9 軸モーションセンサを併用した視線計測に関する研究

A study on line-of-sight measurement in combination with a 9-axis motion sensor ○学 丹澤 優<sup>\*1</sup>, 尼崎 悠<sup>\*1</sup>, 木澤 悟<sup>\*2</sup>, 齊藤 亜由子<sup>\*1</sup> Yutaka TANZAWA<sup>\*1</sup> Yu AMAGASAKI<sup>\*1</sup>, Satoru KIZAWA<sup>\*2</sup> and Ayuko SAITO<sup>\*1</sup> <sup>\*1</sup> 工学院大学 Kogakuin University <sup>\*2</sup> 秋田工業高等専門学校 National Institute of Technology, Akita College

Humans perceive external environmental information using the five senses of sight, hearing, smell, taste, and touch. Since we perceive most of the information about the external environment based on visual information, measuring the line of sight is expected to clarify how humans relay visual information to their motor control system. However, it is not possible to evaluate the gaze position quantitatively unless the absolute coordinates of the line of sight are obtained. Therefore, in this study, we propose a new sensor fusion to estimate the absolute coordinates of the line of sight. The absolute coordinates of the line of sight were estimated by a Kalman filter using a portable 9-axis motion sensor and a gaze measurement system. We evaluated the accuracy for the absolute coordinates of the line of sight estimation in the experiment. This analytical method is anticipated for use in estimating the absolute coordinates of the line of sight in sports and healthcare applications.

Key Words : 9-axis motion sensor, Kalman filter, Line-of-sight, Pose estimation, Sensor fusion

# 1. 緒 言

人間は視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚といった5感を用いて外的環境情報を知覚している.その中でも視覚情報を元に外的環境情報の大部分を知覚するため,視線を計測することにより人間がどのように外的環境情報を知覚するのかを明らかにすることが期待できる<sup>(1)</sup>.

これまで行われてきた視線計測は、頭部が動かないことを前提条件とした実験や視線位置の座標データを必要 としない実験など、頭部姿勢を基準とした視野平面内における視線計測を行うものがほとんどであった<sup>(2),(3)</sup>. し かし、視線の絶対座標を取得しない限り、視線位置を定量的に評価することはできない. 視線の絶対座標を取得 するため、実験室内に設置された光学式モーションキャプチャ等の同期計測が行われているが<sup>(4)</sup>, 従来の光学式 モーションキャプチャとの同期計測では実験室内での計測といった制約を受けるため、計測範囲に制限を受ける ことなく、視線の絶対位置情報を得る方法が求められている.

そこで、本研究では、小型・軽量で持ち運びが容易な9軸モーションセンサを併用した視線計測を行うことで、 計測場所の制限を受けずに視線の絶対位置情報を取得するための新しいセンサ・フュージョンを提案する.

# 2. 9軸モーションセンサを用いた頭部姿勢推定

#### 2·1 姿勢推定

9軸モーションセンサの姿勢は X 軸回りの角度であるロール角( $\varphi$ ), Y 軸回りの角度であるピッチ角( $\theta$ ), Z 軸回りの角度であるヨー角( $\psi$ )を用いて表現する. 基準座標系は Z 軸方向を重力方向とした右手座標系で定義しており,各軸周りの回転は反時計回りを正方向とした. 基準座標系と頭部姿勢角度の定義を図1に示す.9軸 モーションセンサは被験者の頭部に装着し,頭部の姿勢推定においてセンサのローカル座標系を基準座標系に変

415

換して使用する.本研究においては,頭部の回転を推定するが,角度の推定機構である非線形カルマンフィルタ を構成するために3軸周りの角度を含む状態空間モデルが必要になるため,3次元空間内でのロール・ピッチ・ ヨー角について説明を行う.

ロール角とピッチ角の初期角度は、ジャイロセンサの出力からは得ることができないため、静止時に加速度センサから得られる重力加速を用いて式(1)、(2)で表すことができる<sup>(5)</sup>.

$$\varphi_A = atan 2 \frac{A_y}{A_z} \qquad (-\pi < \varphi_A < \pi) \tag{1}$$

$$\theta_A = atan 2 \frac{-A_X}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \qquad (-\pi < \theta_A < \pi)$$
<sup>(2)</sup>

ここで、 $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$ は3軸方向の加速度センサ出力であり、 $\varphi_A$ 、 $\theta_A$ は加速度センサ出力を用いて算出したロール角、ピッチ角の初期値を示す.

ヨー角の初期角度は、地磁気センサから得られる磁場を用いて算出する.室内の計測においては、磁場外乱が 地磁気センサ出力に影響を与える.そのため、実験室内の磁場をあらかじめ計測し、式(3)に示す地磁気センサ出 力と磁場の関係式を用いることにより適切な地磁気センサの感度・オフセットパラメータを決定し、磁場外乱に よる誤差を補正する.

$$M = Gm + B \tag{3}$$

ただし,

$$M = \begin{bmatrix} M_{x} \\ M_{y} \\ M_{z} \end{bmatrix}, \quad m = \begin{bmatrix} m_{x} \\ m_{y} \\ m_{z} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} G_{x} & 0 & 0 \\ 0 & G_{x} & 0 \\ 0 & 0 & G_{x} \end{bmatrix}$$

ここで,Mは地磁気センサ出力,mは磁場外乱補正後の磁場,Gは感度,Bはオフセットである.

さらに、地磁気センサはセンサが傾斜した場合、磁場を正確に検出することができなくなるため、式(4)に示す 補正式を用いて傾斜誤差を補正する.

ここで、  $^{c}m$ は傾斜誤差を補正した磁場である. 傾斜誤差補正後の磁場を用いることにより、ヨー角の初期値 $\psi_m$ は式(5)で表すことができる.



Fig.1 Definition of reference coordinates and head angle

$$\psi_m = atan 2 \frac{-c_{m_y}}{c_{m_x}} \qquad (-\pi < \psi_m < \pi) \tag{5}$$

動作中におけるロール・ピッチ・ヨー角の微分値は、ジャイロセンサ出力を式(6)に示すロール・ピッチ・ヨー 角の微分式へ適用することにより算出することが可能である.

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_t \\ \dot{\theta}_t \\ \dot{\varphi}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin\varphi_t \sec\theta_t & \cos\varphi_t \sec\theta_t \\ 0 & \cos\varphi_t & -\sin\varphi_t \\ 1 & \sin\varphi_t \tan\theta_t & \cos\varphi_t \tan\theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$
(6)

ここで、 $\dot{\varphi}_t$ 、 $\dot{\theta}_t$ 、 $\dot{\psi}_t$ 、はそれぞれロール・ピッチ・ヨー角の微分値であり、 $\varphi_t$ 、 $\theta_t$ は時刻 *t* におけるロール角、 ピッチ角、 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ は3軸周りのジャイロセンサの出力である.式(6)を式(7)へ適用することにより、動作中 の関節角度を算出することが可能である.

$$\begin{bmatrix} \psi_{t+1} \\ \theta_{t+1} \\ \varphi_{t+1} \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \dot{\psi}_t \\ \dot{\theta}_t \\ \dot{\phi}_t \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \psi_t \\ \theta_t \\ \varphi_t \end{bmatrix}$$
(7)

ここで、 $\varphi_{t+1}$ 、 $\theta_{t+1}$ 、 $\psi_{t+1}$ は時刻 t+1 におけるロール・ピッチ・ヨー角であり、 $\varphi_t$ 、 $\theta_t$ 、 $\psi_t$ は時刻 t におけるロール・ピッチ・ヨー角を示す。

## 3. 視線センサ・フュージョン

3 軸周りの頭部姿勢を考慮した視線の絶対座標を得るための第一歩として,頭部の屈曲・伸展(ロール角)の みを考慮した視線センサ・フュージョンを構築する.

## 3・1 非線形状態方程式の構築

非線形状態方程式においては、式(7)を用いて頭部姿勢を表現するとともに、式(7)におけるロール角の変化分と 視線の上下方向(Z軸方向)移動の関係式を挿入する.構築した非線形状態方程式を式(8)に示す.

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t$$

(8)

ただし,

$$x_t = \begin{bmatrix} \psi_t \\ \theta_t \\ \varphi_t \\ GZ_t \end{bmatrix},$$

$$F(x_t) = \begin{bmatrix} \psi_t + \sin\varphi_t \sec\theta_t \cdot \omega_{y,t} \cdot Ts + \cos\varphi_t \sec\theta_t \cdot \omega_{z,t} \cdot Ts \\ \theta_t + \cos\varphi_t \cdot \omega_{y,t} \cdot Ts - \sin\varphi_t \cdot \omega_{z,t} \cdot Ts \\ \varphi_t + \omega_{x,t} \cdot Ts + \sin\varphi_t \tan\theta_t \cdot \omega_{y,t} \cdot Ts + \cos\varphi_t \tan\theta_t \cdot \omega_{z,t} \cdot Ts \\ GZ_t + (\theta_t + \cos\varphi_t \cdot \omega_{y,t} \cdot Ts - \sin\varphi_t \cdot \omega_{z,t} \cdot Ts) \cdot \frac{239.5}{\theta_s} \end{bmatrix}$$

ここで、状態方程式の一行目から三行目は式(7)を用いて構成しており、Ts はサンプリング時間である.四行目は 視線の上下方向座標GZ<sub>t</sub>の時間更新を示す.θ<sub>s</sub>は実験における頭部ロール角の最大・最低角度の絶対値であり、本 研究においては 40 度としている.

# 3・2 非線形観測方程式の構築

地磁気センサ出力から得られたヨー角と,加速度センサ出力,視線計測システムから得られた視線のZ座標を 用いて非線形観測方程式を構築する.構築した非線形状態方程式を式(9)に示す.

$$y_t = H(x_t) + v_t$$

(9)

ただし,

$$y_{t} = \begin{bmatrix} \psi_{m} \\ A_{x_{i}} \\ A_{y_{i}} \\ A_{z_{i}} \\ G_{z} \end{bmatrix},$$
$$H(x_{t}) = \begin{bmatrix} \psi_{i-1,t} \\ (\ ^{\circ}R_{i})_{t}^{T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\ GZ_{t} - \frac{\theta_{t}}{\theta_{s}} \cdot 239.5 \end{bmatrix}$$

ここで、 $\psi_m$ は式(5)を用いて地磁気センサ出力から得られたヨー角であり、 $A_{x_i}, A_y, A_{z_i}$ は加速度センサ出力、 $G_z$ は 視線計測システムから得られた視野平面における上下方向の視線座標、 $v_t$ は白色雑音である.

## 3・3 非線形カルマンフィルタアルゴリズム

構築した非線形方程式,非線形観測方程式から成る拡張カルマンフィルタを解くため,状態方程式(式(8))における $F(x_t)$ ,観測方程式(式(9))における $H(x_t)$ の偏微分 $f(x_t)$ , $h(x_t)$ をそれぞれ式(10),(11)に算出する.

$$f(x_t) = \frac{\partial F(x_t)}{\partial x_t} \tag{10}$$

$$h(x_t) = \frac{\partial H(x_t)}{\partial x_t} \tag{11}$$

以上より,式(12)~(16)で表される非線形離散時間システムを用いて,予測ステップ(式(12),(13))とフィル タリングステップ(式(14)~(16))から成る拡張カルマンフィルタアルゴリズムを繰り返し計算する.

$x_{t+1}^- = F(x_t)$	(12)
$P_{t+1}^- = f_t P_t f_t^T + Q$	(13)
$K_{t+1} = P_{t+1}^{-} h_{t+1}^{T} (h_{t+1} P_{t+1}^{-} h_{t+1}^{T} + R)^{-1}$	(14)
$x_{t+1} = \bar{x_{t+1}} + K_{t+1} \left( y_{t+1} - H(\bar{x_{t+1}}) \right)$	(15)
$P_{t+1} = (I - K_{t+1}h_{t+1})P_{t+1}^{-}$	(16)

ここで、Pは誤差共分散行列、Kはカルマンゲイン、Qは非線形状態方程式におけるプロセスノイズ $w_t$ の共分散 行列、Rは非線形観測方程式における観測ノイズ $v_t$ の共分散行列である. $x_{t+1}^-$ , $P_{t+1}^-$ は時刻tまでの情報を用いて 推定した時刻t+1における状態量と誤差共分散行列であり、 $x_{t+1}$ , $P_{t+1}$ は時刻t+1までの情報を用いて推定した 時刻t+1における状態量と誤差共分散行列である.

#### 4. 検証実験

## 4・1 計測装置と被験者

視線の絶対位置情報を取得するため、視線計測システム(EMR-9;株式会社ナックイメージテクノロジー)と 9 軸モーションセンサ(SS-WS1792;株式会社スポーツセンシング)を用いて視線計測実験を行った.被験者の 視線は、図2に示す視野平面(X-Z平面)におけるピクセル座標として得る.本実験において使用した視線計測 システムの視野平面ピクセル座標は,被験者から見た水平方向をX軸,垂直方向をZ軸としており、平面中心O は(0,0),X座標の範囲は-319~319 pixel,Z座標の範囲は-239~239 pixelとしている.9軸モーションセンサは、 3 軸ジャイロセンサ・3 軸加速度センサ・3 軸地磁気センサ、無線通信モジュールを搭載しており、ノートパソコ ンに USB 接続されたデータ送受信装置を介して計測制御アプリケーション(ss-wSensor;株式会社スポーツセン シング)と通信することにより複数の9軸モーションセンサを用いた同期計測が可能である.センサの大きさは 38×53×11 mm、重量は30gであり、身体部位に直接取り付けて計測することができる.9軸モーションセンサは 被験者の頭部に取り付け、3 軸の加速度、地磁気、角速度の値を取得した.

本実験に参加した被験者は、22歳男性、身長 163cm、体重 52kg の1名である.計測実験は工学院大学にて実施した.本実験については臨床実験に関する工学院大学ヒト倫理審査委員会の承認を得るとともに、あらかじめ 被験者に十分な説明を与え、同意を得た.

#### 4·2 計測条件

実験において被験者が視線を移動させた壁面の概略図を図3に示す.被験者から1mほど離れた壁に原点(0,0) に印を付け,被験者は計測開始後,5秒間停止後に実験を開始した.被験者は視線を動動かすことなく,原点を 見続け,頭部を上下に1往復動かす動作を行った.

視線計測システムと9軸モーションセンサは同期しており,視線計測システムのサンプリング周波数は60Hz, 9軸モーションセンサのサンプリング周波数は100Hz である.

## 4·3 計測結果

実験結果を図4,図5に示す.図4はセンサ・フュージョンにより得られた頭部のロール角の変化を示しており,頭部が上方向を向くとき正の値をとり,下方向を向くとき負の値をとる.本結果は,検証実験において被験者が頭部を下方向へ回転させた後,上方向へ回転させる動作と一致している.図5の青の実線は視線計測システムから得られた視野平面上の視線のZ座標であり,赤の実線はセンサ・フュージョンにより得られた絶対座標系おける視線のZ座標の推定結果である.本結果より,視線計測システムから得られた視野平面における視線のZ



Fig.2 Pixel coordinates in the sight plane (x-z plane)



Fig.3 Schematic view of the wall



座標は頭部の姿勢変化に伴い上下方向に変動しているが、センサ・フュージョンにより得られた絶対座標系にお ける視線のZ座標は原点からほとんど動いておらず、提案したセンサ・フュージョンの有効性を示すことができ た.

# 5. 結 言

頭部のロー角の変化と視線計測システムの視野平面 Z 座標を用いたセンサ・フュージョンにより,視線の絶対 座標*GZ*を求めた.図5より,提案したセンサ・フュージョンの有効性を示すことができた.今後は,頭部の左右 方向の動きと視線計測システムの視野平面 X 座標から視線の絶対座標*GX*を求めるセンサ・フュージョンを提案 していく.

## 文 献

- (1) 照明学会, "屋内照明のガイド", 電気書院 (1980), pp.9.
- (2) 齊藤亜由子,木澤悟,小林義和,宮脇和人,"スノーボードターンにおける視線と作用力に関する研究",日本機械 学会論文集, Vol.87, No.896 (2021), DOI: 10.1299/transjsme.20-00407.
- (3) 主原愛,大島義人, "アイカメラを用いた視線解析による実験室内の危険抽出",安全工学, Vol.48, No.3 (2009), pp.148-154.
- (4) Ayuko Saito, Yuto Monma "Quantitative evaluation of visual-motor coordination while receiving a ball with both hands", Proceedings of the SICE Annual Conference 2020 (2020), FrBT19 2
- (5) Vaganay, J., Aldon, M. J. and Fournier, A., "Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1993), pp.277–282.