

加速度信号による振り子角と角速度の推定

Estimation of the Angle and Angular Velocity of a Pendulum by Acceleration Signals

立花康夫, 河合敏勝

Yasuo TACHIBANA, Toshikatsu KAWAI

神奈川工科大学情報工学科

In this paper, we propose an estimation method of the angle and angular velocity from the acceleration signals that are gathered by two acceleration sensors mounted on a moving target. It is assumed that the acceleration sensor is able to measure simultaneously two components of the acceleration that are relatively crossed at the right angles. Two sensors are mounted on the rotation body with same distance and other sides form the rotation axis. We obtain the relation between the 4 acceleration signals. Using simulations it is shown that the propose method is appropriate and effective.

Key Words: gravitational acceleration, acceleration sensor, state estimation, digital differential filter

1 はじめに

この論文では、動く台車に固定された支点の周りで回転することのできる単振り子を停止制御する場合において、角度と加速度の推定を半導体加速度計により実現する手法を提案し、シミュレーションを実施することにより、その動作性能を評価した結果を示す。支点の動く振り子は天井走行クレーン等の具体的な設備にその例を見出すことができる [1]。天井走行クレーンの運転はクレーンとそれに吊下る荷物の動きを見て操作員が手動で運転制御する。また、振り子を逆さまにすると、制御しない限り倒れてしまう。このような倒立振り子の制御は、格好の制御の題材として学習の教材に広く供されている [2]。このようなシステムでは、振り子の角度と角速度の計測が重要な技術課題となる。通常、振り子の角度は摺動抵抗やロータリエンコーダ等により、支点の位置はスライドエンコーダ等のセンサやパルスモータの駆動によるパルスカウント値による方法が用いられている。そして、停止制御をしようとする、これらの測定値が是非とも必要になる。特に角度の計測において、これらのセンサは本質的な構造が機械系であり、動きをセンサまで伝えるための何らかの機械的連繋を必要とする。このような角度の計測をまったく稼動部分の無いセンサ、具体的には半導体加速度計等 [3] により間接的に推定できれば、システムを堅牢な物とすることができる。

この論文で、我々は並進運動と回転運動の合成運動

をする対象の回転角と角速度の推定法を与える。そのために直交 2 成分が計測可能な 2 組の加速度計を回転軸に対し反対側等距離の位置で回転対象に固定し、これらから得られる 4 つの加速度信号を用いる。

回転角の半分の正接は計測値から得られる量の 2 次方程式で表されることを示す。この 2 次方程式の 2 つの解の一方が正しい。本論文では 2 つの解のいずれを用いるかを逐次判定するアルゴリズムを提案し角度の推定値を与える。

この角度推定値とセンサの加速度計測値より得られる角速度の 2 乗値と角加速度からデジタル微分フィルタを用いて無駄時間を含まない角速度の推定値を与えるアルゴリズムを提案する。

提案する推定アルゴリズムは 3 つのパラメータを含む。計測値に雑音が含まれる場合には推定値の誤差はこれらのパラメータの選定に依存する。本論文では制御系が入った運動状態での系をシミュレーションすることにより誤差評価を行い必要となるパラメータの選定基準を与える。

提案推定法を並進運動できる台車とそれに支点を固定した振り子の運動の停止制御に用いた例を示す。これは天井走行クレーンをモデル化したものである [1]。この系の停止制御を最適レギュレータ [7] で行う場合を考える。

シミュレーションの結果により提案する角度と角速度の推定法の妥当性と有効性を示す。

2 対象振り子系

図1は台車と、そこに固定された支点を持つ振り子のモデルである。台車上の支点を通り、水平なレールに平行に y 軸を設け、レール上の固定点を通り重力の向きに x 軸を設定する。支点を O' とし、台車の質量を M とする。振り子の糸の長さを ℓ とし、錘の質量を m とする。台車に水平にかかる外力を u とし、糸の鉛直からの角度を θ とする。錘の重心を P 、重力の加速度を g とし、振り子の粘性減衰係数を c 、台車の粘性減衰係数を d とする。この論文では単位を明記しないが、パラメータについては表1に単位を記してある。

糸は細い棒のようなもので、任意の θ でたわまないと仮定すると振り子系の運動方程式は次式となる。

$$\ell\ddot{\theta} + \ddot{Y} \cos \theta = -g \sin \theta - \frac{c}{m} \ell \dot{\theta} - \frac{c}{m} \dot{Y} \cos \theta \quad (1)$$

$$(M + m)\ddot{Y} + m\ell\ddot{\theta} \cos \theta = u + m\ell\dot{\theta}^2 \sin \theta - (c + d)\dot{Y} - c\ell\dot{\theta} \cos \theta \quad (2)$$

3 振り子に固定した点での加速度

図1で振り子に固定した $x' - y'$ 座標系を設け、その原点は台車上の振り子の支点 O' で、 x' 座標軸は糸に固定されているとする。便宜上、 $x - y$ 座標系には単位ベクトル \mathbf{i}, \mathbf{j} を、 $x' - y'$ 座標系には単位ベクトル \mathbf{i}', \mathbf{j}' を設定し $\mathbf{k} = \mathbf{i} \times \mathbf{j}$ および $\mathbf{k}' = \mathbf{i}' \times \mathbf{j}'$ とする。 \mathbf{k} を用いると角速度ベクトルは $\boldsymbol{\omega} = \dot{\theta} \mathbf{k}$ と表される。

糸上の固定点 Q_{H1} を考え、 $\overrightarrow{O'Q_{H1}} = \mathbf{r}'_1 = \ell_H \mathbf{i}'$ とする。点 Q_{H1} では重力加速度と拘束力による加速度の和が働いて $x' - y'$ 座標系で停止しているので点 Q_{H1} に固定された加速度計には次の加速度が作用する [4]。

$$\mathbf{a}_H^{(1)} = g\mathbf{i} - \ddot{Y}\mathbf{j} - \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}'_1 - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_1) \quad (3)$$

式(3)の右辺第3項は接線加速度で第4項は遠心力による加速度を表す。

4 支点对称な2組の加速度

点 Q_{H1} の他に支点 O' に対して対称な位置に点 Q_{H2} を置き、 $\overrightarrow{O'Q_{H2}} = \mathbf{r}'_2 = -\ell_H \mathbf{i}'$ とする。糸の振り子ではこのような設定はできないが実体振り子にすれば容

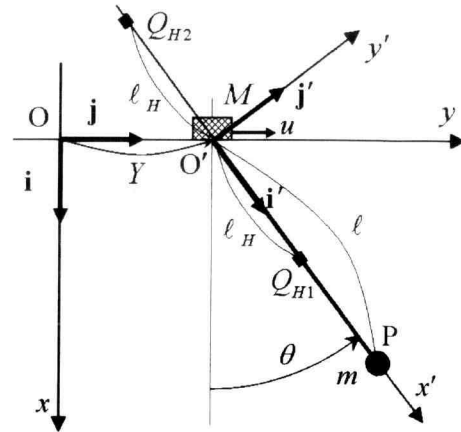


図1: 支点の動く単振り子

易に実現できる。式(3)より点 Q_{H1} での加速度は

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_H^{(1)} &= g\mathbf{i} - \ddot{Y}\mathbf{j} - \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}'_1 - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_1) \\ &= g\mathbf{i} - \ddot{Y}\mathbf{j} - \ddot{\theta} \mathbf{k}' \times \ell_H \mathbf{i}' - \dot{\theta}^2 \mathbf{k}' \times (\mathbf{k}' \times \ell_H \mathbf{i}') \\ &= g\mathbf{i} - \ddot{Y}\mathbf{j} - \ddot{\theta} \ell_H \mathbf{j}' - \dot{\theta}^2 \ell_H \mathbf{j}' \\ &= g\mathbf{i} - \ddot{Y}\mathbf{j} - \ddot{\theta} \ell_H \mathbf{j}' + \dot{\theta}^2 \ell_H \mathbf{i}' \\ &= g(\mathbf{i}' \cos \theta - \mathbf{j}' \sin \theta) - \ddot{Y}(\mathbf{i}' \sin \theta + \mathbf{j}' \cos \theta) \\ &\quad - \ddot{\theta} \ell_H \mathbf{j}' + \dot{\theta}^2 \ell_H \mathbf{i}' \\ &= (g \cos \theta - \ddot{Y} \sin \theta + \dot{\theta}^2 \ell_H) \mathbf{i}' \\ &\quad - (g \sin \theta + \ddot{Y} \cos \theta + \ddot{\theta} \ell_H) \mathbf{j}' \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。同様に、点 Q_{H2} での加速度は

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_H^{(2)} &= (g \cos \theta - \ddot{Y} \sin \theta - \dot{\theta}^2 \ell_H) \mathbf{i}' \\ &\quad - (g \sin \theta + \ddot{Y} \cos \theta - \ddot{\theta} \ell_H) \mathbf{j}' \end{aligned} \quad (5)$$

となる。 $\mathbf{a}_H^{(1)}$ と $\mathbf{a}_H^{(2)}$ から次のように \mathbf{b} を作る。

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= (\mathbf{a}_H^{(1)} + \mathbf{a}_H^{(2)})/2 \\ &= (g \cos \theta - \ddot{Y} \sin \theta) \mathbf{i}' - (g \sin \theta + \ddot{Y} \cos \theta) \mathbf{j}' \end{aligned} \quad (6)$$

5 計測信号と角度の関係

現実存在している加速度計では [3], \mathbf{i}', \mathbf{j}' 方向の成分を同時に計測できるので

$$\mathbf{b} = \beta_r \mathbf{i}' + \beta_t \mathbf{j}' \quad (7)$$

とすれば、式(6)により計測値から

$$\beta_r = g \cos \theta - \ddot{Y} \sin \theta \quad \beta_t = -g \sin \theta - \ddot{Y} \cos \theta \quad (8)$$

が得られる。式 (8) の両式から \ddot{Y} を消去して、

$$\beta_r \cos \theta - \beta_t \sin \theta = g \quad (9)$$

となる。半角の公式を用いると式 (9) は $\tan \frac{\theta}{2}$ に関する 2 次方程式、

$$(g + \beta_r) \tan^2 \frac{\theta}{2} + 2\beta_t \tan \frac{\theta}{2} + g - \beta_r = 0 \quad (10)$$

となり、 $\tan \frac{\theta}{2}$ として次式を得る。

$$\tan \frac{\theta}{2} = (-\beta_t \pm \sqrt{\beta_t^2 + \beta_r^2 - g^2}) / (g + \beta_r) \quad (11)$$

式 (11) からは $\tan \frac{\theta}{2}$ として 2 つの解が得られるが、その内一方が正しい。正しいものを見出すには、時々刻々と計測して、正しい θ から連続的に接続するものを選び、これを推定値 $\hat{\theta}$ とする。具体的な方法は次節で提案する。

特に停止している場合には $\ddot{Y} = 0$ であるから、そのときの角度を $\tilde{\theta}$ とすると、

$$\tan \tilde{\theta} = -\beta_t / \beta_r \quad (12)$$

で、これは角度推定値 $\hat{\theta}$ の初期値として用いる。

6 角度の推定

本論文の主題の一つである角度 θ の推定法について提案する。加速度信号 $\mathbf{a}_H^{(1)}, \mathbf{a}_H^{(2)}$ の計測はサンプル周期 T_S 毎に実施すると考え、時刻 kT_S でのサンプル値を各変数の右下に添え字 k を書いて示す。例えば、 β_r, β_t の値のサンプル値は $\beta_{r,k}, \beta_{t,k}$ である。

初期状態は鉛直より傾いた停止状態から始め、式 (12) より定まる $\tilde{\theta}$ より $\hat{\theta}_0 = \tilde{\theta}_0, \hat{\theta}_1 = \tilde{\theta}_1$ とする。

$k = 2, 3, \dots$ に対しては次のように定める。式 (11) を θ について解いて $i = 1, 2$ に対して

$$\theta_k^{(i)} = 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{-\beta_{t,k} - (-1)^i \sqrt{\beta_{t,k}^2 + \beta_{r,k}^2 - g^2}}{g + \beta_{r,k}} \right\} \quad (13)$$

と置く。式 (13) では $|\theta_k^{(i)}| \leq \pi$ ($i = 1, 2$) となるように計算する。 θ_k は $\theta_k^{(1)}$ か $\theta_k^{(2)}$ のいずれかであるが、推定値 $\hat{\theta}_k$ を $\hat{\theta}_{k-1}$ と $\hat{\theta}_{k-2}$ から $\Lambda_k^{(i)} = |\theta_k^{(i)} - 2\hat{\theta}_{k-1} + \hat{\theta}_{k-2}|$ ($i = 1, 2$) と置いて

$$\hat{\theta}_k = \begin{cases} \theta_k^{(1)} & \Lambda_k^{(1)} < \Lambda_k^{(2)} \text{ \& } |\hat{\theta}_{k-1}| > \varepsilon_0 \\ \theta_k^{(2)} & \Lambda_k^{(1)} \geq \Lambda_k^{(2)} \text{ \& } |\hat{\theta}_{k-1}| > \varepsilon_0 \\ \hat{\theta}_{k-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

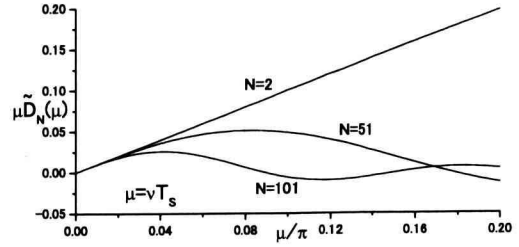


図 2: 微分フィルタの周波数特性

で逐次定める。ここで正数 ε_0 は角度決定閾値である。式 (14) は $\hat{\theta}_k$ の変化がより滑らかな方を選択することを意味している。

7 角速度の推定

この節で本論文のもう一つの主題である角速度の推定法を提案する。ベクトル \mathbf{c} を

$$\mathbf{c} = (\mathbf{a}_H^{(1)} - \mathbf{a}_H^{(2)}) / 2 = \gamma_r \mathbf{i}' + \gamma_t \mathbf{j}' \quad (15)$$

とすると式 (4) と式 (5) より

$$\gamma_r = \dot{\theta}^2 \ell_H \quad \gamma_t = -\ddot{\theta} \ell_H \quad (16)$$

となる。 γ_r と γ_t は計測値から求まるので $\dot{\theta}_k^2$ と $\ddot{\theta}_k$ の推定値 $\hat{\eta}_k$ と $\hat{\varphi}_k$ としてそれぞれ次式が得られる。

$$\hat{\eta}_k = \gamma_{r,k} / \ell_H \quad \hat{\varphi}_k = -\gamma_{t,k} / \ell_H \quad (17)$$

加速度推定値の構成には、整数 N を 2 以上として移動平均フィルタ

$$G_N(z) = \{1 + z^{-1} + \dots + z^{-(N-1)}\} / N \quad (18)$$

と次のデジタル微分フィルタ $D_N(z)$ を用いる [5],[6]。

$$D_N(z) = \frac{12}{N(N-1)(N+1)T_S} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{N-1}{2} - i \right) z^{-i} \quad (19)$$

$D_N(z)$ は入力の現在より過去 N 点に直線を最小二乗法であてはめ、その傾斜を出力するように構成されている。 $D_N(z)$ の周波数特性は角周波数を ν として、

$$D_N(e^{j\nu T_S}) = j\nu \tilde{D}_N(\nu T_S) e^{-j \frac{(N-1)}{2} \nu T_S} \quad (20)$$

と表される. 規格化周波数 $\mu = \nu T_S$ を用いると

$$\tilde{D}_N(\mu) = \frac{3}{N(1-\cos \mu)} \left\{ \frac{\sin \frac{(N-1)\mu}{2}}{\frac{(N-1)\mu}{2}} - \frac{\sin \frac{(N+1)\mu}{2}}{\frac{(N+1)\mu}{2}} \right\} \quad (21)$$

である. 図2に $\mu \tilde{D}_N(\mu)$ の例を図示し微分フィルタとして動作することを示す.

$G_N(z)$ に信号 η_k を通しその出力を r_k とする. 計測値に雑音が無ければ式(17)より r_k の値は負にならず, 運動が大きい間は零でない値を保持する.

$D_2(z)$ に入力として角度推定値 $\hat{\theta}_k$ を通し, その出力を c_k とし, 同じように $D_N(z)$ に $\hat{\theta}_k$ を通し, その出力を d_k とする. d_k は $N_H = (N-1)/2$ とすると, 式(20)より $\hat{\theta}_{k-N_H}$ の無駄時間の無い推定値となる. 我々は $\hat{\theta}_k$ の推定値 \hat{d}_k を $\hat{d}_0 = 0$ とし, $k \geq 1$ では次式のように与える.

$$\hat{d}_k = \begin{cases} c_k & r_k > \rho_0(\hat{\theta}_0/T_S)^2 \text{ or } k < N \\ d_k + T_S \sum_{i=1}^{N_H} \hat{\varphi}_{k-i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)での右边2段目の式の第2項は $\hat{\theta}$ に対する推定値 $\hat{\varphi} = -\gamma_t/\ell_H$ の時刻 $(k-N_H)T_S$ から kT_S までの積分を矩形近似したものである. すなわち \hat{d}_k は無駄時間を含まない時刻 kT_S での推定値となる. ρ_0 は角速度決定閾値で無名数である. 式(22)は振り子が大きく運動している間は微分フィルタとして $D_2(z)$ を用い, 変化が小さくなり計測雑音の影響が大きくなったら $D_N(z)$ を用いることを示している.

8 停止制御系への適用

考察の振り子系では, 所定の位置で台車と振り子を停止するような制御をする目的があるので, 停止制御系へ我々の提案する角度と角速度の推定法を適用してみる.

式(1)と式(2)の振り子系に対して, $\theta = 0, \dot{\theta} = 0, Y = 0, \dot{Y} = 0$ を設定値とし, 最適レギュレータで制御するとして対象系の線形近似を行なう[7]. 角度 θ は小として, $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, $\dot{\theta}^2 \approx 0$ で近似し表1の場合で線形近似状態方程式,

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -11.76 & -0.5 & 0 & -0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1.96 & 0 & 0 & -0.1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (23)$$

表 1: シミュレーションパラメータ

記号	説明	値	単位
g	重力加速度	9.8	[m/s ²]
m	振り子の質量	0.2	[kg]
ℓ	振り子の糸の長さ	1.0	[m]
M	台車の質量	1.0	[kg]
c	振り子の粘性減衰係数	0.1	[J · s ² /m ²]
d	台車の粘性減衰係数	0.1	[J · s ² /m ²]
ℓ_H	加速度計取り付け長さ	0.01	[m]
T_S	サンプル周期	0.02	[s]
T_C	制御周期	0.02	[s]
h	RungeKutta 刻み幅	0.01	[s]
ε_0	角度決定閾値	0.0002	[rad]
N	$G_N(z), D_N(z)$ タップ数	51	点
ρ_0	角速度決定閾値	0.001	
σ	付加雑音標準偏差	0.001	[m/s ²]

を得る. $\mathbf{x} = (\theta, \dot{\theta}, Y, \dot{Y})^T$ は状態ベクトルである. 正定対角行列 $\mathbf{W} = \text{diag}(10, 5, 2, 1)$ に対し評価関数

$$\int_0^\infty (\mathbf{x}^T \mathbf{W} \mathbf{x} + u^2) dt \Rightarrow \min \quad (24)$$

から次の状態フィードバックゲインを得る[8].

$$\mathbf{k}_G = (-2.2036, -1.5520, 1.4142, 1.9875) \quad (25)$$

式(25)の右边に書かれた数値は表1に対応し, 次節でのシミュレーションで用いた値である.

上記議論は連続系の場合である. 我々は制御周期 T_C でデジタル制御する. T_C は対象の動き例えば振り子の周期に対して十分小さくなるようにして, 連続系の結果を用いて時刻 kT_C での操作量を状態変数推定値 $\hat{\mathbf{x}}_k$ により

$$u_k = -\mathbf{k}_G \cdot \hat{\mathbf{x}}_k \quad (26)$$

で与える. この論文では $T_C = T_S$ で考察している.

ところで, 台車の位置は比較的容易に計測できるので Y は計測できるものとする. Y_k をデジタル微分フィルタ $D_2(z)$ に通した信号 \hat{H}_k を \dot{Y}_k の推定値として用いる. まとめて $\hat{\mathbf{x}}_k$ を次式で与える.

$$\hat{\mathbf{x}}_k = (\hat{\theta}_k \quad \hat{d}_k \quad Y_k \quad \hat{H}_k)^T \quad (27)$$

9 推定法パラメータと誤差評価

我々の提案する角度と角速度の推定には3つのパラメータ ϵ_0, N, ρ_0 を定める必要がある。これらのパラメータは式 (14) と式 (22) によりアルゴリズムに影響するから、これらの設定によって計測雑音や計算誤差により正しい判断を誤ることが生ずる。そこでパラメータに対する推定誤差の評価が必要となる。本論文では糸の方向に加速度雑音を加わるとして推定誤差への影響をシミュレーションで評価する。振り子の動作は前節で考えた制御系により制御されていると考える。

評価のために、糸の方向に平均0で標準偏差 σ の正規白色雑音 $N_{nor}(\sigma)$ を加える。

振り子系は式 (1), 式 (2) と式 (26) により定まる。微分方程式の解法は刻み幅 h のルンゲクッタ法により数値積分を行う。初期条件は $\theta(0) = 10[\text{deg}]$, $\dot{\theta}(0) = 0$, $Y(0) = 5$, $\dot{Y}(0) = 0$ とし、結果の表示に関して角度は度 $[\text{deg}]$, 角速度は $[\text{deg/s}]$ とする。

誤差の発生の様子とその影響の過程を見るために表1のパラメータの場合で状態量と操作量の変化を図3に、推定値の変化を図4に示す。提案推定値で制御系が動作し状態値が設定値に整定している。

誤差評価のためにいくつかの指標を定義する。 $k \geq k_{setl}$ で系は整定するとして、この区間を整定区間とする。図3では $k_{setl} = 500$ である。整定区間での θ_k の二乗平均の非負の平方根を $E_r\{\theta\}$ とする。同様に $E_r\{\dot{\theta}\}$, $E_r\{Y\}$, $E_r\{\dot{Y}\}$ を定義する。推定誤差 $|\hat{\theta}_k - \theta_k|$ の $k \geq 0$ での二乗平均の非負の平方根を $E_s\{\hat{\theta}\}$ とする。同様に $E_s\{\hat{\dot{\theta}}\}$ を定義する。

計測加速度の大きさの評価のため $\|\mathbf{a}_H^{(1)}\| - g$ のシミュレーション区間での最大値を $A_b\{\mathbf{a}_H^{(1)}\}$ とする。同様に $A_b\{\mathbf{a}_H^{(2)}\}$ を定義する。

振り子の運動に伴い $\dot{\theta}_k^2$ の推定値 η_k のフィルタ値 r_k の変化を $\epsilon_0 = 0.002$ として描いた図5を見ると雑音のレベルが増大して $\sigma \geq 10^{-3}$ となると $N = 51, 101$ では負の値となっている。これは計測可能な $\dot{\theta}_k^2$ のレベルより雑音が大きくなっていることを示し、このような範囲での推定能力は低下する。 $N = 21$ では NT_S が振り子の周期より短いため運動中の r_k の山は割れている。 $N = 51, 101$ では運動の大きい部分で平坦な山を成し r_k が運動状態を表す指標として作用している。そこで $N = 51, 101$ について検討する。

角度決定閾値 ϵ_0 の効果を調べてみる。図6と

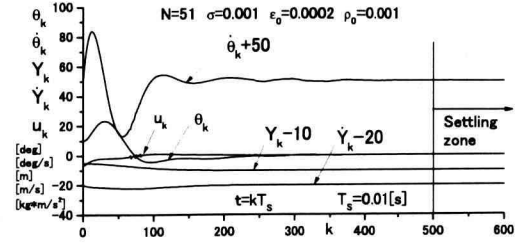


図3: 状態変数と操作量

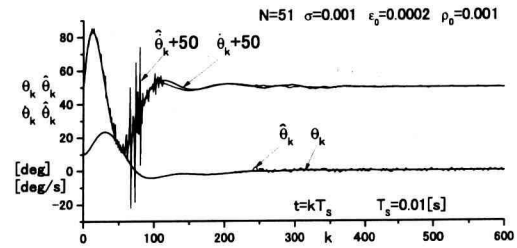


図4: 推定値 $\hat{\theta}_k, \hat{\dot{\theta}}_k$

図7には $E_r\{\theta\}, E_r\{\dot{\theta}\}, E_r\{Y\}, E_r\{\dot{Y}\}$ を図8には $E_s\{\hat{\theta}\}, E_s\{\hat{\dot{\theta}}\}$ を $N = 51, 101$ と $\epsilon_0/2 = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$ としたときの値を σ を変えて描いている。これらの評価値を見ると ϵ_0 はほとんど評価値に影響していない。また評価値は σ と共に増大している。

N の影響は状態値誤差では $N = 101$ の方が $N = 51$ より評価値が若干小さいが、推定値誤差では $N = 51$ の方が $N = 101$ より1桁程評価値が小さい。いずれの評価値も σ と共に増大している。

角度決定閾値 ϵ_0 の選定はあまり推定誤差に影響しないが、小さな値 $\epsilon_0 < 10^{-2}$ が望ましい。フィルタタップ数 N は NT_S が振り子の周期より大きい範囲で小さ目の方が望ましく $21 < N < 101$ の範囲に最適点があり $N = 51$ で良好に動作する。角速度決定閾値 ρ_0 は N を設定して r_k に現れる運動状態を表すブロック状の波形を検出できるように設定する。

図9には $A_b\{\mathbf{a}_H^{(1)}\}, A_b\{\mathbf{a}_H^{(2)}\}$ の値を示している。図9から加速度計測値の絶対値は高々 $2g$ 以内である。

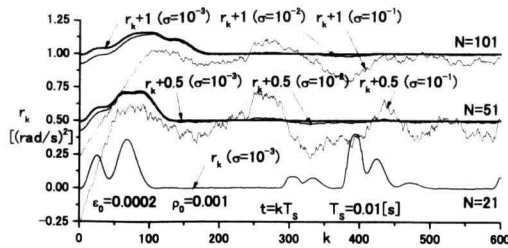
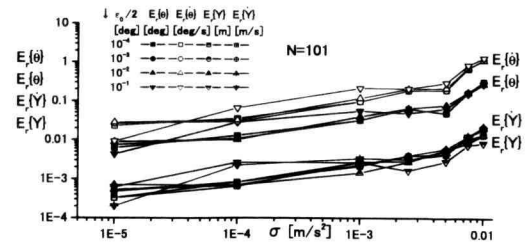
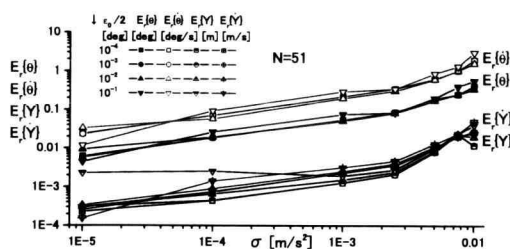
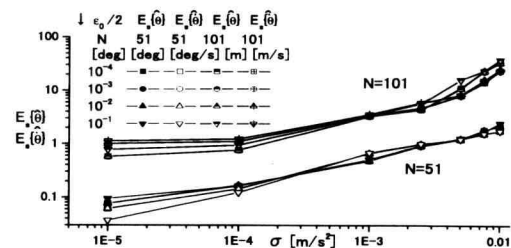
図 5: 角速度二乗値の平均 r_k 図 7: $N = 101$ での状態値誤差図 6: $N = 51$ での状態値誤差

図 8: 推定誤差

10 まとめ

この論文では、並進運動と回転運動する対象の鉛直からの角度と角速度を推定する手法を提案した。これを台車の動く振り子の停止制御に適用した例を示した。

推定アルゴリズムに現れるパラメータの選定について計測誤差を考えたシミュレーションによる推定誤差評価から検討した。半導体加速度計等のように可動部分の無いセンサ系で角度と角速度が推定できればシステムの堅牢さの点から有効と考えられるが、ドリフトの発生等加速度センサの特性の補償を考慮しなければならない。今後、オブザーバによる状態推定との比較による検討も必要であると考えている。シミュレーションの結果から提案推定法がクレーンの制御などに利用できる可能性があることを示すことができた。

参考文献

- [1] 柳井法喜, 山本元司, 毛利彰「逆力学計算に基づくクレーンのフィードバック制御」計測自動制御学会論文集, vol.40, no.11, pp.1040-1055, 2001
- [2] 川谷亮治, 村田剛, ファハリ・ヘルダー, 武士保進「ループ整形設計手法に基づく直列3重型倒立振り子の安定化制御」計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.8, pp.852-854, 1997

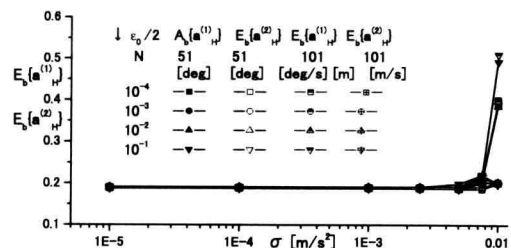


図 9: 計測加速度最大値

- [3] "LINER DATA BOOK 1999-2000", ANALOG DEVICES, chapter5, pp.19-29
- [4] 阿部龍蔵「力学・解析力学」岩波書店, pp.113-117, 1994
- [5] Yasuo Tachibana, "Parameters and System Order Estimation Using Differential Filters and Resultant", IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E82-A, pp.1900-1910, no.9, Sept. 1999
- [6] 立花康夫「カスケードディジタル微分フィルタによる伝達関数の推定」電子通信学会論文誌 vol.58-D, no.9, pp.546-553, 1975
- [7] 有本卓「システム制御の数理」岩波講座応用数学, 岩波書店, pp.79-91, 1993
- [8] MATLAB"Control System Toolbox", MathWorks, chapter8, pp.27-30, 1997