

ロードセルを用いた重量計測での不要振動除去に最適な FIR フィルタの設計*

上村久仁男*¹ 金井 浩*² 中鉢憲賢*²

(1994年10月14日受付)

【要旨】 本論文では、ロードセルを用いた高精度重量計測におけるロードセルの不要振動除去に最適な FIR フィルタの設計方法について述べる。通常、雑音を含んだ入力から雑音のみを除去するフィルタを設計する場合、まず検出したい信号に対するノイズ成分の周波数特性を決定し、次にその特性を実現するフィルタ次数と係数が決定される。この方法を用いて重量計測の誤差の評価を行った前報の結果では、FIR フィルタは、直線位相特性であるために波形歪が発生しないので、IIR フィルタよりも分散の少ない計量測定精度が得られることが分かった。しかし、ハミング窓関数を用いた FIR フィルタについては 150 次以上が必要であるために低速ライン処理での計測にしか適用できない。従って、本論文では少ないタップ数で高精度計測が可能となる FIR フィルタを設計することを目的とした。フィルタの設計方針としては、通常的设计法のように周波数特性をあらかじめ与えるのではなく、重量算出に関係する測定区間においてのみフィルタ出力が平坦であれば良いことに着目して、その測定区間におけるフィルタ出力と真の重量との差の 2 乗和を真の重量で正規化した正規化評価関数 J を定義し、正規化評価関数が最小になるような FIR フィルタを設計する。設計したフィルタに実際の重量信号を適用させた結果、30 次で測定重量誤差 0.1% (0.28 gf) 程度の高精度が得られた。

キーワード FIR フィルタ, 重量計測, 振動除去
FIR filter, Weight measurement, Vibration elimination

1. ま え が き

台秤で製品一つ一つの重量を測定する方法を生産ラインに応用させるには、図-1 に示すようにモータとモータからの駆動ベルトを一体にして台秤に相当する計量部に取り付け、更にローラと二つのローラを結ぶ平ベルトにより構成される計量コンベアが必要とされる。また、重量計測センサのロードセルの一方は床に固定し、他方は計量コンベアに接続し、重量による歪量に比例した直流信号を取り出す。計量コンベアの入口には、被測定物が計量コンベアへ載り移ったことを感知するためにフォトセンサ 1 を設け、出口には選別

タイミング用にフォトセンサ 2 を設ける。一つ一つ測定する静的な方法の場合、ロードセル出力波形は機械振動ノイズの無い滑らかな波形をしている。しかし、生産ラインにおける動的な測定の場合には、被測定物は計量コンベアを高速に通過するため、ロードセル出力信号は台形状の波形となり、更にモータの回転振動ノイズや被測定物の計量コンベアへの載り移り衝撃振動が加わり、計測したい区間でかなりのリップルを含んだ振動波形となる。従って、この信号をそのままサンプリングして重量算出値とすると、計測タイミングのずれによって測定値に大きな誤差を生じる。そのために被測定物が計量コンベアに載り移った際に発生する振動をローパスフィルタによって除いて、測定したい区間の信号を平坦化し、計測タイミングの違いによる測定のはらつきを抑制することが必要である。

この生産ラインでの計測において解決すべき問題としては、以下のようにまとめられる。

- 1) ロードセルの出力信号が非定常で有限長の単発パルスであるためにフィルタの設計が難しい。また、

* Design of optimum FIR filter for eliminating mechanical noise in weight measurement with load cell, by Kunio Kamimura, Hiroshi Kanai and Noriyoshi Chubachi.

*¹ ニッカ電測(株)開発部

*² 東北大学工学部電気工学科

(問合先: 上村久仁男 〒356 川越市下赤坂字大野原 710 ニッカ電測(株)開発部)

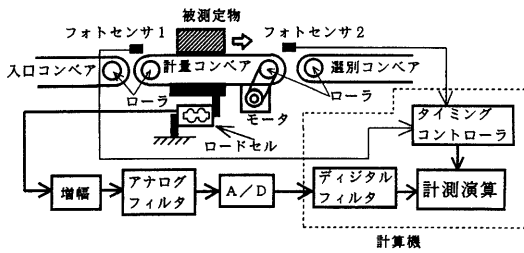


図-1 生産ライン上での重量計測の説明図

同一の被測定物を計量した場合でも、被測定物の計量台への載り移り方によって、ロードセルの出力信号は様々な波形となる。これは、被測定物のどの部分が計量コンベアと最初に接触するかによって衝撃力や摩擦力の加わり方が変わるためである。従って、この重量計測では、毎回予想できない外力（衝撃力、摩擦力）やモータの機械振動という力成分が重畳された信号から被測定物の重量という同一な力成分を採り出す必要がある。

- 2) 生産ラインでは測定精度が最大測定重量 1,000 gf に対して、1 gf 程度すなわち 0.1% の重量計測精度が要求される。
- 3) 処理量が毎分 200 個ならば、被測定物が 1 個当たり 0.3 秒の間で計量コンベアを通過するため、演算時間に限りがある。
- 4) 生産ラインでは一つの被測定物が 1 回だけしか計量コンベアを通過しないため、何回かの計測の平均をとることができない。

フィルタの設計方法には、時間領域と周波数領域での設計があるが²⁾、従来の方法ではいずれにおいても、まず、フィルタの周波数特性、又は、そのインパルス応答をあらかじめ決定して与え、次にその特性をいろいろな評価の観点から最もよく近似する FIR 又は IIR フィルタを設計し、フィルタ係数と次数を決定している。前報¹⁾でのフィルタの設計方法は、周波数領域での設計に分類される。この方法を IIR フィルタの設計に適応させた場合、阻止域の減衰の度合いからチェビシェフフィルタが最良と考えられたが、重量計測に関する実験結果では、IIR フィルタにおいてはベッセルフィルタが最良で、チェビシェフフィルタは通過域にリップルを持つため最も悪かった¹⁾。FIR フィルタは IIR フィルタのベッセルフィルタより更に良い計量測定精度が得られた。これは、FIR フィルタが直線位相特性であるため、波形歪が発生しないためと考えられ

る。しかし、ハミング窓関数を用いた FIR フィルタでは 150 次以上が必要であった。従って、より少ない次数で構成できる FIR フィルタを設計することが要求される。

そこで本論文では、従来のフィルタ設計法においてあらかじめ与えられていたフィルタの望ましい周波数特性の決定方法について注目して新しいフィルタの設計方法を提案する。すなわち、望ましいフィルタ出力としては、ある測定区間における出力波形の標準偏差が最小で、さらに、フィルタ出力と重量の真値との誤差が最小であれば良いことに着目し、重量算出に関係する測定区間におけるフィルタ出力と真の重量との差の 2 乗和を真の重量で正規化した正規化評価関数 J を定義し、その正規化評価関数 J が最小になるようにフィルタ係数を決定する。ただし、フィルタ次数と測定区間長も未知数であるため、フィルタ次数と測定区間を順次変化させては、評価関数が最小になるフィルタ係数を求める必要がある。次に、一つのロードセル出力に対して評価関数を最小にする係数列を複数のロードセル出力に適応することにより、重量計測に最適なフィルタ次数、測定区間長が決定され、最終的なフィルタ係数が求められる。最後に実験によって本手法の有効性を確認する。

2. 不要振動除去に適した FIR フィルタの設計の原理

本論文で提案するフィルタ設計法は、図-2 に示すような次数 K 次で係数 a_0 から a_K までの FIR フィルタモデルを用いて、重量測定に必要な区間の始点 n_1 から区間の終点 n_2 のフィルタ出力と真の重量 w との差の 2 乗和を真の重量で正規化した正規化評価関数 J を定義し、正規化評価関数 J が最小になるようにフィルタ係数を決定する。ただし、フィルタ次数と測定区間長も未知数であるため、フィルタ次数と測定区間を順次変化させては、評価関数が最小になるフィルタ係数を求める必要がある。FIR フィルタ出力 $z(n)$ を (1) 式で表す。

$$z(n) = \sum_{i=0}^K a_i y(n-i) \quad (1)$$

ここで $y(n)$ を入力信号、 K を次数、 a_i をフィルタ係数とする。図-2 に示すように、フィルタ出力は現在の入力 $y(n)$ と過去の K 個の入力に各々の係数を掛けたものの総和になる。真の重量 w とフィルタ出力 $z(n)$ の区間の始点 n_1 から区間の終点 n_2 の間における差の 2 乗和を真の重量で正規化した正規化評価関

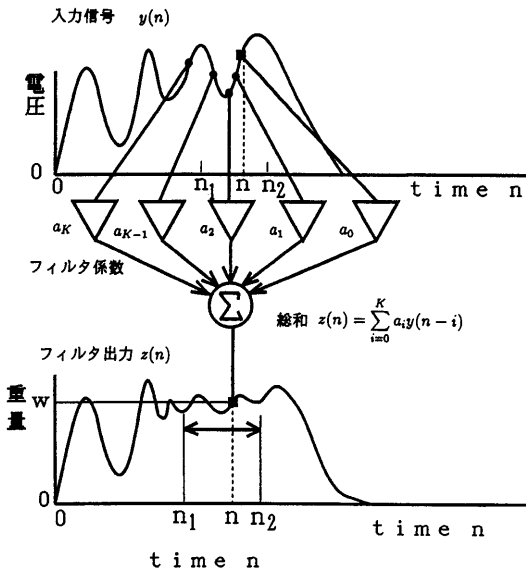


図-2 フィルタ設計の原理図

数 J を定義する。

$$J = \frac{1}{(n_2 - n_1 + 1)} \frac{1}{w^2} \sum_{n=n_1}^{n_2} |z(n) - w|^2 \quad (2)$$

この式に (1) 式を代入して整理すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{(n_2 - n_1 + 1)} \frac{1}{w^2} \sum_{n=n_1}^{n_2} \left| \sum_{i=0}^K a_i y(n-i) - w \right|^2 \\ &= \frac{1}{(n_2 - n_1 + 1)} \frac{1}{w^2} \sum_{n=n_1}^{n_2} \left(\sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^K a_i a_j y(n-i) \right. \\ &\quad \left. \cdot y(n-j) - 2w \sum_{i=0}^K a_i y(n-i) + w^2 \right) \\ &= \frac{1}{w^2} \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^K a_i a_j C_{ij} - \frac{2}{w} \sum_{i=0}^K a_i C_i + 1 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで

$$C_{ij} = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} y(n-i) y(n-j) \quad (4)$$

$$C_i = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} y(n-i) \quad (5)$$

とする。 J を最小にするフィルタ係数 a_i , ($i=0, 1, \dots, K$) は下記の式を満たす。

$$\frac{1}{2} \frac{\partial J}{\partial a_i} = \frac{1}{w^2} \sum_{j=0}^K a_j C_{ij} - \frac{C_i}{w} = 0 \quad (6)$$

従って、線形連立 1 次方程式

$$\sum_{j=0}^K a_j C_{ij} = w C_i, \quad (i=0, 1, 2, \dots, K) \quad (7)$$

を解くことによりフィルタ係数 $\{\hat{a}_i\}$, ($i=0, 1, 2, \dots, K$) を求めることができる。また、(3)式は、

$$J = \frac{1}{w^2} \sum_{i=0}^K a_i \left(\sum_{j=0}^K a_j C_{ij} - w C_i \right) - \frac{1}{w} \sum_{i=0}^K a_i C_i + 1 \quad (8)$$

と変形できるから、(7) 式で得られたフィルタ係数 $\{\hat{a}_i\}$ を用いたときの正規化評価関数 J の最小値 J_{\min} は、

$$J_{\min} = 1 - \frac{1}{w} \sum_{i=0}^K \hat{a}_i C_i \geq 0 \quad (9)$$

と決定される。次に、一つのロードセル出力に対して評価関数を最小にする係数列を複数のロードセル出力に適応することにより、重量計測に最適なフィルタ次数、測定区間長が決定され、最終的なフィルタ係数が求められる。

また、 $y(n)$ を単位インパルス $\delta(n)$ とおいて得られるフィルタのインパルス応答 $h(n)$ は、次式で得られる。

$$h(n) = \sum_{i=0}^K \hat{a}_i \delta(n-i) \quad (10)$$

$$= \begin{cases} \hat{a}_n & (n=0, 1, 2, \dots, K) \\ 0 & (n > K) \end{cases} \quad (11)$$

この $h(n)$ の $(K+1)$ 点の離散的フーリエ変換として、フィルタの伝達関数 $H(k)$ は次式で与えられる。

$$H(k) = \frac{1}{K+1} \sum_{i=0}^K \hat{a}_i \exp\left(-j \frac{2\pi i k}{K+1}\right) \quad (12)$$

また、得られたフィルタ係数 $\{\hat{a}_i\}$ を用いて (1) 式で得られるフィルタ出力 $z(n)$ の区間 $[n_1, n_2]$ における平均値 \bar{w} と標準偏差 σ_w を次式で求める。

$$\bar{w} = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} z(n) \quad (13)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} (z(n) - \bar{w})^2} \quad (14)$$

この平均値 \bar{w} をもって、試料の重量測定値とする。

3. 実験方法と結果

3.1 入力信号の取り込み

真の重量 $w=222.7$ gf の被測定物について、入力信号 $y(n)$ を A/D 変換のサンプリングを 4 ms として取り込んだ波形を図-3 に示す。区間の始まりは被測定物が計量コンベアへ乗り移る 0.2 秒前のタイミングで、機械的に常に一定の位置である。図-3(a) は被測定物が計量コンベア入口フォトセンサ 1 を遮光した信号を示し、図-3(b) から (d) はロードセルの出力信号を 52 dB 増幅した信号で、図-3(b) が 1 回目、(c) が 2 回目、(d) が 3 回目に測定した信号である。

3.2 フィルタの特性

次数 K , 区間 $[n_1, n_2]$ により係数 $\{\hat{a}_i\}$, 伝達関数

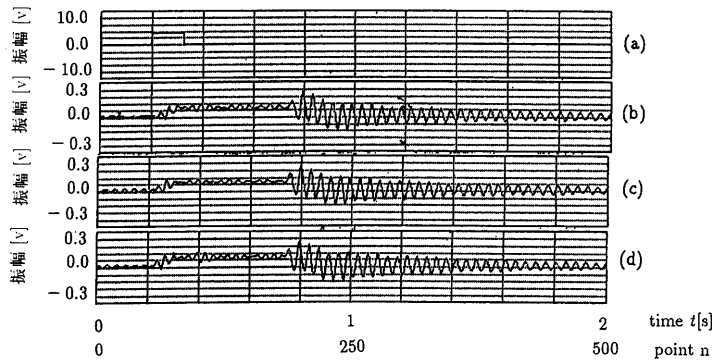


図-3 ロードセルの出力信号の例 (試料は 222.7 gf の木片)
 (a) フォトセンサ 1 の出力信号, (b) 1 回目, (c) 2 回目, (d) 3 回目に測定した信号

の周波数特性 $H(k)$, フィルタ出力 $z(n)$ がどのように変化するか調べるために, まず, 入力信号 $y(n)$ の平坦部分をできる限り広く取るように, 区間の始点 n_1 と区間の終点 n_2 をおのおの 100 と 170 に設定した。このとき, 次数 K を 10 次から 70 次まで変化させ, 正規化評価関数の最小値 J_{\min} , 測定重量値 \hat{w} のバイアス誤差 $\hat{w} - w$, フィルタの係数列 $\{\hat{a}_i\}$, 伝達関数の周波数特性 $H(k)$, フィルタの出力波形 $z(n)$ を求めた。

図-4 は測定重量のバイアス誤差 $\hat{w} - w$ と正規化評価関数の最小値 J_{\min} の平方根をおのおの点線と実線で示している。正規化評価関数の最小値 J_{\min} の平方根とバイアス誤差 $\hat{w} - w$ の絶対値は次数と共に減少し, 正規化評価関数の最小値 J_{\min} の平方根は $K=70$ 次で, バイアス誤差は $K=40$ 次で零となる。また, (14) 式の標準偏差 σ_w は, 次数 $K=20$ 次から 70 次までの範囲で 0.1 gf 以下であった。

図-5 は次数 $K=10$ 次から 70 次までのフィルタの係数列 $\{\hat{a}_i\}$ である。係数列の振幅は次数と共に小さくなる。また, $K=60$ 次と 70 次の係数列はやや規則性がありそうであるが, $K=10$ 次から 50 次までは不規則な係数列である。これらは, 周波数領域で設計した理想ローパスフィルタを逆フーリエ変換して得られた係数列が sinc 関数の形状であることと比べるとやはり不規則な形状をしている。

図-6 は次数 $K=10$ 次から 70 次までの伝達関数の振幅周波数特性 $|H(k)|$ である。各々の周波数特性で最大値を 1 に正規化している。次数 K が 10 次の場合, 95 Hz を中心としたバンドパス特性になっていて, 30 次では 10 次の伝達関数をより小刻みにした形状になり, 50 次から 70 次では直流付近におけるゲインが最大となっている。直流付近のゲインが最大で高周波成

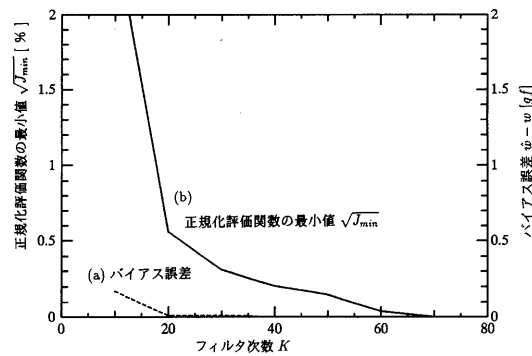


図-4 区間の始点 $n_1=100$, 区間の終点 $n_2=170$ としたときの次数 $K=10$ から $K=70$ 次までの (a) バイアス誤差 $\hat{w} - w$ と (b) 正規化評価関数の最小値 $\sqrt{J_{\min}}$ (%)

分に通過域がなければローパス特性といえる。 $K=30$ 次から 70 次までの伝達関数の振幅周波数特性は, 最初の遮断周波数が 8.7 Hz 付近, 次に 18 Hz にあり, 通過域は直流から 8.7 Hz と 9 Hz から 18 Hz までにある。従って, 正規化評価関数を最小にするフィルタの伝達関数はバンドストップフィルタであると考えられる。このことを確認するためにバイアス 0.08 V に振幅 0.02 V の正弦波を重畳させて, 正規化評価関数を最小にするフィルタ係数による伝達関数を求めた。結果として, 7 Hz の正弦波が重畳された場合には 7 Hz のみに遮断周波数があり, 14 Hz の正弦波が重畳された場合には 14 Hz のみに遮断周波数を持つバンドストップフィルタであることが確認された。

図-7 は次数 $K=10$ 次から 70 次までのフィルタ出力 $z(n)$ である。区間の始点 n_1 から区間の終点 n_2 までのフィルタ出力のリプルが次数 K の増加と共に減少していることが分かる。

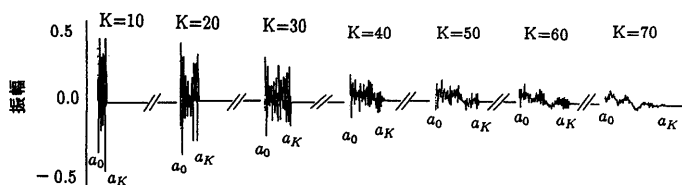


図-5 区間の始点 $n_1=100$, 区間の終点 $n_2=170$ としたときの各次数 K での係数列 $\{a_i\}$ の変化

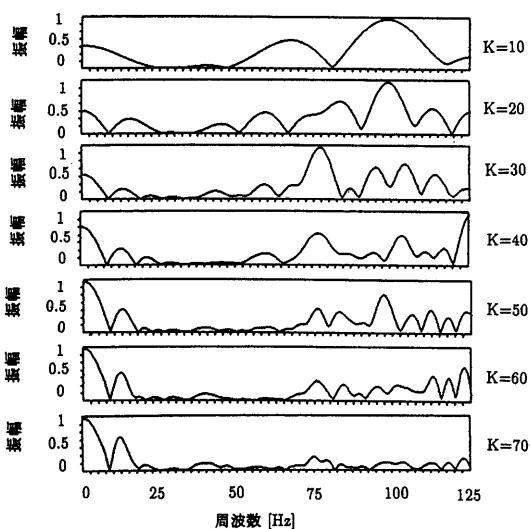


図-6 区間の始点 $n_1=100$, 区間の終点 $n_2=170$ としたときの各次数 K における伝達関数の振幅周波数特性 $|H(k)|$

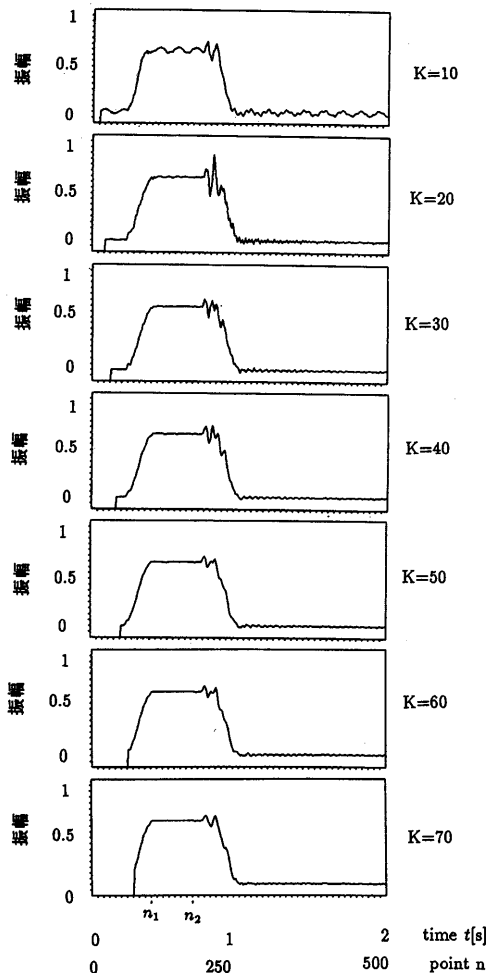


図-7 区間の始点 $n_1=100$, 区間の終点 $n_2=170$ としたときの次数 $K=10$ 次から $K=70$ 次までの各々の場合のフィルタ出力 $z(n)$

までとしたときのフィルタ出力 $z(n_1)$ から $z(n_2)$ は次式で表される。

図-8 は図-7 の次数 $K=10$ 次から 70 次までのフィルタ出力 $z(n)$ の区間の始点 n_1 から区間の終点 n_2 までについて、区間の始点 n_1 から区間の終点 n_2 までの平均値 \bar{w} でバイアスを除去した後、FFT 処理を行って得られた振幅スペクトルを示している。次数 $K=10$ 次では 8.7 Hz にピークがあるが、 $K=30$ 次以上ではそのリプルが減少している。

3.3 フィルタ次数 K と正規化評価関数の最小値 J_{\min} の関係

図-9 は区間の終点 n_2 を 170, 区間の始点 n_1 を 110 から 150 まで変化させたときの正規化評価関数の最小値 J_{\min} の平方根を図示している。測定重量値のバイアス誤差 $\bar{w} - w$ はいずれも 1 gf 以下のため図示しなかった。図-9 から分かるように、フィルタ次数 K と測定区間長 $N = n_2 - n_1 + 1$ の関係が $K \geq N - 1$ のときに正規化評価関数の最小値 J_{\min} が零になっている。これは以下の理由からも明らかである。FIR フィルタ出力 $z(n)$ は (1) 式で与えられる。測定区間を n_1 から n_2

$$\begin{bmatrix} y_{n_1-0} & y_{n_1-1} & y_{n_1-2} & \cdots & y_{n_1-K} \\ y_{n_1+1} & y_{n_1} & y_{n_1-1} & \cdots & y_{n_1+1-K} \\ y_{n_1+2} & y_{n_1+1} & y_{n_1} & \cdots & y_{n_1+2-K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n_2-0} & y_{n_2-1} & y_{n_2-2} & \cdots & y_{n_2-K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{n_1} \\ z_{n_1+1} \\ z_{n_1+2} \\ \vdots \\ z_{n_2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

正規化評価関数を最小化することは、 $z(n_1)$ から $z(n_2)$ を測定重量の真値 w に近づけることであり、未知数であるフィルタ係数列 $\{a_i\}$, ($i=0, 1, \dots, K$) の数 $K+1$ とフィルタ出力の数 $n_2 - n_1 + 1$ が等しく、逆行可能であれば方程式より係数列が得られ、等しくないときは最小 2 乗法により得られる近似解を係数としている。

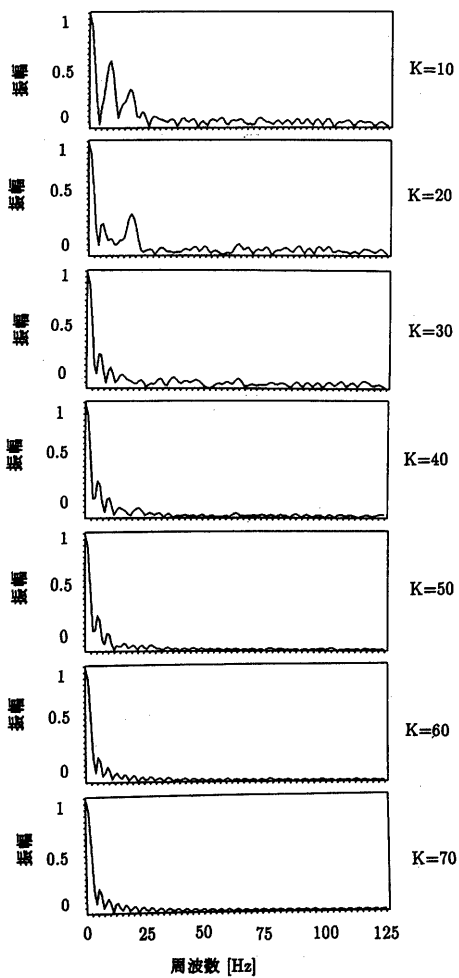


図-8 区間の始点 $n_1=100$, 区間の終点 $n_2=170$ としたときの次数 $K=10$ 次から $K=70$ 次までのフィルタ出力 $z(n)$ の振幅スペクトル $|H(k)|$

3.4 フィルタの最適化

ロードセル信号系列において、次数と測定区間が等しいときに評価関数が最小になることが分かった。従って、次に一つの信号列で得られた係数を様々なロードセル信号に適用して、最適なフィルタ次数と最適区間長を決定する必要がある。

3.4.1 様々な信号の係数による影響

表-1 は次数 $K=30$ 次, 区間の始点 $n_1=140$, 区間の終点 $n_2=170$ について, 3 回の独立な計測で得られた信号系列 $y_a(n)$, $y_b(n)$, $y_c(n)$ から求められた係数 $\{a_i\}$ を使用したときの測定重量値 \hat{w} と標準偏差 σ_w についての実験をまとめたものである。

- 1) 一つの重量信号から求めた係数列 $\{a_i\}$ を用いて他の信号系列のフィルタ出力 $z(n)$ を求めた場合 (表-1 の非対角項に相当) においても, 測定重量のバイアス誤差 $\hat{w} - w$ は, 最大で 0.28 gf と小さく, 要求される測定精度を満足する値であった。
- 2) 標準偏差 σ_w はフィルタ係数を求めるために使用した信号系列と, そのフィルタ係数を用いて重量測定を行った信号系列が同じ場合 (表-1 の対角項に相当) には 0 gf であるが, 他の係数を使用した場合 (表-1 の非対角項に相当), 最大 1.62 gf と期待より大きな値であった。

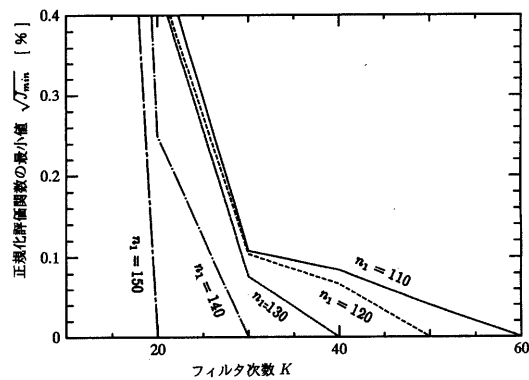


図-9 区間の終点 $n_2=170$ 一定とし, 区間の始点 n_1 を 110 から 150 まで変化させたときの次数 K による正規化評価関数の最小値 $\sqrt{J_{\min}}$ (%)

表-1 様々な信号の係数による影響 (真値は 222.7 gf)

フにイ使用ルタし係数を求めるため	使用係数*		重量測定に用いた信号系列		
			$y_a(n)$	$y_b(n)$	$y_c(n)$
(a) $y_a(n)$	測定重量 \hat{w}		222.7 gf	222.61 gf	222.42 gf
	標準偏差 σ_w		0.0 gf	1.5 gf	1.34 gf
(b) $y_b(n)$	測定重量 \hat{w}		223.85 gf	223.66 gf	223.40 gf
	標準偏差 σ_w		1.32 gf	0.0 gf	1.62 gf
(c) $y_c(n)$	測定重量 \hat{w}		221.89 gf	221.81 gf	221.58 gf
	標準偏差 σ_w		0.86 gf	0.90 gf	0.0 gf

* (a) 信号系列 $y_a(n)$ の係数, (b) 信号系列 $y_b(n)$ の係数, (c) 信号系列 $y_c(n)$ の係数

3.4.2 最適フィルタ次数

3.3 節の結果と考察から、一つのロードセル出力について、次数 K と測定区間長 N が $K=N-1$ のときに正規化評価関数が最小になることが分かったので、次に、一つのロードセル出力の正規化評価関数を最小にする係数を様々な信号に適應させ、最適次数と測定区間長を求める。ただし、測定区間の終点 n_2 はできるだけ平坦部分の最後が良いと思われるので、 $n_2=170$ とした。図-10 は信号系列 $y_c(n)$ について、次数 K と区間 n_2-n_1 が等しい場合のフィルタ次数に対するフィルタ評価を图示している。図-10 の (a) はバイアス誤差、(b) は標準偏差であり、標準偏差は信号系列のなかの最大値を表示している。フィルタ次数が 40 次するとき標準偏差が最小である。これは次のように考えられる。

- 1) 信号系列 $y_c(n)$ の平坦部は、区間 $n_1=70$ から $n_2=170$ であるため、最高次数は平坦部の区間の半分である 50 次以下が最良であり、50 次以上であれば平坦部以外も含めてフィルタリングするため、平坦部以外の信号が測定区間のフィルタ出力に現れるので、標準偏差が大きくなると考えられる。従って、フィルタ次数の最大値はロードセル出力の平坦部分の区間長の半分とすることが理想的であるといえる。
- 2) フィルタ次数の最小値はできるだけ小さい方が好ましいが、少ない次数では他のロードセル出力との同期の問題も考えられ、不要信号の 1 波長以上の次数であれば同期の問題はなくなると考えられる。伝達関数の除去している最低周波数は 8.7 Hz であったので、 $8.7 \text{ Hz} = 114 \text{ ms}$ の関係とサンプリング周期 4 ms により 1 周期が 28 ポイントであるから、フィルタ次数は 29 次以上が必要であると

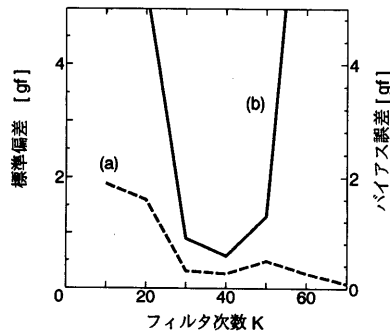


図-10 次数 K と区間 n_2-n_1 が等しいときの最適フィルタ次数
(a) バイアス誤差, (b) 標準偏差

考えられる。しかし、最終的には次数を変化させたときの測定区間のバイアス誤差と標準偏差から判断する必要があると考えられる。

4. ま と め

本論文は、重量計測におけるロードセルの不要振動除去に適した FIR フィルタの設計方法と評価を述べた。前報¹⁾の FIR フィルタにおいて、重量計測の測定精度が 0.5% 以内であるためには 150 以上の次数が必要であったが、この報告に述べたフィルタの設計方法では 30 次程度で構成できることが分かった。図-11 は本論文で行ったフィルタ設計・評価の説明図である。観測できるロードセル出力②は、①の理想的なロードセル出力に機械雑音が重畳され、重量から電圧変換が行われ、更に電気雑音が重畳されたものである。図-11 のフィルタ③は、測定区間長 $N (=n_2-n_1+1)$ における真の重量値に対する誤差 (説明図の黒色の面積) の最小化である。③は周波数領域で設計した理想ローパスフィルタであり、遮断特性のシャープネス、通過域のフラットネスを考慮して設計するために、150 次の

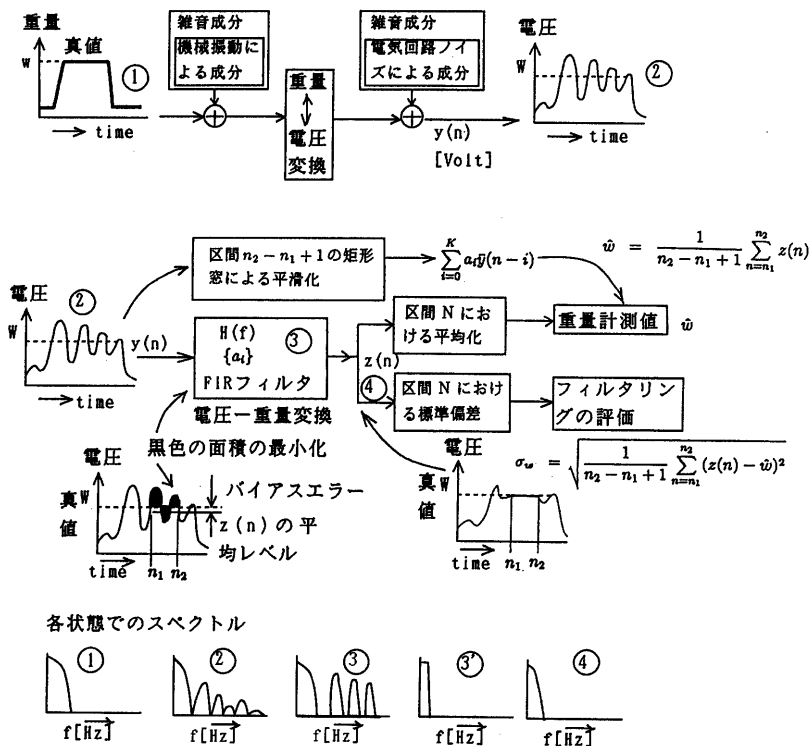


図-11 フィルタ設計・評価の説明図

タップが必要であったが、本論文で提案したフィルタ③は不要な周波数成分のみを除去するので、少ない次数で構成できる。④はフィルタ出力のスペクトルである。フィルタの評価は重量計測値 \hat{w} と標準偏差 σ_w により評価した。

次にフィルタの最適化で分かったことは、フィルタのモデルに必要な次数と区間の関係について、各個別の信号列に対しては、3.3節の結果と考察からフィルタ次数 K と測定区間長 $N = n_2 - n_1 + 1$ の関係が $K = N - 1$ のとき正規化評価関数 J が最小になり、最良のフィルタ出力が得られる。この $K = N - 1$ の条件で得られるフィルタ係数を様々な信号に適応した場合は、フィルタ次数が 40 次のとき最小の標準偏差が得られた。以下に重量計測に最適なフィルタの設計法をまとめる。

- 1) 信号系列 $y_a(n)$, $y_b(n)$ を測定する。
- 2) 信号系列 $y_a(n)$ について、被測定物が計量コンベアへ載り移ってから計量コンベアを出るまでの平坦部分の区間長を確認する。
- 3) フィルタの最高次数を平坦部分の半分とする。たとえば平坦部分が $n_1 = 70$ から $n_2 = 170$ であれば、

最高次数 K を 50 次とする。

- 4) 測定区間長 N とフィルタ次数 K を $K = N - 1$ とした評価関数を最小にする条件で、フィルタ次数を最高次数から順次下げてゆき、信号系列 $y_a(n)$, $y_b(n)$ に対する標準偏差が最小になる次数を選ぶ。

謝 辞

日頃ご助言をいただくニッカ電測(株)浜田良一開発部長に感謝いたします。

文 献

- 1) 上村久仁男, 金井 浩, 中鉢憲賢, “生産ラインでの高速高精度重量計測のためのデジタルフィルタの設計と評価,” 音響学会誌 50, 279-288 (1994).
- 2) 樋口龍雄, デジタル信号処理の基礎 (昭晃堂, 東京, 1984), pp. 109-110.



上村 久仁男

昭和51年芝浦工業大学工学部通信工学科卒業。同年、電測工業(株)(現ニッカ電測(株))入社。入社以来、高電圧放電現象を応用したピンホール検査機、CCDカメラを用いた異物検査機、打缶音による缶真空不良検査機などの非破壊検査装置の設計・研究開発に従事し、最近ではデジタル信号処理の計測への応用研究に従事。現在、技術開発部次長。平成7年工学博士(東北大学)。日本音響学会会員。



金井 浩

昭和56年東北工業大学工学部卒業、昭和61年同大学院博士課程修了。工学博士。同年同大学情報処理教育センター助手、昭和64年同大学工学部電気工学科助手。専任講師を経て、平成4年6月同電気工学科助教授、現在に至る。超音波による医用生体計測と音響振動に関するデジタル信号処理に関する研究に従事。昭和62年石川賞、平成2年日本音響学会粟屋賞、平成3年電子情報通信学会篠原賞等、平成7年本学会佐藤論文賞受賞。日本音響学会、電子情報通信学会、電気学会、日本機械学会、日本超音波医学会、日本ME学会、日本循環器学会、情報理論とその応用学会、IEEEの各会員。



中鉢 憲賢

昭和31年東北大学工学部卒業。工学博士。昭和40年東北大学電気通信研究所助手、昭和41年同研究所助教授、昭和54年より東北大学工学部電気工学科教授。この間、音響及び超音波工学の研究に従事し、特に超音波計測においては、我が国の超音波顕微鏡の開発に大きく貢献している。昭和39年電子通信学会稲田賞、平成2年に電気学会学術振興賞(進歩賞)及びIEEE-UFC論文誌最優秀論文賞等、平成7年科学技術庁長官賞(科学技術功労者)及び本学会佐藤論文賞受賞。日本音響学会(平成2年～3年東北支部長、平成3年より理事、平成7年から副会長)、電気学会、電子情報通信学会、応用物理学会、IEEE、超音波医学会、日本ME学会、日本機械学会、非破壊検査協会の各会員。