

# 技術紹介

## 6 MEMS センサを利用した小型IMUの開発

### Development of compact IMU using MEMS sensors

阿部 建二	Kenji Abe	商品開発センター 技術マネージャー 博士(理学)
竹内 竜太郎	Ryutaro Takeuchi	航機事業部 第三技術部 マネージャー
吉田 和弘	Kazuhiro Yoshida	航機事業部 第三技術部 主任

**キーワード:** 慣性装置、MEMS センサ、i-Construction、スマート農業、ICT

**Keywords:** Inertial Measurement Unit, MEMS Sensor, i-Construction, Smart Agriculture, ICT.

#### 要 旨

近年の労働人口の減少によって、特に建設や農業分野で、労働力不足が深刻化しています。そのため、これらの分野ではICT(Information and Communication Technology)の導入による労働生産性向上の期待が高まっています。現在、建設分野ではi-Constructionと呼ばれる新しいICTを利用する取り組みが進んでいます。また、農業分野でも、スマート農業と呼ばれる取り組みが進んでいます。これらのICTの利用では、衛星測位技術と慣性センサを組み合わせ、建設機械や農業機械の位置や姿勢を三次元で高精度な計測を行います。そして、それらに基づいて機械を制御することによって、屋外作業の生産性を高めます。当社では、航空機用などの高精度な慣性航法装置の開発を行ってきましたが、これらの産業分野での利用を考慮した、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)センサを利用した小型IMU(Inertial Measurement Unit)の開発を進めています。本稿では、この開発状況を報告します。

#### SUMMARY

Due to the recent declining workforce, labor shortages are getting worse, especially in construction and agriculture fields. Therefore, in these fields, improvement of labor productivity by ICT (Information and Communication Technology) introduction is expected. Currently, in the construction field, efforts to use a new ICT called i-Construction are proceeding. Also in the agricultural field, efforts called Smart Agriculture are advancing. In the use of these ICTs, we combine satellite positioning technology and inertial sensors to measure the position and attitude information of construction machines or agricultural machines with high accuracy in three dimensions. And by controlling the machine based on them, we increase productivity of outdoor work. JAE has been developing highly accurate inertial navigation systems for aircraft, etc. JAE is also developing a small inertial measurement unit using MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) sensors considering their use in above industrial fields. This paper reports on the development.

## 1. はじめに

現在、急速に進行する少子高齢化とそれに伴う人口減少が、多くの分野で労働力不足を起し、特に建設や農業分野では深刻化しています。その対策として、これまで進んでいなかった ICT の導入とそれによってもたらされる労働生産性の向上が期待されています。これらの ICT の利用では、様々な技術の導入が必要になりますが、屋外で使われる作業機械の位置や姿勢の計測技術が重要になります。

位置の計測には衛星測位技術が使われます。GPS (Global Positioning System) を初めとした衛星測位システムの整備が、各国・地域によって進められています。それらはまとめて、GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれ、多くの衛星を測位に利用できる環境が整ってきました。

スマート農業<sup>1)</sup>の施策の中には農業機械の自動運転の実現が含まれます。それぞれの作業行程を高い位置精度で行う必要が在りますが、衛星を使って測位できるのは、衛星からの信号を受信するアンテナ位置です。通常、アンテナは車体の高い位置に取り付けられるため、傾斜やデコボコの在る圃場などを走行する場合、車体の傾斜角を補正して位置を求める必要が在ります (図 1)。また、運転操作の自動化のために車体の向きや姿勢を検出して制御を行う必要が在り、これらの用途に IMU (Inertial Measurement Unit/慣性計測装置) が使用されます。

i-Construction<sup>2)</sup>における建設生産プロセスでは、調査、設計、施工、維持管理の全ての行程で三次元データを用いて行われます。施工部分は情報化施工と呼ばれ、国土交通省発注の土工工事で試行が始められ、生産性の向上が確認されています。この情報化施工では、cm レベルの精度で施工を行うことが求められています。施工で使われる建設機械には様々な種類が在りますが、最も汎用的に使われる機械が油圧ショベルです。油圧ショベルの施工では、バケットの先端位置を精度良く求める必要が在ります。ボディーに衛星測位用のアンテナを取り付けて位置を求め、さらにバケットの先端位置までを計算します。ボディーやショベルの腕部分 (ブーム、アーム、バケット) の長さは既知であるため、それぞれの傾斜角を精度良く求めることによって、バケットの先端位置を出すことができます (図 2)。中型の油圧ショベルでバケットの先端位置を十分な精度で求めるためには、取り付けられる IMU の姿勢角 (ロール角、ピッチ角) の精度は  $0.1^{\circ}$  以下が必要となります。

本稿では、これらの産業分野での利用を考慮した IMU の試作・評価結果と油圧ショベルで使用した場合の計測精度の検討について報告します。

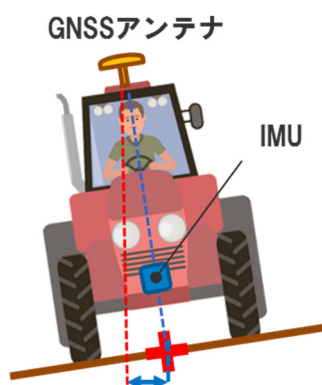


図 1. 傾斜の在る圃場を走行する農機

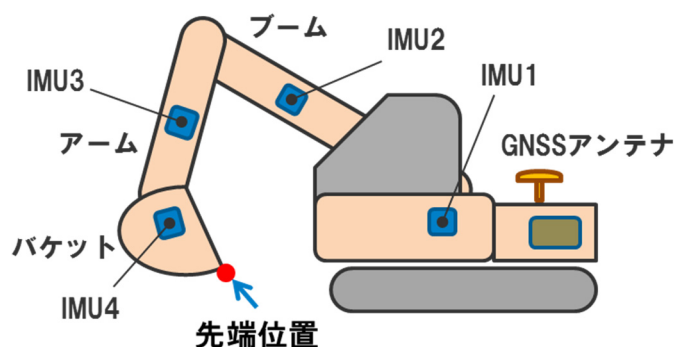


図 2. IMU を取り付けけた油圧ショベル

## 2. IMU について

IMU は、直交 3 軸(X, Y, Z)に配置された加速度計とジャイロから、加速度、角速度を検出し、その検出結果を使って演算した姿勢角、速度、位置を出力する装置です（図 3）。全ての物体の動きは、回転と移動（直線運動）の組み合わせで表現することが出来ます。これらの動きを検出するためのセンサを慣性センサと呼びます。

回転を知るセンサ ⇒ ジャイロ (角速度を検出)

移動を知るセンサ ⇒ 加速度計 (加速度を検出)

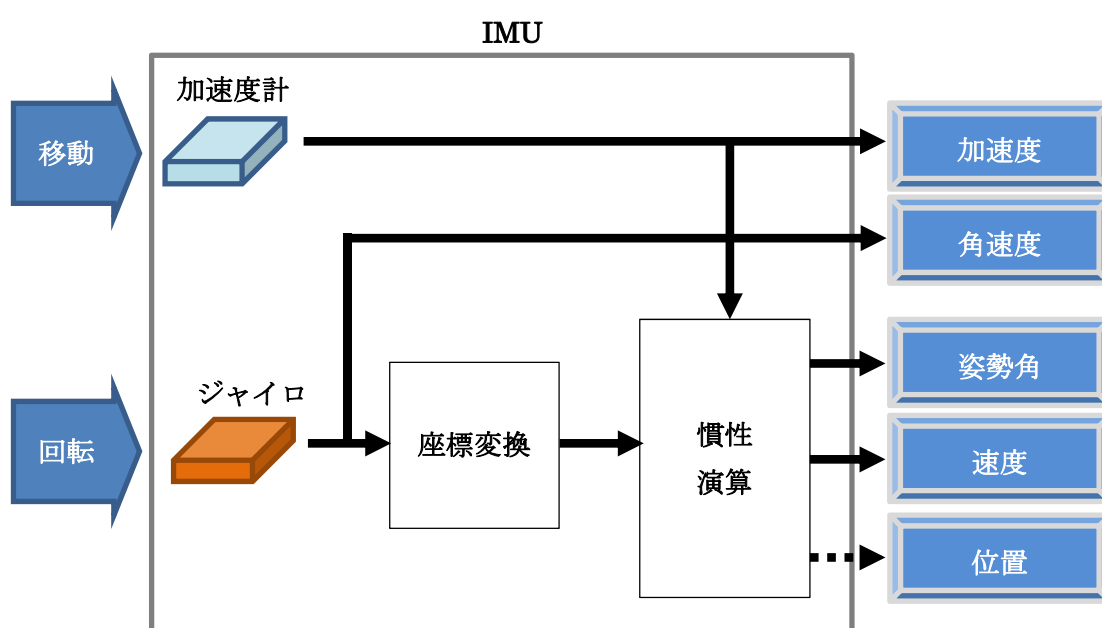


図 3. IMU ブロック図

農機や油圧ショベルに必要な姿勢角は、次のようにして計算されます。加速度計が水平のときの出力が「0(ゼロ)」になることを利用して、IMU の水平がどの程度傾いているかを演算し、初期姿勢を検出します。この姿勢角（ロール角、ピッチ角）の初期姿勢を計算する方法をアライメントと言います。初期姿勢を基準とし、その後の回転量（角速度）や移動量（加速度）を連続的に検出することで IMU の姿勢、位置を常に把握することが可能となります。

なお、本開発では、高精度の GNSS 測位を使用することを想定しているため、IMU から位置の出力は行っていません。

### 3. 試作品の概要

開発を行っている試作品の概要を説明します。慣性センサには、MEMS 技術を使ったジャイロおよび加速度計を搭載しました。MEMS センサは、半導体プロセス技術を応用してシリコン基板上に機械構造を集積化したもので、IMU の小型化、低コスト化を図ることが可能で、近年、その性能が向上してきました。本試作品の外観を図 4 に、ハードウェア機能ブロックを図 5 に示します。また、主要仕様を表 1 に示します。



図 4. 試作品外観

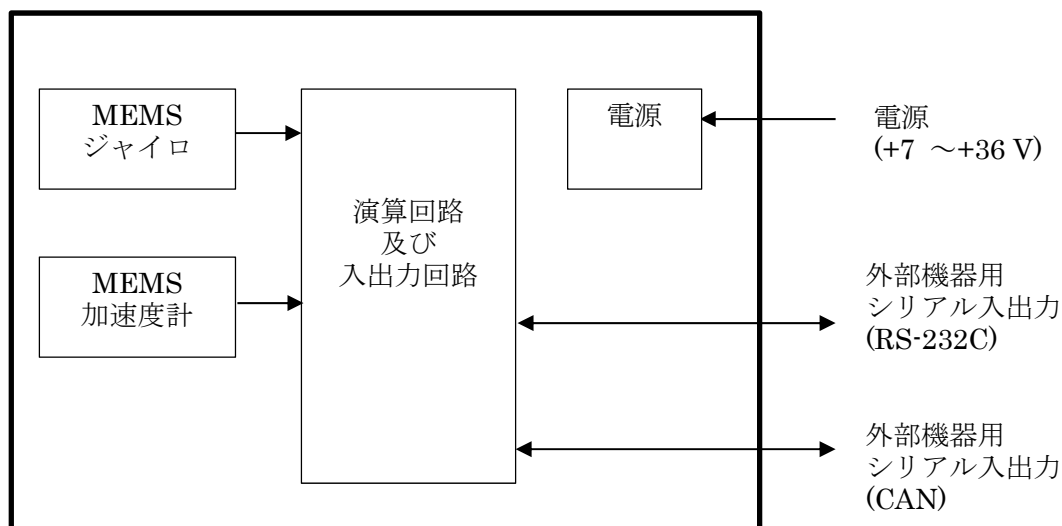


図 5. ハードウェア機能ブロック

表 1. 試作品主要仕様

シャーシ	外形	50(W)×62(D)×30(H) mm
	質量	120 g 以下
環境仕様	温度範囲	-40 °C ~ +80 °C
	耐衝撃	500 G@1ms
電源仕様	入力電源	+7 V ~ +36 V
	消費電力	1.0 W 以下
通信仕様	出力形式	RS232C (CAN 対応予定)
	データリフレッシュレート	100 Hz
	出力情報	角速度 3 軸、加速度 3 軸、 ロール角、ピッチ角、ヨー角
センサ部	角速度レンジ	±300 °/s
	加速度レンジ	±2 G, ±4 G, ±8 G(何れかのレンジを選択)
	ピッチ角 精度 (±80 °)	0.1 ° rms
	ロール角 精度 (±90 °)	0.1 ° rms

IMU の性能に影響を与える要因の 1 つが、IMU 内部の発熱の影響です。搭載部品の発熱がセンサに熱的影響を及ぼし、IMU の出力が影響を受けます。本試作品では、当初想定した大きさを出来るだけ変えずに、IMU の出力特性が影響を受けないように設計検討を行いました。発熱の大きな部品を出来るだけセンサから離すように配置し、排熱のルートを確保するように検討を進めました。

熱解析の例を図 6 に示します。図 6 は IMU の周囲温度を 80 °C にした場合のセンサ搭載基板の温度分布を示します。設計変更後はセンサ搭載基板の温度上昇が抑えられていることが分かります。

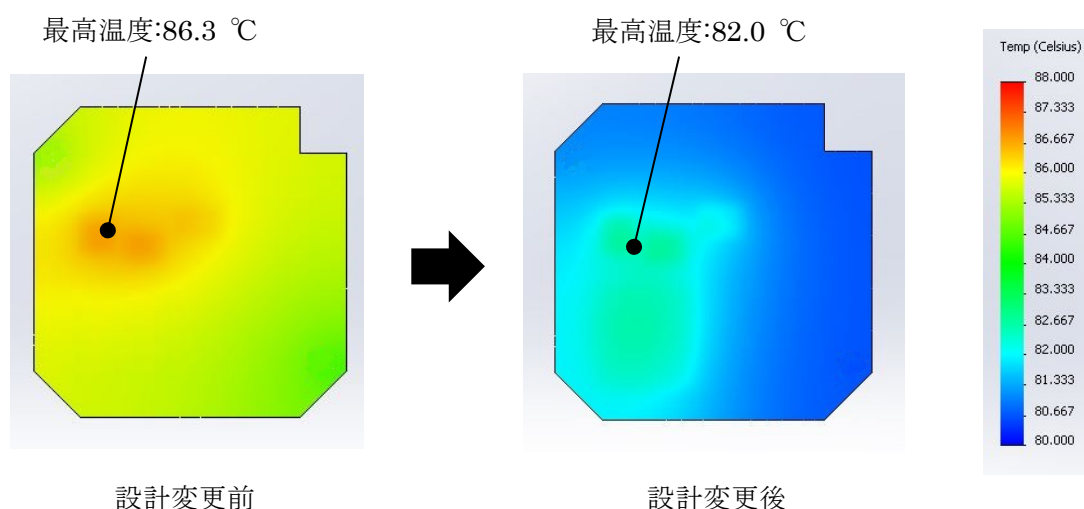


図 6. センサ搭載基板の熱解析(80 °C 雰囲気)

IMU の使用環境温度は $-40^{\circ}\text{C}$  ~  $+80^{\circ}\text{C}$ としました。広い温度範囲で使用する際に、温度変化が IMU の性能に影響を与えます。本試作では、センサのバイアスに対して 1 次の補正を行いました。図 7 にジャイロバイアスと温度、図 8 に加速度計バイアスと温度、そして、それぞれに当てはめた 1 次式の直線を示します。それぞれの温度はセンサ部の温度です。

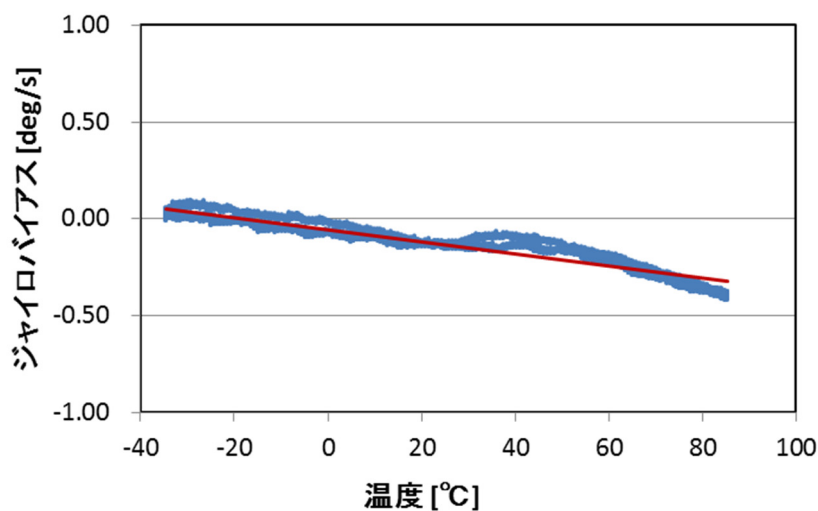


図 7. ジャイロバイアスと温度

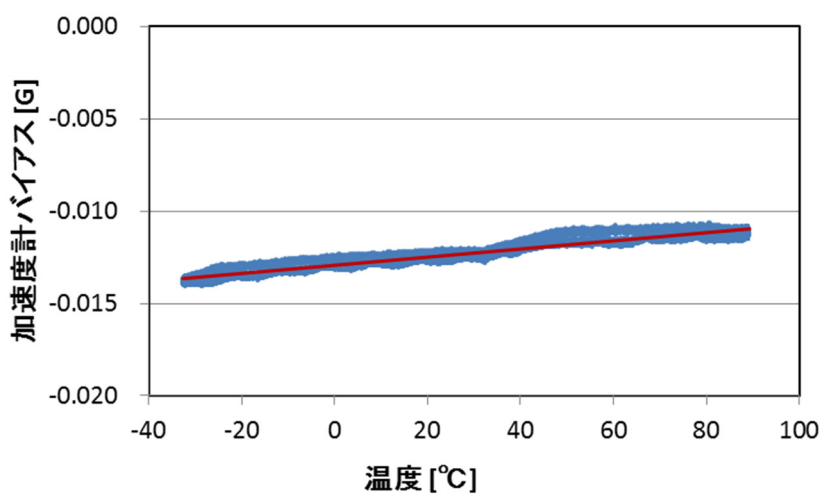


図 8. 加速度計バイアスと温度

本試作品では、ジャイロ、加速度計のバイアス温度補正以外に、各センサ出力のスケールファクター補正、ミスアライメントの補正を行い、姿勢角の精度向上を行っています。

## 4. 評価結果

試作品を静止状態で姿勢角を評価した結果を示します。アライメント実施後、ロール方向、ピッチ方向、それぞれに  $10^{\circ}$  刻みで測定し、入力角に対する差を誤差としています。入力角の精度は  $0.001^{\circ}$  以下です。

3回の測定を行いました。1回は **HOT START** と呼び、電源投入後1時間以上動作させ、アライメント実施後にデータを取得しています。あとの2回は **COLD START** と呼び、室温で8時間以上放置状態からアライメントを実施し、直ぐにデータを取得しています。これら3回の測定は、室温下で行いました(図9、図10)。これらの結果から、ロール角、ピッチ角とも  $0.03^{\circ}$  rms 以下の精度が得られました。

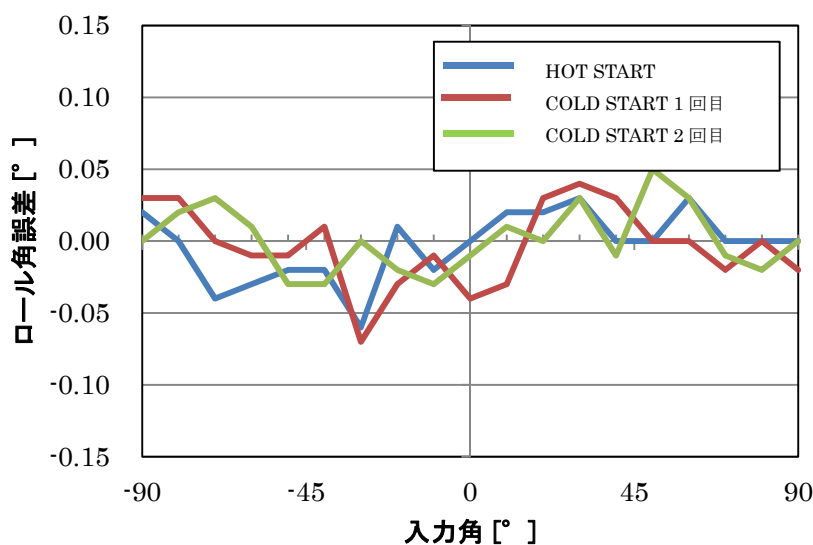


図9. ロール角評価結果

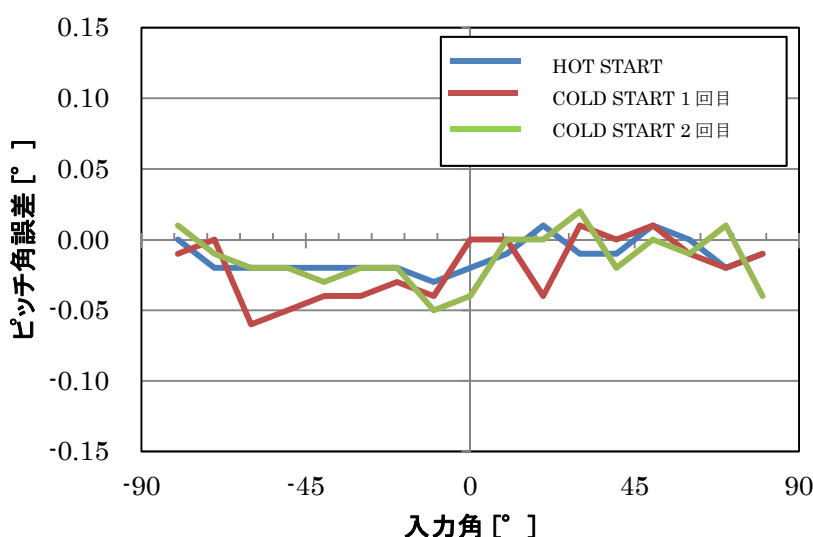


図10. ピッチ角評価結果



## 5. 計測精度の検討

精度要求の高い、油圧ショベルのバケット先端位置の計測精度を検討します。情報化施工で多く用いられると考えられる運転質量 20 トンクラス油圧ショベルに搭載した場合を想定します。

まず、位置の計測では、油圧ショベルに取り付けられた GNSS アンテナ位置を、RTK (Real Time Kinematic) と呼ばれる高精度の測位方法で求めます。RTK 測位の位置精度は 1 ~ 2 cm です。

GNSS アンテナはボディーの上に 2 つ設置され、バケットの向いている方位は 2 つの測位点から求められます (図 11)。図中の青線と赤線は真値と計測された角度を示します。方位角の測定精度は RTK 測位の精度と 2 つのアンテナの間隔で決まり、方位角精度は  $0.1^{\circ}$  未満と考えられています。この精度からバケット先端位置の方位方向の位置精度は 2 cm 未満となります。

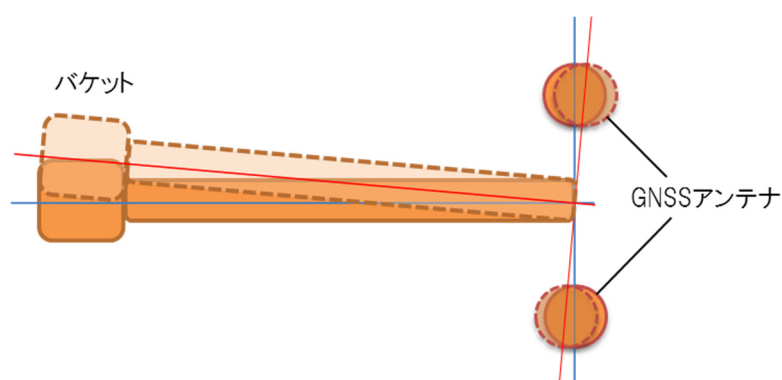


図 11. GNSS アンテナによる方位計測

静止状態における姿勢角の測定精度を用いて、鉛直面内のバケット位置の計測精度を考えます (図 12、ロール方向の傾きが無い場合を想定)。バケット先端位置はそれぞれの構成部分の角度によって決まりますが、先端位置の計測精度が最も低くなるのは、位置計測の元となる GNSS アンテナから腕の部分の部分が直線状に伸びた状態です。この状態での計測精度を算出します。図 12 では、左下方向に腕を伸ばした状態です。

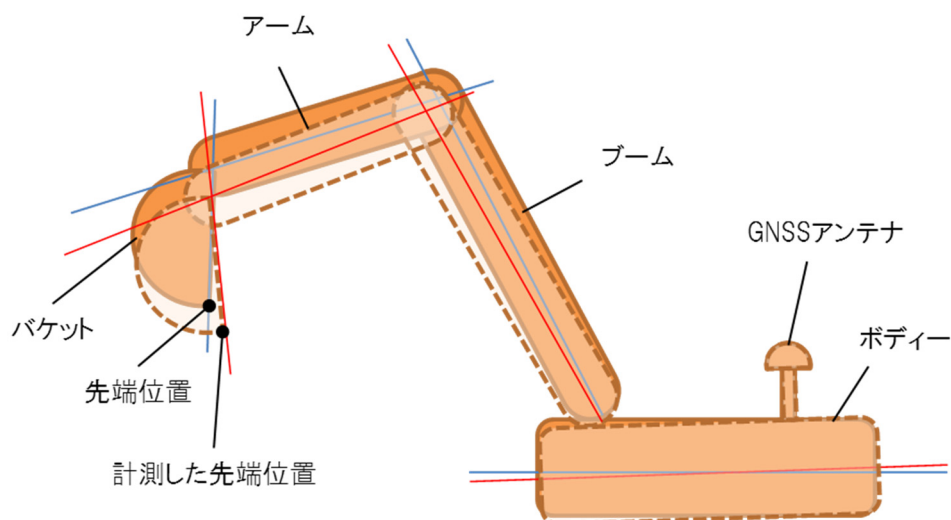


図 12. 油圧ショベルのバケット先端位置の計測



油圧ショベルのボディー、腕の各部分、それぞれに IMU を取り付け、姿勢角精度から鉛直面内での位置計測精度を算出します。例えばブーム部分では、ブームの長さ $\times \sin \theta_E$ として出されます（ $\theta_E$ ：姿勢角精度）。それぞれの長さ、位置計測精度を表 2 に示します。

GNSS アンテナからバケット先端位置までの計測精度は、各構成部分の精度の二乗和平方根で算出され、試作品 IMU の静止状態の姿勢角精度  $0.03^\circ$  では、精度は  $0.37\text{ cm}$  となります。また、環境温度  $-40^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$  の範囲における試作品の静止状態の姿勢角精度は、 $0.1^\circ$  以内になることを実験で確認しています。姿勢角精度が  $0.1^\circ$  の場合の GNSS アンテナからバケット先端位置の計測精度は、 $1.23\text{ cm}$  です。

現在、市場に供給されている MEMS センサを用いた小型 IMU の姿勢角精度の多くは  $0.2^\circ \sim 0.5^\circ$  ですが、それらを用いた場合の GNSS アンテナからバケット先端位置の計測精度は、 $2.45\text{ cm} \sim 6.14\text{ cm}$  になります。

表 2. 各長さと位置計測精度

IMU の姿勢角精度 ( $\theta_E$ ) [ $^\circ$ ]		0.03	0.1	0.2	0.5
	長さ [m]	位置計測精度 [cm]			
GNSS アンテナからブームの付け根	2.5	0.13	0.44	0.87	2.18
ブーム	5.7	0.30	0.99	1.99	4.97
アーム	3.0	0.16	0.52	1.05	2.62
バケット	1.3	0.07	0.23	0.45	1.13
GNSS アンテナからバケット先端	12.5	0.37	1.23	2.45	6.14

情報化施工では、工事個所によって求められる精度が異なり、要求の高い個所では  $3\text{ cm}$  程度が検討されています。バケット先端位置の計測では、RTK-GNSS 測位の精度と GNSS アンテナからバケット先端までの計測精度を合わせた精度になりますが、本試作品を用いた場合に、情報化施工で求められる精度を満たせる見通しです。

## 6. まとめ

高精度の IMU 開発で培った技術を応用して進めている小型 IMU の開発状況を報告しました。これまでに、広い使用環境温度内で、油圧ショベルで必要とされる姿勢角精度  $0.1^{\circ}$  rms を満足できる見通しを得ることができました。

この IMU は衛星測位と組み合わせた使い方を想定しています。今後は GNSS 測位モジュールを組み入れた IMU の開発を行っていく予定です。

### [参考文献]

- 1) 農林水産省「スマート農業の実現に向けた研究会」検討結果の中間とりまとめ (2016)  
[http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g\\_smart\\_nougyo/pdf/cmatome.pdf](http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_smart_nougyo/pdf/cmatome.pdf).
- 2) 国土交通省 技術調査：i-Construction ホームページ [http://www.mlit.go.jp/tec/tec\\_tk\\_000028](http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028).