拡張カルマンフィルタを用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測

太田 憲*・小林 一 敏**

Measurement of Angular Velocity and Angular Acceleration in Sports Using Extended Kalman Filter

Ken OHTA* and Kazutoshi KOBAYASHI**

The measurement of angular velocity and angular acceleration in sports biomechanics is usually based on cinematography. But this method dose not have good accuracy. Authors previously developed angular velocity and angular acceleration measurement system, which used 12 accelerometers. But this system is tedious, beacause of mounting the large number of accelerometers.

This paper proposes a measurement system using 9 accelerometers in sports, which accurately measures the rotation motion. This measurement system uses the extended Kalman filter. The accuracy of this method was examined by simulation and experiments.

Key Words: measurement in sport, extended Kalman filter, accelerometers, angular velocity, angular acceleration

1. はじめに

スポーツのような運動の計測では、ビデオや 16 mm などの画像を用いた計測方法を採用することが多く^{1),2)}, 画像による計測方法はスポーツ・バイオメカニクスで用いられている計測方法の一つである。

画像を用いて角速度・角加速度を算出する場合、微分演算に伴うノイズ増大が問題となる。たとえば身体をリンク機構とみなして逆動力学問題に適用し関節モーメントを推定する場合には、ノイズが大きすぎて使用に耐えられない場合が多い。また角加速度センサとして一般的なセンサもなく、角速度センサとしてはジャイロスコプが存在するが、一般にはその計測範囲は低速な運動に限られ、スポーツのような高速な運動の計測には適していない。

そこで筆者らはこれまでに加速度計を用いた運動計測

方法を開発し³⁾, さらにカルマンフィルタを導入し, より高精度に回転運動を計測する方法を提案した⁴⁾. このとき観測信号には加速度計によって得られる角速度と角加速度を用いたが, 使用する加速度計が 12 個と多い。

そこで本論文では, 9 個の加速度計によって得られる角速度と遠心加速度と角加速度を観測信号として用いる新たな計測方法を提案し, 実験とシミュレーションにより本方式の有効性を検討する。なお本論文では状態方程式は線形システムであるが, 観測方程式が非線形となるため, 拡張カルマンフィルタを導入する。

この方法により, 計測システムを小型化し, 実験時の被験者への負担を減らすなどの効果や, 様々な応用が期待できる。

2. 加速度計の配置と出力

2.1 加速度計を用いた計測方法の基本原理解

まず物体に生ずる加速度を考える。Fig. 1 に示すように, 静止基準座標系 ΣXYZ に対して物体に固定された運動座標系 Σxyz の原点を O' とする。運動座標系 Σxyz が運動する場合, 物体の点 P に生ずる加速度 A_p はその並進加速度, 重力加速度, 遠心加速度, そして角加速度である。したがって A_p は以下ようになる。

* 筑波大学体育科学研究科 つくば市天王台 1-1-1

** 中京大学体育学部 豊田市貝津町床立 101

* Doctoral Program of Health and Sport Sciences,
University of Tsukuba, Tsukuba

** Faculty of Physical Education, Chukyo University,
Toyota

(Received July 4, 1994)

(Revised January 9, 1995)

Fig. 1 Coordinate systems and six accelerometer configurations for measurement of angular velocity

$$A_P(t) = \ddot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{g} + \boldsymbol{\omega}(t) \times (\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{r}) + \dot{\boldsymbol{\omega}}(t) \times \mathbf{r} \quad (1)$$

ここで静止基準座標系 ΣXYZ からみた運動座標系 Σxyz の原点 O' の位置ベクトルを $\mathbf{R}$ とし、重力加速度を $\mathbf{g}$ 、運動座標系 Σxyz からみた点 P の位置ベクトルを $\mathbf{r}$ 、剛体の角速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}$ としている。

いま2個の加速度計を運動座標系の原点 O' に向かって同一直線上に平行に装着すると、2個の加速度計には等しい重力加速度と並進加速度が検出される。したがってこの2個の加速度信号の差を取れば遠心加速度項と角加速度項の回転運動成分だけが残る。

2.2 角速度計測

このことを利用して筆者らはこれまでに、加速度計を用いて3次元角速度を計測する方法を開発した^{3),4)}。本論文でもこの方法を利用して得られる角速度信号を、後述の拡張カルマンフィルタの観測信号として用いる。すなわち Fig. 1 に示すように6個の加速度計 ($A_{x1}, A_{x2}, A_{y1}, A_{y2}, A_{z1}, A_{z2}$) を、運動座標系 Σxyz の原点 O' に向かうように装着する。各 xyz 軸方向にはそれぞれペアの加速度計が固定され、その間隔は全て d である。また原点 O' から加速度計 (A_{x2}, A_{y2}, A_{z2}) までの距離を (r_x, r_y, r_z) とすると各加速度計に検出される加速度信号は、(1)式から

$$\begin{aligned} A_{x1}(t) &= \ddot{R}_x(t) - g_x(t) + (r_x + d)(\omega_y(t)^2 + \omega_z(t)^2) \\ A_{x2}(t) &= \ddot{R}_x(t) - g_x(t) + r_x(\omega_y(t)^2 + \omega_z(t)^2) \\ A_{y1}(t) &= \ddot{R}_y(t) - g_y(t) + (r_y + d)(\omega_x(t)^2 + \omega_z(t)^2) \\ A_{y2}(t) &= \ddot{R}_y(t) - g_y(t) + r_y(\omega_x(t)^2 + \omega_z(t)^2) \\ A_{z1}(t) &= \ddot{R}_z(t) - g_z(t) + (r_z + d)(\omega_x(t)^2 + \omega_y(t)^2) \\ A_{z2}(t) &= \ddot{R}_z(t) - g_z(t) + r_z(\omega_x(t)^2 + \omega_y(t)^2) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ただし、

Fig. 2 Six accelerometer configurations

$$\ddot{\mathbf{R}}(t) = \begin{pmatrix} \ddot{R}_x(t) \\ \ddot{R}_y(t) \\ \ddot{R}_z(t) \end{pmatrix}, \mathbf{g}(t) = \begin{pmatrix} g_x(t) \\ g_y(t) \\ g_z(t) \end{pmatrix}, \boldsymbol{\omega}(t) = \begin{pmatrix} \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \\ \omega_z(t) \end{pmatrix} \quad (3)$$

のように、 $\ddot{\mathbf{R}}, \mathbf{g}, \boldsymbol{\omega}$ の各ベクトルは xyz 直交座標成分に分解される。

以上から角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ の xyz 成分は、

$$\begin{aligned} \omega_x(t) &= \sqrt{\frac{(A_{y2}(t) - A_{y1}(t)) + (A_{z2}(t) - A_{z1}(t)) - (A_{x2}(t) - A_{x1}(t))}{2d}} \\ \omega_y(t) &= \sqrt{\frac{(A_{x2}(t) - A_{x1}(t)) + (A_{z2}(t) - A_{z1}(t)) - (A_{y2}(t) - A_{y1}(t))}{2d}} \\ \omega_z(t) &= \sqrt{\frac{(A_{x2}(t) - A_{x1}(t)) + (A_{y2}(t) - A_{y1}(t)) - (A_{z2}(t) - A_{z1}(t))}{2d}} \end{aligned} \quad (4)$$

となる^{3),4)}。ところが(4)式を用いた角速度計測方法は、加速度信号の平方根をとっているため、加速度信号に含まれる加速度計の雑音が低角速度になるにつれ増幅され、符号も得られない。そこで次章では、この問題を拡張カルマンフィルタを用いて解決していく。

2.3 遠心加速度と角加速度計測

ここで扱う計測方法は前節同様、二つの加速度信号の差を用いる。前節では加速度計を各座標軸方向に装着していたが、Fig. 2 のように加速度計 (A_{x3}, A_{y3}, A_{z3}) を各座標軸の軸方向に対して直交するように配置し、原点には3軸の加速度計 (A_{x0}, A_{y0}, A_{z0}) を配置し、計6個装着する。原点 O' から加速度計 (A_{x3}, A_{y3}, A_{z3}) までの距離を全て l とすると、(1)式より各加速度計に検出される加速度信号は

$$\begin{aligned} A_{x3}(t) &= \ddot{R}_y(t) - g_y(t) - l(\omega_x(t)\omega_y(t) + \dot{\omega}_x(t)) \\ A_{y0}(t) &= \ddot{R}_y(t) - g_y(t) \\ A_{y3}(t) &= \ddot{R}_z(t) - g_z(t) - l(\omega_y(t)\omega_z(t) + \dot{\omega}_y(t)) \end{aligned}$$

Fig. 3 Nine accelerometer configurations

$$A_{z0}(t) = \ddot{R}_z(t) - g_z(t) \quad (5)$$

$$A_{z3}(t) = \ddot{R}_x(t) - g_x(t) - l(\omega_z(t)\omega_x(t) + \dot{\omega}_y(t))$$

$$A_{x0}(t) = \ddot{R}_x(t) - g_x(t)$$

となる。そこで平行に配置された2個の加速度計の信号の差をとり重力加速度と並進加速度をキャンセルすると、

$$\frac{A_{z0}(t) - A_{y3}(t)}{l} = \omega_y(t)\omega_z(t) + \dot{\omega}_x(t)$$

$$\frac{A_{x0}(t) - A_{z3}(t)}{l} = \omega_z(t)\omega_x(t) + \dot{\omega}_y(t) \quad (6)$$

$$\frac{A_{y0}(t) - A_{x3}(t)}{l} = \omega_x(t)\omega_y(t) + \dot{\omega}_z(t)$$

が得られる。次章ではこの(6)式から得られる遠心加速度と角加速度の和の信号も観測信号として用いていく。

また前節の角速度計測方法では加速度計は6個必要であり、本節で使用する加速度計の数も6個であるが、原点O'の加速度計(A_{x0}, A_{y0}, A_{z0})の信号は、前節で使用した加速度計(A_{x1}, A_{x2}, A_{y1}, A_{y2}, A_{z1}, A_{z2})の信号から推定することができる。すなわち原点O'から加速度計(A_{x1}, A_{y1}, A_{z1})までの距離を全てsとすると

$$A_{x0}(t) = A_{x1}(t) - \frac{s}{d}(A_{x2}(t) - A_{x1}(t))$$

$$A_{y0}(t) = A_{y1}(t) - \frac{s}{d}(A_{y2}(t) - A_{y1}(t)) \quad (7)$$

$$A_{z0}(t) = A_{z1}(t) - \frac{s}{d}(A_{z2}(t) - A_{z1}(t))$$

である。したがって(4)式の角速度と(6)式の遠心加速度と角加速度を得るためには、Fig. 3のように計9個の加速度計が必要となる。

3. 拡張カルマンフィルタを用いた角速度・角加速度計測方法

2.2節で取り上げた角速度計測の特徴は低角速度で誤差が増大すること、符号が得られないことなどが問題であった。そこでここでは2.3節で扱った遠心加速度と角

加速度も拡張カルマンフィルタの観測信号としてあわせて使用し、これらの問題を解決しながら、より高精度の角速度・角加速度の推定を行う。

時刻 $t=n$ での加速度計を装着した物体の角速度を $(\omega_x(n), \omega_y(n), \omega_z(n))$ とし、角加速度を $(\dot{\omega}_x(n), \dot{\omega}_y(n), \dot{\omega}_z(n))$ としたときの状態ベクトル $\mathbf{x}_n$ を、

$$\mathbf{x}_n = (\omega_x(n) \ \omega_y(n) \ \omega_z(n) \ \dot{\omega}_x(n) \ \dot{\omega}_y(n) \ \dot{\omega}_z(n))^T \quad (8)$$

とした。このときの状態方程式は、

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_n + \mathbf{w}_n \quad (9)$$

となる。ここで $\mathbf{w}_n$ はプロセスノイズ・ベクトルで、

$$\mathbf{w}_n = (w_1(n) \ w_2(n) \ w_3(n) \ w_4(n) \ w_5(n) \ w_6(n))^T \quad (10)$$

である。状態遷移行列 $\mathbf{F}$ は

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} & \delta t & & \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & & \delta t & \\ & & & \delta t \\ 0 & & & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

で表わされ、 δt は信号のサンプリング間隔であり、 $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ は3次の単位行列である。

一方、観測ベクトルを $\mathbf{y}_n$ としたときの観測方程式は

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n) + \mathbf{v}_n \quad (12)$$

で表わされる。ここで $\mathbf{v}_n$ は観測ノイズ・ベクトルで、

$$\mathbf{v}_n = (v_1(n) \ v_2(n) \ v_3(n) \ v_4(n) \ v_5(n) \ v_6(n))^T \quad (13)$$

となる。ノイズベクトル $\mathbf{w}_n$ と $\mathbf{v}_n$ は共に平均値0の白色ガウスノイズを仮定する。またその共分散行列 $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ はそれぞれ

$$E[\mathbf{w}_i \ \mathbf{w}_j^T] = \mathbf{Q}_i \delta_{ij}$$

$$E[\mathbf{v}_i \ \mathbf{v}_j^T] = \mathbf{R}_i \delta_{ij} \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (14)$$

とする。ここで δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

なおこれらのノイズベクトルの詳細については、第4章で述べる。ところで(12)式の $\mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n)$ は

$$\mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n) = \begin{bmatrix} \omega_x(n) \\ \omega_y(n) \\ \omega_z(n) \\ \omega_y(n)\omega_z(n) + \dot{\omega}_x(n) \\ \omega_z(n)\omega_x(n) + \dot{\omega}_y(n) \\ \omega_x(n)\omega_y(n) + \dot{\omega}_z(n) \end{bmatrix} \quad (15)$$

で表わされ、(4)、(6)式から得られる加速度信号を観測信号として用いる。一般に $\mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n)$ がこのような非線形関数である場合に、非線形システムの状態推定問題に対する最適解を求めることは困難である。そこで

$$\mathbf{H}_n \mathbf{x}_n = \mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n) \quad (16)$$

とおくと、(12)式は

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n \quad (17)$$

となる。ただしここで $\mathbf{H}_n$ は

$$H_n = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & \omega_y(n) \\ \omega_z(n) & 0 & 0 \\ 0 & \omega_x(n) & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

とした。 H_n は x_n の関数であるが、角速度と角加速度の推定に拡張カルマンフィルタ⁵⁾を利用し、以下のようなアルゴリズムを得ることができる。

$$\begin{aligned} x_{n/n} &= x_{n/n-1} + K_n [y_n - H_n(x_{n/n-1})] \\ P_{n/n} &= P_{n/n-1} - K_n H_n(x_{n/n-1}) P_{n/n-1} \\ K_n &= P_{n/n-1} H_n(x_{n/n-1})^T [H_n(x_{n/n-1}) \\ &\quad P_{n/n-1} H_n(x_{n/n-1})^T + R]^{-1} \\ x_{n/n-1} &= F x_{n-1/n-1} \\ P_{n/n-1} &= F P_{n-1/n-1} F^T + Q \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 $x_{n/n}$ は x_n の推定値、 $P_{n/n}$ は推定誤差の共分散行列、 K_n はカルマンゲインである。

なお観測信号である角速度は(4)式によって得られる信号を用いるが、観測方程式で用いる角速度信号の符号が不明であるので、以前提案したカルマンフィルタを用いた場合と同様な方法⁴⁾を用いる。すなわち(19)式の $x_{n/n-1} = F x_{n-1/n-1}$ によって得られる測定の前推定値 $x_{n/n-1}$ の符号を利用し、 y_n の符号としている。

4. 実験による精度の検討

本論文で用いた計測システムの有効性の検討を、Fig. 4に示すような振り子に運動を行わせ、振り子に固定した加速度計とポテンシオメータの出力を比較することによって行う。また筆者らが以前に提案した12個の加速度計から得られる加速度信号を観測信号とする、カルマンフィルタを用いて計測する方法⁴⁾とも比較し、本方式の

Fig. 4 Illustration of the three degrees of freedom mechanical pendulum

9個の加速度計による拡張カルマンフィルタを用いる方法の性能を検討する。

4.1 実験システム

Fig. 4のように直交3軸方向にのびた固定金具にFig. 3に示した配置で加速度計を9個装着する。またカルマンフィルタを用いた方法との比較のため、3個の加速度計を加え、計12個の加速度計を装着し、さらにその固定金具を振り子の先端に装着する。実験に用いる加速度計は単軸センサのストレインゲージ型加速度計である。加速度計の配置は、原点O'から最も離れた加速度計でその距離が約10cmである。

振り子は三つの自由度をもつ回転機構に連動させ、各回転角は各軸に固定されたポテンシオメータからロール角・ピッチ角・ヨー角として検出される。これらのポテンシオメータの出力から求められた振り子の各回転角より角速度と角加速度を算出し、拡張カルマンフィルタを用いて計測したそれらと比較した。

なお一般の角速度計測用ジャイロの測定範囲は低速な運動に限られており、スポーツのような高速な運動ではこの測定範囲をしばしば越える。そこで本論文ではポテンシオメータの信号を微分することにより角速度および角加速度を算出した。ポテンシオメータの信号の平滑化ならびに微分には平滑化スプライン⁶⁾を用いた。

加速度計から得られた信号はストレイン・アンプで増幅した後、ポテンシオメータのデータと合せてA/D変換器で200Hzでサンプリングした。

4.2 ノイズパラメータと初期値

Fig. 5に観測信号として用いる(a)角速度信号と、(b)遠心加速度と角加速度の和の信号を、ポテンシオメータから得られたそれぞれの値と比較示す。ポテンシオメータから計測した角速度との平均自乗誤差の平方根(rms)は0.60(rad/sec)であった。また遠心加速度と角加速度の和の信号のrmsは4.0(1/sec²)であった。ただし角速度のrmsは角速度の大きさによって変化するので注意が必要である。

本方式の2個の加速度信号の差をとり回転運動成分以外をキャンセルする方法は、固定金具を含めたセンサに生じる微小振動なども取り除く役割も果たしている。

なお(4)式から得られる角速度は理想的な状態では必ず正の値をとる。しかし加速度信号にはノイズが含まれ、角速度の大きさがゼロに近づくほどノイズの分散は大きい。またこのノイズのため(4)式の各平方根演算によって角速度の値が虚数となる場合もある。しかし観測値のノイズは平均値0のノイズを仮定しているため、(4)式による解が虚数となる場合は、虚数ではなく(4)式の各角速度成分の符号を負として算出した。

(a) Angular velocity

(b) Centrifugal acceleration and angular acceleration

Fig. 5 Observation signal compared with potentiometers

このように観測信号としてこの角速度信号を利用する場合、低角速度になるにつれ誤差が大きいため、低角速度になるにつれ角速度の観測ノイズの分散値を大きくする必要がある。そこでノイズパラメータ $v_1(n)$, $v_2(n)$, $v_3(n)$ の大きさの決定にあたっては、カルマンフィルタを用いた場合と同様な方法⁴⁾を用いた。すなわち、角速度信号に含まれるノイズの標準偏差は角速度算出式(4)から

$$\sqrt{\frac{2d\omega^2 + 0.025}{2d}} - |\omega| \quad (20)$$

を採用する。ここで ω は各角速度の大きさを、推定された直前の値を用いる。また d はペアの加速度計間の距離である。このように観測ノイズの大きさは変化するが、平均値は0でガウス性も満たすものと仮定する。また、加速度信号の不規則雑音の標準偏差は今回用いたストレインゲージ型加速度計でその容量の約0.05%である。したがって実験で用いた容量5Gの加速度計で約0.025(m/sec²)の標準偏差の雑音が含まれている。なお本研究では加速度信号の差の信号を用いているが、その差の信号に含まれる雑音も、ほぼ同様な標準偏差値を取っていることが実験により確認されているので、この値を(20)式に用いる。

(20)式から角速度信号の精度は加速度計間の距離や、加速度計のS/N比などに影響されていることがわかる。これらの影響については次章で検討する。

一方遠心加速度と角加速度の和の信号の観測ノイズの

標準偏差は、(6)式から0.025/l(1/sec²)を採用した。

以上より各観測ノイズの標準偏差を

$$\begin{aligned} \sigma_{v1} &= \sqrt{\frac{2d\omega_x^2 + 0.025}{2d}} - |\omega_x| \\ \sigma_{v2} &= \sqrt{\frac{2d\omega_y^2 + 0.025}{2d}} - |\omega_y| \\ \sigma_{v3} &= \sqrt{\frac{2d\omega_z^2 + 0.025}{2d}} - |\omega_z| \\ \sigma_{vi} &= 0.025/l \quad i=4, \dots, 6 \end{aligned} \quad (21)$$

としたときの、共分散行列

$$R = \text{diag} \{ \sigma_{v1}^2, \sigma_{v2}^2, \sigma_{v3}^2, \sigma_{v4}^2, \sigma_{v5}^2, \sigma_{v6}^2 \} \quad (22)$$

を得る。ただしここで、 $\text{diag} \{ * \}$ は*を対角成分とする対角行列を表わす。

プロセスノイズの標準偏差は角速度で0.005(rad/sec)を、角加速度で0.5(rad/sec²)を採用した。これらの値はポテンシオメータの計測値を基準値として考え、サンプリング時間間隔 $\Delta t = 0.005$ (sec)として予測モデル(9)式に当てはめたときの残差の標準偏差で求めた。

したがって共分散行列 Q は

$$Q = \text{diag} \{ 0.005^2, 0.005^2, 0.005^2, 0.5^2, 0.5^2, 0.5^2 \} \quad (23)$$

となる。

また状態ベクトルの初期値の与え方がフィルタの収束性に影響を与えるが⁷⁾、運動開始時には静止しているとして

$$x_{0|-1} = \{0, 0, 0, 0, 0, 0\}^T \quad (24)$$

とした。

スポーツにおける試合のような場面では、センサを装着して計測することはほとんど困難である。そこで本論文で用いた計測方法は、主として実験室的な計測を対象としている。したがって初期値をゼロと設定したのは、たとえばゴルフスイングのように運動開始時にほぼ静止状態を保つことが、多くの場合十分可能であると考えたからである。

4.3 実験結果

角速度をカルマンフィルタ(以後、方法Iと呼ぶ)を用いて計測した場合と、本方式(以後、方法IIと呼ぶ)を用いて計測した場合との比較をFig. 6に示す。

Fig. 5と比べれば、本方式を用いることにより角速度信号の符号が得られ、低角速度での誤差も少なくなっているのがわかる。同様に角加速度の比較もFig. 7に示す。

なお、これらのデータはすべて z 軸周りの角速度や角加速度であるが、 x 軸や y 軸周りのデータもほぼ同様な結果が得られている。

ポテンシオメータから計測した角速度との平均自乗誤

Fig. 6 Comparison of angular velocities measured with Kalman filter and potentiometers

差の平方根(rms)は、方法IIでは $0.17(\text{rad/sec})$ 、方法Iでは $0.14(\text{rad/sec})$ であった。また角加速度のrmsは方法IIでは $4.2(\text{rad/sec}^2)$ であり、方法Iでは $3.4(\text{rad/sec}^2)$ である。

このようにどちらの方法も、角速度・角加速度の精度は観測信号と比べほぼ同程度に向上している。このことから方法IIはより少ない加速度計でよい精度が得られる有効な計測方法であるといえる。

なお、本実験で用いた振り子実験における角速度信号の大きさは、最大で約 $7(\text{rad/sec})$ ぐらいである。しかし実際のスポーツ、たとえばゴルフスイング時のクラブの角速度は約 $20 \sim 30(\text{rad/sec})$ 、バドミントンのスマッシュ時のラケットの角速度は約 $70 \sim 80(\text{rad/sec})$ となる場合もある。

本実験装置ではこのような高速な運動の計測を行うことが困難であるため、比較的低速な運動の計測にとどまったが、高速な運動の計測をする場合には、より高容量の加速度計を用いれば、ほぼ同等な精度が得られることが推察できる。

5. シミュレーションによる検討

前章までに本論文で採用した方法IIの基本的な有効性の検討ができた。ここではさらにシミュレーションにより計測精度に影響する誤差要因を検討する。またこのとき方法Iとの比較も行う。

本方式において計測精度に一番影響を及ぼすのは観測信号のノイズと考えられる。そこで複数の加速度計に固

Fig. 7 Comparison of angular acceleration measured with Kalman filter and potentiometers

定金具を含めて一つのセンサとして考えると、観測ノイズの分散値の大きさに与える影響は、(20)式からペアで用いている加速度計間の距離によることがわかる。したがってここではまず始めに、加速度計間の距離が精度に与える影響を検討する。つぎに加速度計は固定金具に固定されるが、それらの装着ミスや固定金具のたわみなどによる角度誤差が与える影響を検討する。

シミュレーションはFig. 4のような振り子に運動を行わせたときの各加速度計に検出される加速度信号に、 $0.025(\text{m/sec}^2)$ を標準偏差値とする白色ガウス雑音を混入させる。このときのサンプリング・タイムは $0.005(\text{sec})$ で、シミュレーション時間は $3.5(\text{sec})$ とした。

シミュレーションに用いる加速度計は、原点に (A_{x1}, A_{y1}, A_{z1}) を、またそこから等距離だけ離れた場所に加速度計 (A_{x2}, A_{y2}, A_{z2}) と (A_{x3}, A_{y3}, A_{z3}) を配置する。

Fig. 8に加速度計の間隔を $2.0 \sim 20.0(\text{cm})$ まで変化したときの基準信号である角速度と推定値の平均自乗誤差の平方根(rms)を示す。

方法IIや方法Iでも加速度計の間隔が小さくなるほど精度が低い。また方法Iのほうが、より大きな間隔を取ることで、若干精度を向上させることが可能である。

ただしこれらの値は計測する角速度の大きさによって異なるが、方法IIを用いてスポーツのような運動の計測を行うことを考えた場合、 5.0 cm ぐらいあれば十分と思われる。

Fig. 8 Measurement error (rms) versus the distance of accelerometers

(a) Error due to angle α

(b) Error due to angle β

Fig. 9

つぎに加速度計を装着している固定金具のたわみなどによって、加速度計の感度方向にずれが生じた場合を想定する。角度誤差の与え方は、2個の加速度計とも同一直線上に平行に装着されたまま、2個の加速度計に角度誤差 α を含む場合 (Fig. 9(a)) と、先端の加速度計だけが角度誤差 β を含み、2個の加速度計が同一直線上にない場合 (Fig. 9(b)) の2種類である。またこのとき加速度計を配置する原点からの距離は 10 cm とした。

この角度誤差 α と β を 0.05~1.0 (degree) まで変化させたときの、基準信号である角速度と推定値の平均自乗誤差の平方根 (rms) を Fig. 10 に示す。これより方法 I でも方法 II でも角度誤差 β のほうが精度に大きく影響を与えているのがわかる。これは本方式が基本的に2個の加速度計の差の信号を用い並進加速度などをキャンセルできる性質を利用しており、この誤差の影響が大きく出ているためと思われる。

6. おわりに

スポーツにおける身体やラケットなどの道具の回転運動の計測に、加速度計を用いる計測方法を提案した。本方式は9個の加速度計を用い、そこから得られた加速度信号を観測信号とした拡張カルマンフィルタに適用し、

(a) Measurement error (rms) versus angle α

(b) Measurement error (rms) versus angle β

Fig. 10

筆者らが以前に提案した12個の加速度計を用いる方法とほぼ同等な精度を得ることが可能となった。このことから、さらに少ない加速度計でも高精度な計測が可能となり、運動計測時の被験者への負担を軽減することなどの効果が期待できる。

また本方式は原理的にオンライン計測が可能な方法であり、様々な応用が期待できる。たとえば、このような加速度計を用いた運動計測により直接運動座標系上の角速度や角加速度が得られ、このほかにも並進加速度信号が加速度計から得られるので、逆動力学問題におけるトルク算出時などでは有効な計測方法になると思われる⁸⁾。

このような場合、従来画像によって角速度や角加速度を算出することが多く、その精度が問題となっていたが、本計測方法を利用することにより、測定精度も十分実用範囲に達すると思われる。

本方式を用いた計測方法は、使用する加速度計の容量や角速度の大きさなどによって精度は異なるが、特にスポーツのような高速な運動の計測では有効な計測方法である。

参考文献

- 湯, 渋谷, 阿江, 横井: 空中における身体の捻り発生に関する研究, 体育学研究, 34-3, 227/234 (1989)
- 山田憲政: ゴルフスイング中の上肢関節の役割, 人間工学, 26-2, 81/86 (1990)
- 太田, 小林, 土居: 加速度座標系における加速度信号の処理—バドミントンのスマッシュ動作の力学的分析—, 日本

バイオメカニクス学会第10回大会論集, 135/139 (1990)

- 4) 太田, 小林: 加速度計を用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測, 計測自動制御学会論文集, 30-12, 1442/1448 (1994)
- 5) 片山 徹: 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店 (1983)
- 6) 桜井明監修: Cによるスプライン関数, 東京電機大学出版局 (1993)
- 7) 中野, 西山: パソコンで解くカルマンフィルタ, 丸善 (1993)
- 8) 太田, 小林: カルマンフィルタを用いた3次元生体内力推定方法, 日本バイオメカニクス学会第12回大会論集 (1994) (印刷中)

[著者紹介]

太田 憲 (学生会員)

1987年, 北海道大学理学部地球物理学科卒業。90年筑波大学大学院体育研究科コーチ学専攻修士課程修了。同大学院体育科学研究科博士課程を経て, 95年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターフロンティア研究員。加速度計を用いたスポーツ運動計測の研究に従事, 日本体育学会, 日本バイオメカニクス学会, 電子情報通信学会などの会員。

小林 一 敏 (正会員)

1963年, 立教大学理学部数学科卒業, 70年順天堂大学体育学部助教授。74年筑波大学体育科学系助教授。79年同教授。94年中京大学教授。現在に至る。日本体育学会, 日本バイオメカニクス学会, 日本体力医学会, 日本機械学会などの会員。