

# 15. 情報化施工向け油圧ショベルにおける マシンコントロール機能の開発

日立建機株式会社  
株式会社日立製作所

○ 泉 枝穂  
成川 理優

## 1. はじめに

国土交通省は、2016 年度より国の直轄工事に「i-Construction」を導入することを発表した。その中で、土木建設現場の ICT 活用による施工は、3D データをベースに、測量・設計から施工、管理、検査にいたる全プロセスに展開するもので、生産性、安全性を大きく高める取り組みとして期待されている。

現状、マシンガイダンス機能を搭載したショベルが多く使用されているが、操作はオペレータが実施するため、出来形は技量に依存する部分が大きく、生産性及び品質向上の面で課題があった。

日立建機では、施工目標面情報とショベルの位置、姿勢情報を照合しながらフロントを半自動制御することで、効率的な作業が行えるマシンコントロール機能を備えた油圧ショベルを開発した。本論文では、マシンコントロール機能の概要とその特徴について述べる。

## 2. マシンコントロール機能

従来のマシンガイダンス機では、施工目標面とバケットの位置関係を気にしながら操作を行う必要がある。それに対し、マシンコントロール機では、施工目標面に対して掘り過ぎることを気にせず操作が可能である。

本開発機に搭載したマシンコントロール機能の特徴について説明する。

### 2.1 掘り過ぎ防止機能

本機能は、施工目標面とバケットとの距離情報を基にフロントを半自動制御することで、施工目標面に対する掘り過ぎを防止し、効率的な掘削を可能とするものである。各操作におけるマシンコントロールの動作について、それぞれ説明する。

#### (1) ブーム下げ操作

ブーム下げ操作によりバケットが施工目標面に近づくと、ブーム下げ動作を減速し、施工目標面上で停止するように制御する。この動作の概念図を図-1 に示す。本制御は、掘削動作を開始する際に、バケット先端を掘削開始位置に合わせたり、

バケットの先端を用いて測量を行ったりする場合に有効な機能である。

また、バケット底面のうち、目標面と最も近い部分を選択して制御する。これにより、バケット先端のみでなく、後端部の目標面への侵入も防止することができる。

#### (2) 掘削操作

アームまたはバケット操作によりバケットが施工目標面に近づくと、必要に応じ、施工目標面とフロントの位置関係によってフロント速度を制御する。本操作においても、前述した内容と同様に、バケット底面のうち、目標面と最も近い部分を選択して制御する。アーム引き操作により自動でブームが上がる例についての概念図を図-2 に示す。

掘削方向に連続した複数の施工目標面に対して掘削操作をした場合には、面のつなぎ目に対して減速をかける。これによって、掘削操作の途中で角度が変化するような施工目標面においても、連続して掘削することができる。

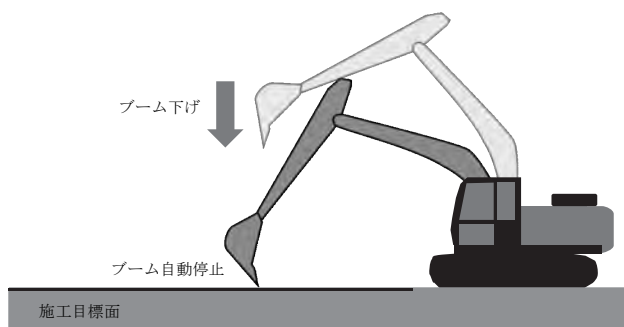


図-1 ブーム下げ操作による停止制御

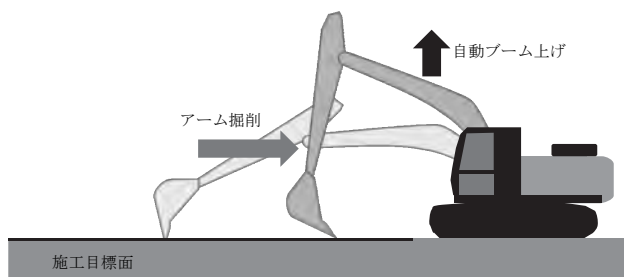


図-2 掘削操作によるブーム上げ制御

また、バケット操作によりバケットが施工目標面に近づいた場合には、バケットの動きを停止せずにブームを上げるように制御する。これにより、任意のバケット姿勢で位置合わせが可能となる。

## 2.2 バケット角度保持機能

本機は、バケット角度を一定に保持する機能を備えており、この作業モードで使用する際には、バケット操作をしなくても、バケット角度を一定に保つことができる。本機能は、目標面とバケットの距離、角度が所定の条件を満たす場合に有効となる。

バケット角度保持機能の概念図を図3に示す。本機能を用いることで、ブームとアームの操作のみで法面形成も行うことが可能となる。また、本機能が有効であっても、オペレータによりバケット操作が行われた場合には、オペレータの操作を優先してバケットを動かすことが可能であり、その際にもブーム上げ操作を自動で行う為、目標面を掘り過ぎることを防止することができる。

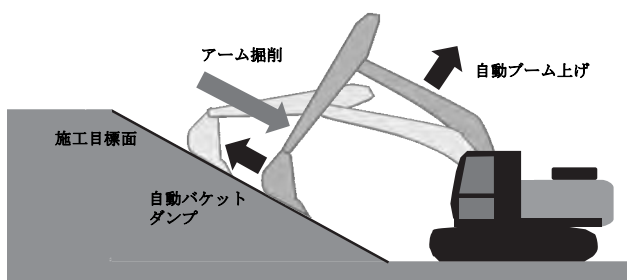


図-3 バケット角度保持機能

## 2.3 作業モード切替

マシンコントロールの作業モードとして、速度を優先する粗掘削モードと、精度を優先する仕上げモードとを備えている。粗掘削モードではオペレータの操作を優先するために、レバー操作に対する減速を弱めに設定している。一方、仕上げモードではオペレータ操作よりも精度を優先するため、オペレータのレバー操作に対し減速を強めに設定している。このようにアクチュエータの速度を抑えることで、施工目標面に対する高精度な制御を実現している。よって、オペレータは、施工目標面まで距離が遠い場合には粗掘削モードを選択し、仕上げ時には仕上げモードを選択するように使用する。

なお、この作業モードの切り替えや、2.2節で説明したバケット角度保持機能の有効化は、操作レバー上のスイッチで容易に変更可能である。

このように、ZX200X-5Bのマシンコントロール機能は、操作レバーに設けられたスイッチによりレバーから手を放すことなくON/OFFを変更可能であり、マシンコントロールが不要な状況下での使い勝手を高めている。さらに、使い勝手と安全性を両立させるために、走行状態や、車体の傾斜角度といった条件により、マシンコントロールのON/OFFを自動で変更する機能を設けている。

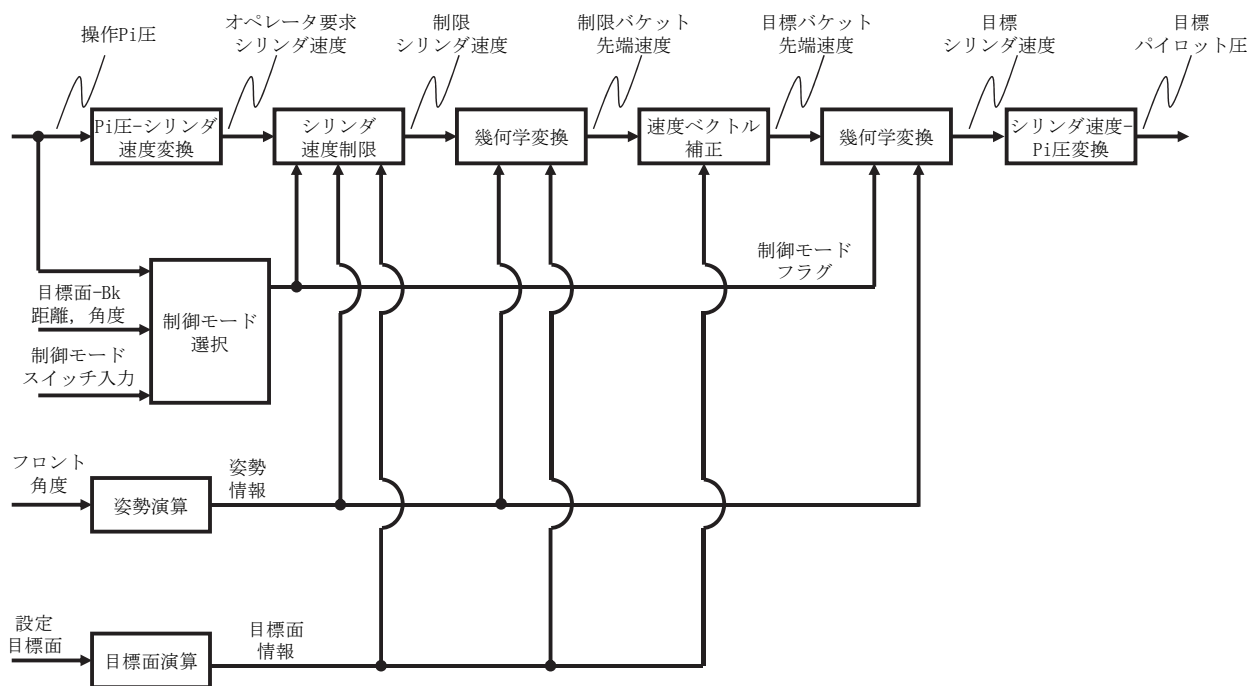


図-4 制御ロジック概要

## 2.4 制御ロジックの概要

マシンコントロールにおける制御ロジックの概要を図4に示す。各操作に応じて、目標パイロット圧を算出する方法について、図4を用いて説明する。

操作レバーに基づくパイロット圧信号とフロント姿勢情報、目標面情報に基づきフロントの速度を制限するように、シリンダ速度の制限目標値を算出する。このシリンダ速度を幾何学変換により、バケット先端速度に換算する。換算されたバケット先端速度を、目標面に沿った掘削となるよう補正する。補正されたバケット先端速度を、幾何学変換によりシリンダ速度に変換する。最終的に、変換されたシリンダ速度となるように、目標パイロット圧を出力する。

ここで、目標速度を算出する手法について詳細を述べる。一般的に、ロボット工学等で用いられる逆運動学問題は、作業機先端の動作から、各関節の動作を求めるものである。一方、油圧ショベルにおいては、オペレータの掘削操作はアームやバケットに表れるが、オペレータの操作よりもアクチュエータを速く動かすことは強い違和感を生じる要因となる。そこで、アームやバケットの角速度は与えられるものとして逆運動学問題を解く構成とした。定式化した逆運動学問題は以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bm} \\ \dot{\theta}_{am} \\ \dot{\theta}_{bk} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、数式(1)において、 $\dot{x}$  : バケット制御点水平方向速度、 $\dot{z}$  : バケット制御点鉛直方向速度、 $\dot{\theta}$  : バケット制御点角速度、 $\dot{\theta}_{bm}$  : ブーム角速度、 $\dot{\theta}_{am}$  : アーム角速度、 $\dot{\theta}_{bk}$  : バケット角速度、 $J^{-1}$  : 逆ヤコビ行列である。

バケット制御点の鉛直方向速度は、目標面に侵入しないような動作をするために、図4における速度ベクトル補正で算出される値である。

掘り過ぎ防止機能において、アームやバケットの掘削操作が行われた場合は、アーム角速度、バケット角速度、バケット制御点鉛直方向速度を用いて目標ブーム角速度を算出する。

バケット角度保持モードにおいては、アーム掘削操作が行われた場合に、アーム角速度、バケット制御点鉛直方向速度、バケット制御点角速度を用いて、目標ブーム角速度及び目標バケット角速度を算出する。

このように目標角速度を算出することで、オペレータによるアームやバケットの操作を活かしつつ、制御するブーム角速度を算出できる。

これに加えて、油圧ショベル特有の課題である、油圧の応答性や負荷による速度変化に対応する為、姿勢、油温、シリンダ負荷圧に応じた制御を行っている。

## 3. システム構成

本開発機のシステム構成と共に、マシンコントロールを実現するために必要な機器について説明する。

### 3.1 全体システム

ZX200X-5Bのシステム構成を図5に示す。ショベル設置された角度センサ、ストロークセンサ、車体傾斜センサにより、ショベルの姿勢を検出する。またパイロットラインの圧力センサにより、オペレータの操作を検出する。レバー入力装置やディスプレイコントローラからは、マシンコントロール機能の設定変更要求を受け取る。また3Dシステムコントローラから、目標施工面情報を取得する。情報化施工コントローラは、これらの情報からフロントを半自動制御するための指令値を演算し、後述する油圧制御ユニットへ出力することで、マシンコントロール機能を実現する。

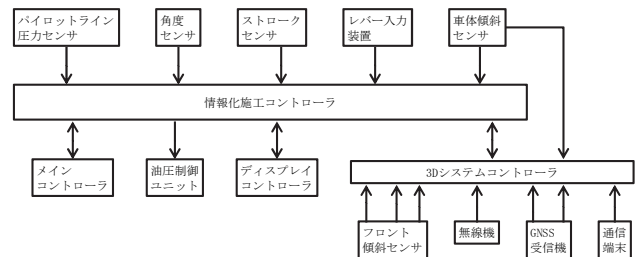


図-5 システム構成

### 3.2 油圧機器

油圧ショベルは、オペレータのレバー操作によりパイロットバルブが駆動し、生じた圧油によってコントロールバルブ内のスプールが動き、油圧シリンダの動作を制御する。油圧機器のシステム構成を図6に示す。

本機の油圧システムは標準機と同一であるが、パイロットバルブとコントロールバルブの間に、マシンコントロール用油圧制御ユニットを搭載している。この油圧制御ユニットには、電磁比例弁が含まれており、これらは情報化施工コントローラからの指令により駆動される。これらの電磁比例弁を駆動することで、オペレータ操作によるパイロット圧に対して介入し制御することで、マシンコントロール機能を実現している。さらに、油

圧式遮断弁，電磁式遮断弁を搭載することで，電磁比例弁故障時の安全性を確保している。また，マシンコントロールを用いない場合は標準機と同等の操作感を確保できる。

### 3.3 インタフェース機能

前述したマシンコントロール機能を実現するにあたり，同時に開発した操作系インタフェース機能について説明する。

#### (1) レバー入力装置

図 5 において，レバー入力装置は従来の油圧シヨベルに搭載されているものと異なる仕様のものを採用した。前述した様に，本レバー入力装置には，複数の ON/OFF スイッチや，アナログ入力機能がある。これにより，制御モードやマシンコントロール機能の ON/OFF 切り替えを手元から行えるようにした。

ZX200X-5B は，2D 仕様機も存在しており，各仕様機に応じて必要な入力を備えることにより，使い勝手を考慮している。例えば，2DMG，2DMC 仕様機においては，必ず施工目標面の設定が必要となるが，施工目標面情報を設定するだけでなく，基準位置も操作レバーのスイッチを用いて設定可能としている。3DMG，3DMC 仕様機では，3D システムコントローラと連携し，モニタ画面表示を操作レバーから変更することを可能とした。

#### (2) ディスプレイ

図 5 において，ディスプレイコントローラを通して，車体の標準モニタに出力するための情報のやり取りを行う。車体のモニタに搭載した MG・MC に関する表示内容の一例を図 7 に示す。各種警告通知や作業モードはアイコンで表示する。前述したレバー入力装置を用いて，これらのアイコン部分にて，作業モードの切替えなども行うことができる。

### 4. 掘削結果

図 8 に示すような施工目標面を想定し，バケット角度保持モードにて掘削を行った結果の一例を写真 1 に示す。

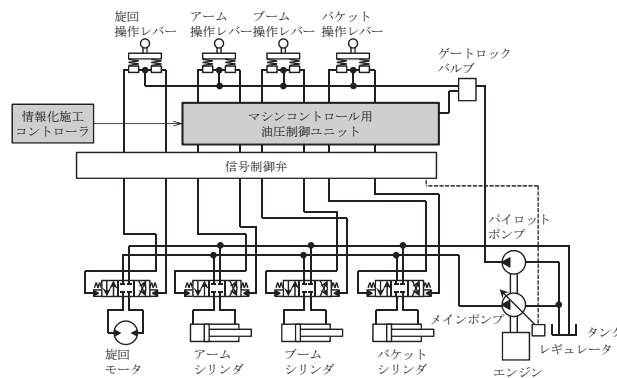


図-6 油圧機器システム構成

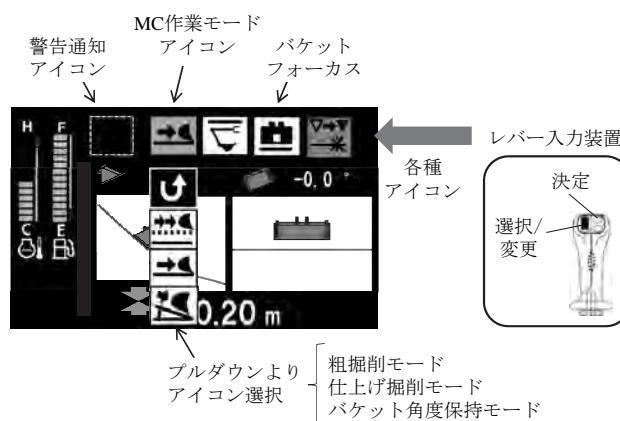


図-7 写真のキャプションは下に置き、



図-8 施工目標面の一例



写真-1 掘削現場の写真