

ブルドーザーマシンコントロールシステムの最新技術の紹介

マストレスタイプ MC システム 3D-MC^{MAX}

本田 肇

情報化施工が行われて既に幾年の月日が流れているが、建機の位置や刃先の位置を何らかの方法で計測し、油圧制御する方式は従来から大きく変化が無い。しかしながら、建機の位置や姿勢を検出するセンサー技術の進歩に伴い、情報化施工の分野にも高度な技術が採用され続けている。本稿では、世界にも例を見ない画期的かつ効率的な施工を実現する IMU（慣性計測装置：Inertial Measurement Unit）を用いたブルドーザーのマシンコントロールシステムを紹介する。

キーワード：ブルドーザー、マシンコントロール、3D、マストレス、IMU、高速応答性

1. はじめに

昨今の GNSS リアルタイム測位技術の進化は、土木施工技術に大きな進化をもたらした。三次元設計データを利用した情報化施工技術であるマシンコントロール（以下 MC）、マシンガイダンス（以下 MG）は、短期間で高品質な施工を可能にするだけでなくオペレーターの負担の軽減も達成することができた。

また、2016 年 4 月に実施された国土交通省による i-Construction 施策のスタートも相まって、今後、旧態存在している丁張作業やトータルステーションを使った測量から、建機による直接施工への移行がより加速していくことが予想される。本稿では最先端の技術を使ったブルドーザーの MC システムを紹介する。

2. MC システムについて

MC システムとは、GNSS や自動追尾トータルステーションによる測位技術を用いて建機や排土板の位置（三次元座標）を検出し、あらかじめ建機内のコントローラーに登録した施工対象となる三次元設計データに基づいて排土板の高低や傾きを自動で制御するシステムである。このシステムを用いると建機のオペレーターは、排土板を手動で制御する必要がなくなるばかりでなく、ディスプレイ上で設計面あるいは作業面に対して作業進捗状況が分かるように差分として確認することができる。このため、例えばオペレーターの熟練度に関係なく品質の良い施工ができることより、多くの現場で既に導入されている実績がある。

3. ブルドーザーの MC システム

（1）従来のブルドーザー MC システム

ブルドーザーの MC は大きく 2D と 3D に分けられる。2D システムは外部に設置した回転レーザーから発光される光を排土板に取り付けたマストを昇降する受光器で受信し、排土板の位置を高低差で管理するシステムである。2D システムを写真—1 に示す。



写真—1 2D-MC システム

一方、3D の MC システムは、三次元設計データとセンサーで検出・計算した情報から、三次元座標で管理するシステムである。3D の MC システムには GNSS 方式と自動追尾トータルステーションによる LPS 方式があり、それぞれ特徴が異なるため、現場や環境により使い分けられている。本稿では GNSS 方式の MC システムについて言及する。

従来の3DのGNSS方式のMCシステムは、排土板に取り付けられたGNSSアンテナとアンテナを支えるマスト及び排土板の角速度、加速度を検出するIMU（慣性計測装置：Inertial Measurement Unit）もしくは傾斜センサーで構成され、GNSSで検出される三次元座標情報と排土板の姿勢から排土板の刃先の位置を計算、三次元設計データとの比較により自動的に排土板を設計通りに制御するシステムが用いられてきている。これにより、三次元で設計データ通りに施工することが可能となる。従来の3D-MCシステムを写真—2に示す。



写真—2 3D-MC システム

しかしながら、従来機では以下の欠点が挙げられた。

- ・GNSSのサンプリング周波数の遅さによる排土板制御の応答性の遅れ
- ・GNSSアンテナのケーブルやマストが排土板に取り付けられていることによるオペレーターの前方視界の妨げ。
- ・車両回送時ならびに盗難防止などの安全管理を目的としたアンテナやケーブルなどの取り外し作業の煩わしさ。

(2) マストレスタイプMCシステム (3D-MC^{MAX})

前項に記述した従来機の欠点を改善するためにマストレスタイプのMCシステム (3D-MC^{MAX}) (以下「本システム」という) が開発された。

特徴は以下の通りである。

- ・従来、排土板に取りついていたGNSSアンテナを取り外し、キャビンの上部に取り付けることで、オペレーターの前方視界の妨げが無くなる。
- ・従来、1つだったGNSSアンテナを2個取り付けることにより、車体の向きを常に把握することができる。

- ・従来、排土板のみにセンサーを取り付けていたが、排土板と車体の両方にセンサー (IMU) を取り付けることにより、車体及び排土板それぞれの角速度、加速度を独立して検出することができる。

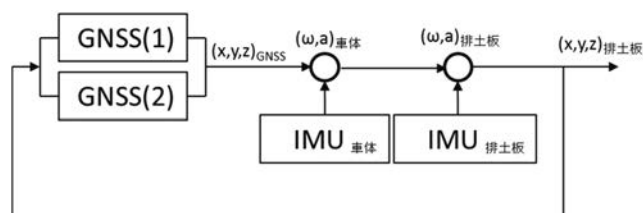
本システムの構成を写真—3に示す。



写真—3 本システムの構成

(3) 座標計算アルゴリズム

MCシステムは排土板の刃先の三次元座標が直接検出できないため、各センサーからその三次元座標を正確に計算することが重要である。キャビンに取り付けられた2個のGNSSアンテナから車体の位置 (x, y, z)、向き、進行方向を検出し、車体及び排土板に取り付けられたIMUセンサーで検出された角速度 (ω)、加速度 (a) から、排土板の刃先の位置 (x, y, z) を計算する。座標計算アルゴリズムのイメージを図—1に示す。

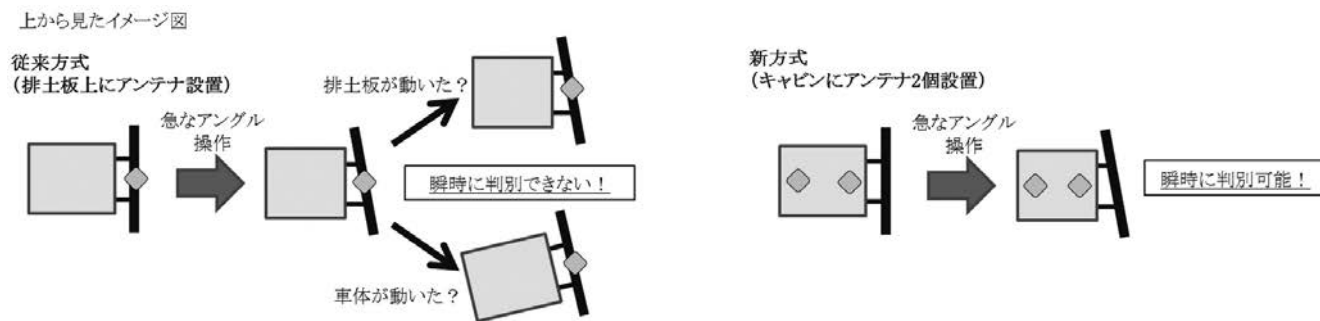


図—1 制御イメージ

(4) 効果

排土板にGNSSアンテナが取り付けいた方式では、例えば急激なアングル制御を行った際に、排土板にアングル操作を施したのか、それとも車体の方向が変化したのかの検知にタイムラグを生じ、高速走行時にはこれが施工に誤差を生じることがありえた。

しかしながら、2個のGNSSアンテナと2個のIMUにより排土板と車体の姿勢を独立して管理しているこのシステムでは、それぞれの方向と姿勢をリアルタイムで把握し、適切な制御を行うことが可能とな



図ー2 効果の説明

り、複雑な施工に対しても高速で品質良い施工を可能にする。効果の説明を図ー2に示す。

また、従来は排土板の座標はGNSSの検知性能に依っていたため、GNSSの座標検出性能のバラつきが施工のバラつきを決めていた。しかしながら、このシステムの場合は、車体の位置はGNSSで決められるが、排土板の制御はIMUの高サンプリングレート(100 Hz)の検出能力に従う為、よりリアルタイムな制御が可能になり、施工面もより滑らかな結果を得ることができる。

このシステムの高速な排土板の応答性により、前進・後進時に3速フルスロットルの前進・後進時でも1～2 cm(標準偏差)でのばらつきで施工が可能になる。これにより、作業者に短時間での施工を実現させることができ、施工管理上においても生産性の向上を図ることができる。写真ー4に3速バック引きで行った施工結果面を示す。



写真ー4 施工結果面

(5) 特記事項

(a) IMU(慣性計測装置: Inertial Measurement Unit)のイニシャライズ

IMUは物体の運動計測を目的に、ロボット、自動車、飛行機などに応用されているが、近年ではドロー

ンなどにも活用され、飛行制御、姿勢制御にも活用されている計測装置である。本システムではIMUを活用し車体の姿勢、排土板の姿勢を計算し安定した制御を行うことができるが、排土板のアングル角についてはIMUから出力される角加速度より求めることから、角度原点を得る必要がある。このことから、システム電源投入時に角度の始点として排土板を左端にセットする作業が必要である。この作業はキャビン内に設置されたディスプレイ上に作業要求が黄色で表示され、オペレーターが排土板を左端にアングル移動させることで緑色に変化し正常に完了したことが直ちにわかる。従ってオペレーターは正常にイニシャライズが終了したことを判別でき、不安なく作業に移行できる。

(b) 寸法キャリブレーション

GNSSアンテナからの測位から排土板の位置を検出するため、各センサーの物理的な位置関係を正確に事前に登録しておくことが必要である。GNSSアンテナ及びIMUセンサーと排土板の刃先との相対間隔だけでなく、排土板の回転中心や履帯との距離についても寸法を事前に計測しておくことが必要である。ただし、これは初期導入時に実測しコントローラーに値を入力するだけでよく、取り付け位置を変更しなければ再設定は不要である。

(c) 取り付け

取り付け作業として、GNSSアンテナのキャビン上部への設置、IMUセンサーの固定、配線が主な作業となる。IMUセンサーはブラケットを車体と排土板にそれぞれ溶接した後に取り付けることになるが、センサーの取り付けだけだと半日程度の作業工数で取り付けが可能である。配線はそれぞれのセンサー間とコントローラーの接続ケーブルのみである。

(d) 装着マシン

このシステムは後付けのシステムであるので、原理的には建機のメーカーに依らないシステムであるが、現状はコントロールシステムの互換性などにより、す

すべての車種に対応とは至っていない。

4. おわりに

本稿では、ブルドーザーで使う MC システムの最新システムを紹介した。IMU を 2 個用いた本システムマストレス MC システム (3D-MC^{MAX}) は世界でも例が無く、IMU の利点である高速な応答性を十分に生かす制御アルゴリズムの実現により、高速走行時の排土板の高速制御を実現しただけでなく複雑な形状の施工に対しても対応できる。この結果、このシステムは今後の情報化施工の分野で求められる高品質、高度化された施工を可能にするものと捉えている。

また、このシステムは i-Construction で掲げられて

いる「生産性の向上」、「オペレーター不足の解消」、「安全性の向上」などの課題の解決に貢献する画期的な MC システムであり、今後のブルドーザーの MC システムにおいて次世代の標準システムとして位置付けられ、情報化施工の現場に生産革命をもたらすものとしている。

J C M A

【筆者紹介】

本田 肇 (ほんだ はじめ)

(株)トプコン

営業本部 国内 ICT 一施工／農業推進部

ICT 一施工 営業企画課

シニアエキスパート

