

## 短 報 (Short communication)

### 森林作業道の情報化施工に供する油圧ショベルの姿勢演算精度

山口 浩和<sup>1)\*</sup>、鈴木 秀典<sup>1)</sup>、佐々木 達也<sup>1)</sup>、市川 作雄<sup>2)</sup>、山内 延恭<sup>3)</sup>

#### 要旨

森林作業道作設作業における作業の効率化と施工精度の向上を目的として、油圧ショベルの姿勢やバケット爪先位置を作業道の設計図面とともに運転席のモニタ等に表示させることで、オペレータの作業を支援する情報化施工技術の開発を進めている。本研究では、情報化施工に供する油圧ショベルの各部位に搭載したIMUのデータからバケット爪先位置を演算し、トータルステーションにより精度検証を行った。その結果、高さ方向の標高誤差は平均1.03cmとなり、国土交通省の基準である誤差5.0cm以内の基準を十分に満たしたが、3次元方向の誤差が7.05cmと大きい結果となった。この原因を精査したところ、IMUの方位角計測精度に、最大6.0度、平均0.7度の誤差があることが分かった。そこで、IMUの代替となる方位角計測方法として、油圧ショベルの位置を特定するためのトータルステーションによる後部ブリズムの測量データを用いて方位角を算定する方法を用いたところ、3次元方向の誤差についても平均1.75cmと小さくなることが分かった。これらのことから、情報化施工に資するための油圧ショベルの姿勢は、IMUセンサとトータルステーションを用いることで、十分な演算精度が得られることを明らかにした。

キーワード：情報化施工、森林作業道、油圧ショベル、IMU、バケット位置

#### 1. はじめに

森林作業道（以下、作業道）作設作業における作業効率の向上と作業道の質の向上を目的として、土木分野において利用が推進されている情報化施工技術を作業道作設作業に応用する実証試験を行っている。情報化施工とは、情報通信技術の活用により、施工前あるいは施工中に得られる電子データを用いて、施工の効率化や高精度化を実現しようとするものである。作業道作設における情報化施工では、作業中のバケット爪先位置が設計図に対してどのような位置関係にあるのかを示し、設計図面通りに施工が行えるようオペレータを支援することで、無駄を省いた作業の効率化や路体施工精度の向上を目指している。これらの目的を達成するためには、機械中心に対してバケット爪先位置がどの位置にあるのかを高精度で演算できることが求められる。土木分野の情報化施工においてはIMU (Inertial Measurement Unit) とGNSS (Global Navigation Satellite System) を用いて機械の姿勢や方位角を計測する方法が一般的である（国土交通省2019）。しかし、開空度の高い皆伐地を除いて、間伐林分を含む森林内あるいは作業道上において、GNSSを用いてリアルタイムに自己位置を特定するなどの場合には、十分な精度が得られない場合が多い（毛綱・山口2016）。そのため、作業道の情報化施工においては、IMU情報の

みを用いた手法を検討している。そこで本報告では、機械各部に取り付けたIMUからの姿勢角情報からどのくらいの精度で油圧ショベルの姿勢を演算できるのかを明らかにするとともに、誤差の特徴を分析し、精度向上のための対策について検討を行った。

#### 2. 試験方法

##### 2.1 油圧ショベルおよびセンサ

供試機械は、バケット容量0.5m<sup>3</sup>（車体質量12トン）クラスの油圧ショベルである（Table 1）。土木分野では中型の油圧ショベルに該当するが、車体幅（履帯幅）が2.49mあり、幅員3メートル程度の作業道開設に対しては比較的大型の機械である（林野庁2015）。

Table 1. 油圧ショベルの諸元

単位：mm

全長	7,620
全幅	2,490
全高	2,875
最大掘削深さ	5,520
ブーム最大到達長	8,170
作業機最小回転半径	2,450

原稿受付：令和2年3月31日 原稿受理：令和2年6月26日

1) 森林総合研究所 林業工学研究領域

2) 株式会社前田製作所

3) 株式会社ジッタ

\* 森林総合研究所 林業工学研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

掘削用バケットは、油圧ショベルのナックルブームの先端に取り付けられているため、バケット爪先位置の座標を演算するために、上部旋回体、ブーム、アーム、バケットの姿勢角を計測する必要がある。そこで、これら4つの部位に Fig. 1 のように IMU を取り付け、それぞれの姿勢角を計測することとした。取り付け位置は、上部旋回体、ブーム、アームについては部材に直接、作業中に土中に埋まることが予想されるバケットについては、油圧シリンダの力をバケットに伝えるバケットリンケージ部とした。IMU の諸元を Table 2 に示す。IMU は、3 軸加速度センサ、3 軸角速度センサ、3 軸磁気センサを内蔵し、それらのデータを独自のアルゴリズムを用いて処理し、姿勢角（ピッチ角、ロール角、ヨー角）をリアルタイムに算出する装置である。

2.2 バケット爪先位置の演算

バケット爪先位置を演算するために必要な各部位（以下、リンクとする）の姿勢角は、ブーム、アーム、バケットについては水平面からの仰角（ $a_1, a_2, a_3$ ）、上部旋回体については方位角（ $a_4$ ）である（Fig. 2）。バケット爪先位置を演算するためには、油圧ショベルの各寸法をあらかじめ求めておく必要がある。そこで、油圧ショベルに任意の姿勢をとらせ、トータルステーション（以下、TS）を用いて各ジョイントの座標値を測量し、各リンク長（ジョイント間距離）や各リンク姿勢角（ジョイント間の傾斜角）を求めた。各リンクに取り付けた IMU は姿勢角と必ずしも一致する角度で取り付けられているわ

けではない。そのため、測量で求めた各リンク姿勢角と IMU の計測値を比較することによるキャリブレーションを行った。また、バケットリンク姿勢角は、アームリンク姿勢角とバケットリンケージの姿勢角の差分を変数とする関数式を用いて算出した。掘削作業時のバケット爪先位置の3次元位置座標  $P(x, y, z)$  は下記 (1) ~ (3) の演算式で求めることができる。

$$x = (l_1 \cos a_1 + l_2 \cos a_2 + l_3 \cos a_3 + l_{x0}) \sin a_4 - l_{y0} \cos a_4 \quad (1)$$

$$y = (l_1 \cos a_1 + l_2 \cos a_2 + l_3 \cos a_3 + l_{x0}) \cos a_4 + l_{y0} \sin a_4 \quad (2)$$

$$z = l_1 \sin a_1 + l_2 \sin a_2 + l_3 \sin a_3 + l_{z0} \quad (3)$$

ただし、 $a_4=0$ （ブーム伸展方向が  $z$  軸と平行）の時のブーム取り付け位置を  $A(l_{x0}, l_{y0}, l_{z0})$ 、ブーム、アーム、バケットのそれぞれのリンク長を  $l_1, l_2, l_3$ 、それぞれのリンクの水平面からの角度を  $a_1, a_2, a_3$ （ブーム伸展方向から  $z$  軸正方向に向かって正）、上部旋回体の旋回角度を  $a_4$ （ $x$  軸正方向から  $y$  軸正方向へ向かって正）とする。

2.3 精度検証方法

バケット爪先位置演算精度の確認試験は、前田製作所構内のクレーン検査場の基準平面（水平面）にて行った（Photo 1）。精度の検証は、IMU 計測データから演算され

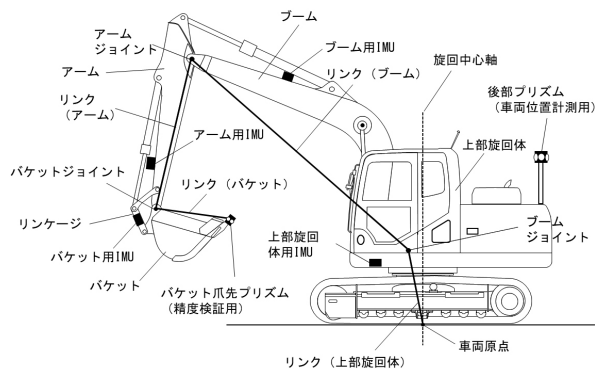


Fig. 1. IMU 取り付け位置および各部位ジョイント位置

Table 2. IMU の諸元

外形寸法	46 × 45 × 24mm
重量	50g
作動温度	-40 度 ~ +85 度
姿勢角（ロール / ピッチ）精度	0.1°
方位角精度	0.8°
データ更新レート	60Hz

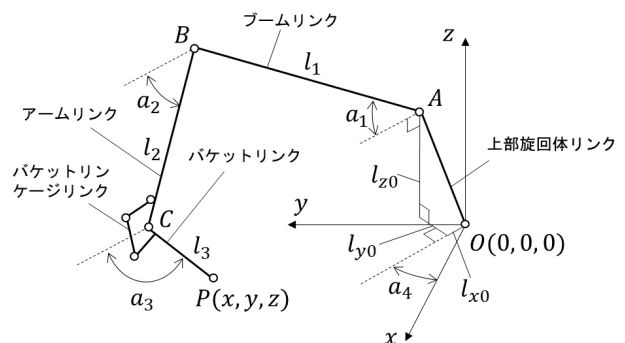


Fig. 2. 座標系の設定と姿勢演算に用いる各係数



Photo 1. TS を用いた精度測定試験の様子

たバケット爪先位置の3次元座標値と、TSにより視準した3次元座標値（真値とする）とを比較することにより行った。

試験条件は、掘削作業中に油圧ショベルが旋回動作を含め様々な姿勢を取ることを考慮し、ブーム角、アーム角、バケット角、車体角度（方位角）をそれぞれ任意に変化させた30パターンの機械姿勢を対象とした。各姿勢において、IMUによって計測した4つの部位の姿勢角からバケット爪先の3次元座標値を演算するとともに、バケット爪先に360度プリズムを取り付け、TSを用いてバケット爪先位置を測量し、3次元座標値を得た。TSによる測量値を真値として、両者を比較することにより、誤差の大きさおよび誤差の発生方向等の誤差特性を求めた。

### 3. 結果と考察

油圧ショベルの姿勢30パターンについて行ったバケット爪先の3次元座標演算精度の結果をFig. 3に示す。機械原点からバケット爪先位置までの距離に応じた誤差を、標高誤差と水平誤差に分けて表示した。誤差の特徴を見ると、全体的には標高誤差はバケット位置に関係なく一定となる傾向を示し、水平誤差は原点から遠いほど大きくなる傾向を示した。これらの傾向は、(1)～(3)式において、高さ方向（z座標）が各部位の姿勢状態を示す独立項の和であるため誤差が原点からの距離に依存しにくく、平均誤差が小さくなる傾向にあること、水平方向（x座標、y座標）は原点からの距離と方位角の積になるため、距離に応じた誤差傾向にあることなどから説明することができる。

次いで、油圧ショベルの姿勢30パターンにおけるバケット爪先位置の演算誤差をTable 3に示した。国土交通省のガイドラインにおいては、情報化施工に使用する機械のバケット爪先位置の演算精度については、標高誤差に対して平均5.0cm以内となることと定められている。本試験においても、標高誤差について最大5.6cm、平均

1.03cmとなり、運用上において十分な精度が得られていることが確かめられた。一方、前後方向（ブーム伸展方向）誤差、左右方向（旋回方向）誤差について見てみると、前後方向の誤差が平均1.19cm、左右方向の誤差が平均6.35cmとなり、左右方向の誤差が大きい結果となった。土木分野における油圧ショベルのガイダンスでは機械が作業面に対して正立して作業を行うことを前提としているため、左右方向の誤差がそれほど重要ではないのに対して、作業道の情報化施工を適用する場合には、機械は常に作業道の作設方向を向いており、切土あるいは盛土面に対して正立することがないなど作業の想定が異なる。そのため、標高誤差や前後方向誤差と同様に左右方向誤差も重要であると考えている。

前後方向誤差および標高誤差は、IMUセンサの姿勢角（ピッチ角）の計測精度に影響を受けるが、左右方向の誤差は方位角の計測精度の影響を受ける。Table 2に示した通り、IMUセンサの特徴は、ピッチ角、ロール角（精度0.1°）よりも方位角（精度0.8°）の精度が低いことから、左右方向において誤差が大きかった原因は方位角計測誤差によるものと推測された。そのため、IMUによる方位角計測の代替となる手法を検討する必要がある。そこで、情報化施工において機械位置を特定するために車体後部に取り付けられている後部プリズム位置も同時にTSにより測量する。この後部プリズムは、機械の旋回中心から離れた位置にあるため、機体が旋回動作を行うことで円弧軌跡を描く。円弧軌跡から機械の旋回中心を算出できれば、方位角を演算することが可能である。そこで、IMUにより計測した方位角と後部プリズムの測量値から演算された方位角とを比較した。その結果、両者には、最大で6.0度、平均で0.7度のズレがあることが分かった（Fig. 4）。IMUセンサは、磁気センサを用いるため、作業現場や金属体である機械の動きに起因する磁場変化の影響を受けやすいため、方位角計測において精度が得られなかった可能性がある。このことが、Fig. 4においてバケットが近い距離（2.5m付近）にも関わらず大きな方位角誤差となった原因であると考えられる。

後部プリズムの測量から求めた方位角を用いて、30パターンの姿勢についてバケット爪先位置を演算しなおした結果、左右方向の誤差は平均0.6cm、前後方向誤差、左右方向誤差、標高誤差、それぞれの合成である3次元方向誤差でも平均1.75cmとなり、5cm以内の精度で演算できることが分かった（Fig. 5, Table 4）。これらのことから、後部プリズムの軌跡から算出された方位角は、IMU

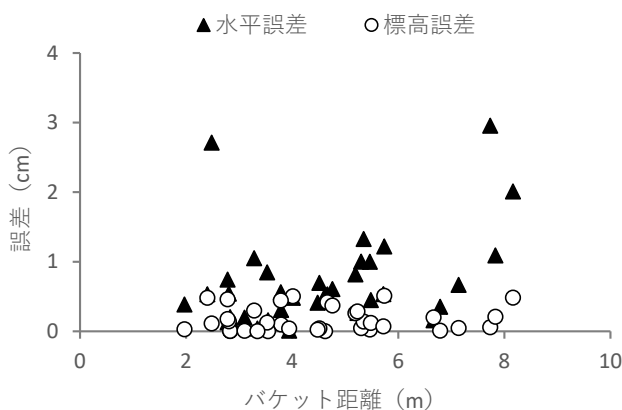


Fig. 3. バケット距離に応じた爪先位置演算誤差（IMUによる方位角計測）

Table 3. バケット爪先位置演算誤差（IMUによる方位角計測）  
単位：cm

	水平誤差		標高誤差	3次元方向誤差
	左右方向	前後方向		
IMU	6.35	1.19	1.03	7.05

で計測した方位角よりも精度が高いことが伺える。

後部プリズム位置は、施工時は常に TS で測量しているため、方位角推定に利用することができる。しかし、方位角を算出するためには油圧ショベルの旋回中心の座標が常に必要である。掘削作業は、車両の移動と掘削を繰り返す作業であり、車両を移動させる度に旋回中心を求めるための旋回動作が必要となり作業能率の低下が懸念される。今後は、作業能率への影響を最低限にとどめるため、IMU と TS を併用しながら、通常の掘削作業工程の中で旋回中心を求め、車両方位角を特定する手法について検討する予定としている。

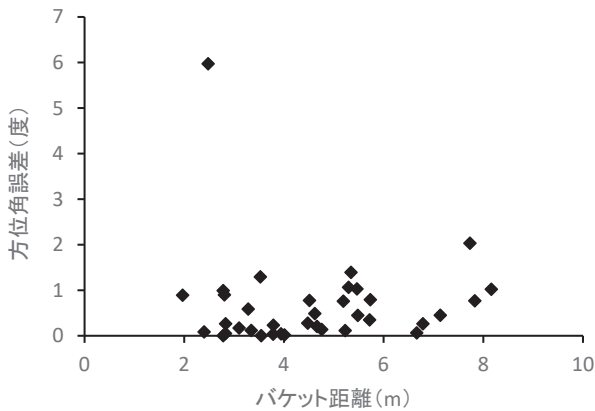


Fig. 4. IMU による方位角計測精度

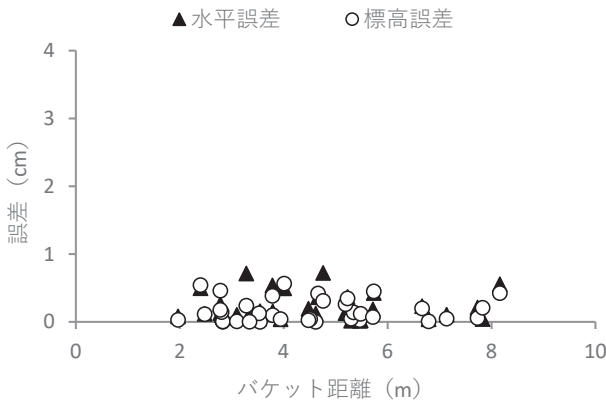


Fig. 5. バケット距離に応じた爪先位演算置誤差 (TS による方位角計測)

Table 4. バケット爪先位置演算誤差(TSによる方位角計測) 単位: cm

	水平誤差		標高誤差	3次元方向誤差
	左右方向	前後方向		
IMU	0.58	0.81	1.03	1.75

4. おわりに

森林作業道作設作業における作業の効率化と施工精度の向上を目的として、油圧ショベルの姿勢やバケット爪先位置を作業道の設計図面とともに運転席のモニタ等に表示させることで、オペレータの作業を支援する情報化施工技術の開発を進めている。本研究では、情報化施工に用いる油圧ショベルの姿勢演算精度を明らかにするため、油圧ショベルの姿勢を決定する4つの部位(上部旋回体、ブーム、アーム、バケット)にIMUを搭載し、それぞれの姿勢角からバケット爪先位置を演算で求め、その演算精度をトータルステーションにより検証を行った。その結果、高さ方向の誤差は平均1.03cmとなり、国土交通省の基準である誤差5.0cm以内の基準を十分に満たすことを確認したが、3次元方向の誤差が7.05cmと大きい結果となった。この原因を精査したところ、水平方向の誤差に影響するIMUの方位角計測精度に、最大6.0度、平均0.7度の誤差があることが分かった。そこで、IMUの代替となる方位角計測方法として、油圧ショベルの位置を特定するためのトータルステーションによる後部プリズム位置の視準データを用いて方位角を算定する方法を試したところ、3次元方向の誤差が平均1.75cmに小さくできることが分かった。これらのことから、情報化施工に資するための油圧ショベルの姿勢は、IMUセンサとトータルステーションを用いることで、十分な演算精度が得られることを明らかにした。

後部プリズムをTSで計測する方位角計測手法が有効であることが分かったが、車両を移動させる度に旋回中心を求めるための旋回動作が必要となり、作業能率の低下が懸念される。そのため、今後は、IMUとTSを併用しながら、通常の掘削作業工程の中で旋回中心を求める手法について検討する。

謝辞

本研究は、農研機構生研支援センター「生産性革命に向けた革新的技術開発事業」の補助を受けて実施した。

引用文献

国土交通省 (2019) “ICT 建設機械精度確認要領 (案)”, <https://www.mlit.go.jp/common/001284056.pdf>, (参照 2020-03-31)

毛綱 昌弘・山口 浩和・伊藤 崇之・鈴木 秀典・千坂 修・高崎 綾信・草野 兼光・北原 成郎 (2016) 遠隔操作機能と自動走行機能によるフォワードの操作支援技術の開発. 森林総合研究所研究報告, 15(4), 91-102.

林野庁 (2015) “平成 27 年度版森林作業道作設ガイドライン”, [https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan\\_kansi/h27itaku\\_seika\\_butu/attach/pdf/h27itaku\\_seika\\_ippan-267.pdf](https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/h27itaku_seika_butu/attach/pdf/h27itaku_seika_ippan-267.pdf), (参照 2020-03-31)

## Posture estimation accuracy of an excavator for information oriented construction of forest work road

Hirokazu YAMAGUCHI<sup>1)</sup>, Hidenori SUZUKI<sup>1)</sup>, Tatsuya SASAKI<sup>1)</sup>, Sakuo ICHIKAWA<sup>2)</sup>  
and Nobuyasu YAMAUCHI<sup>3)</sup>

### Abstract

An assessment was made of the attitude calculation accuracy of hydraulic excavators used for the computerized construction of forest work roads. An inertial measurement unit (IMU) was mounted on the four parts (upper revolving structure, boom, arm, and bucket) that determine the posture of the excavator. The toe position of the bucket was calculated from the various posture angles, and the accuracy was verified using TS. The results revealed an average height error of 1.03 cm, which is compliant with the specified standard of a maximum error of 5.0 cm set by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism. However, the error in the three-dimensional direction was as large as 7.05 cm. A close examination of the cause of this error revealed an error in the IMU azimuth measurement of 0.7° on average and as large as 6.0°. As a different way, the azimuth angle was calculated using the coordinate values of the rear prism surveyed by TS, and it was found that doing so reduced the average error in the three-dimensional direction to 1.75 cm.

**Key words :** computerized construction, forest work road, excavator, IMU, bucket position accuracy

---

Received 31 March 2020, Accepted 26 June 2020

1) Department of Forest Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) MAEDA SEISAKUSHO Co., Ltd

3) JITSUTA Co., Ltd.

\* Department of Forest Engineering, FFPRI, Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305 8687, Japan; e-mail: hiroy@ffpri.affrc.go.jp

