

# センサフュージョンを用いた頭部運動計測法

江村 暁\* 館 暲\*

## Sensor Fusion based Measurement of Human Head Motion

Satoru EMURA Susumu TACHI

In the field of tele-existence and virtual reality, unconstrained measurement of human head motion is essential for HMDs (Head Mounted Display) to be interactive. Polhemus sensors developed for that purpose have deficiencies of low sampling rate and long latency. This paper proposes a new method which raises the sampling rate and cancels the latency through sensor-fusion of polhemus sensor and gyro sensor information. Validity of the method is confirmed by off-line computation of real data.

**Key Words :** Virtual reality, Tele-existence, Human motion measurement, Sensor fusion, Kalman filter

### 1. はじめに

トレイグジスタンスでは、人間の運動や力を実時間で計測し、その内部状態を推定する。その内部状態がロボットに伝達され、直接ロボットの運動制御システムをコントロールし、人の動きを忠実に再現してロボットの人工の目、首、手足などを制御する。その時、ロボットの人工の感覚器からの情報は、作業に適した高度の臨場感をもって、人間の感覚器に提示される。

人間の視覚への情報提示には HMD (Head Mounted Display) が使われるが、それを有効に活用するためには人間の頭部の運動、すなわち頭部の空間内の位置と姿勢角の6自由度を精度よく実時間で推定する必要がある。この計測には大別して、リンク機構をもちいる接触型の方式<sup>1)</sup>と、磁気センサをもちいる非接触型の方式がある。リンク機構を用いる方法は、高サンプリング周波数(～300 Hz)で高精度な計測が可能である。一方、磁気センサは非接触のメリットがあるが低サンプリング周波数(～60 Hz)で無視できない時間遅れ(約100 ms)があり実用上の障害となっている。

並進運動については、Friedmannら<sup>2)</sup>によりカルマンフィルタをもちいた予測法が示されているが、回転運動

については扱われていない。廣瀬ら<sup>3)</sup>は、角度の1自由度について3時点でのデータによる線形の予測系を用いて、この遅れをキャンセルする方法を提案している。しかし剛体の姿勢角は3自由度あり、そのオイラー角表現に対して定常線形フィルタを適用できず、一般的な問題の解決には至らなかった。

本研究では、剛体の姿勢角を、ZYX-オイラー角で表現したときの予測式の1次近似を求め、拡張カルマンフィルタを構成しセンサフュージョンにより予測推定する方法を提案する。観測値として高速だがドリフトのため精度の悪いジャイロセンサと低速ではあるが比較的精度のよい磁気センサをもちい、センサフュージョン<sup>4)</sup>を行うことで、頭部の運動、特にその姿勢角を精度良く高サンプリング周波数で計測・推定できる。種々の方式による実験結果を比較し、本方式の有効性を実証する。

### 2. センサフュージョンをもちいる計測法

多数の異種類のセンサからの信号を処理し、みかけ上1つの性能の向上したセンサを実現することを、ここではセンサフュージョンと呼ぶ。著者らは、カルマンフィルタを利用して、このセンサフュージョンの実現を図っている。具体的には以下の方法を提案する。

時刻  $t=n$  での頭部の姿勢角を ZYX オイラー角  $(\gamma_n \beta_n \alpha_n)$  で、表わし、物体座標系(頭部に固定した座

原稿受付 1993年2月15日

\* 東京大学先端科学技術研究センター

標系)の各軸回りの角速度を  $\omega_n = (z_n y_n x_n)$  で表わすと、状態ベクトル  $r_n$  は  $(r_n \beta_n \alpha_n | z_n y_n x_n)$  となる。ジャイロセンサのサンプリング間隔を  $\delta t$ 、姿勢角を計測する磁気センサの時間遅れを  $d$  とする。

以下の式では  $y_n$  を観測ベクトル、 $r_{n/n}$  は  $r_n$  の推定値、 $r_{n+1/n}$  は予測値、 $P_{n/n}$  は推定誤差の共分散行列とする。また  $w, v$  は、平均値 0 の白色ノイズである。

物体座標系での角速度からオイラー角の変化分を求めするには以下の変換行列  $F'$  をもちいる。

$$(d\gamma \quad d\beta \quad d\alpha)^T = \delta t F' (x \quad y \quad z)^T$$

$$F' = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \cos \beta & \cos \beta & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \tan \beta & \tan \alpha \tan \beta & 1 \end{pmatrix}$$

これにより以下の式が成立する。

$$r(t+\delta t) \cong r(t) + \left( \frac{\delta t F'(\alpha, \beta, \gamma) \omega}{0} \right)$$

以下  $F = \begin{pmatrix} I & \delta t F' \\ 0 & I \end{pmatrix}$  とおく。

方法 I.

磁気センサのみの計測に対応する観測行列を  $H_p$ 、ジャイロセンサのみの計測に対応する観測行列を  $H_g$  とする。磁気センサの時間遅れを考慮して

$$H_p = (I - dF')$$

$$H_g = (0|I)$$

であり、状態方程式は (1)、観測方程式は (2)(3) となる。

$$r_{n+1} = Fr_n + Gw \tag{1}$$

$$y_{pn} = H_p r_n + v \tag{2}$$

$$y_{gn} = H_g r_n + v \tag{3}$$

磁気センサからのデータが利用できるタイミングでは式 (4)~(8) をもちいて、角速度センサからのデータが利用できるときには式 (4)(5)(9)~(11) をもちいてカルマンフィルタを構成し、センサフュージョンを行う。

$$r_{n+1/n} = Fr_{n/n} \tag{4}$$

$$P_{n+1/n} = FP_{n/n}F^T + GQG^T \tag{5}$$

$$r_n/n = r_{n/n-1} + K_p[y_{pn} - H_p r_{n/n-1}] \tag{6}$$

$$P_n/n = P_{n/n-1} - K_p H_p P_{n/n-1} \tag{7}$$

$$K_p = P_{n/n-1} H_p^T [H_p P_{n/n-1} H_p^T + R]^{-1} \tag{8}$$

$$r_n/n = r_{n/n-1} + K_g[y_{gn} - H_g r_{n/n-1}] \tag{9}$$

$$K_g = P_{n/n-1} H_g^T [H_g P_{n/n-1} H_g^T + R]^{-1} \tag{10}$$

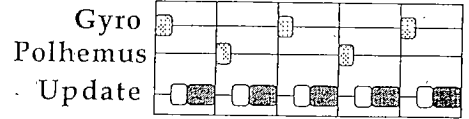
$$P_n/n = P_{n/n-1} - K_g H_g P_{n/n-1} \tag{11}$$

方法 II.

磁気センサとジャイロセンサ両方で同時に計測することに対応する観測行列を  $H$  とする。

$$H = \begin{pmatrix} I & -dF' \\ 0 & I \end{pmatrix}$$

Method I



Method II

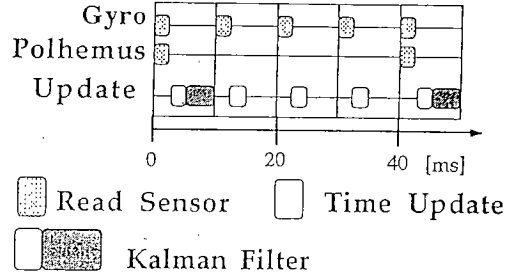


Fig. 1 Timing Chart of Method I, II

となり、状態方程式は (1) 観測方程式は、(12) で与えられる。

$$y_n = Hr_n + v \tag{12}$$

$$r_{n+1/n} = Fr_{n/n} \tag{13}$$

$$P_{n+1/n} = FP_{n/n}F^T + GQG^T \tag{14}$$

$$r_n/n = r_{n/n-1} + K[y_n - Hr_{n/n-1}] \tag{15}$$

$$P_n/n = P_{n/n-1} - KHP_{n/n-1} \tag{16}$$

$$K = P_{n/n-1}H^T[HP_{n/n-1}H^T + R]^{-1} \tag{17}$$

式 (13)~(17) をもちいてカルマンフィルタを構成し、センサフュージョンを実現する。

ジャイロセンサからのデータのみ利用できるときは、直前の 3 時点での角速度平均 ( $\bar{z} \bar{y} \bar{x}$ ) を角速度  $\omega_{n/n}$  として、

$$r_{n+1/n+1} = Fn/n$$

で時間更新を行う。

方法 I のアルゴリズムでは各時点での異なる種類の観測値から最尤内部状態を推定する。一方、方法 II のアル

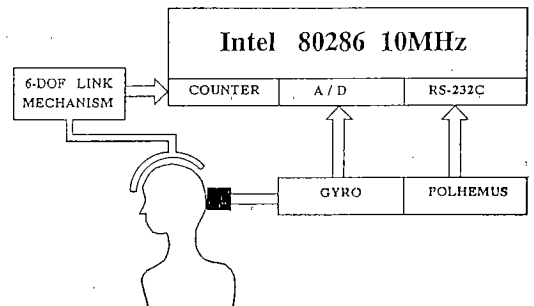


Fig. 2 Configuration of Experiment System

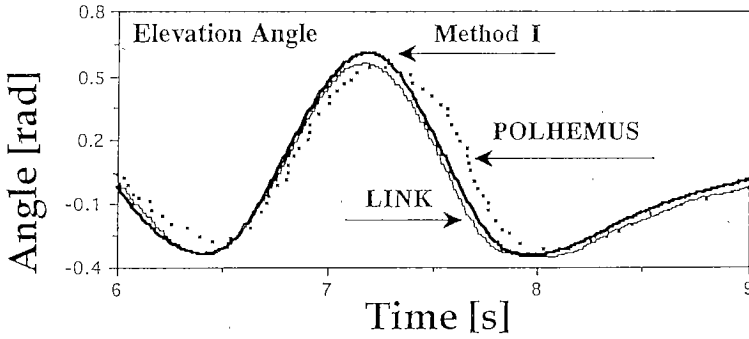


Fig. 3 Comparison of Link Data (control), POLHEMUS Data and Fusion Method I Proposed

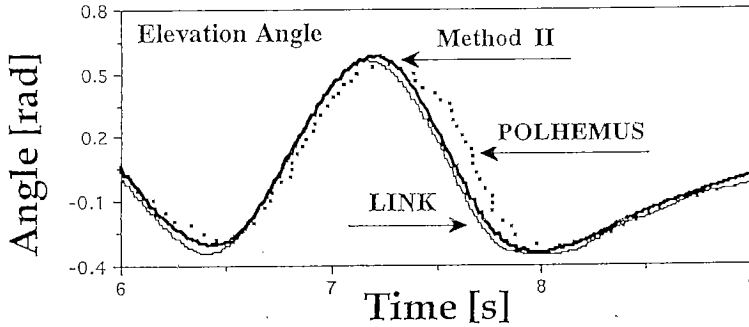


Fig. 4 Comparison of Link Data (control), POLHEMUS Data and Fusion Method II Proposed

ゴリズムでは、計算量の多いカルマンフィルタの適用レートを下げて推定レートの向上をはかっている。Fig.1 にタイミングチャートを示す。

### 3. 実験

#### 3.1 実験装置

頭部の姿勢角を計測する磁気センサとしてPOLHEMUSセンサ (McDonnell Douglas 製) を、ジャイロセンサとして村田製作所のジャイロスターをもちいた。リンク式センサ<sup>3)</sup>からの値は遅れがなく高精度なので、これを基準信号とみなし、ジャイロセンサとPOLHEMUSセンサからのデータが本論文で提案する信号処理によりどの程度基準信号に近づくかを実験的に調べる。

POLHEMUSセンサの計測値はRS232C(19200bps)より50Hzで、ジャイロセンサの計測値はAD変換され100Hzで、コンピュータ(80286 10MHz)に読み込まれる。また性能比較のために、リンク式センサ<sup>4)</sup>の計測値が、カウンターボードを通じて50Hzでコンピュータに読み込まれる。10[s]間のデータを取得し、オフラインで処理した。

POLHEMUSセンサは時々データ落ちする。その場合

は1クロック前のデータを代わりにもちいる。なおカルマンフィルタの計算には、数値的に安定なUD分解<sup>5)</sup>をもちいている。Fig.2に実験システムの構成を示す。

#### 3.2 ノイズパラメータの決定

プロセスノイズは、駆動行列により定まる。3×3の単位行列をIとすると、駆動行列は

$$G = \begin{pmatrix} w_1 I & 0 \\ 0 & w_2 I \end{pmatrix}$$

となる。 $w_1, w_2$ は、リンク式センサでの計測値を $\delta t$ をサンプリング間隔として予測モデルに当てはめたときの残差の標準偏差で求まる。 $w_1=0.01[\text{rad}]$ 、 $w_2=0.15[\text{rad}]$ をもちいた。

角速度の観測ノイズ $v_2$ について、ジャイロ仕様等を考慮して、最大角速度 $90[\text{deg/s}]$ の10.0% $\approx 0.15[\text{rad/s}]$ とした。角度の観測ノイズ $v_1$ について、POLHEMUSセンサの誤差は $0.8[\text{deg}] \approx 0.013[\text{rad}]$ 程度で、遅れ分 $d=0.1[\text{s}]$ 先を予測していることを考慮して、角度の観測ノイズを計算する。時間 $d$ 間に頭部が $r \rightarrow r' = r + dF'\omega + \delta r$ に動くとして、 $r^* r'^*$ を、 $rr'$ の観測値、 $\omega^*$ を角速度 $\omega$ の観測値とする。 $r^* r'^* = rr' + dF'\omega^*$ である。 $r^* - r, \omega^* - \omega, \delta r$ の独立を仮定して、 $r^* r'^* - rr'$ の標準偏

差を計算する。これが  $v_1$  となる。  $v_1$  の分散を  $\langle r'^* - r' | r'^* - r' \rangle$  で表わすと

$$\langle r'^* - r' | r'^* - r' \rangle = \langle r^* - r | r^* - r \rangle + \langle \delta x | \delta x \rangle + \delta t^2 \langle \omega^* - \omega | F'^T F' | \omega^* - \omega \rangle$$

$|F'| = 1/\cos(\beta) \sim 1$  より、  $F'^T F' \sim I$  と近似する。

$$\langle r'^* - r' | r'^* - r' \rangle \cong 0.013^2 I$$

$$\langle \delta x | \delta x \rangle \cong \sqrt{\frac{d}{\delta t}} w_1^2 I$$

$$\langle \omega^* - \omega | F'^T F' | \omega^* - \omega \rangle \sim \langle \omega^* - \omega | \omega^* - \omega \rangle \sim (w_2^2 + v_2^2) I$$

これより、  $v_1 \sim 0.0268[\text{rad}]$  と求まる。

### 3.3 実験結果

**Figs. 3, 4** に、方法 I, II による結果を示す。また 40 [ms] 分のデータの処理時間、及び基準信号との平均自乗誤差の平方根 (rms) を **Table 1** に示す。比較のためジャイロセンサのみからの推定、POLHEMUS センサのみからのカルマンフィルタ推定も計算した。処理時間は、オフライン処理にコンピュータ (80386+80387.33 MHz) をもちいた場合である。

本方式 I, II のようにセンサフュージョンをもちいることで、より良い推定値が得られる。方法 I と II を比べると、方法 II は処理時間が I の半分にもかかわらず、精度の点で I と殆ど差がない。すなわち方法 II をもちいるならば、RS-232C の通信時間等を考慮しても、オンラインでセンサフュージョンを行うことができる。

## 4. ま と め

頭部の回転運動をカルマンフィルタをもちいて予測する方式を示した。POLHEMUS センサの遅れを解消し、

**Table 1** Performance of each Method (Azm, Elv stand for Azimuth, Elevation.)

	rms ( $\times 10^{-2}[\text{rad}]$ )			Time [ms]
	Azm	Elv	Roll	
POLHEMUS	7.12	9.22	9.00	—
Gyro	47.1	16.3	19.5	—
Kalman	8.16	12.9	16.8	19.6
Method I	6.00	3.52	4.30	39.2
Method II	5.38	3.72	4.26	9.6

推定レートを向上させるために、POLHEMUS センサとジャイロセンサを融合する予測法 I, II を提案した。実データについてオフライン推定をおこない、高精度なリンク式センサを基準信号とし他の方法と比較した結果、本方式による推定精度の向上を確認した。また、提案した方法 II が十分実時間オンライン処理可能であることを示した。

### 参 考 文 献

- 1) 館, 荒井: テレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, 7, 4, pp.314-326, 1989.
- 2) M. Friedmann, T. Starner and A. Pentland: Synchronization in Virtual Realities, PRESENCE, 1, 1, pp. 139-144, 1992.
- 3) 廣瀬, 木島, 佐藤, 石井: シースルー型HMDを用いた仮想空間による実空間の修飾の研究, 第6回ヒューマン・インターフェイス・シンポジウム論文集, pp.1-8, 1990.
- 4) 石川正俊: センサフュージョンの課題, 日本ロボット学会誌, 8, 6, pp.95-102, 1990.
- 5) S. Tachi, H. Aral and T. Maeda: Tele-Existence Master Slave System For Remote Manipulation, IROS '90, pp.343-348, 1990.
- 6) 片山: 応用カルマンフィルタ, pp.133-154, 朝倉書店, 1991.