

# 海底カメラにおける姿勢計測技術の研究

田中 聡 伍賀正典

A Study on attitude measurement system in sea bedded camera system.

Satoshi TANAKA, Masanori GOKA

## ABSTRACT

An EKF (Extended Kalman Filter) is constructed to estimate the attitude of the “seabed camera” setting on the seafloor using 9-axis sensors for acceleration, gyro, and geomagnetism. The measurement experiment results of the camera in the Seto Inland Sea, almost certain results is obtained in the north, south, east, and west directions. On the other hand, it was also found that unstable values appear when the top and bottom are switched. It is affected by the magnetic material contained in the mud on the seabed.

### 1. 海底カメラの姿勢センサ

海底に沈めて画像を撮影し、水温や潮流を長時間にわたって計測するための海底カメラの開発を行っている[1][2]。現在の4号機(図1)では複数の海底カメラを海底に沈めて多点観測することを目指している。このた



図.1 海底カメラ4号機 (ドライブレコーダ搭載)

めに、それぞれのカメラの位置関係をできるだけ正確に

スマートシステム学科

知る手段が必要になる。特に、海底カメラがどの方向を撮影しているのかというカメラの姿勢を示すデータが必要になる。現在の海底カメラは船上からケーブルで吊り下げて10m程度の深さの海底に下して設置するため、海底カメラの方向や姿勢を船上からコントロールすることは非常に難しく、偶然に設置された方向で撮影を行うことになる。このため、海底での画面の東西南北や画面の傾きを知るための正確な情報が必要となる。



図.2 2つの海底カメラの設置(海上に浮き球が設置)

海底カメラで採用した姿勢センサは IMU(Internal Management Unit)用として広く使われている Boch 社の BMX-055 および ST マイクロエレクトロニクス社の LSM9DS1 である。2つとも同じような加速度、ジャイロ、磁気コンパスを搭載した9軸のセンサで同程度の性能である。センサには誤差があり、理論的にあり得ない、データの組み合わせが発生する場合もあるため、センサ出力をそのまま実際の姿勢とすることはできない。またセンサ軸と本体軸は離れているので回転中心が異なる場合には遠心による加速度が追加される。そこで観測値と推定値(求めたい姿勢の情報)を分離する Kalman Filter[3]や Madgwick Filter[4]を適用する。

## 2. センサから姿勢を求める

図3に2号機に前者を搭載した場合の、センサ軸と本体軸、カメラ画面のスクリーン軸の関係を示す。

座標系は海底カメラ本体のボディ座標 $(x_b, y_b, z_b)$ を基準として、センサ座標 $(A_x, A_y, A_z)$   $(G_x, G_y, G_z)$   $(M_x, M_y, M_z)$ 。なお、センサは加速度、ジャイロ、磁気コンパスの3つがあり、 $x, y, z$  の軸は一致しておらず、センサによっては軸の正方向に負の値が出るというものであるが、そうした違いを整合し本体軸のボディ座標の軸方向に合わせるものとする。

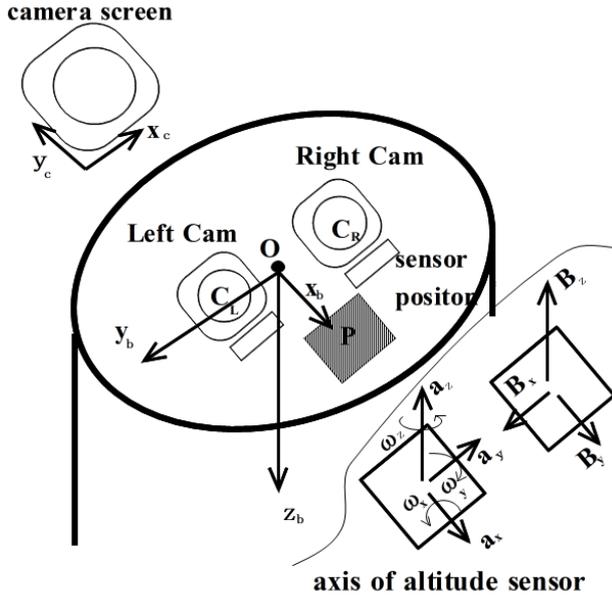


図.3 海底カメラとセンサの座標系の関係

海底カメラ本体の原点Oからセンサ軸の原点までのベクトルを $\vec{r} = \vec{P}$ とする。

地球上における東西南北、上下を考えた海底カメラの姿勢を表すためには YPR(Yaw, Pitch, Roll)を Roll( $\phi$ )、Pitch( $\theta$ )、Yaw( $\psi$ )の Euler 角の座標軸回転(座標の回転ではない)の行列

$$\begin{cases} R_x(\Phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{pmatrix} \\ R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \\ R_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

基準座標(アースフレーム)からセンサの座標への変換を次のような変換積で表すものとする。

$$C_{xyz} = R_x(\Phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \quad (2)$$

基準の軸方向はそれぞれの回転について、  
Roll( $\phi$ ):X軸右回り回転、xy平面が水平で0。  
Pitch( $\theta$ ):x軸の水平からの伏角。

Yaw( $\psi$ ):北方向を0として上からみて時計回りとする。

加速度センサの値は重力方向を+z軸とすると

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = R_x(\Phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。gは重力加速度である。このとき、センサ値 $A_{xyz}$ から求まる Euler 角は(3)を用いて

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{A_y}{A_z}\right) \quad (4)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{-A_x}{A_y \sin\phi + A_z \cos\phi}\right) \quad (5)$$

と求まる。一方 Yaw 角は

$$\psi = \text{atan2}(-m_E, m_N) \quad (6) \quad \text{C言語標準}$$

であり、 $m_E, m_N$  は地磁気の東及び北方向成分である。地球上では地磁気は水平面に対して伏角 $\delta_m$ で入射している。

たとえば筆者の広島県近傍では $49^\circ$  近くである。また、北方向をx方向にとるとy成分は0となるので、センサのうける磁力の大きさ $M_s = (M_x, M_y, M_z)$  と未知数 $m_0$ を用いて

$$\begin{pmatrix} m_N \\ m_E \\ m_{fz} \end{pmatrix} = R_z \begin{pmatrix} m_0 \cos\delta_m \\ 0 \\ m_0 \sin\delta_m \end{pmatrix} = R_y^{-1} R_x^{-1} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

が成立する。

このようにして、姿勢は求まるが、測定値にはそれぞれ誤差がある。

ジャイロのセンサ測定値 $\vec{G} = (G_x \ G_y \ G_z)$ に対して推算される角速度 $\vec{\omega} = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$ はバイアス $\vec{b} = (b_x \ b_y \ b_z)$ を用いて、

$$\vec{\omega} = \vec{G} - \vec{b} \quad (8)$$

と表現できる。ただし、 $\vec{b} = \vec{0}$ である。

同様に、磁気センサのバイアス $\vec{v} = (v_x \ v_y \ v_z)$ を考えると、(5)式は次のようになる。

$$\tan \phi = \left( -\frac{m_E}{m_N} \right) = \frac{(M_z - v_z) \sin\theta - (M_y - v_y) \cos\theta}{(M_x - v_x) \cos\theta + (M_y - v_y) \sin\theta \cos\theta + (M_z - v_z) \sin\theta \cos\theta} \quad (9)$$

なお、

$$\tan\delta_m = \frac{m_{fz}}{m_N \cos\psi + m_E \sin\psi} \quad (10)$$

である。磁気センサは外部の磁性物体の影響を受けやすく方位の測定に影響を与えるため姿勢計測への感受性を下げておく必要がある。また、BME-055 に比べ、LSM9DS1 はバイアス値がかなり大きいうえ、製品のばらつきが大きいためあらかじめきちんとオフセット量を計測しておく必要がある。

本体軸とセンサ軸の原点が異なる場合、本体軸回りの回転はセンサ対し遠心力 $\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \vec{r}$ や回転の接線方向に向く力 $\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{r}$ そしてコリオリの力 $\boldsymbol{\omega} \times \dot{\vec{r}}$ が重力加速度 $g$ に加算される。

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \vec{r} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{r} + 2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\vec{r}} +$$

$$R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (11)$$

このうちセンサは本体に固定されているのでコリオリの力は0である。

本システムのサンプリング周期  $T$  は120msec である。そこで、入力のカットオフ周波数0.4Hz の一次ローパスフィルタ(デジタルフィルタ)を使用している。

### 3. クォータニオンによる運動方程式

3次元の回転を表現するにはクォータニオンを用いると特異点がない良い解が得られるとされている。クォータニオンに関する運動方程式は

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \hat{Q} \vec{\omega} \quad (12)$$

であり、(7)を代入すると、

$$\begin{cases} \dot{q}_0 = -\frac{1}{2} \{ (G_x - b_x)q_1 + (G_y - b_y)q_2 + (G_z - b_z)q_3 \} \\ \dot{q}_1 = \frac{1}{2} \{ (G_x - b_x)q_0 - (G_y - b_y)q_3 + (G_z - b_z)q_2 \} \\ \dot{q}_2 = \frac{1}{2} \{ (G_x - b_x)q_3 + (G_y - b_y)q_0 - (G_z - b_z)q_1 \} \\ \dot{q}_3 = \frac{1}{2} \{ -(G_x - b_x)q_2 + (G_y - b_y)q_1 + (G_z - b_z)q_0 \} \end{cases}$$

(13)

運動方程式を時間差分で求めるには

$$\hat{q}_t = q_{t-1} + \int_{t-1}^t \omega dt \quad (14)$$

ではあるが、文献[5]によると1次近似により

$$\begin{bmatrix} \hat{q}_0 \\ \hat{q}_1 \\ \hat{q}_2 \\ \hat{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \Delta t \quad (15)$$

の漸化式で逐次求めることができる。

今回のEKFの適用においては他の例にならって、状態変数 $\mathbf{x}$ にはジャイロのバイアス $\vec{b}$ をパラメータに加えて次のようにした。

$$\mathbf{x} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad b_x \quad b_y \quad b_z] \quad (16)$$

前の状態 $\hat{\mathbf{x}}_k$ から次の状態推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ を求める状態遷移

を $f(\mathbf{x})$ とすると

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = f(\hat{\mathbf{x}}_k) \quad (17)$$

カルマンフィルタでは $f$ のヤコビ行列

$$\mathbf{A}_k = \frac{\partial f(\hat{\mathbf{x}}_k)}{\partial \hat{\mathbf{x}}_k} \quad (18)$$

を使い、誤差共分散行列 $\mathbf{P}_n$ を同時に求める。

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + T \cdot (\mathbf{A}_k \mathbf{P}_k + \mathbf{P}_k \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}) \quad (19)$$

の漸化式を逐次計算する。なお、 $T$  はサンプルタイム、 $\mathbf{Q}$

は系から発生する誤差の二乗平均値である。ちなみに $\mathbf{A}_k$ は次のようになる。

$$\mathbf{A}_k = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_x - b_x) & -(\omega_y - b_y) & 0 & 0 & 0 \\ (\omega_x - b_x) & 0 & (\omega_z - b_z) & 0 & 0 & 0 \\ (\omega_y - b_y) & -(\omega_z - b_z) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (\omega_z - b_z) & (\omega_y - b_y) & -(\omega_x - b_x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(\omega_z - b_z) & q_1 & q_2 & q_3 \\ -(\omega_y - b_y) & -q_0 & q_3 & -q_2 \\ (\omega_x - b_x) & -q_3 & -q_0 & q_1 \\ 0 & q_2 & -q_1 & q_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

これにより状態の推定値 $\hat{\mathbf{x}}_k$ が次々と求まるが、この状態に

おいて、各センサはどのような値でなければならないのかを計算する必要がある。これが出力関数 $z(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ であり、状態 $\mathbf{x}$ 、入力 $\mathbf{u}$ に対してセンサ値はどのようになるのかを表わしている。

クォータニオンを用いて加速度、磁気センサが出力すべき値は(3)(11)より [6]

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \vec{r} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{r} + 2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\vec{r}} + g \begin{bmatrix} 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix}$$

(21)

(1)(7)より

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 02q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos\delta_m \\ 0 \\ \sin\delta_m \end{pmatrix}$$

(20)

であり、出力関数はこれを並べたものになる。



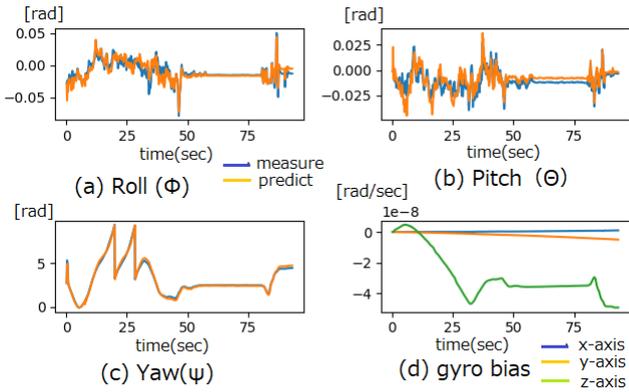


図.4 測定値と推定値の比較

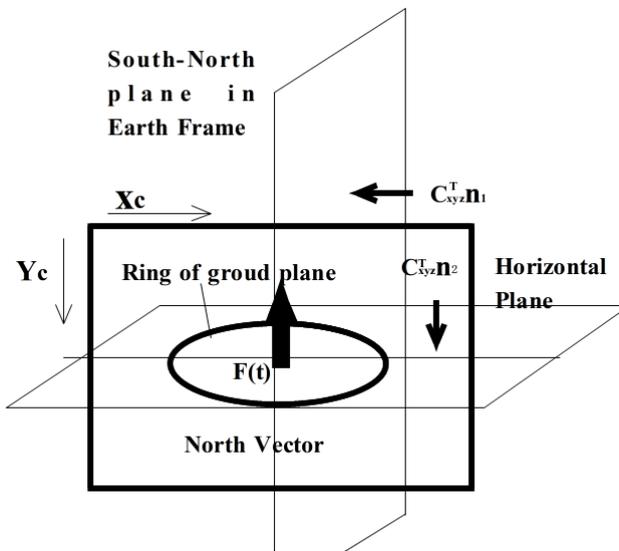


図5 スクリーン座標と南北、水平面の関係

本体座標系 $(x_b, y_b, z_b)$  に対してカメラの方向ベクトルは $(0, 0, -1)$ であるから、北向きベクトルはアースフレームで点 $(X, Y, s)$ , (ただし $s$ は定数)を通る平面と本体座標系の $x_b - y_b$ 平面との交線の向きで、画面上に描画したい点を中心とした矢印を描けばよい。また、上下向きベクトルはアースフレームの点 $(a, b, Z)$ , (ただし $a, b$ は定数)となる平面と本体座標系の $x_b - y_b$ 平面との交線の向きとなる。

点 $\vec{s}$ を通り単位ベクトル $\vec{n}$ に垂直な面のベクトル式は

$$\vec{u} = \vec{X} + t\vec{n} \quad t \text{は定数} \quad (31)$$

であるから、アースフレーム上の平面は

$$\vec{n}_1 \cdot (\vec{X} - \vec{s}_1) = 0, \quad \vec{n}_1 = (1, 0, 0) \text{ 北向きベクトル} \quad (32)$$

$$\vec{n}_2 \cdot (\vec{X} - \vec{s}_2) = 0, \quad \vec{n}_2 = (0, 0, -1) \text{ 上向きベクトル} \quad (33)$$

そして、2つの平面交線ベクトルの式は、

$$\vec{F}(t) = \frac{h_1 - h_2(\vec{n}_1, \vec{n}_2)}{1 - (\vec{n}_1, \vec{n}_2)^2} \vec{n}_1 + \frac{-h_1(\vec{n}_1, \vec{n}_2) + h_2}{1 - (\vec{n}_1, \vec{n}_2)^2} \vec{n}_2 + t(\vec{n}_1, \vec{n}_2) \quad (34)$$

$$\text{ただし、} h_1 = (\vec{n}_1, \vec{X}), \quad h_2 = (\vec{n}_2, \vec{X}) \quad (35)$$

でありこの線上に。(34)から(34)のそれぞれのベクトルは

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x & 0 & C_x \\ 0 & S_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \left\{ C_{xyz}^T \vec{X} + \begin{pmatrix} 0 \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} \right\}$$

(36)

によって、スクリーン上に射影することができる。ただし、 $S$ はカメラ行列であり画面上の大きさのスケールと位置を表す。 $y_s, z_s$ は画面内の特定の位置にベクトルを移動させるためのシフト量である。 $C_{xyz}^T$ は(2)の回転変換の逆行列を使うことができることを示している。

座標変換よりアースフレーム上のベクトルを回転変換したのち、画面の特定の位置に移動させてあとはカメラ変換により画像の特定の位置に収まるように大きさを合わせるという作業を行うが、 $S_x, S_y$ はあらかじめ決めておくとしても、 $C_x, C_y, y_s, z_s$ は未知数であるため、最終的に画面の大きさに収まるように非線形方程式を解いて求める必要がある。表示例を図6に示す。右下向き矢印が上向きベクトル、右上矢印が北向きベクトルである。円盤は水平面の方向を表している。



図6 画面方向の表示例

様々な場所でベクトルの方向と画面方向を比較した。その結果、

(1) Roll, Pitchについて90度付近の回転時に一時的に逆転するなどの課題がみられるが、おおむね妥当な方向を示している。

(2) Yaw方向については磁北とのずれはあるもののおおむね正しい方向を取得している。

(3) 周辺環境に鉄などの磁性体があるとずれが大きくなる。

## 6. 海中における計測結果

海底カメラを瀬戸内海の海底に設置してその姿勢を計測した結果を図7に示す。計測時間はおよそ8時間である。一日に2回の潮の満ち引きがあり、観測開始時は満潮であったが、8時間後には引潮になり本体が海上のフロートにより引き倒されてカメラの方向が変わったことがうかがえる。計測値によると Roll 方向に  $45^\circ$  も傾斜している。その後元の方向に戻っている

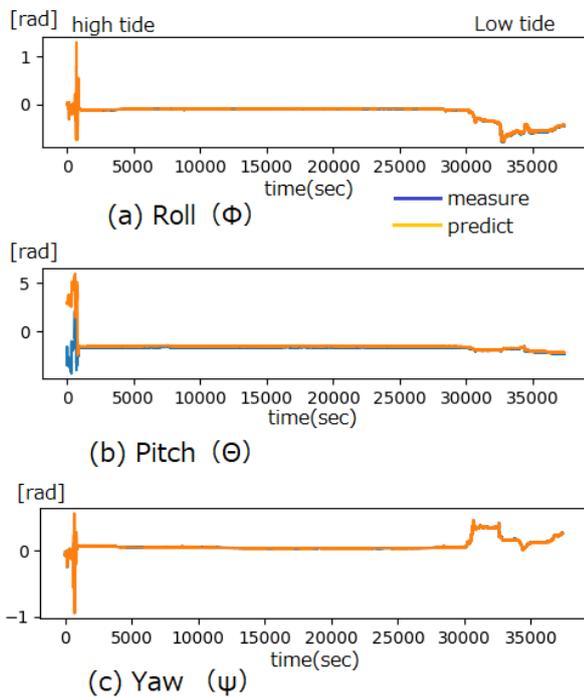


図7 長時間観測実験

## 7. まとめ

多くのデータを用いて、適切なカルマンゲインを求めることができれば、が得られれば海底カメラの姿勢計測ができる。ただし、個々のセンサの補正が重要である。

### 参考文献

- [1] 田中他：「藻場環境観測システムの開発」私立大学研究ブランディング事業成果報告. **2018**.
- [2] 田中他「海底カメラによる海中観測実験」令和元年度福山大学研究成果発表会,令和元年6月26日
- [3] R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82:35,45, 1960.
- [4] S. O.H. Madgwick: An efficient orientation filter for inertial and internal / magnetic sensor arrays, *Computer Science*,2010.
- [5] Sabatini, A.M. Kalman: Kalman-filter-based orientation determination using inertial/magnetic sensors: observability analysis and performance evaluation, *Sensors* 2011,11,pp.9182-9206.
- [6] 廣瀬 圭,近藤亜希子：総説・特集③人間工学のための計測手法 第1部：動作計測(2)－慣性センサによる動作計測－,人間工学,Vol.50.No.4('14).