

戦-5 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 I T 施工技術の研究開発を進めている。

平成 21 年度は、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を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、障害物回避動作の開発を行った。

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

平成 18 年度までの成果として、I T 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制御技術として、設計情報と地形情報に基づく動作計画を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作業形態に関する実態調査を実施し、その結果に基づく動作計画として粗掘削・仕上げ掘削作業を実現させた。

平成 19 年度では、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り、作業効率の向上、自動制御するための動作計画として地形情報の 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、I T 施工システム全体としての評価を行った。

その結果として、I T 施工システムにおける、地形等

の計測、動作計画による掘削～積込み作業、作業状況表示等の機能を確認することができた。

現在までの検証実験では、土木研究所構内の掘削が容易な土質条件（関東ローム）による検証であったため、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）に必要な多様な土質、掘削条件に対応できるものとなっていない。このため、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（正確には FF-PID 制御）によるコントロール下に置くために、その出力の最大値に制限を与えており機械本来の出力を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関知し、それに対応した動作を行う動作計画になっていないことである。

そこで平成 21 年度は、平成 20 年度に行ったバケットリンクのひずみ手法に加えて油圧ショベルの動作などから障害物等地盤情報の把握を行う手法に係る検討を行いその有用性を把握したほか、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を行った。また、新たな動作計画・制御プログラムに障害物等地盤状況を把握する手法の一つを用いて、障害物回避に係る実験も行った。

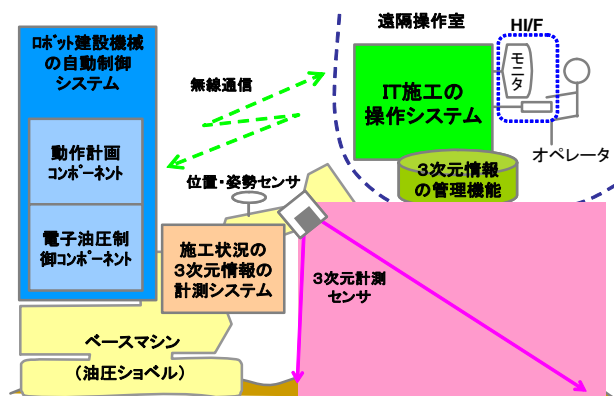


図-1 システム概要図

2. 粗掘削用動作計画・制御プログラムの改良

2.1 従来の動作計画と制御プログラムの課題

平成 18 及び 19 年度に、油圧ショベルの掘削作業を自動化するに当たって必要な、掘削作業のショベルの動作の計画と、その計画の通りに機械を動かすために必要な制御プログラムの開発を行った。

動作計画とは、文字通り動作の計画で、本稿では特に、油圧ショベルが掘削作業を行うときのブーム・アーム・バケットの動き方の計画を指している。どのような動作で動いて欲しいかを先に決定し、その計画通りに機械の持つ動力系に制御信号を与えて動作を発生させる役割をもつのが制御プログラムである。これら二つを組み合わせることで、必要な作業を油圧ショベルで自動で行わせることができるようになる。

今までの研究成果から、仕上がり面をある程度の精度で実現することと、土砂を効率よくすくいだし排土する作業はそれぞれ分けて実施することが効率的であることが分かっており、前者を仕上げ掘削、後者を粗掘削とよび、それぞれについて動作計画・制御プログラムを分けている。(図-2)

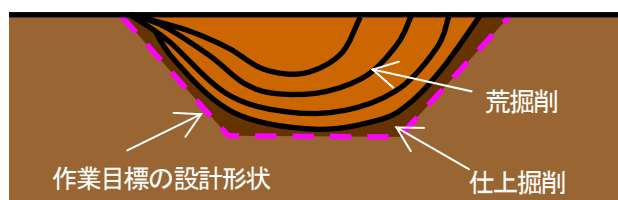


図-2 掘削動作の種類 (イメージ図)

仕上げ掘削の動作計画では出来形の形状を正確になぞるようなバケット刃先の動きを計算し、その計画を忠実に再現する出力を行う FF-PID 制御プログラムを開発実装した。この制御プログラムは、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、他の研究においては、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が、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高い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べく開発を行い、FF(Feed-Forward)-PID 制御による制御手法を開発した。

平成 19 年度に行った IT 施工システム全体としての評価においては、この仕上げ掘削用に開発した動作計画及び制御プログラムを、パラメータの設定において精度を若干犠牲にして高速に動作を行うようにしたものを粗掘

削用の動作計画・制御プログラムとして利用し、トータルとして、平均的なオペレータ搭乗によるサイクルタイムに比して同等に近い効率を実現するとともに高い仕上がり精度を得ることに成功しその有効性を確認した。

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、未だ課題となっている。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から、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。

この課題に対応すべく、平成 21 年度においては、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範囲を拡大し、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。

2.2 改良

2.2.1 動作計画及び制御プログラムの改良検討

1) 動作計画

粗掘削における制御プログラムの課題が油圧の出力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化す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。

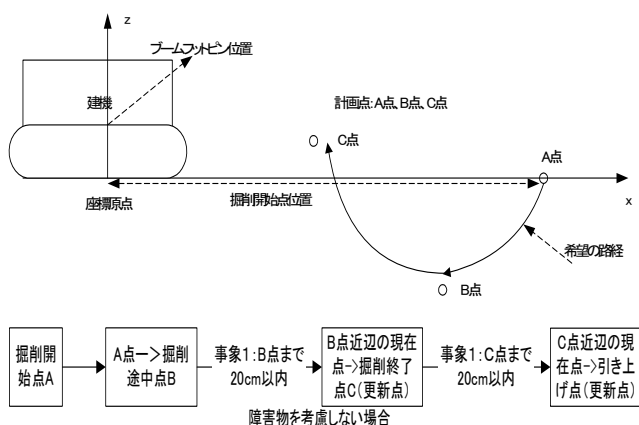


図-3 改良した動作計画 (軌跡設計と動作フロー)

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。

2.2.2 改良プログラムの空中動作による動作実験

改良した動作計画と制御プログラム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-3 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-3 中の B 点に相当)、そこからすくい上げる引き上げ動作 (図-3 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-1 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			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		約25.5s	4	
25	40	30	30	25	30	0.4	1			0.4	約20s	5	
25	40	30	30	25	30	0.8	1			0.6	約19s(振動)	6	
25	40	30	30	25	30	0.7	1			0.6	約19s	7	
25	40	30	30	25	40	0.7	1			0.5	約16s	8	
25	40	30	30	25	40	0.3	1	0.4	0.3	0.25	約13s	最終	

表-1 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-4)。

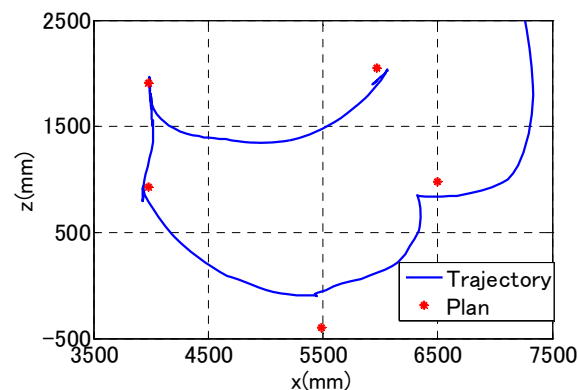


図-4 改良プログラムによる動作実験の結果軌跡

動作計画から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。

3. 障害物等の認識と回避動作の実現

3.1 障害物等認識の必要性

油圧ショベルの掘削能力をより引き出すことのできる動作計画・制御プログラム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年度は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。

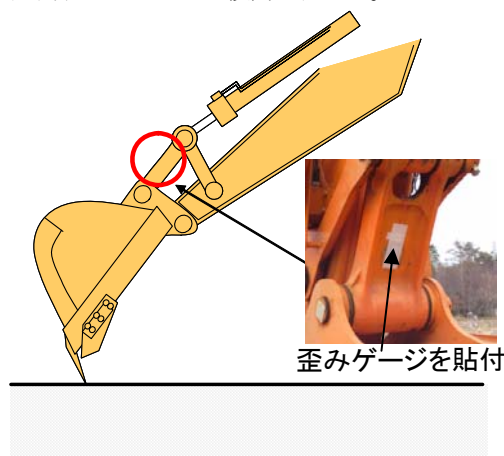


図-5 障害物認識用歪みゲージの貼付位置

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、固い地盤や障害物が存在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、その値が十分に観測可能かどうか、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できれば、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無くなる。

そこで平成21年度においては、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。

3.2 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-1）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ー（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-1 現システムに装備している各センサー

3.3 障害物衝突時の各データ計測実験・検知手法検討

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。

3.3.1 検討方法

実験に先立ち、以下の図-6及び写真-2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。

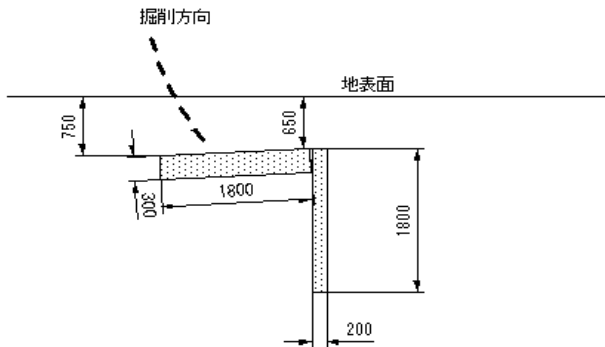


図-6 障害物の埋込状況 (イメージ)



写真-2 障害物の埋込状況 (写真)

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、2.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。

3.3.2 測定結果の整理と各データの特性の検証

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-5で示した歪みゲージにて計測)及びピッチ角データ

(写真-1にある光ファイバージャイロにて機械全体の前方への傾きを計測)、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-8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。

なお、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、油圧ショベルに設定した機械座標系(図-7)に基づいて計算されたものであり、今回の測定では、水平方向の原点は油圧ショベルの旋回中心であるが、垂直方向の0点は地盤面に対して0.08[m]のズレがあった。

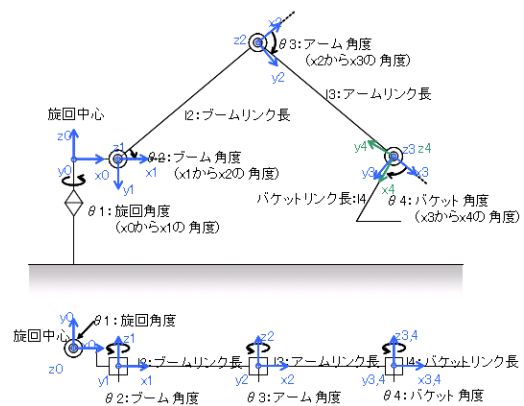


図-7 油圧ショベルから見た機械座標系

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秒の時点においては、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。以降は、図-8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ー伸縮速度の応答遅れ評価
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がかかったとほぼ同時にパイロットバルブが開き、そのバルブを通じて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、生じる遅れであると推察される。

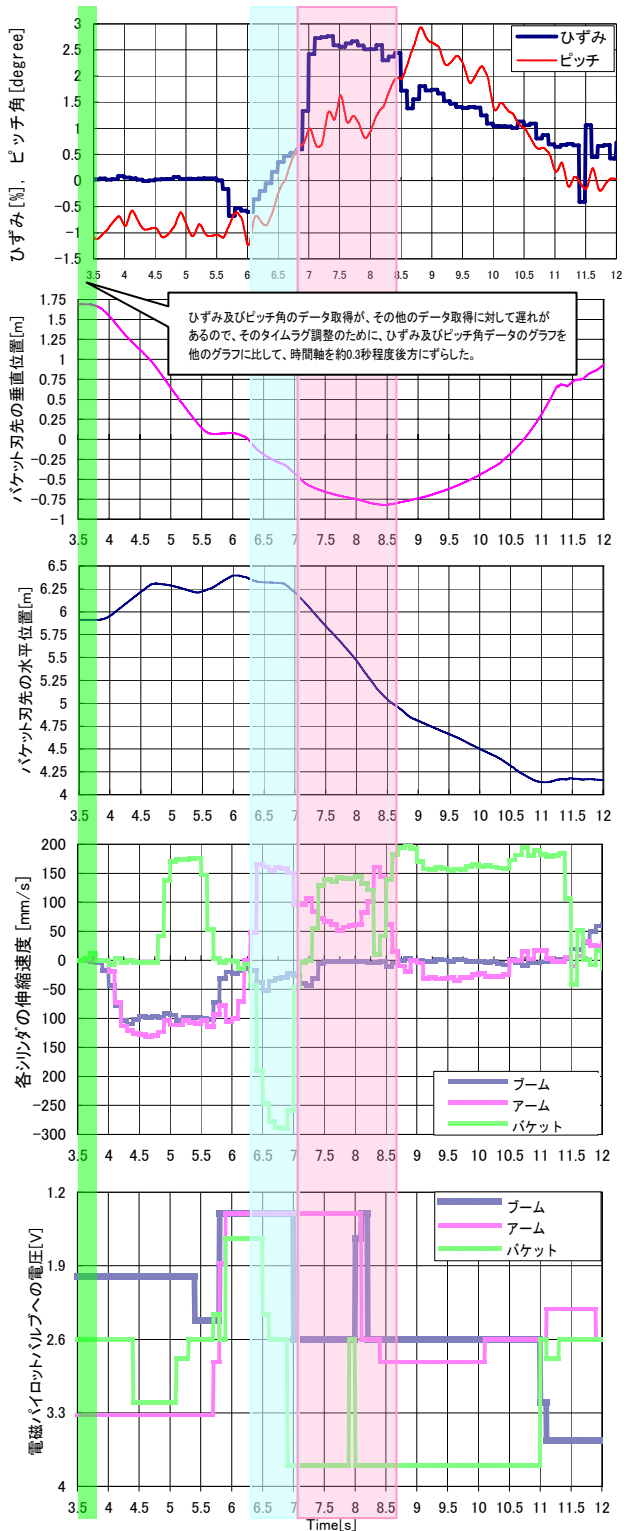


図-8 実験結果(バルブ電圧・シリンダー伸縮速度・刃先位置)

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。最上段のバケットリンクの歪みデータ(以下、「歪みデータ」という)を見ると、約6.0秒を境に上昇に転じており、約6.8秒の辺りで著しい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、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、歪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の増加から、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観測されていて、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のデータ取得のためにポートを割り当てなければならぬ点では、他の2つのセンサ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-8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-8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通り、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、バケットリンク歪みのデータに対して劣ってはいない。

ただし、図-8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、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、各シリンダーの速度情報を待つ同期を取りつつ処理を行い判別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、その判別手法については、バケットリ

表-2 障害物検知に関する各センサデータの特徴

	① バケットリンク歪み	② シリンダー速度	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)	○ (峻別川シリンダー速度活用すると△)
峻別性	○ (明確な上昇)	△ (他シリンダーの動作が混響)	△ (単独では明確に峻別できない)
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	○	△	△

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-2の通りとなる。

3.3.3 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 シリンダー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ーの伸長・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ーの伸長・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側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、直接シリンダーの伸縮を測定できる油圧シリンダー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、シリンダー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ー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ーの伸縮速度が他のシリンダー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性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 バケット刃先速度の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、そこで行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-3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-3 障害物検知手法の検討結果

	① バケットの歪み	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	△ (新たにコード・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。

3.4 障害物の回避動作の実現

3.4.1 回避動作の動作計画

2.において示した改良動作計画・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。

2.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、平成19年度に行った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、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-9)

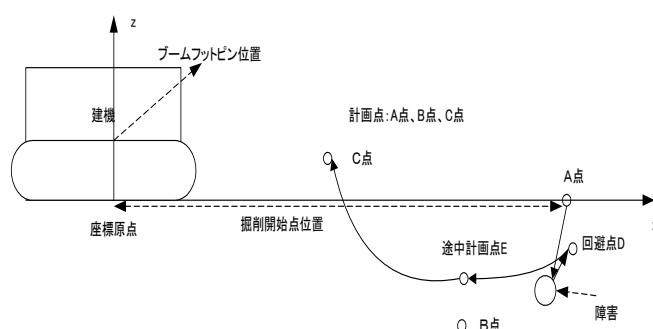


図-9 回避動作計画の軌跡設計

3.4.2 回避動作の動作実験

回避動作の確認を図るに当たり、3.3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-10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

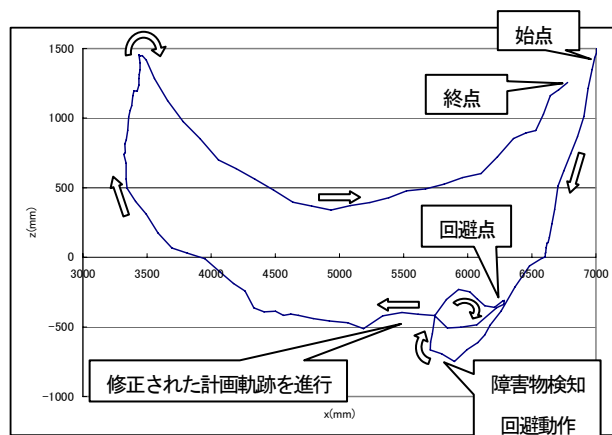


図-10 回避動作計画の実験結果の軌跡データ

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。

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。

4. まとめ

4.1 研究成果

本研究では、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。

- 1) 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。
- 2) 障害物の認識手法について3つの方法を考案し、その有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。
- 3) 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。
- 4) 1)での修正した動作計画・制御プログラムに、3)の回避計画を追加し、2)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。

4.2 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IT施工技術検討業務報告書、平成19年3月
- 2) 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
- 3) S. Singh : Synthesis of Tactical Plans for Robotic Excavation, Ph. D Thesis, Carnegie Mellon University, 1995
- 4) 岡部信也：「油圧ショベル大全」、2007

RESEARCH ON AUTOMATIC EXCAVATION OF HYDRAULIC SHOVEL

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2006-2009

Research Team : Construction Technology Research
Department Advanced
Technology Research Team

Author : KENNICHI Fujino

MASAHARU Moteki

TAKASHI Ootsuki

HUI Shao

Abstract : Civil engineering work involves many dangerous and grueling tasks, so improving work environments and ensuring safety are challenges facing this field. It is necessary to introduce automation technology to construction industry that will prepare for the aging of construction workers and the shortage of young experienced workers, boost efficiency, cut costs and improve quality levels. In a bid to address this issue, combining simple remote operation, the research and development of IT construction technology was carried out with autonomous construction machinery.

In 2009, we modified computer programs about action planning and control in order to get to use ultimate machine performance and developed obstruct detection method and avoiding action planning and found those useful through experiences.

Key words : Unmanned construction, Hydraulic shovel, Automatic construction system, Action planning