

# 世界最小・最軽量 2g 3次元モーションセンサー

## 「U-BRAIN MicroSmart」

臼田総合研究所株式会社

代表取締役社長 工学博士 臼田 裕

### ABSTRACT

Currently, on the tablet or smartphone, various sensors: such as acceleration sensor and gyroscope, geomagnetic sensor are mounted. Further, these sensor's application can be developed using the API of the OS. However, the future, in a wearable device of the development stage, ultra-compact, lightweight and power-saving is required in particular. Therefore, it is difficult to use the hardware of the current tablet or smartphone. We developed the world's smallest and lightest 2g 3-dimensional motion sensor: "U-BRAIN MicroSmart" that have greatly improved size, weight, power-saving and built-in ease than conventional hardware. So, we report on its performance and function.

### 1. 背景

現在、スマホやタブレットには、加速度、ジャイロ、地磁気等の各種センサーが搭載されており、OS上のAPIを経由して、アプリケーションが開発できるようになっている。しかし、今後主流と目されているウェアラブル機器への適用を考えると、現行のスマホやタブレットを構成しているハードウェアでは、大きさ、重さ、省電力、内蔵容易性等の点において、十分とはいえない。

そこで今回、ウェアラブル機器への搭載を目指し、大きさ、重さ、省電力、内蔵容易性を従来のハードウェアより大きく向上させた世界最小・最軽量 2g 3次元モーションセンサー「U-BRAIN MicroSmart」を開発したので、その機能と性能について報告を行う。

具体的には、今回開発した3次元モーションセンサー「U-BRAIN MicroSmart」は、世界最小・最軽量 2g でありながら、15軸センサー(位置6、姿勢3、方位3、光1、音1、温度1)と5ch I/O(入出力切替可能)から構成されており、各種ウェアラブル機器に内蔵し、Bluetooth, ZigBee等と組み合わせることにより、PCやスマートフォン、タブレット等と単独で100mの長距離無線接続を可能にする。

主な特徴としては、

- (1) 15軸センサー(位置6, 姿勢3, 方位3, 光1, 音1, 温度1)を19x20x3.8mmで基板実装
- (2) 15軸センサー(位置6, 姿勢3, 方位3, 光1, 音1, 温度1)を軽量2gで基板実装
- (3) 15軸センサー(位置6, 姿勢3, 方位3, 光1, 音1, 温度1)と5ch I/Oを同一回路基板実装
- (4) 各種センサー誤動作防止用ドリフト補償機能をファームウェア上に標準搭載
- (5) 無線ユニット(Bluetooth, ZigBee等)との組合せにより単独100mの長距離無線接続
- (6) 給電用USB、バッテリーコネクタ、電源スイッチを軽量2g基板上に標準搭載
- (7) PC、スマートフォン等向けにファームウェア、ミドルウェアを新開発を実現した点である。(図1)(図2)

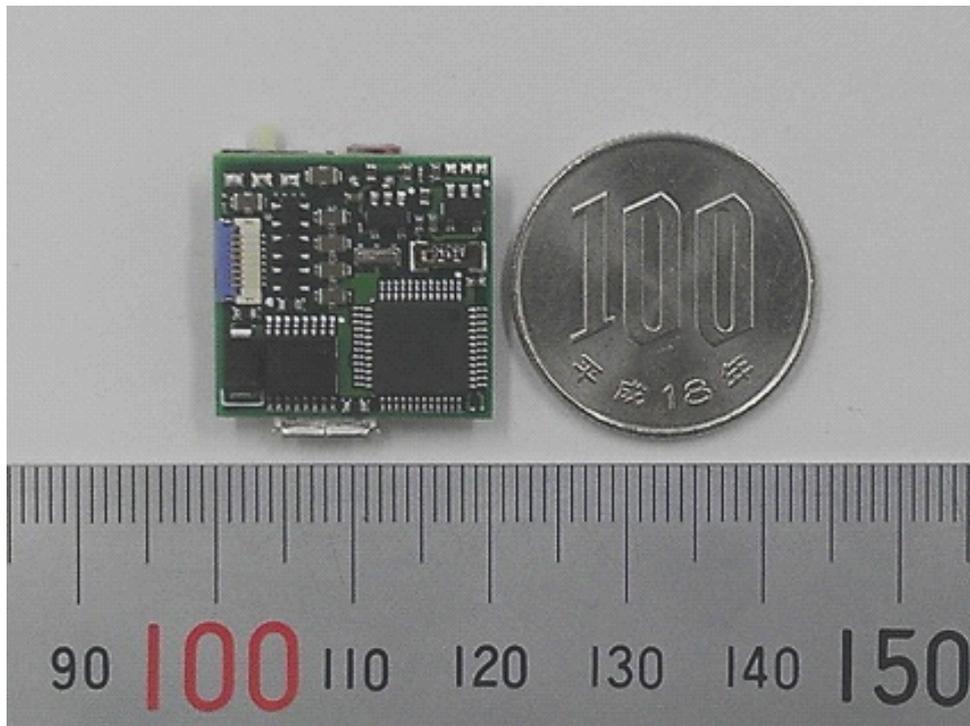


図1. 3次元モーショセンサー「U-BRAIN MicroSmart」概観図

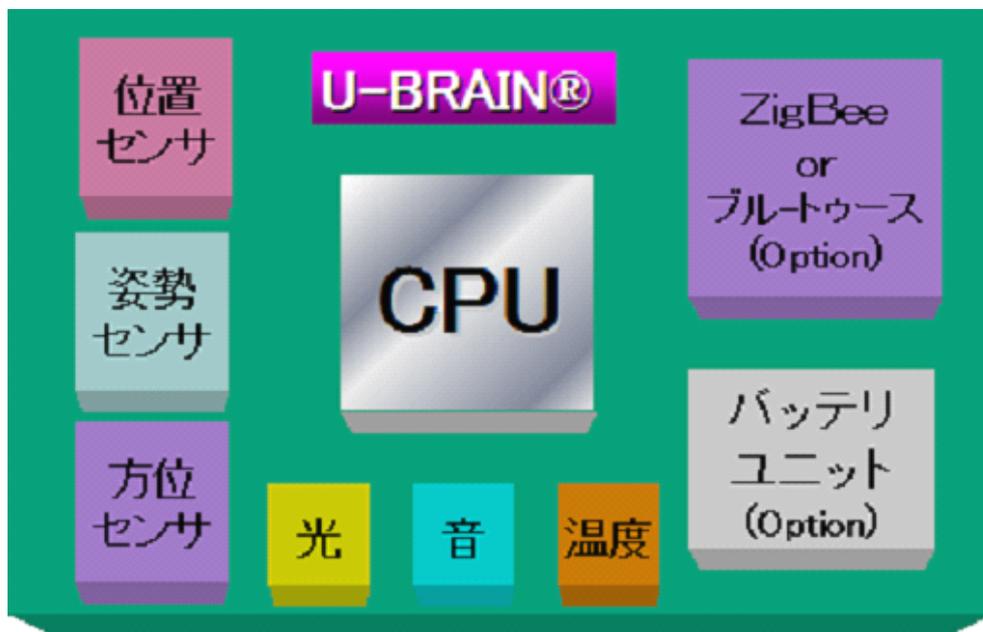


図2. 3次元モーショセンサー「U-BRAIN MicroSmart」構成図

## 2. 15軸モーションセンサーの特徴

今回、開発した15軸モーションセンサーは、位置6軸、姿勢3軸、方位3軸、光1軸、音1軸、温度1軸の合計15軸から構成されている。

各構成軸の内容について説明すると位置6軸は、2系統のダイナミックレンジを持つ3軸加速度センサー2個から形成されており、第1のセンサーは、( $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$ ,)の切り換えが可能なデジタル出力の3軸加速度センサーである。第2のセンサーは、( $\pm 3g/\pm 5g/\pm 16g$ )の実装時交換可能なアナログ出力の3軸加速度センサーである。

この2系統の3軸加速度センサーを採用した目的は、たとえば第1のセンサーが、 $\pm 2g$ に設定された状態にあるとそれ以外のダイナミックレンジの測定は、レンジ切り換えを行わない限り、不可能になる。そこで、この問題を解決するために、第2のセンサーを設けて、異なるダイナミックレンジの同時測定を可能とした。

次に、姿勢3軸は、( $\pm 250^\circ/s$ ,  $\pm 500^\circ/s$ ,  $\pm 1000^\circ/s$ ,  $\pm 2000^\circ/s$ )の切り換え可能な3軸ジャイロセンサーを採用している。ジャイロセンサーは、単位時間当たりの角速度を検出できるので、単位時間当たりの角速度の1回積分を行うことにより、角度 $\theta$ を測定することが可能になる。

しかし、通常の半導体角速度センサーでは、MEMS構造により製造されているため、通電時の温度変化により、ドリフトが発生する。このドリフトが大きな問題となり、単位時間当たりの角速度の1回積分を行うと大きな誤差を含み、正しい角度 $\theta$ を測定することができない。

そこで、今回は、この1回積分時の誤差を最小とするために、ジャイロドリフト補償機能を15軸モーションセンサーのファームウェア上に標準実装することにした。この標準実装の結果、単位時間当たりの角速度のドリフトをなくし、より正確な角度 $\theta$ を測定することが可能になった。

また、方位3軸は、 $\pm 1200\mu T$ のダイナミックレンジを持つ3軸地磁気センサーを採用した。3軸地磁気センサーを採用することにより、リアルタイムに方位を測定することができるので、加速度、角速度などと組み合わせることにより、測定対象物の動的な状態の変化を的確に捉えることが可能になる。

さらに今回は、通常の加速度、角速度、方位センサー以外に光1軸、音1軸、温度1軸のセンサーを採用した。

光1軸は400~700nmの感度レンジを持つ照度センサーであり、音1軸は100~10000Hzの感度レンジを持つMEMSマイクロフォンであり、温度1軸は $-40^\circ C \sim +85^\circ C$ の感度レンジを持つ温度センサーである。

光1軸、音1軸、温度1軸のセンサーを同一基板上に実装することにより、1つのCPUにより、制御可能となるため、加速度、角速度、方位以外の複数の情報も同時に測定できるので、小型・軽量・省電力を必要とするウェアラブル機器を実現するためには、有効である。

しかも今回は、様々なウェアラブル機器への適用を目指して、5chのI/O入出力を同一回路基板に実装しているので、外部スイッチ等により、モーションセンサーの動作状態を制御したり、実装センサーの状態に応じて、モータ等の外部機器を制御したりすることが可能になっている。(表1)

表1、15軸モーションセンサーの仕様一覧表

ユニット名	仕様1	仕様2	温度範囲
センサモジュール	15軸	加速度6,ジャイロ3,地磁気3,光1,音1,温度1	
加速度1	XYZ3軸	(±2,±4g±8,±16) g	-40°C~+80°C
加速度2	XYZ3軸	±3g/±5g/±16g	-40°C~+85°C
ジャイロ1	XYZ3軸	(±250,±500,±1000,±2000) ° /s	-40°C~+80°C
地磁気1	XYZ3軸	±1200μT	-40°C~+80°C
光	光1軸	感度:400~700nm	-25°C~+75°C
音	音1軸	感度:100~10000Hz	-40°C~+100°C
温度	温度1軸	感度:-40°C~+85°C	-40°C~+80°C
CPU	マイクロプロセッサ	20MHz, 3 V ~ 5.5 V	-20°C~+75°C
I/O	入出力5点	最大5点入出力切替可能	-20°C~+75°C

### 3. ジャイロドリフト補償機能

従来から船舶や航空機で使用されてきた光ファイバージャイロでは、光のモアレパターンにより角速度を検出しているため、ドリフトが発生しにくく、大きな問題にはならなかったが、半導体製造技術により作製されたジャイロセンサーは、その特性上、通電時の温度上昇に伴い、ドリフトが発生する。

このドリフトを除去するためにジャイロセンサー製造メーカーは、センサー内に簡易マイコンを内蔵し、事前に、温度変位によるセンサーのドリフト量を測定し、温度テーブル参照により、補正を行っているものが多い。

この手法では、ある程度のドリフト量を補正することは可能であるが、半導体製造技術で作製されたジャイロセンサーは、ミクロンレベルの構造体のコリオリ力をアナログ値として検出しているため、個体差も大きく、同じ工程の同じラインで製造されたセンサーといえどもまったく同一の特性を持つこと難しいため、補正には限界がある。

そこで、今回この問題を解決すべく、より高い精度でドリフトを補正する、ジャイロドリフト補償機能を15軸モーションセンサーのファームウェア上に実装したので、その機能について説明する。

本機能では、ある温度で静止状態にあるジャイロセンサーの出力を予め記憶する。そして、例えば別の温度で静止状態にあるジャイロセンサーの出力を検出する。検出された出力と、予め記憶したジャイロセンサーの出力とを比較すると、温度ドリフトによって変化した基準値の差が抽出される。ジャイロセンサーの出力は、変動による出力と、温度ドリフトによる出力とを重ね合わせたものである。抽出された基準値の差は温度ドリフトによる出力に相当する。したがってジャイロセンサーの出力から抽出された基準値の差を除去することにより、変動による出力のみを求めることができる。ジャイロセンサーからの出力値を $\omega_i$ とし、ドリフト分の角速度を $\Delta\omega_k$ とすると、ドリフト補償後の変動量Lは(式1)のようになる。

$$\text{ドリフト補償後の変動量 } L = \sum \{ \omega_i - \Delta\omega_k \} \quad (\text{式1})$$

上記の(式1)に従って、一方向の移動を例にとって原理的に説明する。

ジャイロセンサーは、静止状態で温度が変化した場合、**図3のグラフβ**のように出力する。

**グラフα**はジャイロセンサーを一定量移動させたときの出力値を示す。これは、**グラフβ**を電圧軸正方向に平行移動させたものである。このうち例えば**20℃**のときの出力値を**θ**としてメモリ等に記憶させておく。例えば**40℃**のときを例にとる。**40℃**のとき、静止状態でのジャイロセンサー出力は**β1**である。ここでメモリに記憶された値**θ**を読み出し、**β1**と**θ**との差をとると上記温度ドリフトによるオフセット量が抽出される。

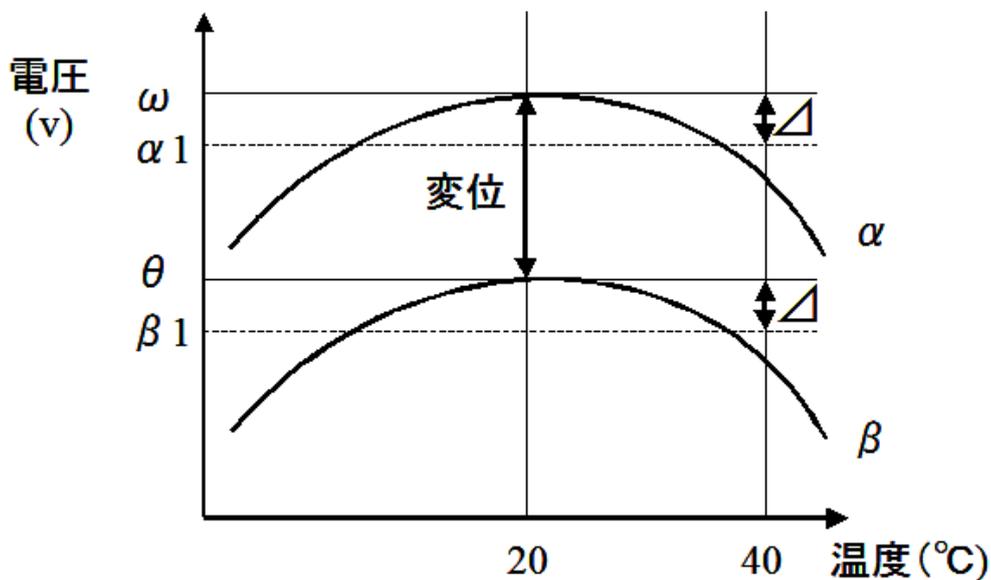
このときのオフセット量を**Δ**とすると、 $\Delta = \theta - \beta 1$ となる。

さらに、**40℃**のときにジャイロセンサーを一定量移動させたときの出力値は**α1**である。ここで**α1**に**Δ**を足すと補償出力が算出される。このときの補償出力を**ω**とすると、

$$\omega = \alpha 1 + \Delta = \alpha 1 + (\theta - \beta 1) = \alpha 1 - \beta 1 + \theta \quad (\text{式2})$$

となり、補償出力**ω**は温度に関係なく一定となる。**ω**からメモリに記憶しておいた**θ**の値を減算すれば、**(α1 - β1)**が求まる。これが実際の移動による変位となる。(式2)

つまり実際には、ジャイロセンサーが静止状態の**グラフβ1**さえ記憶しておけば、一定量ジャイロセンサーを移動させたときのある温度での出力電圧(**グラフα1**のある温度における出力電圧)と、**グラフβ1**のその温度における出力電圧との差をとることにより、ジャイロセンサーの移動のみによる変位が検出できる。



$$\left\{ \begin{array}{l} \cdot \Delta = \theta - \beta 1 \\ \cdot \omega = \alpha 1 + \Delta \\ \quad = \alpha 1 - \beta 1 + \theta \end{array} \right.$$

図3、ジャイロドリフト補償方法

## 4. 動作検証

つぎに、今回15軸モーションセンサーのファームウェア上に実装したジャイロドリフト補償機能により、3次元空間で「U-BRAIN MicroSmart」を一定方向に移動させて、その移動量を計測し、実際の移動量とどの程度誤差が生じるのかの動作検証を行ったので、その内容を報告する。

### 4.1 測定装置設置手順

(STEP1) 図4の測定装置を組み立てる。

(STEP2) 測定する半径位置に U-BRAIN MicroSmart を固定する。(図4)

- ・ 都度移動し固定を繰り返す。

(STEP3) 角度プリント紙の位置を調整する。(図4)

- ・ カメラの回転中心と角度プリント紙の図中心を一致させる。
- ・ リモコンの HOME ボタンを押す。
- ・ リモコンの ↑ ↓ ボタンで U-BRAIN MicroSmart が水平になるように調整する。
- ・ 定規のセンターとプリント紙の 0° のラインを一致させる。

(STEP4) カメラポジションをプリセットさせる。(リモコン操作)(図5)

- ・ ↑ ↓ ボタンで U-BRAIN MicroSmart が水平になるように調整する。
- ・ ← → ボタンで回転角度を変える (0° 15° …)。
- ・ PRESET を押しながら数字ボタンを押し、状態を記憶させる (1~6 まで)。

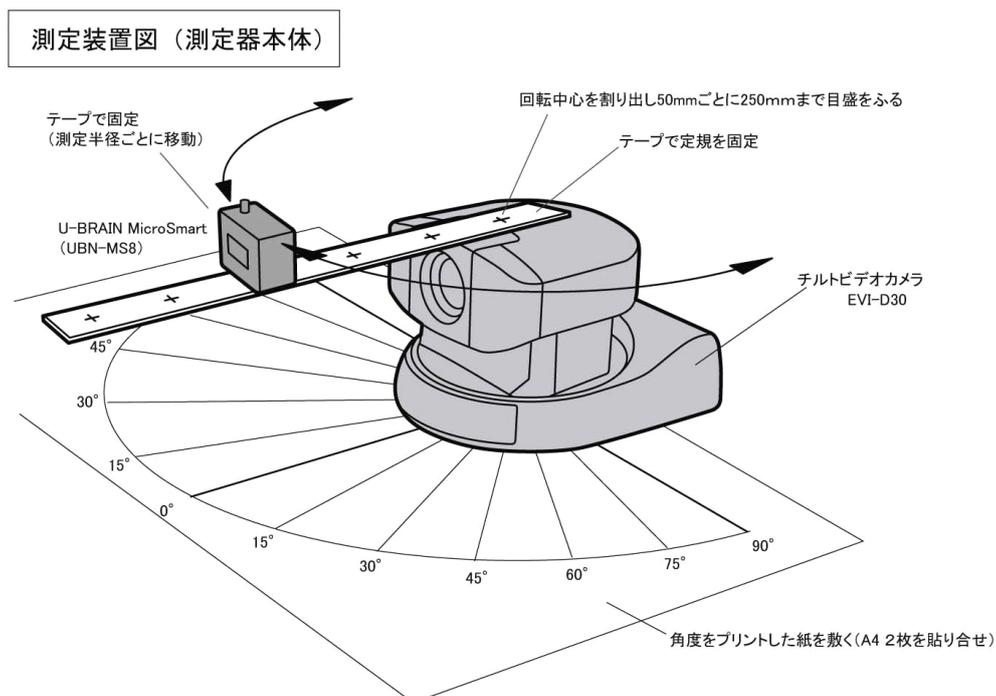


図4、測定装置(本体)

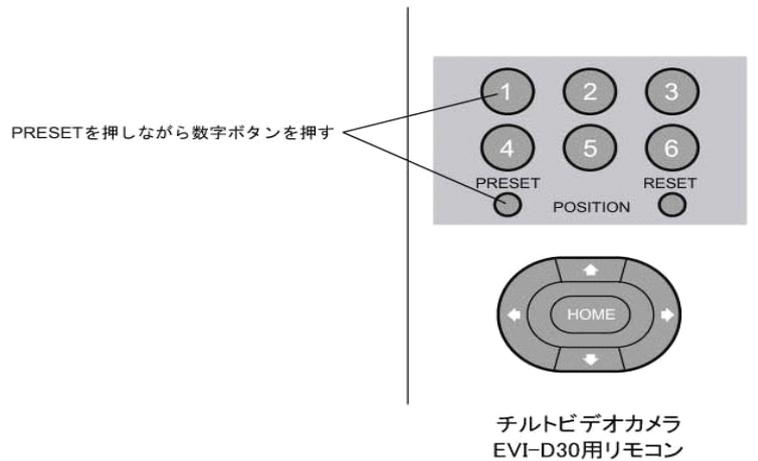


図5、測定装置(リモコン)

## 4.2 データ処理装置設置手順

(STEP1) PC を立ち上げ Bluetooth デバイスを有効にする。(図6)

(STEP2) U-BRAIN MicroSmart と接続する。

- ・ Bluetooth の設定で COM ポート上の U-BRAIN MicroSmart と接続されていることを確認する。
- ・ 接続されているポート番号を控える。

(STEP3) U-BRAIN-DSM (データ取得ソフトウェア) を起動する。

- ・ U-BRAIN-DSM を立ち上げる。
- ・ U-BRAIN MicroSmart ポート番号を U-BRAIN-DSM に入力し Start をクリックする。
- ・ 測定装置側の位置を  $0^\circ$  ポジション (プリセット) にした状態で U-BRAIN-DSM の  $\theta$  値をリセットする。

測定装置図 (PC側)

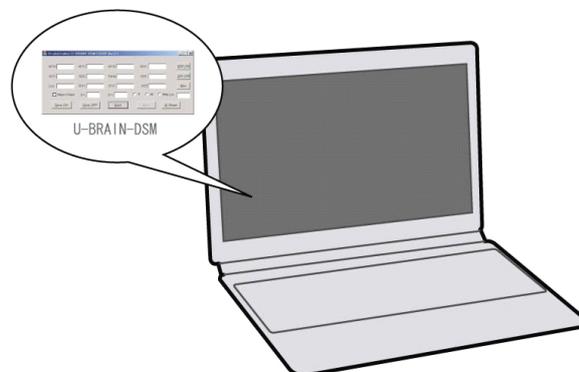


図6、データ処理装置

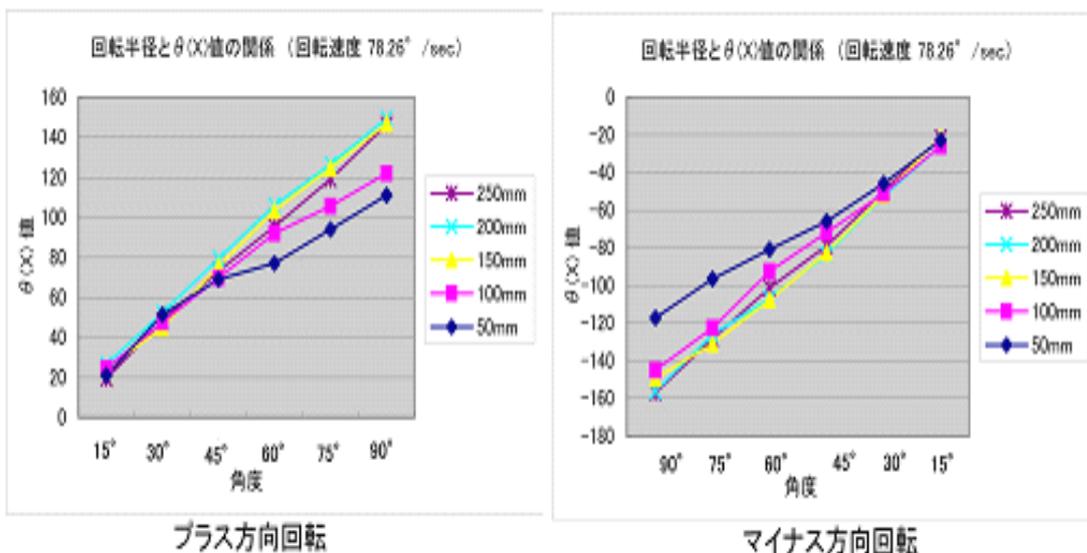
### 4.3 測定手順

- (STEP1) X 軸の測定が全て済んでから Y 軸、Z 軸の順序で測定を行う。
- (STEP2) 各測定毎に、プリセットした 0° ポイント (HOME に定規たわみ分の上下調整を加えた位置) に必ず戻る。
- (STEP3) 各測定毎に、U-BRAIN-DSM の  $\theta$  Reset をクリックする。
- (STEP4) 半径距離 50mm に固定した状態で、+15° から +75° までの 5 段階を順に測り、次に 100mm で +15° から +75° までを計測する順序で行う。(50mm→100mm→150mm→200mm→250mm)
- (STEP5) +15° から +75° までを一巡後、同じ工程を 10 回繰り返す、次に半径距離を変更した測定を行う。
- (STEP6) 半径距離を移動させると定規のたわみが変わるため、プリセット済の +15° から +75° の全ての状態にリモコンの上下カーソルで水平調整を加え再記憶させる。
- (STEP7) プラス側の +15° から +75° までが済んでからマイナス側を計測する。
- (STEP8) プリセット数の都合上、90° の測定は全半径の +15° から +75° が全て終わった後で行う。
- (STEP9) 10 回の平均値を EXCEL 上で計算し、回転半径と  $\theta$  値の関係をグラフ化する。
- (STEP10) チルトビデオカメラ EVI-D30 のプリセット回転速度を計測したところ、0° から 180° の移動に 2.3 秒を要したことから速度は 78.26/sec としている。

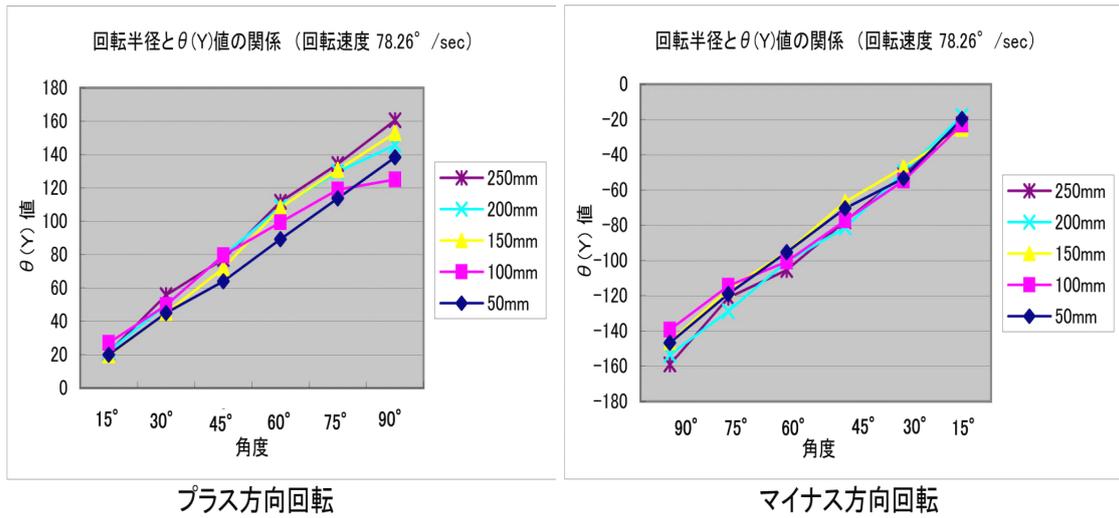
### 4.4 測定結果

#### 4.4.1 ジャイロセンサー感度 500° /S の場合

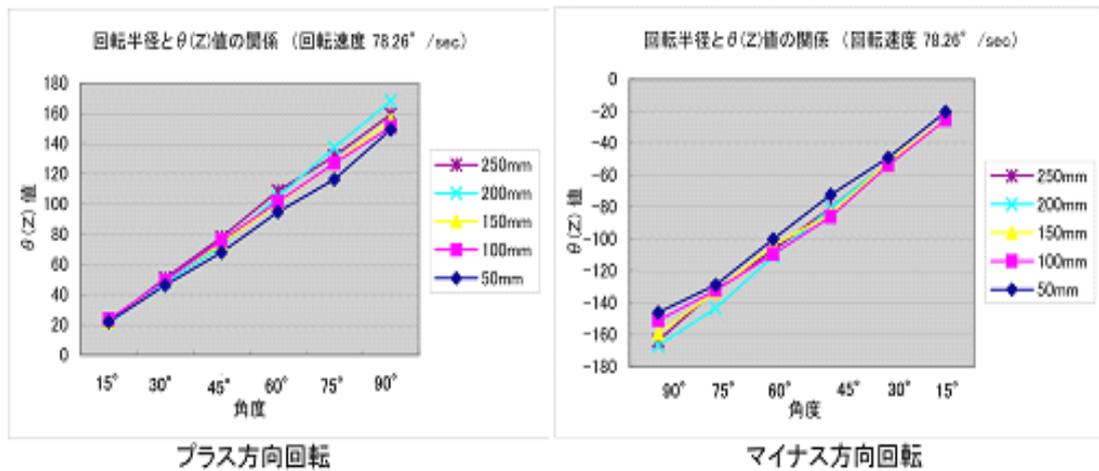
##### (1) X 軸の測定結果



## (2) Y 軸の測定結果

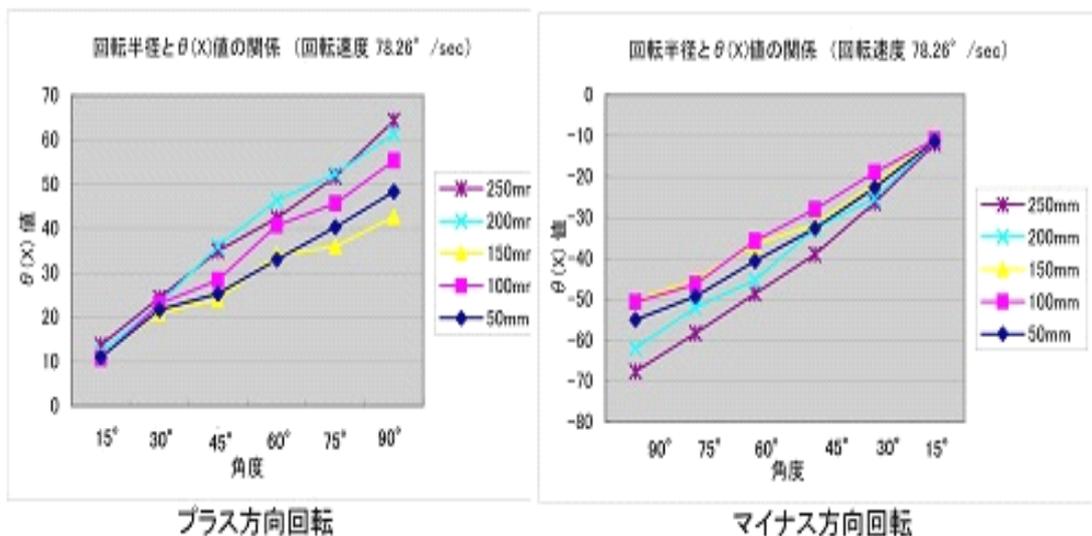


## (3) Z 軸の測定結果

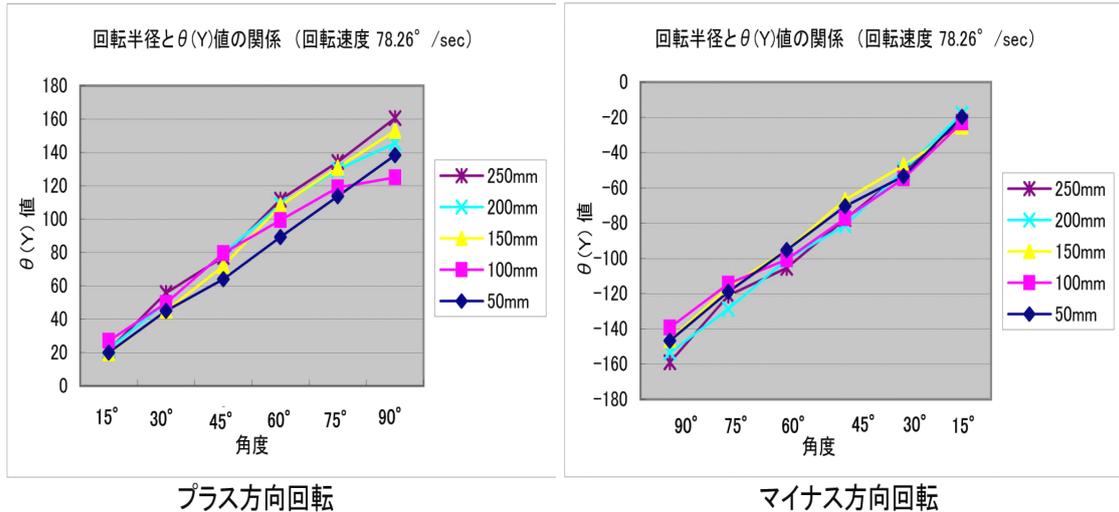


## 4. 4. 2 ジャイロセンサー感度 1000° /S の場合

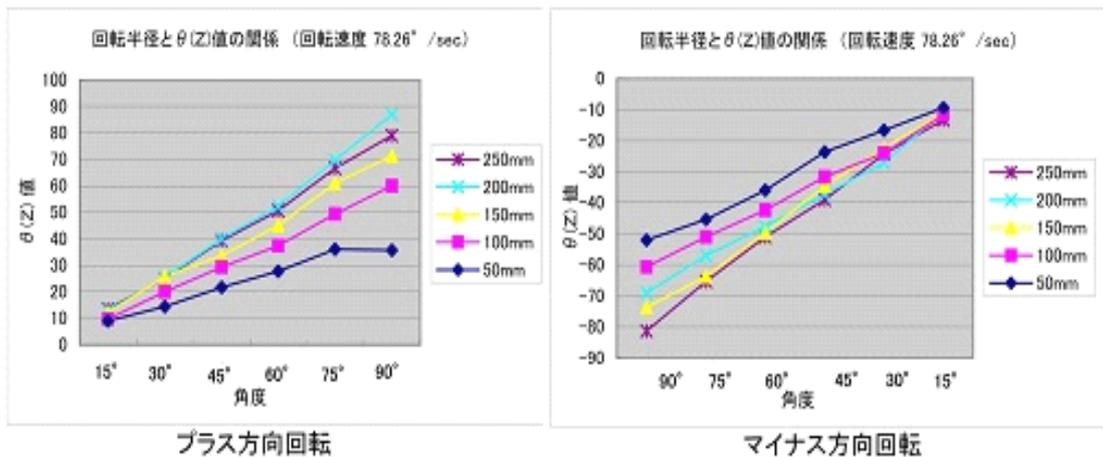
### (1) X 軸の測定結果



## (2) Y 軸の測定結果



## (3) Z 軸の測定結果



## 4.5 考察

3次元空間で「U-BRAIN MicroSmart」を一定方向に移動させて、その移動量の計測を行った結果の考察するとジャイロセンサー感度 500° /S の場合には、X 軸半径 50mm のプラスマイナス値の直線性があまり保たれていないことがわかる。X 軸半径 100mm 以降は、プラスマイナス値の直線性が、距離の応じて改善されていることから判断すると測定装置のモータ駆動方式がパルスモータであるため、初動時の立ち上がりトルクと停止時の立下りトルクによる振動が影響して、過大な角速度が発生し、距離演算時の誤差を生じさせる原因となったものと考えられる。

ジャイロセンサー感度 500° /S の場合の Y 軸、Z 軸では、半径が異なってもプラスマイナス値の直線性は、保たれているところからするとジャイロセンサー X 軸への過大な角速度の影響が特に大きいので、パルスモータ駆動ではなく、サーボモータ駆動による測定装置に変更して、影響が低減するのかが確認する必要がある。

一方、ジャイロセンサー感度 1000° /S の場合には、X 軸半径 50mm~150mm と Z 軸半径 50mm, 100mm のプラスマイナス値の直線性が、あまり保たれていないことがわかる。この場合も X 軸半径 200mm, Z 軸半径 150mm 以降は、プラスマイナス値の直線性が、距離に応じて改善されている。

ジャイロセンサー感度  $500^{\circ}/S$  と  $1000^{\circ}/S$  の場合では、過大な角速度が発生した際に影響を受けるセンサー軸が異なることが推測されるため、この原因解明の点からもパルスモータ駆動ではなく、サーボモータ駆動による測定装置に変更して、影響が低減するのかが確認する必要がある。

動作検証の結果、ジャイロセンサー感度  $500^{\circ}/S$  と  $1000^{\circ}/S$  の各場合において、XYZ 軸ごとに「U-BRAIN MicroSmart」を半径 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm に設置して、一定方向に移動させて、その移動量を計測し、実際の移動量とどの程度誤差が生じるのかの動作検証を行った。傾向としては、設置半径が小さい場合には、一部ある程度誤差が大きく出る場合があるものの、測定機器のパルスモータ駆動方式による影響等を考慮すると、姿勢測定センサーとしては、利用価値が高いことが理解できる。

本「U-BRAIN MicroSmart」には、姿勢センサー以外に加速度、方位、光、音、温度センサーも実装されているので、今後はこれ等センサーの動作検証も行っていく予定である。

## 5. まとめ

本稿では、3次元モーションセンサー「U-BRAIN MicroSmart」に搭載されている15軸モーションセンサーの特徴とジャイロドリフト補償機能及び動作検証による性能について述べた。

3次元モーションセンサー「U-BRAIN MicroSmart」をICT機器に内蔵或いは搭載すれば、ICT機器のセンサー情報(位置、姿勢、方位、光、音、温度)を高精度で、取得可能となる。

また、3次元モーションセンサー「U-BRAIN MicroSmart」は、これから大きな発展が予想されているウェアラブル機器への内蔵など幅広い利用も可能である。

今後、3次元モーションセンサー「U-BRAIN MicroSmart」が、多くのICT機器やウェアラブル機器に内蔵或いは搭載されることにより、社会の様々な分野で、利活用されることが期待される。