

# 油圧ショベルガイダンスシステムの仕組み

## ロボテック機能を活用した作業支援機能

福川 光男

油圧ショベルの作業特性・構造に適応させた外部基準点からの位置情報とインプットされた設計データを基に、各種センサを用いた自己動作姿勢検出機構によりリアルタイムに動作姿勢を計測する、操作支援機構としての3D、2Dマシンガイダンスシステムの仕組みと活用事例を紹介する。

キーワード：2D・3D油圧ショベル制御、油圧ショベル操作ガイダンス、マシンガイダンスのアルゴリズムフロー

### 1. はじめに

情報化施工システムの一環として油圧ショベルの操作支援機構（ガイダンスシステム＝3D、2D-MG）が一部の施工現場で普及し始めてきている。しかし、油圧ショベルは土工用建設機械の中で圧倒的に使用台数の多い機種であるにも関わらず、ブルドーザやモータグレーダのマシンコントロール（自動制御）システムの装着率と比較して極端に少ない。また、何故、ブルドーザやモータグレーダのようにマシンコントロールシステムが装着できないのか？油圧ショベルの動作特性の観点から、ガイダンスシステムの仕組みを解説する。一方、油圧ショベルの作業特性の面から平面制御に特化して必要機能を抽出し、ロボテック機能により設定基準点からの作業点、計画線をモニタ上に明示させる使い勝手が良く、且つ、3次元システムに比べコストパフォーマンスの高い2次元ガイダンスシステムが注目されている。

### 2. 油圧ショベルの作業要領と操作手順

油圧ショベルは土工工事ばかりではなく、コンピュータ機能を活かして、工種の異なる作業に適応した各種のエンドエフェクタ（アタッチメント）を装着した多機能機として活用されているが故に建設機械としての普及率が高いと考えられる。機械土工工事においてもブルドーザやモータグレーダとは異なり数種の作業にも適用出来る。主な作業は掘削、積込み、整形作業（法面など）であるが、反面コンピュータ機能としての自由度も高く、積込み作業以外は予め設置され



写真—1 作業用指標を目安として操作を行う

た作業指標を目指しながらの人的操作によって行われるため、高い習熟度を要する（写真—1）。また、作業指標が少なければ操作判断に支障をきたし、多ければ手間もかかり作業の障害となりうる。

### 3. 何故油圧ショベルのマシンコントロール（自動化）は困難なのか？

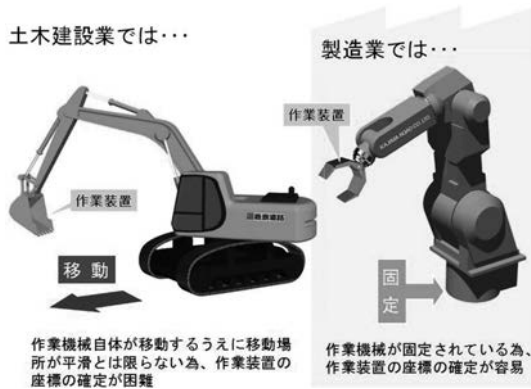
産業用ロボットの場合には移動機構がなく、対象となるWorkを移動しTool（Robot）との正確な相対位置を容易に確保することが可能である。一方、土工工事の場合にはWorkを移動することができないため移動機構が必要となり、作業機との相対位置を設定するためには外部定点からの測位情報が必要になる（図—1）。知りたい位置情報は作業装置先端がWork内に埋没されるため測位可能な箇所から間接的な算出となる。ブルドーザやモータグレーダは一直線上にオフセット点を取る事が可能であり比較的算出による測位

が容易である。さらに、レーザ光を回転させた水平基準をセンシングさせての傾き制御機構や衛星測位機能、光学測位機能を利用しての操作の自動化も可能になる。しかし、油圧ショベルの場合にはブーム、アーム、バケットの連結部分が屈曲するため、一直線上にoffset点を設けることが不可能であり、各種センサを使用しての演算処理による測位となる(図一2)。特異な例としてブルドーザと同様にバケット上部にレーザ受光器を取り付けて傾き制御させる方法もあるが用途が制限される(図一3)。さらに、負荷変動が小さく、許容負荷内で使用する産業ロボットとは異なり、対象材料、作業内容において負荷変動が大きく、時には衝撃荷重も受ける不規則な負荷変動に対して、可動部分の作業動作自由度が高い機構であるが故、構成部材の歪み、屈折接続部の嵌め合い精度状況などにより、高い測位精度を得ることが出来たととしても、作業装置の自動化に必要な正確な位置情報を得ることは不可能で

ある。故に、作業環境、使用条件が整っている産業用ロボットのような自動制御機構を採用することは困難であるため、作業装置と作業計画ラインとの相対位置をキャビン内のモニタに明示させ、操作確認ガイダンスシステムとしての実用化に留まっている(写真一2)。



写真一2 油圧ショベルガイダンスモニタ

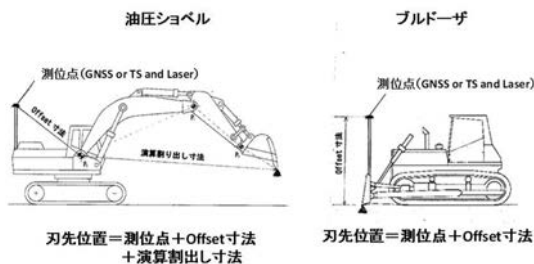


図一1 産業用ロボットとの比較

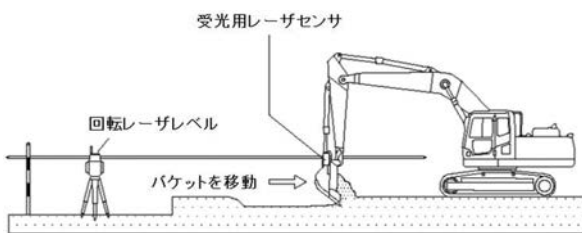
#### 4. 油圧ショベルの作業動作特性:ブルドーザ,モータグレーダとの動作特性比較

ブルドーザやモータグレーダの作業は、作業装置(排土板、ブレードなど)をトラクタ機構により牽引して出来る移動軌跡により、所定の平面を形成させることによってなされる。故に移動=作業となる連続作業であり、自動制御機構を採用する場合には連続した測位機能が必要となる。一方、油圧ショベルの作業は所定の作業対象箇所に作業装置をその都度移動させた後に移動を伴わないスタンディング状態での作業となる(図一4)。故に、衛星測位(GNSS)や光学測位(TS)によって予めインプットした3次元設計データにより作業位置に誘導する方法(3D-MG)と、設置された作業目安となる丁張りや高さ設定レーザ光などを基準として勾配や作業位置を定める(2D-MG)ことも可能である。作業位置が定めれば前述した方法でバケット刃先位置や勾配をモニタ上に明示させることができる。

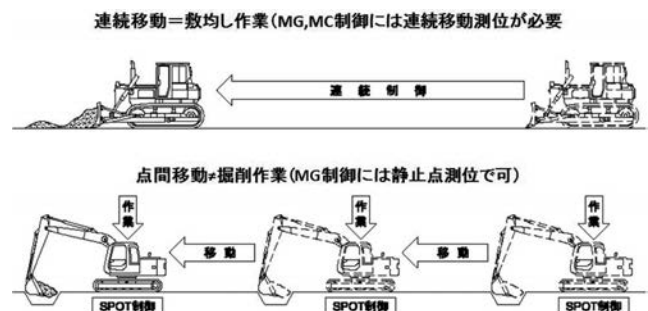
#### ブルドーザと油圧ショベルの刃先位置測位方法



図一2 バケット位置検出には演算処理が必要



このような構成では限られた作業にしか使用できない  
図一3 レーザレベル機構を用いたダイレクト制御

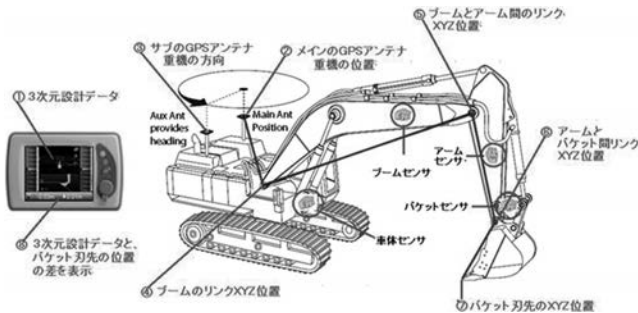


図一4 ブルドーザと油圧ショベルの作業特性比較

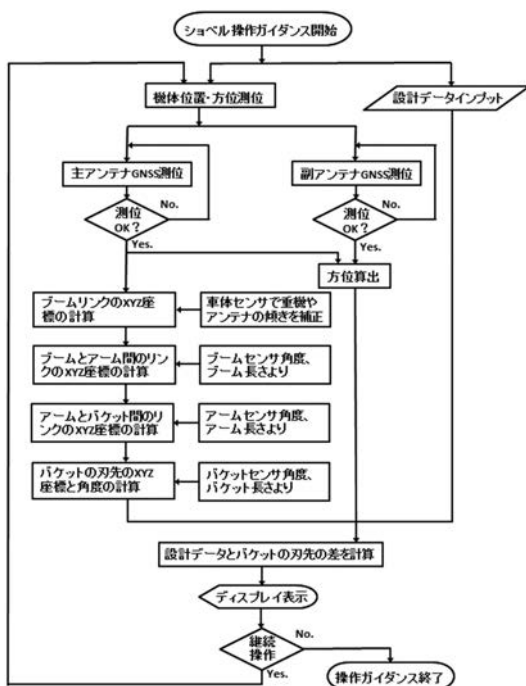
### 5. 油圧ショベルマシンガイダンス (3D-MG) システムの動作フロー

ショベルの基本構造として作業中の基準点はブームのマスターピン (根元) となり、3D-MG システムではその座標を割り出すため、先ず衛星測位 (GNSS) や光学測位 (TS) により受信アンテナ (または受光ターゲット) の位置と方向を測位し、そこからマスターピンまでのオフセット量を演算により定める。次にマスターピンの位置が定まれば各作業リンクの角度と長さからバケット先端の位置と傾きが算出出来る。そして、予めインプットした設計データを参照することにより、モニタ上に描かれた設計ラインとバケットとの相関位置 (動き) がリアルタイムに明示される。操作員はモニタからの操作支援情報を基に操作を行う。従って、システムの構成は、

- ①位置、方位測位機能
- ②屈折傾斜角計測と位置演算機能



図一五 3D 油圧ショベルマシンガイダンスシステムの仕組み



図一六 3D 油圧ショベルマシンガイダンスシステムアルゴリズムフロー

③設計データとの参照機能

④操作情報表示機能, となる。

システム構成の一例 (図一五) と操作アルゴリズムフローを示す (図一六)。以上の機能により、バケットが土中、水中に埋没状態であっても設計線との相関位置をモニタ上で認知させることが可能なのである (写真一三)。



写真一三 バケット水没状態とモニタ画面

### 6. 各部機能の仕組み

前述したように、このシステムは複数の機能によって構成されている。機能別にその仕組みを述べる。但し、衛星測位 (GNSS) や光学測位 (TS) の仕組みと設計デジタルデータに関する記述はこの章では省略する。

#### (1) 機体の位置座標測位と方位測位機能

機体の方位はブルドーザなど作業に移動が伴う機種においては移動する方向の情報より認知させることができるが、ショベルの機構特性としては作業箇所留まって作業を行うため、作業装置部分に旋回機能が付加されているので別途に方位測位をする機能が必要となる。そのため旋回体に取り付けられた位置測位用衛星受信アンテナに並行してもう一本別に受信アンテナを設置して両方の測位差より方位を割り出す仕組みを採用している (写真一四)。また、位置測位アンテナを一本にしてジャイロコンパスを用いて方位を測位する機種もある (写真一五)。

#### (2) ブームマスターピン位置からバケット刃先位置を検出する方法

測位機能により操作基準位置となるブームのマスターピン位置が計測され、次にそこからバケット先端の刃先位置は各リンクの可動ピン間距離とリンクの傾



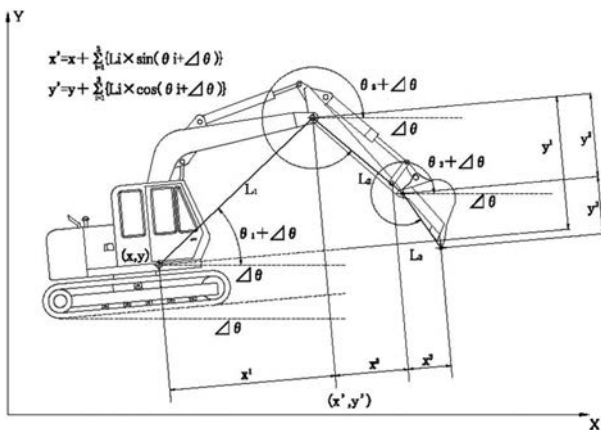


写真一四 メイン受信アンテナとサブ受信アンテナ



写真一五 ジャイロコンパスポールと測位用受信アンテナ

斜角情報より、マニピュレータ部分の屈曲状況に応じてリアルタイムで演算される（図一七）。この機構により機体の姿勢を機体内部のセンサ情報のみで計測することが出来る。また、作業指標（丁張り）または基準高さレーザ受光位置から逆に機体の動作基準点となるブームのマスターピン位置を計測することができ、機体の移動ごとに設定をリセットすることで、2D-MGシステムへの活用が可能となる。



図一七 ブームマスターピン位置からバケット先端位置算出方法

(3) 可動部角度計測方式

ショベルの作業マニピュレータ部分はブーム、アーム、バケットで構成されており、各リンクフレーム、及び機体の傾斜角は各種のセンサが用いられて計測されている（図一五）。

①傾斜センサ

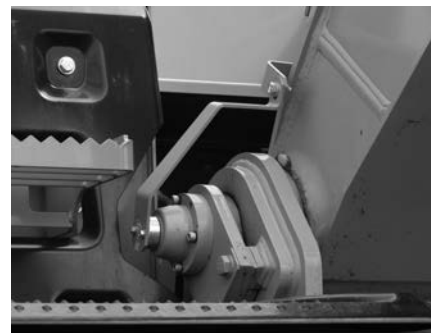
各リンクフレームの傾斜角を計測するセンサとして、重力を基準とした傾斜センサが用いられる。この方式は機体の傾斜角も含めて計測することができる利点もある。しかし、作業中バケットが土中、水面下に埋没される工種ではセンサの取り付け位置に配慮が必要になる（写真一六）。



写真一六 バケット傾斜センサ取付状況

②角度センサ（エンコーダ）

エンコーダ式の角度センサはリンクフレームの屈折点に装着される。計測応答性が早く耐衝撃性を備える利点がある。しかし、屈折点のみの屈折角度を検測するため、機体設置時の傾斜角補正機構が必要となる（写真一七）。



写真一七 ブーム屈折角検出用エンコーダ

③シリンダリニアセンサ

リンクを屈折させるための油圧シリンダにリニアセ

ンサを内蔵させ、シリンダストロークに応じた屈折角を検出させる機構もある。センサ部分が露出していないため保守性に優れている。しかし、検出精度はリンク接合箇所のピン嵌め合い精度が影響される。エンコーダ計測と同様に機体の傾斜角補正機構が必要となる（写真—8）。



写真—8 バケット屈折角検出用シリンダリニアセンサ

④本体（トラクター部）2軸傾斜センサ

作業位置にセットされる機体は必ずしも水平な状態では無く、ショベルマニピュレータ部分を旋回させた場合には機体傾斜角に応じた補正が必要となる。そのため2軸傾斜センサを搭載する必要がある。機種によっては方位センサを組み込んだ2軸傾斜センサユニットが用いられている（写真—9）。



写真—9 方位+2軸傾斜センサユニット

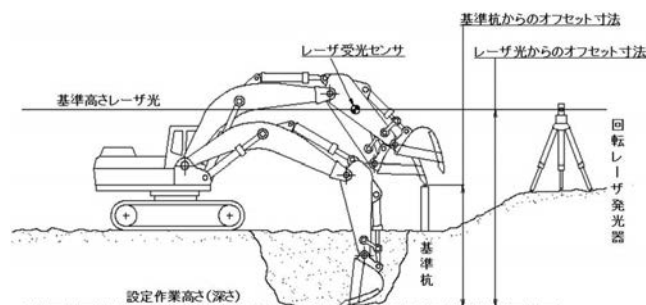
(4) 作業指示表示モニタ機構：音声アシストの必要性

測位、計測されたデータを演算し、操作支援ガイダンスのアウトプット情報として操作員に提示される。提示される方法は目視情報として操作座席前面に装着されたモニタ画面に数値、イラスト、電光表示（ライトバー）等のインジケータのみならず、操作員が作業装置の動きを確認するためにモニタを注視すること無

く、聴覚情報としてパルス、連続音を組み合わせた信号音によってガイダンス情報を得ることが可能である。（カーナビゲーションシステムでも同様の機能が備わっている）今後、操作支援ガイダンス機構としてさらなる人的感覚機能を生かしたマン・マシンインターフェース機構の開発が求められるであろう。

7. 作業特性を生かした2Dシステムの活用

衛星測位（GNSS）や光学測位（TS）を使用して、外部基準点から機体位置を測位し、予め入力した3次元設計データを基に作業装置の操作をガイダンスする仕組みは3D-MGとしてシステムの概要を述べた。前述したように油圧ショベルの作業は移動を伴わないスタンディング状態で作業を行う。故に予め設置した作業目安となる指標（丁張り、回転レーザ基準）を用いてその都度作業位置をリセットする必要があるが、煩わしい作業である数値データの作成をしなくとも、そこを作業基点として掘削目標値までのオフセット量、斜面整形作業の勾配など2次元情報をコントロールパネルに直接入力することができる（図—8）。一方、バケットの動きは前述したように機体および各リンクのセンサからの傾斜角情報により、外部からの変位情報を使用することなく、マニピュレータ部分の姿勢状態を作業動作に合わせてリアルタイムにモニタ



図—8 2D-MG作業基準点オフセット要領



写真—10 2D-MGシステムを用いての法面整形作業



写真—11 アームに取付けられたレーザ受光器



写真—13 スイングバケット機構を活用した法面整形作業



写真—12 河床整備にレーザ基準システムを活用

上に表示させる事が可能である。このシステムを用いたの法面整形作業では従来必要な作業目安となる丁張りの設置を大幅に省くことが可能である（写真—10）。また、水平に回転させたレーザ光をブームに取り付けられたセンサ（写真—11）で受光し、基準として掘削高を設定する工法は、レーザ光範囲内（直径約400m）での基準高さリセット作業を容易にすることが出来、作業指標設置が困難な河川での維持管理作業（河床ざらいなど）の合理化に威力を発揮することができる（写真—12）。さらに、前述した、ジャイロコンパスを利用した方位測位情報により、対象作業面にバケット面を並行にする事なくスイングバケットを装着することにより、機体移動頻度を少なくした効率の良い斜め作業が可能な機種も開発され実用化されている（写真—13）。

## 8. おわりに

土木建設業における ICT 技術活用は目覚ましいものがある。厳しい自然環境、激しい衝撃、振動を受けざるを得ない環境下において測位、演算、記憶などの複雑な事項を高い信頼性のもとに実行することが出来る多種多様なハードウェアとソフトウェアが開発され、画期的な施工の合理化が実現している。しかし、ますます細分化、専門化する施工体制環境下において、果たしてその要素技術がフルに活用されているかいささかの疑問がある。

今回は油圧ショベルの機械特性の面から、油圧ショベル作業（工法）に適合する効果的な操作支援システムを選択する必要性について述べた。

### 謝辞

この度の執筆にあたって、ライカジオシステムズ(株)マシンコントロール事業部様、(株)トプコン様、(株)ニコソ・トリンプル コンストラクション営業部様、宮城県(株)佐藤工務店様の貴重な資料提供、並びに説明用作図を作成して頂いた鹿島道路機械部機械センターの方々のご協力に深く感謝致します。

JCMIA

### 【筆者紹介】

福川 光男（ふくかわ みつお）  
 (独)土木研究所  
 技術推進部先端技術チーム  
 招聘研究員

