再現性を発揮する制御器であり、非線形系として扱うべき油圧ショベルなどの大出力の油圧システムへの適用はされてこなかった。

しかし、PID 制御自体が産業界において最も多く利用されている制御手法であること、種々の工夫を施すことで非線形システムに対しても適用の実績を上げていることから、本開発においてもPID制御を制御プログラムとして適用するべく開発を行い、FF(Feed-Forward)-PID 制御による制御手法を開発

し、先のプロトタイプシステムによる掘削実験においては一定の成果を得た。

一方で、実験に用いた地盤よりも固い地盤の掘削で同様のサイクルタイムが実現できるのかという点については、その課題を否定できない。FF-PID 制御則の適用において線形系への近似のために入出力系統の動作範囲を制限したこと、機械出力の限界として適用地盤を狭めてしまっているからである。

この課題を克服すべく、粗掘削において FF-PID 制御にかわる新たな制御手法を導入して、油圧システムの出力量を拡大し、より固い地盤などの多様な地盤条件に対応できるよう、動作計画・制御プログラムの改良を行った。

5. 1. 1. 従来の動作計画の改良

1) 動作計画（制御プログラム部分を除く。）

粗掘削における制御プログラムの課題が油圧の出力量限界値を高める事にある一方で、動作計画における課題は、どのような経路で動かすことが効率的な掘削を実現できるかにある。

バケット刃先の運動速度を最大限大きくする一方で、バケット刃先の軌跡がより短い軌跡でより多くの体積をすくえることが、より高い掘削効率を実現できる動作計画であることが分かる。

そのためのバケット刃先の動作軌跡は、半径一定の円弧において最大であるため、動作計画において実現する軌跡は、土中を半円を描くような動き方になるよう決定した。

この軌跡を実現するために行う動作計画プログラムは、その実現したい動作軌跡上の数点（今回の検討では3点）において、それぞれバケット角度を入力値としブーム・アーム・バケットの姿勢を算出しそれに適合する各シリンダー長（もしくは角度）を求め、その値を動作計画で決定した通過点近傍に到達するごとに次の通過点で実現しなくてはならないシリンダー長を制御プログラムに出力するプログラムとした。

2) 制御プログラム

油圧系の動作においては、各シリンダーに流れる油量をコントロールして行うが、そのときの油量コントロール弁として用いられる電磁パイロット切替弁は、そこにかけられる電圧値によって弁開度が変わる機構となっており、制御系としてはこの電圧値が直接的な操作量である。

制御プログラムにおいては、現在のシリンダー長から、目標とするシリンダー長との差がある一定値に収まらない間は電磁パイロット切り替え弁に電圧をかけて弁を最大限に開き、ある一定値に収まってきたら弁開度を小さくし、最終的には弁を閉じる制御を行うようにした。

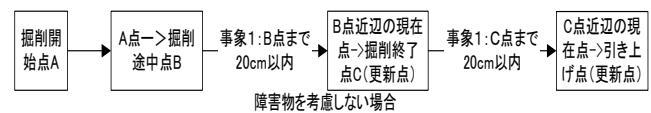
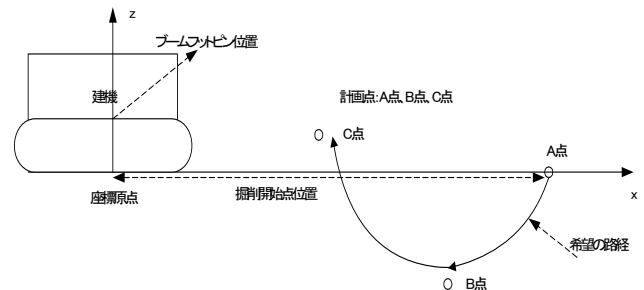


図-21 改良した動作計画（軌跡設計と動作フロー）

制御系においては、このフィードバック系のセンサー精度・与える出力の大きさ及び制動精度の組み合わせから、目標とする値に速やかにかつ振動などの無駄な挙動を発生させずにコントロールすることが課題である。今回の研究においては、前記のように、弁開度の開き方に段階を持たせることで、与える出力が大きい時には制動精度を粗くすることにより振動挙動の発生を抑え、目標値近傍においては、目標とする制動精度に収まるために必要な出力制限をかけて、必要な精度を実現することとした。

5. 1. 2. 改良動作計画の空中による動作実験

改良した動作計画の動作を確認するために、空中動作における動作確認の実験を行った。

掘削負荷のある土中ではない空中での動作確認実験を採用した理由は、今回の実験の目的が、従来よりも大きな出力すなわち大きな弁開度で制御したときにも、振動などの無駄な挙動を発生させずに制御可能となるかどうかを確認するためであることから、ブーム・アーム・バケットの振動などの不要な挙動の発生の有無を目視確認でき、かつ、掘削負荷のない空中での動作の方がより振動が起りやすい状況である厳しい実験条件であることから、空中における動作検証を選択した。

空中における動作は、任意のバケットの位置から掘削開始点（図-21 中の A 点に相当）へバケット刃先を移動させ、そこから、斜め下方への掘削疑似動

作(図-21 中の B 点に相当)、そこからすくい上げる引き上げ動作(図-21 中の C 点に相当)及びその場で放土を行う動作の一連とした。

実験に当たっては、まずは弁開度の調整として、空中動作における振動等の発生しない弁開度の最大を求めていった。調整に当たっては、現状のシステムの弁開度からその値を少しずつアップしていき、振動が発生するごとに、目標シリンダー長近傍での弁開度の絞り率(表-4 中、ゲインと呼ぶ)を高めることで対応した。次表がその調整の結果である。

バルブ開度%						ゲイン						周期	Case	
ブーム		アーム		バケット		ブーム		アーム		バケット				
down	up	down	up	down	up	dn	up	dn	up	dn	up			
20	30	25	25	20	20			1		1		約32s(振動)	1	
20	30	25	25	20	20		0.4		0.4		0.4	約35s	2	
25	40	30	30	25	30		0.4		0.4		2/5	約24s	3	
25	40	30	30	25	30			0.4		0.4		0.3	約25.5s	4
25	40	30	30	25	30	0.4		1		0.4		0.3	約20s	5
25	40	30	30	25	30	0.8		1		0.6		0.6	約19s(振動)	6
25	40	30	30	25	30	0.7		1		0.6		0.5	約19s	7
25	40	30	30	25	40	0.7		1		0.6	0.5	0.25	約16s	8
25	40	30	30	25	40	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.25	約13s	最終	

表-4 バルブ開度の調整プロセス結果

最終的な弁開度は、空中動作でありながら、ブーム及びバケットで最大 40%までの開度での動作確認ができた。従来の弁開度の利用が 25%前後での動作に絞られていたことと比較すると、より出力の高い動作の実現が可能になったと言える。

また、掘削動作部分の軌跡においても 3 点のみを指示することで、概ね、理想的な円形の軌跡を描けていることも併せて確認できた(図-22)。

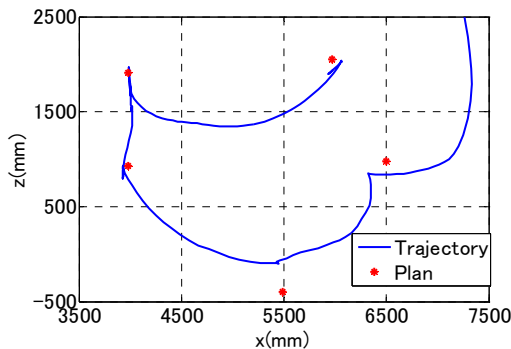


図-22 改良プログラムによる動作実験の結果軌跡

動作計画内で制御プログラムに渡される目標通過点近傍では、バケット刃先の減速が生じるプログラムになっていることから、少ない通過点指示で理想的な軌跡を描けることが確認できたことは、バケット刃先の速度を緩めることなく掘削動作を行えるため、より効率的な粗掘削を実現できる動作計画・制御プログラムになったということがわかる。

5. 2 障害物等の検知手法と回避動作の開発

油圧ショベルの掘削能力をより引き出すことで

きる動作計画が実現できたことで、より固い地盤でも掘削が可能となり、機械出力として多様な地盤条件への対応の範囲が広がったが、障害物などで完全に掘削が止まってしまう時にはその回避を行わなければ掘削が止まるだけでなく、油圧ショベルの転倒などの問題まで発生してしまう。

そこで、障害物等地盤条件変化の認識及び回避動作等の実現を目的として、平成 20 年度に油圧シリンダーからの力をバケットに伝達するために取り付けられているリンクプレート(以下、バケットリンクという)に歪みゲージを取り付け、バケット刃先にかかる掘削抵抗の大凡の値を計測するための基礎検討を行った。

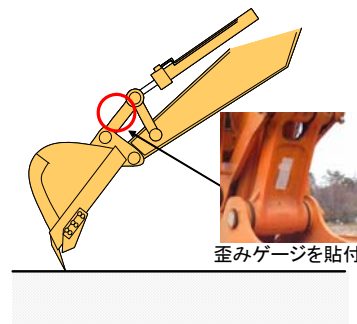


図-23 障害物認識用歪みゲージの貼付位置

検討の内容は、電磁パイロット弁が開いて油圧シリンダーへ作動油が送られ続けているときに、固い地盤や障害物に接触してバケット刃先が進まなくなると、油圧シリンダーからバケットに力を伝えているリンクに歪みが大きく発生してくるとの仮説に基づき、バケット刃先が受ける掘削抵抗の大きさと相関のある値が出てくるのかという検証を行い、両者ともに確認ができた。

一方で、油圧ショベルの自動制御に当たって各種センサーが取り付けられており、バケットリンクの歪み以外でも、それらシステムを構成しているセンサー類を用いて同様もしくはそれ以上のメリットを持って検知が出来れば、新たに歪みゲージを取り付けたり、そのデータ取得のためのコントロール PC へのデータ入力ポートの新たな追加などのシステム修正を行う必要がなくなる。

そこで、障害物の有無や地盤の掘削抵抗の変化の検知をより簡易に行える手法として、現在のシステム構成に用いられているセンサーを通じて得られる油圧ショベルの動作情報などから回避動作に簡易に結びつけるための手法の考案・検討を以下の節において行った。

5. 2. 1 障害物衝突時のショベル挙動

油圧ショベルが粗掘削を進める中で、障害物に衝突したときの動作挙動について考察すると、バケット刃先が障害物にぶつかった後、まずはその負荷によって油圧シリンダーの伸縮速度が低下することが予想される。その後は、油圧シリンダーの力が強いときには油圧ショベルの浮き上がりが発生することも予想される。

これらの挙動は、現システムに装備されている各センサー（写真-4）を用いることで計測が可能である。ブーム・アーム・バケットの関節に取り付けられている角度センサ（ロータリーエンコーダ）から計算してシリンダーの伸縮速度が、油圧ショベルに搭載されている光ファイバジャイロから油圧ショベル上部体のピッチ角が得られる。

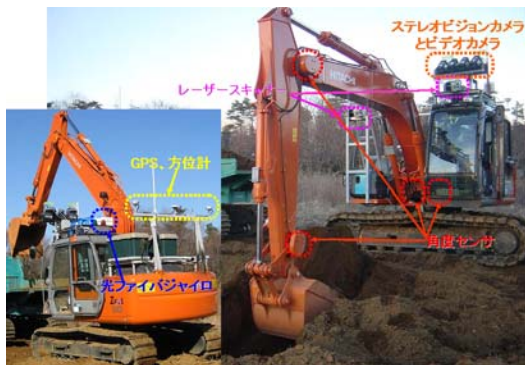


写真-4 現システムに装備されている各センサー

5. 2. 2 障害物衝突時の各データ計測実験と検知手法の検討

現システムのこれらのセンサーが、バケット刃先の障害物への接触に際して、どれだけの即時性と明確さで計測されるのか、またそれらの計測データを用いてどのような障害物検知の手法が考えられ、回避動作へのシグナルとして、土木研究所の油圧ショベルを用いた自動掘削システムにおいてはどのような手法が利用できるかに関して、実験及び検討を行った。

5. 2. 2. 1 検討方法

実験に先立ち、以下の図-24 及び写真-5 の通り、障害物の役割を果たすコンクリート板を埋め込んだ。コンクリート板は長さ×幅×厚さ:1.8m×1.2m×0.4mの大きさとし、埋め戻し時にはランマーを用いて、締固めを行った。

今回の実験では、実験データが掘削負荷の増大によるものと障害物によるものとの区別を見ることも踏まえて、バケット刃先の垂直方向の動きに対して障害となるような障害物とした。縦のコンクリート板

の設置目的は、掘削実験を繰り返し行うときに、障害物表面をバケット刃先がひっかくことで障害物の移動を起こさないためである。コンクリート板のサイズ及び埋設深さは、掘削時に確実に障害物を確実に捉え続けること、深さ方向の負荷増大をもデータ取得することを目的に、バケット幅:1.0mを超え、粗掘削の動作計画で想定する円弧軌跡の半径1.0mに対して十分な長さのサイズとした。

掘削に当たっては、5.1において開発した粗掘削用の動作計画・制御プログラムを利用している。

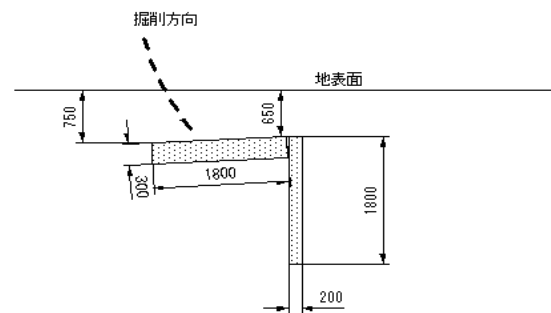


図-24 障害物の埋込状況 (イメージ)



写真-5 障害物の埋込状況 (写真)

5. 2. 2. 2 測定結果の整理と各データ特性の検証

実験にて計測したデータを、5つのグラフを縦に並べて次ページに示した。上から、バケットリンクの歪み (図-23 で示した歪みゲージにて計測) 及びピッチ角データ、バケット刃先の軌跡の水平及び垂直方向の経過、各シリンダーの伸縮速度データ、各油圧シリンダーへのバルブ開度の順で次ページの図-25 に示す。

全てのグラフの横軸は、実験における各種データの計測開始からの経過時間であり、縦軸はそれぞれの標記の通りであるが、最上段にあるバケットリンクの歪み及びピッチ角については、縦軸はピッチ角の単位:「度 (degree)」を表しており、バケットリンク歪みについては、当該グラフに収まるように係数の処理を施している。

バケット刃先の垂直・水平方向の位置についての

グラフは、油圧ショベル上から見た機械座標系（図-4）に基づいて計算されたものである。なお、垂直方向の0点は地盤面とズレがある。またピッチ角については、計測開始時間における姿勢で0°と計測しているため、そこから、掘削開始位置へのバケットの移動においてアーム・ブームを伸ばすことで

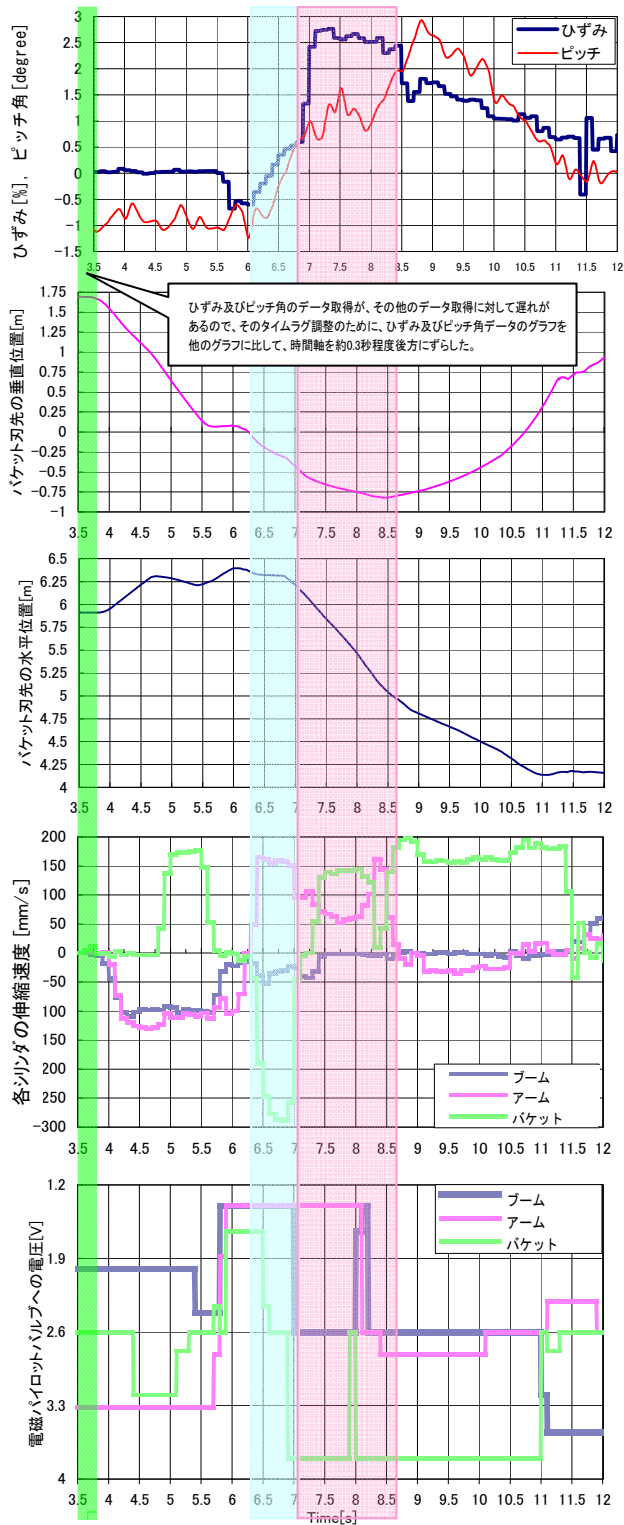


図-25 実験結果(バルブ電圧・シリンダ速度・刃先位置)

ショベルが前方に傾き、グラフの表示開始時刻 3.5 秒の時点では、既に -1° 程度の角度を持っている。

ひずみデータについては、約 5.6 秒の時点から、一端マイナス方向に振れているが、これは掘削開始点近傍でバケットが掘削開始角度に自動調整された際にバケットが開いたことで、バケットリンクに引張りが生じた事によるものである。以下、グラフから各データの特性について検討を行う。

1) バルブへの電圧負荷とシリンダ伸縮速度の応答遅れ
まず、入力データである電磁パイロット弁への入力電圧が入った後、シリンダーが伸縮速度を持つまでの時間に遅れがあることが観測された。概ね、ブームシリンダとアームシリンダでは 0.4~0.5 秒、バケットシリンダにおいては 0.5~0.6 秒程度の遅れである。これは、パイロットバルブへの電圧負荷の後にパイロットバルブが開き、そのバルブを通じて流れる作動油がメインバルブを動かすことでシリンダに作動油が流れ込むという仕組みによって、生じる遅れである。

2) 掘削開始点及び障害物接触時刻の特定

次に掘削開始点時刻、障害物と衝突した時刻の特定を行った。最上段の歪みデータを見ると、約 6.0s を境に上昇に転じており、約 6.8 秒の辺りで著しくデータの立ち上がりを確認できる。前者が地盤の掘削開始点、後者が障害物との接触点であると推察される。

これらの時刻が地盤面の掘削開始点と障害物との接触点であるかを確認するため、2 段目のバケット刃先の垂直位置を表すグラフを用いて、上記時刻に相当する時間でのバケット刃先の垂直位置の変位量が埋設物深さと整合性があるかについて確認する。

バケット刃先が、バケット・リンクの歪みデータのグラフにおける約 6.0 秒の点で地面を掘削しはじめたと仮定すると、バケット刃先は垂直方向に移動をはじめていなければならない。バケット刃先の移動を表すグラフで、その変位が確認されるのは約 6.3 秒の地点であることから、シリンダに関わるデータから求められるデータのグラフ 3 つと弁開度のグラフを約 0.3 秒ずらして表示している（図中緑の網掛け部分がずらし量）。すると、歪みデータのグラフにおける約 6.1 秒から約 7.2 秒までのブルーで網掛けしている領域で、バケット刃先は垂直方向に約 70cm の移動量を示しており、その間のピッチ角の浮き上

がりによる影響を考慮しても、埋設物深さ約 65cm から約 75cm であることと概ね整合がとれていることが分かる。

また、バケット刃先が垂直方向に対して上昇を開始していると思われる約 8.5 秒前後の点において、ひずみデータも大きく値を下げていることから、障害物との接触及び接触物表面に対するバケット刃先の滑りが、この点で終了したものと予想される。ここで、バケット刃先の滑り現象の発生を述べたが、2 及び 3 段目のグラフにおいて、バケット刃先の垂直方向の単位時間変位量が減少し、水平移動量が増大していることから、障害物の表面を滑る現象が発生していたことが予想され、さらに、4 段目のグラフにおけるバケットシリンダの伸縮速度増加から、約 8.5 秒後の点においてバケットがすくい動作に入ったことが確認されており、これら各データの整合から、朱で塗った領域がバケット刃先と障害物との接触している領域であることが分かる。

3) 各データの障害物接触時の特徴の考察

障害物の接触を的確に把握することに目的があるため、障害物接触時の特徴を見るに当たっては、その適切な判別が可能であるかどうか、そしてそれがどれだけ早くできるものであるかという特徴が重要である。それらの観点から、以下で 3 つのセンサーデータについて特徴を考察した。

① バケットリンク歪み

2) の障害物衝突点の特定においてグラフの移動を行っていることから、最も早期に障害物への反応が計測されるのがバケットリンク歪みデータである。

また、地中掘削時と障害物衝突後との間では、極めて明確なデータの立ち上がりが見られていて、これは、掘削可能な地盤と掘削不能な障害物との判別に極めて有効な特性であることが分かる。

バケットリンクへの歪みゲージの取付けの手間とそのためデータ取得のためにポートを割り当てなければならないという点では、他の 2 つのセンサーデータに対して不利ではあるが、上記の反応の早さと明確なデータからの判別性は、以下の二つのデータを遙かに超えるメリットを持つと思われる。

② シリンダー伸縮速度の変化

シリンダーの伸縮速度の変化が障害物に衝突後に観測されるのは、グラフのずらし量から分かる通り、バケットリンク歪み及びピッチ角データに遅れ

ること、約 0.3 秒後である。この時間は一見大差のない量とも思われる。ただし、水平方向にバケット刃先が動いている際に、サイズの大きな障害物に衝突したときには、数字の回避動作にて障害物を繰り返し認識し続けることが予想され、そのときには、この遅れ時間が累積し、サイクルタイムに影響を及ぼす大きさになることは否定できない。

一方で、掘削時に支配的に動作しているアームシリンダーの速度に着目すると（図-25 の上から 4 段目のグラフのピンクのライン）、障害物衝突時のシリンダー伸縮速度の減少割合は、シリンダーの伸縮速度：約 150mm/s から約 100mm/s と約 30%以上の減速を示しており、この比率は、障害物の判定に利用可能な水準であると思われる。

一方で、同図中において、障害物との接触後の約 7.4 秒の時点と約 7.6 秒の時点で比較しても、アームシリンダーのバルブ開度が同じ値である中で、約 30%以上の減速を示している現象が現れている。この現象は、図-25 の上から 4 段目の電磁パイロットバルブへの電圧を示すグラフにおいて、バケットの電磁パイロットバルブ（図中で緑色に示されている）に電圧がかかっていることが確認でき、これによりバルブが開かれた事によってバケットシリンダーへの作動油の流れが発生したことで、アームシリンダーへの作動油供給が低下したことによるものと思われる。

この現象から分かるとおり、一律に 30%の減速を以て障害物との接触があったと解するには障害物を過度に誤認識する可能性がある。今回用いている油圧ショベルの油圧システムはオープン・センタ・システムに分類されるもので、同じバルブ開度でも、そのバルブで操作しているシリンダーへの負荷状況や他のバルブの操作によって、作動油流量が変化する特性を持っており、その特性が今回の実験条件でも影響を与えるレベルであるということだと解釈できる。

よって、土木研究所で開発した自動掘削システムでこのセンサーデータを用いた障害物検知手法を開発するに当たっては、各シリンダーバルブの操作とそれによる作動油の流れの変化・シリンダーの挙動特性を調査の上で、障害物の判別則を設定する必要があることがわかった。

③ ピッチ角

ピッチ角の反応の早さも、バケットリンクひずみ

のデータに対して劣ってはいない。

ただし、図-25 最上段のグラフからにおけるデータ（図中では赤で表示）の傾向からは、若干固い地盤を掘削している最中なのか、障害物に衝突しているのかを明確に峻別するだけのデータとしての違いが観察できない。これは、このデータ単独での障害物衝突判定が難しいことを意味している。バケット刃先の移動データと組み合わせて、バケット刃先の機械座標系上の移動が、実質的に地中の掘削に貢献しているかどうかを判定することは可能かもしれないが、それを行おうとすると、各シリンダの速度情報を待って同期を取りつつ処理を行い判断を行わなければならないため、即時性というメリットが失われてしまうので、その判断手法については、バケットリンク歪みデータには後れを取ってしまうという課題が考察される。

①から③までの特性の比較を検討すると、障害物の検知に関する各センサーデータの特性は、以下の表-5の通りとなる。

表-5 障害物検知に関する各センサーデータの特性

	① バケットリンク歪み	② シリンダ速度	③ ピッチ角
即時性	◎ (最速で反応)	△ (0.3秒の遅れが累積で悪影響)	○ (峻別にシリンダ速度活用すると△)
峻別性	○ (明確な上昇)	△ (他シリンダの動作が影響)	△ (単独では明確に峻別不可)
データ取得の容易性	△ (歪みゲージ取付とポート割当が必要)	○ (既存センサーの利用で可)	○ (既存センサーの利用で可)
総合評価	○	△	△

5. 2. 2. 3 障害物検知手法の検討・提案

前節の結果に基づいて、各センサーを用いた障害物検知の手法について、具体的な検討を行った。考案した手法は、以下の3手法である。

① バケットリンク歪みデータを用いる方法

前節で行った実験と同様の位置に歪みゲージを貼り付け、それによる歪みデータを障害物検知に活用する方法である。自動制御に用いるセンサー類に追加して新たなセンサーを取り付け、そのためのデータ取得ポートを用意するなどシステムに修正を加え

る手間が発生はするが、即時性と明確性を兼ね備えた手法である。

実用化に当たっては、瞬間的に発生するノイズに過度の反応をして誤認知しないよう、歪みの発生後ある一定の時間、それが継続するときに掘削抵抗を高めるような物体にぶつかっている可能性があるとして、動作計画に回避動作のシグナルを発生させるといった方法が考えられる。

② シリンダ伸縮速度の理想値との乖離を用いる方法

予め、弁開度に対するシリンダの伸長・収縮速度をリストとして保有し、ある弁開度で動作しているときに実際に動いているシリンダの伸長・収縮速度をそのリストからわかる理想速度と比較し、その差が大きいときには障害物による掘削の阻害を受けていると判断して動作計画に回避動作のシグナルを送る手法である。

前節で行った実験結果からは、センサーデータの取得にかかる遅れと、油圧システムの特性を踏まえた判別則の構築に難があるとの結果が得られており、現在のシステム構成では採用には未だ検討事項が残る手法ではある。しかし、今後、システム構成に用いているセンサーを、各関節の角度変化を測定するロータリーエンコーダから、直接シリンダの伸縮を測定できる油圧シリンダ内蔵型のストロークセンサーに変更するなどの改良等によって、センサーデータの取得遅れの課題については解消される可能性がある。

また、シリンダごとの負荷状態がわかることによって減速しているシリンダに対して個別にバルブの開度を上げるといった細かくかつ自由度の高い制御が可能になるといった他の手法には無いメリットが新たに期待できる他、回避動作もより高い自由度で計画できるという可能性も期待される。

ただし、この手法には更なる課題もある。前節で、速度変化を見るために着目するシリンダの伸縮速度が他のシリンダの動きに影響を受けて障害物との接触とは無関係に減速を起こすことが確認され、その影響のレベルは障害物認識にも匹敵するものであることがわかった。この現象による障害物認識に関わる課題については、油圧システムの特性を十分に把握することが必要である。

一方で、現在油圧ショベルに用いられている油圧システムは、ブーム・アーム・バケットのそれぞれ

についてのオペレータ操作量に対するバケット刃先の動きの対応関係が、掘削負荷によって変動してしまうオープン・センタ・システムと、変動を起こさないような補償が加わっているクローズド・センタ・システムの2つが存在している。そして、その大きな違いがお互いのシステムの長所を組み入れるべく改良が図られ続けており、その技術的な違いは近年だんだんと溝を埋めてきているところであることが、油圧ショベルメーカーの技術者との意見交換等からわかっている。しかし、現時点では油圧システムの特徴が収斂をするには至っていない。これらの情報を考慮すると、近い将来に実現される可能性のある油圧システムの技術収斂を待ってから、改めてこの油圧シリンダーの伸縮速度に着目した手法の具体的な開発及びその実用性検討を進めていくのが妥当であると思われる。

③ バケット刃先速度減速率をシグナルとする方法
最後に検討・提案する手法は、現時点においては、シリンダー伸縮速度データを個別に利用することが困難であるとの②の手法の検討での認識のもと、各シリンダー操作による影響を排除するために、各シリンダーの動きの総合的な結果であるバケット刃先の移動速度の減速に着目し、各シリンダー操作の相互作用による作動油流量の変化を相殺して障害物によるバケット刃先への負荷による速度減少のみを挙動として捉えることをねらった手法である。

具体的に手法について述べると、バケット刃先が掘り進んでいく過程で、1ステップ前に観測されたバケット刃先の移動速度と現在の移動速度を比較し、その減速が著しい時に掘削効率が著しい低下を招いていると判断し、回避動作を行うべきとのシグナルを動作計画に出す手法である。

現在の土木研究所の掘削システムにおいては、動作計画でバケット刃先位置を算出して計画点通過を確認する機能があり、そこでやっているバケット位置に関する情報を保存し、制御周期のステップごとにその移動量から移動速度を算出できるため、導入に当たっては、簡易なプログラム修正によって導入できるというメリットがある。

以上の3つの障害物検知手法の提案を整理すると、以下の表-6の通りである。

なお、表中での基本的な判定結果は、現在の技術認識から行っており、総合判定はその結果を受けている。また、「システム構成の容易さ」においては、

現在の土木研究所の自動掘削システムでの追加開発に対する容易さを意味している。

表-6 障害物検知手法の検討結果

	① バケットリンク歪み	② シリンダーの伸縮速度	③ バケット刃先移動速度
障害物の検知性	◎	△ (油圧システム・センサーの改良で ○ or ◎)	○ (繰り返しの回避が少ないことが前提)
回避動作の自由度	○	◎ (各シリンダー毎の制御が可能)	○
システム構成の容易さ	△ (新たにハード・ソフトに要修正)	—	○ (そのままのシステムの構成で実現可)
総合	○	△ (課題が解決されれば理想的手法)	○

ここでの検討結果から、①及び③を同評価としたが、土木研究所の自動掘削システムで障害物回避動作の実現において導入する障害物の検知手法については、その導入の容易さを考慮し、③のバケット刃先移動速度の減速度からシグナルを得る方法を活用することとした。

5.2.3 障害物回避動作の動作計画

5.1 で述べた改良動作計画・制御プログラムを用いて、前節までで検討したシグナルを基に回避動作を行うための回避動作の動作計画を検討した。

5.1 において開発した動作計画は、動いて欲しい軌跡の中から、その挙動を作り出すために重要となるバケット刃先の通過点を算出しそのときのシリンダー長を計算して制御プログラムに渡すプログラムであるから、回避動作の計画も、回避するとき重要となる通過点の設計を行うこととした。回避動作の計画においては、熟練オペレータへのインタビューにおいて得られた結果から、障害物へ当たる前に行っていたバケット刃先の移動を戻す形で

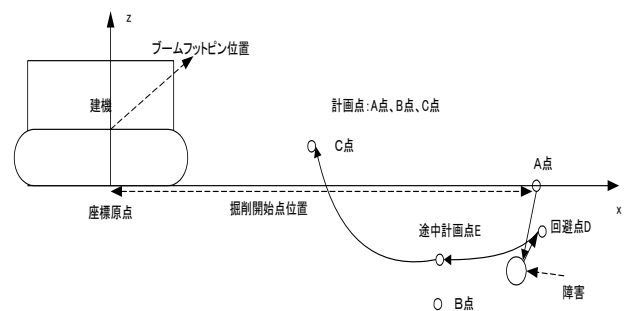


図-26 回避動作計画の軌跡設計

移動するように設計した。全く情報のない地盤中において唯一明らかになっているバケット刃先の移動可能範囲が、障害物に当たる前までにとっていた軌跡であるということからも、回避動作において再度障害物に衝突して動けなくなることを避ける意味がある。

具体的な回避動作を組み込み、5.2において開発した新たな動作計画をさらに修正した。(図-26)

5.2.4 障害物回避動作の動作実験

回避動作の確認を図るに当たり、5.2.2.3で検討を行った手法の③「バケット刃先移動速度」を回避動作を発生させるシグナルとして採用して、回避動作の有用性の確認を行った。

図-27は実験結果のグラフで、バケット刃先の実軌道を示している。障害物にバケット刃先が触れ、シグナル発生後、若干の軌跡のぶれはあるが、バケット刃先が進行してきた軌跡の過去の点に戻っている様子が確認できる。その後、新たに設定された計画軌跡に従い油圧ショベルが動作を続け、引き上げ・放土作業へ移行していることも確認された。

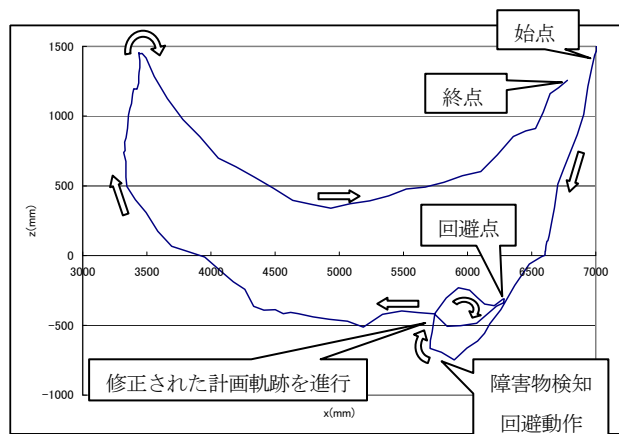


図-27 回避動作計画の実験結果の軌跡データ

本実験により、効率の良い新たな動作計画・制御プログラム上で、自動制御に用いているセンサーのみを用いた障害物の検知とその回避動作の実現が確認できた。

6. まとめ

6.1 研究成果

本研究では、設計情報を含む指示情報から、自動化された油圧ショベルが自ら動作計画を生成し、制御する方法の開発を行い、そのプロトタイプを開発し実験を行い、オペレータの搭乗操作にほぼ匹敵する作業効率と施工精度を実現した。

- 1) 効率的かつ精度の良い仕上がりを実現するために、粗掘削と仕上げ掘削に分けて事象駆動型及び軌跡追従型の動作計画を開発し、設計情報とリアルタイムの施工形状に基づいて掘削動作の計画を自動生成する機能を開発した。
- 2) 国土交通省の地方整備局などの出来形管理基準における河川・海岸・砂防土工及び道路土工の掘削工に関する規格値(±50mm)を概ね満足するレベルでの掘削を実現し、粗掘削で約40s、仕上げ掘削で約50sとオペレータ搭乗運転における台形状の掘削のサイクルタイムと概ね同等の結果を得た。

一方で、平成19年度までに実現したプロトタイプでは対応できる可能性の少ない多様な地盤条件等に対応できるようにするべく、制御可能な範囲に絞っていた機械出力の限界値をさらに高めるための動作計画と制御プログラム開発してその動作を確認したほか、障害物の有無などを認識するための手法検討を行い、土木研究所のシステムに親和性の高い障害物検知手法を実装して回避動作の実現を行った。その結果、以下のことが確認された。

- 3) 目標シリンダー長さへの近づき度合いに応じて電磁比例弁の開度を調整する制御プログラムの導入により、機械の持つ高い出力においても振動等の問題を起こさずに制御下におけることが、空中動作の実験を通じて確認し、制御則の有用性を確認した。
- 4) 障害物の認識手法について3つの方法を考案し、その実用性を検討した結果、現時点のシステム構成においては、バケットリンクの歪みデータを用いた手法が最も早期で明確に判別が可能で有効な手法であるが、シリンダー伸縮速度データを加工してバケット刃先の移動速度変化を用いる手法も有効な手法であることがわかった。
- 5) 回避を行う動作計画の生成ルールとして、戻し動作と引き上げ動作の組み合わせを考案した。
- 6) 1)での修正した動作計画・制御プログラムに、5)の回避計画を追加し、4)におけるバケット刃先の移動速度変化を用いたシステムで回避動作実験を行い、その動作を確認した。

本研究において、動作計画・制御プログラムの修正によって固い地盤の適切な掘削作業が可能となっ

たほか、障害物などの検知を行いそれに対応して回避動作を行う手法を実現できた。

また、将来、現在様々な改良が行われて続けている油圧システムがより高度に収斂して掘削負荷に対する一定した動作特性が共通して確認されるようになり、また各種センサー類の改善が図られた折には、シリンダーの伸縮速度を活用して、より効率の高い掘削作業の自動化を実現する自動掘削システムが開発できる可能性がわかった。

6. 2 今後の展望

本研究の実施にあたり、土木研究所で開発した油圧ショベルの自動掘削システムの開発研究と並行して、自動掘削システムの適用を想定した無人化施工現場の現地調査、自動化開発事例の調査を行い、それら関係者へのヒアリングを実施し、研究の方向性の確認を行ってきた。

その結果、オペレータによる操作を基本としつつ、それをサポートする部分的な自動化技術への有用性について期待があるとともに、かつて先行メーカーによって開発・販売されていた仕上げ動作をサポートする部分的な自動化システムが現時点でもユーザーに利用され続けているなどの実態があることが分かった。

土木研究所における研究において明らかになった油圧ショベルの自動化における現状での実現可能な技術領域の実態とそこから見えてきた課題をもとに、どのような作業で具体的に自動化のメリットがあるのかを分析し、技術的・経済的有用性がある部分への自動化技術の検討を改めて行っていくことは、今後、土木工事現場における高度化に資するものであると思われる。

具体的な今後の展開の方向性としては、先の関係者ヒアリングなどでニーズが確認されている遠隔操作機械を用いた作業現場などにおいて、その作業の効率化等の課題実態の把握とその課題解消などに本研究での成果を活用していくことが有効である。

また、機器を構成するセンサー類や油圧システムの技術状況について、センサメーカーや油圧ショベルなどを含めた建設機械メーカーなどの関係者への調査を継続して行い、機器等の耐環境性や機能の充実状況及びコストなどについて調査を進めていくことも、本研究を通じて得た自動化技術の知見を有効に活用していく上で必要である。

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) S. Singh, Synthesis of Tactical Plans for Robotic Excavation, Ph.D Thesis, Carnegie Mellon University, 1995.
- 3) 独立行政法人土木研究所，平成 19 年度建設機械の I T 施工技術検討業務報告書，平成 20 年 3 月
- 4) 岡部信也：「油圧ショベル大全」、2007