

2次適応 FIR フィルタを用いた高速自動重量選別機のための計量方法の提案

福田謙吾*・吉田浩治**・衣笠哲也**・加門守人***・香川洋一郎***

A New Weighing Method for Checkweighers by Using
the Second Order Adaptive FIR Filter

Kengo Fukuda*, Koji Yoshida**, Tetsuya Kinugasa**,
Morihiro Kamon*** and Yoichiro Kagawa***

A checkweigher is an automatic machine to measure the weight of in-motion products. It is usually equipped with an optical device to make a trigger for setting time duration to allow a product to move on weigh conveyor belt completely for sampling the weight. In this paper, a new weighing method for checkweighers is proposed which uses just signal processing without the optical device. The method is supposed to be implemented as the program on the micro controller with which a conventional checkweigher is equipped. To minimize calculation load, the method utilizes the second order adaptive FIR filter determined from the simple linear regression analysis for the estimation of the mass of an object and the natural frequency of the mechanical structure for weighing which can check the validity of the estimation. The effectiveness of the method is shown through experiments. Also a possibility of faster estimation of weight is shown.

Key Words. Checkweigher, Weighing method, Signal processing, Second order Adaptive FIR filter

1. はじめに

高速自動重量選別機は工業製品などをコンベアなどで搬送しながら質量を測定する装置である。これは、一般的には生産ラインの終端近くに配置され、製品の質量が定められた範囲内か範囲外かによって良品か不良品に自動的に選別する。生産性向上のために、この装置には質量測定の高速度と高精度性が求められる。

Fig.1 に示すように、一般的な高速自動重量選別機は3つのコンベアからなる。搬入コンベア、計量コンベア、排出コンベアである。計量コンベアはロードセルのような荷重変換器の上に設置される。高速自動重量選別機は荷重変換器からの信号を適切に採取して被計量物の質量を測定しなければならない。このために、一般には光電スイッチのような非接触のセンサを搭載している。Fig. 2 に示すように、このセンサは搬入コンベアと計量コンベアの上に配置され、被計量物の計量コンベアへの乗り込みを検知できる。このセンサからの



Fig. 1 Checkweigher

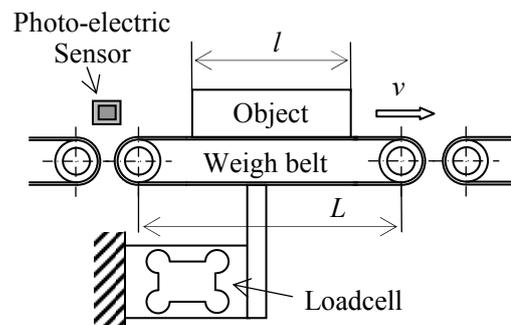


Fig. 2 Object on weigh belt

* 元応用計測工業(株)振動研究開発室
** 岡山理科大学工学部 岡山市理大町 1-1
*** 大和製衡株式会社自動機器事業部 明石市茶園町 5-22
* Former engineer of Vibration R&D, Oyo Measurement Co., Ltd
** Department of Mechanical Systems Engineering, Okayama University of Science, Okayama
*** Automatic Machinery R&D, Yamato Sale Co., Ltd., Akashi
(Received September 3, 2010)

信号は、被計量物が計量コンベアに完全に載っている時間間隔を推測するために用いられ、その時間間隔における荷重変換器からの荷重信号に基づいて計量値が決定される。被計量物が計量コンベアに完全に載っている時間間隔に対応した荷重信号の部分で“有効部”と呼ぶことにする。しかし、光電スイッチを用いる場合、被計量物の形状に高さの制約が課せられることになる。そこで、荷重変換器からの荷重信号に何らかの処理を施すのみで有効部を判定することができれば、光電スイッチを用いずに計量値を決定できる。これにより、コストを削減したり、被計量物の高さ制限を排除したりすることができる。しかし、高速自動重量選別機はさまざまな被計量物に対処する必要があり、また、コンベア速度もさまざまであるので、上述したような信号処理アルゴリズムを確立することは難しい。この困難は、高速自動重量選別機が運動している物体の質量を測定しようとすることに起因する。高速自動重量選別機による被計量物の質量測定は動的質量計測問題^{1)~3),7)}の一つであると捉えることができる。

高速自動重量選別機に関する研究としては、まず、小野ら¹⁾の動的質量計測に関する初期の研究として差動変圧器を用いたレバー式の自動重量選別機を対象としたものがある。そこでは、対象の高能率化を計量機構の動特性改善問題として捉え、これを線形動的システムの状態推定問題として定式化した。シミュレーションと試作機による実験を通して動的質量計測の有効性と実施可能性を示している。Leeら⁸⁾は高速自動重量選別機やコンベヤスケールを対象にした測定速度と精度の向上に取り組んでいる。まず、被計量物の計量台への乗り込みをステップ状であると仮定し、計量台の動特性を変位に関する線形二階常微分方程式で表現している。これに基づき、変位信号を二次の差分方程式で表現し、そこでの係数を信号のデータを用いて逐次型最小自乗法で推定することによって質量を得る方法を提案している。シミュレーションによって検証はしているが、高速自動重量選別機が搬送機構を持つことなどに起因して変位信号に重畳する機械的外乱としての振動等については考慮がなされていない。また、Kameokaら⁹⁾は計量コンベアがロードセルによって支持されているタイプの高速自動重量選別機を対象にしている。被計量物の計量コンベアへの乗り込みは光電スイッチによって検知し、荷重信号をローパスフィルタとノッチフィルタによって平滑化する信号処理を行っている。この方法を実機によって精度の検証を行っている。野田ら¹⁰⁾はコンベアライン上で搬送される物体を連続的に秤量するシステムを対象としている。計量コンベアはロードセルによって1点で支持されたタイプであり、被計量物の乗り込みは光電スイッチによって検出される。荷重信号をFIRフィルタによって平滑化し、最大値をもって計量値とする実用的で簡易な方法を提案し、この方法による精度を実験によって確認している。さらに、田崎ら^{11),12)}は、複数個の計量コンベアを配置して、それぞれのロードセルから得られる出力を組み合わせることで物体の質量

を測定する多連秤による連続秤量に取り組んでいる。このシステムにおいても光電スイッチが用いられ、荷重信号は同じ信号処理法が用いられている。梅本ら¹³⁾は搬送機構が滑走式でばね式はかりを持つ高速自動重量選別機を対象にしている。はかりの品物台への被計量物の乗り込みは光電スイッチによって検知するタイプである。これは小野らが文献²⁾で使用したものと同一である。品物台の変位信号の過渡応答が減衰振動であることに注目し、その周波数を求めることで被計量物の質量が求められることを利用した方法を提案している。振動成分の周波数は最小二乗法を用いた適応フィルタで推定している。品物台の質量、ばね定数、ばねの粘性係数をあらかじめ精度良く同定しておく必要があるが、実験によって、提案法で高い精度が得られることを示している。また、梅本ら¹⁴⁾はロードセルによって支持された計量コンベアを持つメーカー製の自動重量選別機も対象にしている。被計量物の計量コンベアへの乗り込みは光電スイッチによって検知する。能動ベルトコンベアを採用しているために機械的外乱が生じるが、その除去のために荷重信号に移動平均と適応ノッチフィルタによる処理を行うことを提案している。実験によって、被計量物が長い場合でも、精度を向上させることができることを示している。近年、Yamakawaら¹⁵⁾は電磁力補償型(EMFC)の高速自動重量選別機について動特性モデルを導出し、その妥当性を実験によって確認している。亀岡ら¹⁶⁾はばね式はかりを持つ自動重量選別機を対象にして、それを設置する基礎部の振動が選別精度に与える影響を検討している。ある基準値に対する被計量物の質量の大小によって被計量物が選別される時、基準値近くの質量を持つ被計量物は外乱などによってどちらにも選別される可能性がある。このような問題に対して、選別確率を定義し、基礎部の振動が正規定常不規則である場合に対して選別確率の近似式を理論的に導出し、シミュレーションで検証している。さらに、中谷ら¹⁷⁾はロードセルで支持された計量コンベアを持つタイプの高速自動重量選別機を対象にして、その基礎振動に起因する測定値の誤差を補償する方法の有効性を実験によって示している。基礎振動を検知するセンサとしてやはりロードセルを用いている。

本論文では、計量コンベアにはただ一つの被計量物が存在するものとして、光電スイッチを用いることなく荷重信号の有効部(計量に使用できる部分)を判定し、その有効部の信号を用いて高精度な計量値を得る新しい信号処理法を提案する。さらに能動計量コンベアがロードセルによって支持されたタイプの高速自動重量選別機を用いた実験によって提案法の有効性を示す。

2. フィルタを用いた計量方法

著者らの、走行車両の軸重値計測に関する研究^{6),19)-21)}において、有効部を判定する簡易な方法を提案している。軸重値の測定の場合、有効部はタイヤと路面との接触面が完全に

軸重計の載荷板上にある時間間隔に対応する荷重信号の部分である。この方法は、荷重信号を差分処理して得られる特徴的な点に基づいて有効部を判定する。

Fig. 3 に仮想的な軸重計の荷重信号とその差分信号およびそれらの信号上にあるいくつかの重要な点を示す。 $\{w(kT)\}$ ($k \in Z$)は荷重信号 $w(t)$ からサンプリング時間 T で採取された離散時間信号である。 $\{x(kT)\}$ は $\{w(kT)\}$ を平滑化した信号で振動成分は含まれていないものとする。すなわち、

$$x(kT) = H(z)w(kT). \quad (1)$$

ここで、 $H(z)$ はローパスフィルタである。 $\{\Delta x(kT)\}$ は $\{x(kT)\}$ を差分した信号である。すなわち、

$$\Delta x(kT) = (z-1)x(kT). \quad (2)$$

以下に図中の主な記号の意味をまとめる。

L : 載荷板長 (車両進行方向)

l : タイヤ接地長, \hat{l} は l の推定値

v : 車両速度

A_T : 真の有効部開始点, $A_T = (a_T, w(a_T))$

B_T : 真の有効部終了点, $B_T = (b_T, w(b_T))$

A : 有効部開始点, $A = (a, w(a))$

B : 有効部終了点, $B = (b, w(b))$

S : タイヤ乗込開始点, $S = (s, \Delta x(s))$

P : 最大速度, $P = (p, \Delta x(p))$

s 点はタイヤが載荷板に接触する瞬間であり、 P 点は差分信号 $\{\Delta x(kT)\}$ のピークである。なお、図の $\{x(kT)\}$ のフィルタ処理による時間遅れは補償されている。

高速自動重量選別機の荷重検出器からの荷重信号は Fig. 3 に示される軸重計の荷重信号と同じパターンを持つ。したが

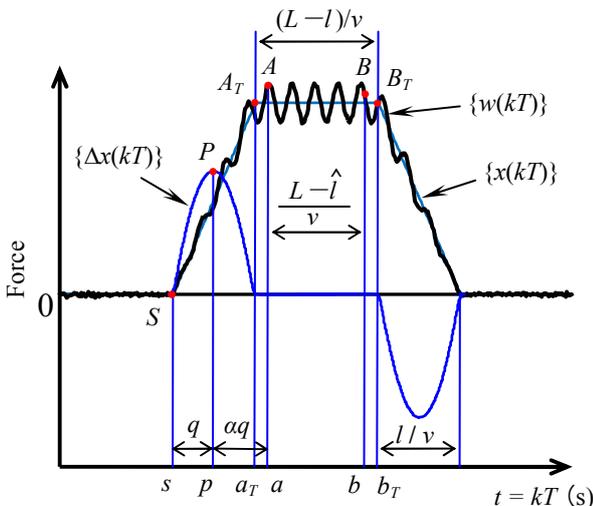


Fig. 3 Typical virtual weight signal $\{w(kT)\}$ from the weighbridge of an axle weighing system, its smoothed signal $\{x(kT)\}$ and the differential signal $\{\Delta x(kT)\}$

って、軸重計の荷重信号における有効部を判定するために提案した簡易な方法を適用できる。自動重量選別機においては、 L , l , v はそれぞれ計量コンベア長、被計量物長、被計量物移動速度に対応する (Fig. 2 参照)。 v はコンベア速度としてあらかじめ知ることができるので、荷重信号の真の有効時間区間を $[a_T, b_T]$ とすると、

$$b_T - a_T = (L-l)/v \quad (3)$$

の関係が利用できる。このことによって、事情はさらに簡単になり、図に示した S 点と P 点を見つけるだけで、 a_T , b_T の推定値 a , b が得られる。 α は正の数であり、 l は被計量物の長さである。通常は $\alpha=1$ とすればよいが、必要ならばローパスフィルタ $H(z)$ の特徴を考慮して、 α に適切な値を設定する。ロードセルから得られた荷重信号 $\{w(kT)\}$ は振動成分 (たとえば、床の常時微動や被計量物が計量コンベアに乗り込む時に発生する衝撃に起因する振動) を必ず含むので、ローパスフィルタを用いる必要がある。コンベア速度が低い場合は、荷重信号を十分に平滑化する高次フィルタを用いることができるので、Fig. 3 に示した有効部を簡単に判定することができる。そして、 g を重力加速度定数とすると

$$m(kT) = H(z)w(kT)/g \quad (4)$$

は振動成分を含まないので、測定質量値 (計量値)

$$\hat{m} = \frac{1}{1+(b-a)/T} \sum_{kT \in [a, b]} m(kT) \quad (5)$$

が容易に得られる。

平滑フィルタ $H(z)$ として 101 タップ FIR フィルタを用いて、実測した $\{w(kT)\}$ (コンベア速度 30 m/min) を平滑化したところ、十分に滑らかな $\{\Delta x(kT)\}$ が得られた。すると、 S 点と P 点を簡単に見つけ出すことができ、 $[a, b]$ がただちに得られた²²⁾。この時の $\{w(kT)\}$, $\{x(kT)\}$ および $\{\Delta x(kT)\}$ と S 点と P 点および判定された有効部開始点 A , 終了点 B を Fig. 4 に示す。

しかし、コンベア速度が速い場合は高次のローパスフィルタを用いることができない。これは、高次のローパスフィルタを用いると、算術平均を取るべき有効部の長さが非常に短くなってしまふからである。すなわち、Fig. 3 に示す区間 $[s, a_T]$ は $\{\Delta x(kT)\}$ が 0 の値をとらない区間であるが、この区間はローパスフィルタの次数が大きくなるにつれて長くなる。そのため、平滑化された荷重信号に Fig. 3 に示す方法を適用した場合、 a_T の推定値である a が b_T (または b) のごく近くの位置や b_T を超えた位置となる不都合が生じる。当然、そのような場合は、計量値の推定ができなくなる。

この様子を Fig. 5 に示す。Fig. 4 と同じ寸法の被計量物をコンベア速度 80 m/min で計測すると、 $a > b$ となってしまう、適切な有効部が得られていないことが確認できる。

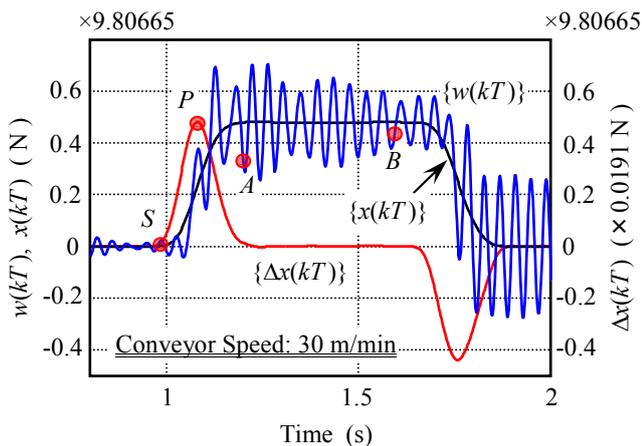


Fig. 4 Actual $\{w(kT)\}$, $\{x(kT)\}$ and $\{\Delta x(kT)\}$ and the determined points in case that conveyor speed is 30m/min

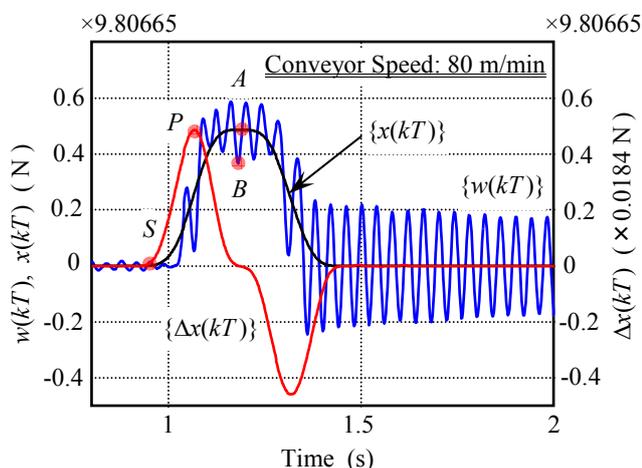


Fig. 5 Actual $\{w(kT)\}$, $\{x(kT)\}$ and $\{\Delta x(kT)\}$ and the determined points in case that conveyor speed is 80m/min

このような理由で低次のローパスフィルタを使わなければならないが、その結果、差分信号 $\{\Delta x(kT)\}$ は十分に滑らかな系列にならず、適切な S 点、P 点を判定することが困難になる。

3. 新計量方法

3. 1. 信号処理システム

上で述べた不都合を回避するため、ローパスフィルタ $H(z)$ の一部分に 2 次適応 FIR フィルタを採用した新計量方法を提案する。新計量方法の信号の流れを Fig. 6 に示す。ロードセル信号はアンプ、アンチエイリアスフィルタ、サンプリング、校正を経て離散時間荷重信号 $\{w(kT)\}$ となる。マイクロコントローラ (CPU システム) 上に実装されたデジタルフィルタ $H_p(z)$ によって、 $\{w(kT)\}$ は動的成分 (計量に最

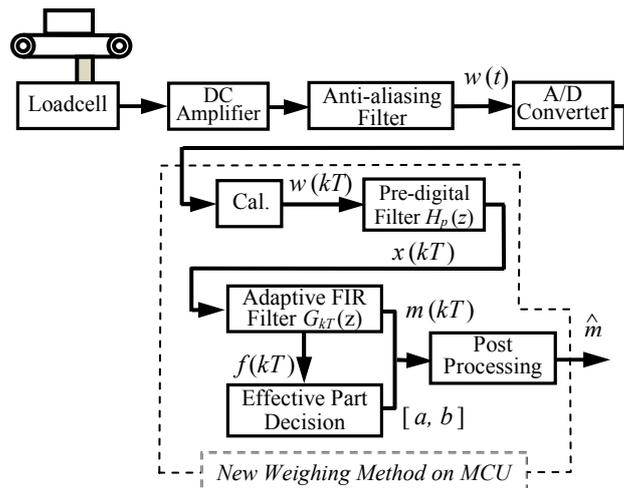


Fig. 6 Diagram of the signal processing in New weighing method

も大きな影響を与える卓越振動成分。ほとんどの場合秤機構の固有振動である) 以外のノイズが除去された平滑化荷重信号 $\{x(kT)\}$ となる。完全に振動成分を除去した 2 とは異なり、 $\{x(kT)\}$ は動的成分 (卓越振動成分) を含んでいる。

つぎの段階で、時間遅れを小さくするため、2 次適応 FIR フィルタ $G_{kT}(z)$ を用いて $\{x(kT)\}$ に含まれる動的成分を除去する。このときの出力信号 $C(kT) = G_{kT}(z)x(kT)$ を校正すると計量値 $m(kT)$ が得られる。以上の関係を式でまとめると、

$$x(kT) = H_p(z)w(kT) \quad (6)$$

$$C(kT) = G_{kT}(z)x(kT) = H_p(z)G_{kT}(z)w(kT) \quad (7)$$

$$m(kT) = \frac{C(kT)}{G_{kT}(1)g} \quad (8)$$

となる。この場合、(4) 式の伝達関数は

$$H(z) = \frac{H_p(z)G_{kT}(z)}{G_{kT}(1)} \quad (9)$$

となる。 $G_{kT}(z)$ の係数をサンプリング毎に更新する(9)式を用いることで、全体のフィルタ長を短く抑えている。

3. 2. 2 次適応 FIR フィルタ $G_{kT}(z)$

短いフィルタ長で、効果的な振幅特性を持つローパスフィルタ $H(z)$ を実現する目的で、適応フィルタ $G_{kT}(z)$ を用いる。最も簡単な構造は

$$G_{kT}(z) = 1 + \beta(kT)z^{-1} + z^{-2} \quad (10)$$

である。適応動作で算定される係数は $\beta(kT)$ のみである。最小 2 乗法を用いると、(7)式の $C(kT)$ と $\beta(kT)$ は同時に得られる。すなわち、

$$\min_{\beta(kT)} \sum_{r=k}^{k+n-3} e^2(rT), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} e(rT) &= x((r+2)T) + x(rT) + \beta(kT)x((r+1)T) - C(kT) \\ &= G_{kT}(z)x((r+2)T) - C(kT). \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $k = a/T, a/T+1, \dots, b/T-n+1, n \geq 4$. ただし、 n は $G_{kT}(z)$ の同定に使用するデータ列

$$\{x(kT), \dots, x((k+n-1)T)\}$$

の個数である.

(8)式によって計量値 $m(kT)$ を得るが、以下に示すように、 $t = kT$ における動的成分周波数 $f(kT)$ も推定できる. まずフィルタの零点 $\sigma(kT)$, $\overline{\sigma(kT)}$ を計算する. すなわち,

$$G_{kT}(z) = (1 - \sigma(kT)z^{-1})(1 - \overline{\sigma(kT)}z^{-1}). \quad (13)$$

ここで、 $\overline{\sigma(kT)}$ は $\sigma(kT)$ の共役複素数である. すると、動的成分周波数 $f(kT)$ は零点の偏角を計算することによって得られる. すなわち,

$$f(kT) = \angle \sigma(kT) / (2\pi T) (> 0). \quad (14)$$

このように、 $G_{kT}(z)$ は最も単純な構造であるが、計量値 $m(kT)$ と周波数値 $f(kT)$ を得ることができる.

被説明変数を $x((k+2)T) + x(kT)$, 説明変数を $x((k+1)T)$ とすると、(12)式より、 $-\beta(kT)$, $C(kT)$ は回帰係数、回帰定数となる. 単回帰分析の演算量で適応フィルタ $G_{kT}(z)$ が決定されるので、 $G_{kT}(z)$ の構造は演算負荷軽減に大きく寄与する. また、最小2乗法によって、 $e(kT) \cong 0$ となっているので、(12)式において $e(kT)$ を無視すると、時間区間 $[kT, (k+n-1)T]$ において有効な差分方程式

$$\begin{aligned} x((k+2)T) + \beta(kT)x((r+1)T) + x(kT) \\ = C(kT) = \text{Const}. \end{aligned} \quad (15)$$

が得られる. 解と係数の関係から、上式の同次方程式の特性解、すなわち $G_{kT}(z)$ の零点には

$$\sigma(kT)\overline{\sigma(kT)} = |\sigma(kT)|^2 = 1 \quad (16)$$

の関係がある. したがって、(15)式の一般解は

$$x(kT) = X_0 \sin(2\pi \tilde{f}kT + \phi_0) + \tilde{m}g \quad (17)$$

となる. ただし、 $[kT, (k+n-1)T]$ で $f(kT)$, $m(kT)$ は一定であるので

$$\tilde{f} = f(kT), \quad \tilde{m} = m(kT) \quad (18)$$

とおいた. X_0 , ϕ_0 は初期条件で決まる定数である. このように、 $G_{kT}(z)$ を用いることは、秤機構 (計量機構) は質量-ばね系システムであると仮定していることになる.

実際の秤機構には若干の粘性抵抗や固体摩擦などが存在するが、短時間データであるので無視することができる. したがって、計量中は外力が作用しないので、(15)式から得られた $\tilde{f} = f(kT)$ が秤機構の固有振動に近ければ、被計量物の計量コンベア乗込時に発生する衝撃の影響は終息し、(17)式が成立していることになり、 $kT \geq a_T$ であると判定できる. ゆえに、乗込が始まる Fig. 3 の S 点の近傍点を起点にし、

$G_{kT}(z)$ から得られる $\{f(kT)\}$ から $[a, b]$ を決定することができる. このとき、差分信号 $\{\Delta x(kT)\}$ は必要ではないので、高次数の $H_p(z)$ を用いる必要もない.

3. 3. 乗込開始点 S と有効部終了点 B の判定

まず、Fig. 3 に示した乗込開始点 $S = x(s)$ を判定する. S の判定精度は計量精度に直接影響しないので、およその値が得られる簡単な方法が望ましい. ここでは、計量コンベア上にはただ一つの被計量物が存在することにして、大小比較のみを用いた最も直感的な方法の一つを Fig. 7 に示す. すなわち、しきい値 M_{UP} , M_{LW} を用いて、

$$m(s' + (N_S - 1)T) \geq M_{UP}, \quad (19)$$

$$m(s') \geq M_{LW} \quad (20)$$

となる最初の s' をみつけて、

$$s = s' + N_D T, \quad 0 \leq N_D < n \quad (21)$$

$$S = (s, x(s)) \quad (22)$$

とすればよい. N_S は適当なデータ点数、 $N_D T$ は $\{m(kT)\}$ の位相遅れに相当する時間である. N_D は、 $M_{LW} = 0$ ならば、 $N_D = n - 1$ としてよいが、 N_D はしきい値 M_{LW} と後述する $\{m(kT)\}$ の突発的変動を考慮して決定すべきである. 通常 $N_D \cong n/2$ 程度でよい.

コンベア速度 v とコンベア長 L は既知であるので、有効時間終了点 b もただちに得られる. すなわち、

$$b = s + L/v \quad (23)$$

$$B = (b, x(b)) \quad (24)$$

となる.

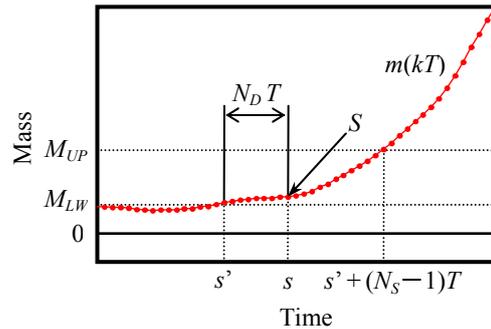


Fig. 7 Location of S and the points for determining S

3. 4. 有効部開始点 A の判定

ここでも、直感的な判定方法の一例を示す. S 点 that 得られた後、以下の不等式を満足する a 点を見つけ出す.

$$f_{LW} \leq f(a) \leq f_{UP}, \quad a > s \quad (25)$$

$$f(a-T) < f_{LW} \text{ or } f(a-T) > f_{UP} \quad (26)$$

この点を Fig. 3 で示された有効時間開始点 a として採用すれば,

$$A = (a, x(a)) \quad (27)$$

を得る. ここで f_{LW}, f_{UP} は許容範囲の上下限值である. この範囲内に秤機構の固有振動数 f_m が存在する. 重量自動選別機は, 選別のための質量値をあらかじめ設定しておくので, およその被計量物質量はわかっている. 被計量物質量を m , 計量コンベア (駆動モータ, 取付金具などを含む) の等価質量を M , ロードセルの等価ばね定数を K とすると, 秤機構の質量-ばね系の近似モデルの固有振動数 f_m は

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m+M}} \quad (28)$$

によって算定できるので, 許容範囲 $[f_{LW}, f_{UP}]$ に適切な数値を与えることは可能である. すなわち,

$$f_{LW} = f_m - \Delta_f, f_{UP} = f_m + \Delta_f, \Delta_f \ll 1$$

とすることができる. しかし, 選別機能を利用せずコンベアスケールとしての使用を想定したとき, 無荷重から秤量 m_F までを考慮するので

$$f_{LW} = f_0 - \Delta_f, f_{UP} = f_{m_F} + \Delta_f$$

となり, 許容範囲が広く設定される. そうなれば, 乗込が完了する前 (Fig. 3 において $kT < a_T$ となる範囲) の計量値を取り込む危険性が高くなる. この場合, 適切な計量値を選択しているとは言い難い. さらに高精度な質量推定値を選択する必要であるならば, $[f_{LW}, f_{UP}]$ をさらに小さな区間に分割して吟味する必要がある.

3. 5. 測定質量値 \hat{m} の算定

動的成分周波数 $f(kT)$ に応じて計量値 $m(kT)$ を分類した度数分布表を作成する. すなわち, 区分

$$\begin{aligned} [d_i, d_i + \Delta d) \subset [f_{LW}, f_{UP}], \\ d_{i+1} = d_i + \Delta d, i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (29)$$

を導入し, $m(kT)$ を区分ごとに分類する. 分類された $m(kT)$ の集合 M_i は

$$\begin{aligned} M_i = \{ m(kT) \mid f(kT) \in [d_i, d_i + \Delta d), kT \in [a, b_n] \}, \\ b_n = b - (n-1)T \end{aligned} \quad (30)$$

となる. $m(b_n)$ は時間区間 $[b - (n-1)T, b]$ において算定されるので, $m(b_n)$ が有効部における最後の計量値である. $m(b_n)$ が得られた時点で度数分布表は完成する. ただちに M_i の要素を評価し, 最適な集合 M_l を選択し, M_l に含まれる $m(kT)$ の平均値を計量値 \hat{m} として採用する. すなわち,

$$\hat{m} = \frac{1}{n_l} \sum_{m(kT) \in M_l} m(kT) \quad (31)$$

を得る.

言うまでもなく, 最適な集合 M_l の定義は重要である. 最も簡単なものは, 最も要素数の多い集合を最適な集合 M_l とすることであろう. すなわち, 評価規準値を

$$n_l = \max \{ n_i = n(M_i), i = 1, 2, \dots \} \quad (32)$$

とする. また, 要素の分散 V_i が最も小さい集合を最適な集合 M_l とすることは極めて自然であろう. すなわち, M_l の要素の分散は

$$V_i = \min \left\{ V_i = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{m(kT) \in M_i} (m(kT) - \bar{m}_i)^2, i = 1, 2, \dots \right\} \quad (33)$$

となる. ただし, \bar{m}_i は M_i に属する計量値の平均値である.

3. 6. 算定手順

3. 3 から 3. 5 で述べたフィルタリング演算, 適応計算および不等式を用いた判断などを実行するのが新提案方法である. 高速自動重量選別機においては, 新提案方法をリアルタイムで実行しなければならない. 測定質量値 \hat{m} を得る(31)式の演算を除く処理はサンプルごとに実行すべきである.

リアルタイム処理を考慮して計算項目と手順をまとめると, 以下ようになる.

Step0) 準備

1) 前置フィルタ $H_p(z)$ の設計:

離散荷重信号 $\{w(kT)\}$ の先験的情報をもとに, $\{w(kT)\}$ のノイズ成分を効果的に除去するプレフィルタを設計する.

2) しきい値などのパラメータの設定:

(19)式の M_{UP} , (20)式の M_{LW} に適切な値を設定する. (25)式の f_{LW}, f_{UP} に適切な値を設定する. (29)式の周波数区分 $[d_i, d_i + \Delta d)$, $i = 1, 2, \dots$ を設定する.

3) フラグ変数の準備:

乗込開始点 S が得られたとき S_FLAG=1 とする.
有効部開始点 A が得られたとき A_FLAG=1 とする.

Step1) 開始:

S_FLAG=0, A_FLAG=0 とする.

Step2) 最新値 $x(k + (n-1)T)$ の取得:

(6)式により平滑化荷重

$$x(k + (n-1)T) = H_p(z)w(k + (n-1)T + D)$$

を算定する. ただし, D は $H_p(z)$ の位相遅れである. $H_p(z)$ の次数が充分小さいときは $D=0$ としてよい.

Step3) 動的成分周波数 $f(kT)$ と計量値 $m(kT)$ の推定:

(10), (11)および(12)式から 2 次対称係数 FIR フィルタ $G_{kt}(z)$ を得る. そして(8)式の $m(kT)$ と(14)式の $f(kT)$ を算定する.

判断 1: A_FLAG=1 ならば Step6 へ分岐する.

判断 2: S_FLAG=1 ならば Step5 へ分岐する.

Step4) Fig. 3 の乗込開始点 S と有効部終了点 B の判定:

たとえば、不等式(19), (20)を満たす s' の存在を確認し、 s' が存在すれば、(21), (23) 式の s と b を算定し、 $S_FLAG=1$ とする。

判断 3: $S_FLAG=0$ ならば Step7 へ分岐する。

Step5) Fig. 3 の有効部開始点 A の判定:

たとえば、不等式(25), (26)を満たす a を探す。 a が存在すれば、 $A_FLAG=1$ とする。

判断 4: $A_FLAG=0$ ならば Step7 へ分岐する。

Step6) 測定質量値 \hat{m} 算定の準備:

もし $f(kT)$ が(29)式の区分 $[d_i, d_i + \Delta d)$ に含まれるならば、(30)式の集合 M_i に $m(kT)$ を追加する。

判断 5: $kT > b$ ならば Step8 に分岐する。

Step7) 時間 kT の更新:

時間を更新 ($kT \leftarrow (k+1)T$) して Step2 に戻る。

Step8) 測定質量値 \hat{m} の算定:

(32), (33)式などを用いて、最適な集合 M_i を選択し、 M_i に含まれる $m(kT)$ の平均値を測定質量値 \hat{m} として採用する。つぎの計量に対処するため、Step1 に分岐する。

4. 実測荷重信号

4. 1. 新計量方法を適用する荷重信号

新計量方法を適用する実測離散荷重信号を Fig. 8, 9 に示す。 Fig. 8 の荷重信号を $\{w_1(kT)\}$ 、 Fig. 9 の荷重信号を $\{w_2(kT)\}$ とする。それらから得られた系列を $\{x_i(kT)\}$ 、 $\{m_i(kT)\}$ 、 ($i=1,2$) などと表記する。 Table 1 に示した主仕様を持つ高速自動重量選別機を用いて、同じ計量条件（被計量物寸法：95 mm×65 mm×45 mm，静止計量値：486.5 g，コンベア速度：80 m/min）で両者を取得した。なお、サンプリング時間 T は 2 ms である。

両者を比較すると、 $\{w_1(kT)\}$ は有効部の動的成分振幅は小さく、一見すると計量に適した信号であると思われる。しかし、よく見ると、有効部においてうなりを生じているように見える。周波数が近接した二つの卓越成分を含んでいる可能性が高い。もしそうであれば、前置フィルタ $H_p(z)$ は動的成分以外を抑制するので、本質的に(10)式の $G_{kT}(z)$ の適用は不可能である。一方、 $\{w_2(kT)\}$ は $\{w_1(kT)\}$ と比較すると、有効部の動的成分振幅は極めて大きく、計量には不都合な信号の

Table 1 Specifications of the checkweigher

Specification	Performance
Weighing Range	6~600 g
Max Weighing Speed	330 packs/min
Division	0.1 g
Weigh Conveyor Length	330 mm

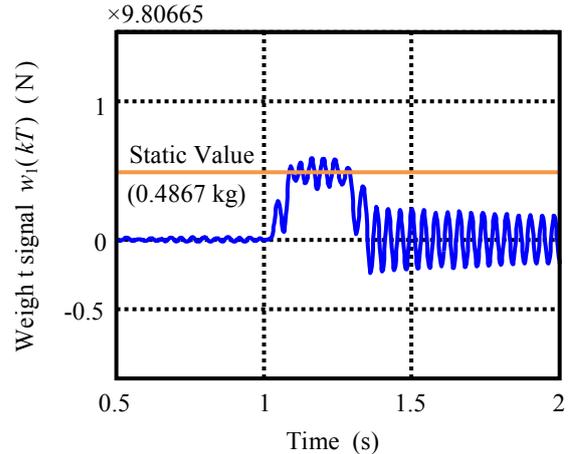


Fig. 8 Weight signal $\{w_1(kT)\}$

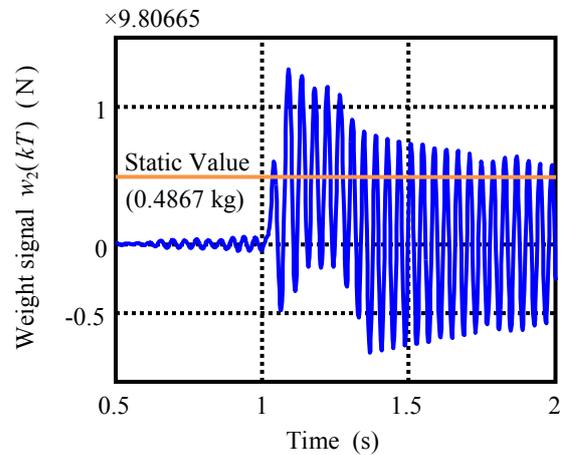


Fig. 9 Weight signal $\{w_2(kT)\}$

ように思われる。しかし、荷重信号の動的成分は典型的な質量一ばね粘性減衰器系の固有振動であれば、 $G_{kT}(z)$ の同定を精度よく行うことができるので、新計量方法にとって、うなりを含んだような $\{w_1(kT)\}$ よりも好ましいことになる。

このように同じ条件下の同じ被計量物であっても、荷重信号 $\{w(kT)\}$ の特徴は計量毎に著しく変化する。原因は被計量物の計量コンベア乗込時衝撃によるものと思われるが、このことが自動重量選別機における動的質量計測を非常に困難なものにしている。

4. 2. 前置フィルタ $H_p(z)$ の設計

0 g（無荷重）の静止計量時の応答（荷重信号）であっても、床の常時微動によって、わずかな振動成分が存在している。一方、コンベアベルト上に被計量物が移動する通常の計量であれば、乗込時の衝撃によって、静止計量時には観察できなかった振動成分が励起される場合がある。被計量物が排出された後の無荷重時の荷重信号と計量中（有効時間区間）の荷重信号のパワースペクトル密度を Fig. 10, 11 に示す。

卓越成分には[†]で位置を示した。さまざまな種類の被計量物をベルト速度 30 m/min で計量したとき得られた 12 本のスペクトルを加算平均することにより平滑化している。データ点数は 256 点、ハニング窓を用いている。

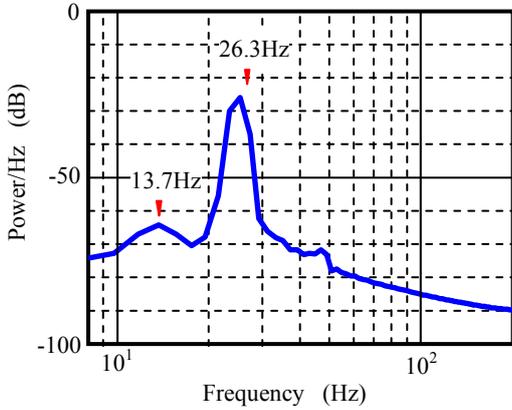


Fig. 10 Average of power spectrums of weight signals $w(t)$ after weighing

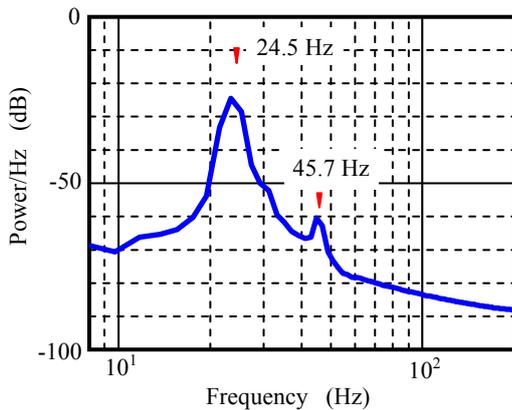


Fig. 11 Average of power spectrums of weight signals $w(t)$ during weighing

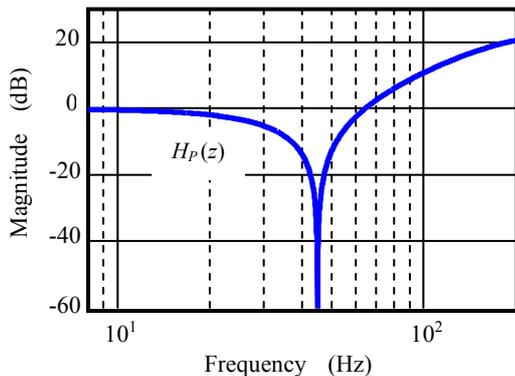


Fig. 12 Amplitude characteristic of Pre-filter $H_p(z)$

Fig. 10 と Fig. 11 を比較すると、計量中のスペクトルには、無荷重時には顕著でない 45.7 Hz 近辺の成分が卓越する。この成分が 25 Hz 近辺の固有振動に重畳されるので、この成分が無視できないとき、2 次のフィルタ $G_{kT}(z)$ では対応できない。そこで、CPU の負担を考慮して 45 Hz にノッチを持つ 3 タップ FIR フィルタ

$$H_p(z) = G(1 - b_1 z^{-1} + z^{-2}),$$

$$b_1 = 2 \cos(2\pi \cdot 45 \cdot 0.002), \quad G = \frac{1}{2 - b_1} \quad (34)$$

を用いて乗込時衝撃の影響を弱めることにした。その振幅特性を Fig. 12 に示す。なお Fig. 10 の 13.7 Hz の成分は建物床の固有振動に起因するものと思われる。

高速自動重量選別機は、計量終了後、被計量物質量が適量であるか否かを判定し、後段の振分装置（排出コンベア）に制御信号を出力しなければならない。また、計量結果に関する統計値を演算・記録する後処理機能も備えている。低速計量においては、有効時間が長いので、途中で計量を打ち切り、余った時間を質量推定計算や一連の後処理に充てることのできる。しかし高速計量においてはそのような余裕は期待できない。後処理時間に許される余裕は僅少となるので、できるだけ演算処理を AD 変換の合間に実行する必要がある。したがって、 $H_p(z)$ のタップ数はより小さい方が好ましい。また、電気回路で構成可能な IIR フィルタを用いると CPU の負担は軽減されるが、FIR フィルタと同様に位相遅れを小さく抑える必要があるため、この場合も高次数のフィルタは使用できない。

5. 実験結果

5. 1. うなりを伴った荷重信号 $\{w_1(kT)\}$

Fig. 8 に示した荷重信号 $\{w_1(kT)\}$ の平滑化信号 $\{x_1(kT)\}$ 、新計量方法の(8)式によって推定された計量値列 $\{m_1(kT)\}$ および判定された乗込開始点 S 、有効部開始点 A および終了点 B を Fig. 13 に示す。このとき(11)式における同定用データ個数は $n = 20$ とした。Table 2 は Fig. 13 から適当な $m_1(kT)$ を選択し、対応する $f_1(kT)$ と残差の二乗和

$$E_1(kT) = \sum_{r=k}^{k+17} e_r^2(rT) \quad (35)$$

を示したものである。

Fig. 13 を見ると、 $\{m_1(kT)\}$ は滑らかであることが望ましいが、1 秒付近で激しく変動している。Table 2 に示すように、最小値 $m_1(1.002) = -638.99$ g に対応する $E_1(1.002)$ は大きな値 32.4352 g²、 $f_1(1.002)$ は無意味な値 0 Hz となっている。また、無荷重時および有効時間区間における $E_1(kT)$ と比較すると、被計量物乗込中および排出中（被計量物の一部が計量コンベア上にあるとき）の $E_1(kT)$ は大きい値を取る。このとき、

$f_1(kT)$ も秤機構の固有振動数 f_m (およそ 23~25 Hz) とは異なっている. 同定用データ $\{x_1(kT), \dots, x_1((k-19)T)\}$ が非周

Table 2 Example values of $f_1(kT)$ and residual sums of squares $E_1(kT)$ correspond to $m_1(kT)$ picked up from Fig. 13

kT (s)	$m_1(kT)$ (g)	$f_1(kT)$ (Hz)	$E_1(kT)$ (g^2)	Remark
1.002	-638.99	0.00	32.4352	Before s, minimum $m_1(kT)$
1.004	242.68	6.56	39.2365	Before s, positive peak
1.040	190.25	28.73	139.5411	Loading part
1.180	485.36	25.01	0.8998	Effective part
1.242	474.95	20.99	8.9117	Unloading part
1.396	0.30	24.93	0.6833	After weighing

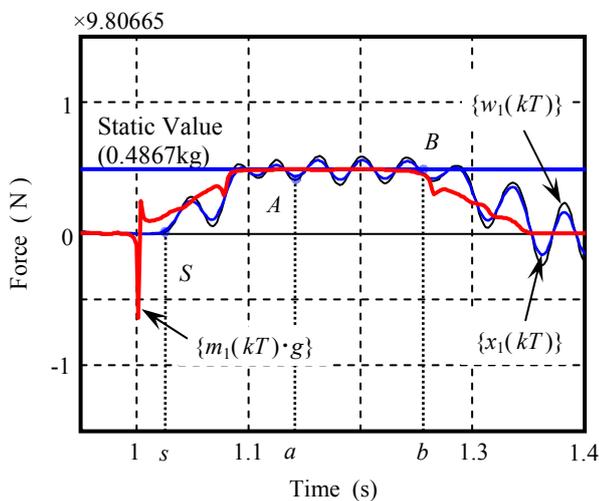


Fig. 13 Discrete signal $\{w_1(kT)\}$, $\{x_1(kT)\}$ and series $\{m_1(kT)\}$

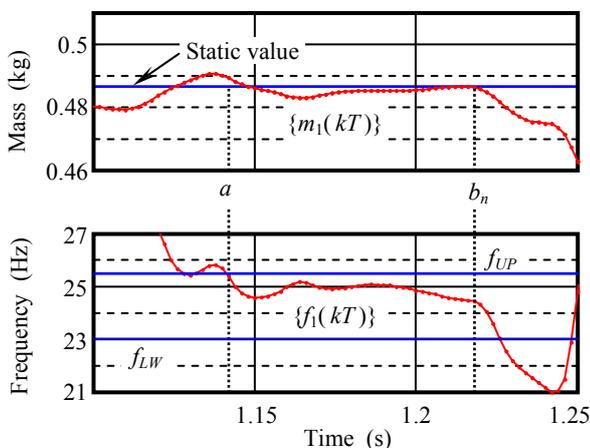


Fig. 14 Measurement value series $\{m_1(kT)\}$ and the dynamic component frequency series $\{f_1(kT)\}$ around the effective time

期的な特徴を持つとき, ただ一つの係数 $\beta(kT)$ では対応できていないことがわかる. このことは, 過渡応答に適用すると, $\{m_1(kT)\}$ が急激に変動する場合があるが, 新計量方法の「 $f(kT)$ によって計量状態を知る」機能が動作していることを示している.

急激な変動を考慮せずに, (19), (20), (21)式において, $M_{UP} = 5 \text{ g}$, $M_{LW} = 2 \text{ g}$, $N_S = 10$, $N_D = 12$ として乗込開始時点判定したところ, $s = 1.026 \text{ s}$ (有効時間終了点 $b = 1.256 \text{ s}$) を得た. Fig. 13 を見ると, ほぼ妥当な位置 S を与えている. このケースでは, 急激な変動による深刻な影響はなく, $f_1(kT)$ に頼らなくてもよいことが確認できる. このとき, (25)式において

$$23.0 \text{ Hz} \leq f_1(kT) \leq 25.5 \text{ Hz} \quad (36)$$

としたところ, 有効時間開始点は $a = 1.142 \text{ s}$ となった. 有効部近辺における, 計量値列 $\{m_1(kT)\}$ と(14)式で推定された動的成分周波数列 $\{f_1(kT)\}$ を Fig. 14 に示す. このとき, (25)式において推定値は $m_1(1.142) = 489.61 \text{ g}$ となり, 真値とみなしている静止計量値 486.7 g と比較すると誤差が大きい. 高速計量であるので妥協できる値であるかも知れないが, 精度には不満が残る. 新計量方法の Step6 と Step8 を適用する必要がある.

Fig. 15 は, Step6 を実行したとき得られた結果の一部をまとめたものである. 横軸は, ヒストグラムの階級に対応する(29)式の区分を表す. 図中の数字は階級の頻度 (i 番目の区分 $[d_i, d_i + \Delta d)$ に属する $m_1(kT)$ の集合 M_i の要素数 n_i), 区分 $[d_i, d_i + \Delta d)$ に属する $m_1(kT)$ の不偏分散を示す. 三角形の記号は M_i に属する $m_1(kT)$ の最大値, 最小値のプロットである. 円記号は M_i に属する $m_1(kT)$ の平均値を示す.

Fig. 15 によると, 8 番目の区分

$$[d_8, d_8 + \Delta d) = [24.75 \text{ Hz}, 25 \text{ Hz})$$

が最大の要素数を持つ. $n_8 = 13$ であるので, この区分に属

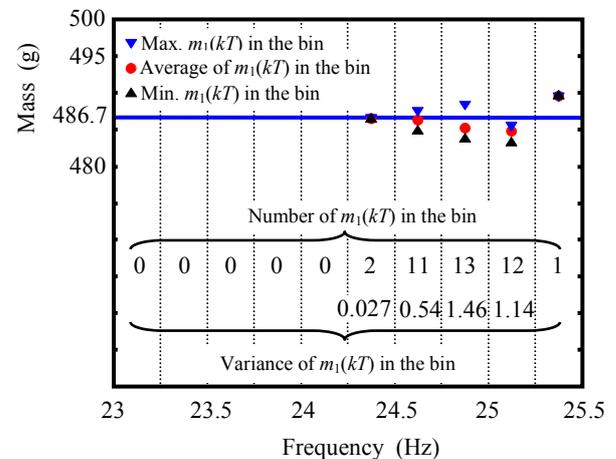


Fig. 15 Arrangement of values obtained from $m_1(kT)$ classified into frequency bins

する計量値 $m_1(kT)$ の平均値が測定質量値となる．すなわち，

$$\hat{m}_1 = \frac{1}{13} \sum_{m(kT) \in M_8} m_1(kT) = 485.28 \text{ g} \quad (37)$$

が得られる．静止計量値 486.7 g と比較すると，誤差は -1.42 g となる． $m_1(1.142) = 489.61 \text{ g}$ と比較すると精度が改善されていることが確認できる．また，要素数が充分多く，分散 V_i が小さいものを選ぶと，7 番目の区分

$$[d_7, d_7 + \Delta d] = [24.5 \text{ Hz}, 24.75 \text{ Hz}]$$

が該当する．同様に

$$\hat{m}_1 = \frac{1}{12} \sum_{m(kT) \in M_7} m_1(kT) = 486.31 \text{ g} \quad (38)$$

が得られ，誤差は -0.39 g となる．さらに精度が改善されるが，分散を計算する手間が増える．また，要素数が小さくなると分散自体が意味をなさないのので，しきい値を設けて，要素数の大小を吟味する必要が加わる．

5. 2. 前置フィルタ $H_p(z)$ の効果

4. 2 で述べたように，乗込時衝撃の影響を弱める目的で，45 Hz にノッチを持つ最小の 3 タップ FIR フィルタ $H_p(z)$ ((34)式を用いている．その効果を示すために，フィルタ出力 $\{x_1(kT)\}$ から得られた $m_1(kT)$ ， $f_1(kT)$ に加えて， $H_p(z)$ を用いることなく，フィルタ入力 $\{w_1(kT)\}$ から直接得られた $m'_1(kT)$ ， $f'_1(kT)$ をプロットした Fig. 16 を下に示す． $m'_1(kT)$ の振動成分は $m_1(kT)$ には見られないので， $H_p(z)$ の効果が確認できる．少し複雑な形状であるが， $f'_1(kT)$ にも周期的な成分が現れていることが確認できる．Fig. 11 に示したように， $H_p(z)$ によって除去された成分は，被計量物乗込時に発生する衝撃によって励起されるものである．定常状態では卓越しない成分なので， $H_p(z)$ の設計には注意を

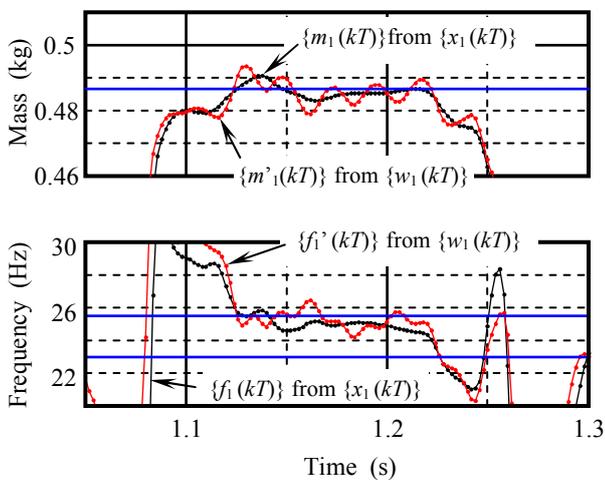


Fig. 16 $m'_1(kT)$ ， $f'_1(kT)$ obtained without using $H_p(z)$ and $m_1(kT)$ ， $f_1(kT)$ obtained using $H_p(z)$

要する．

5. 3. 大振幅の荷重信号 $\{w_2(kT)\}$

Fig. 13 と同様に，Fig. 9 に示した計量信号 $\{w_2(kT)\}$ ，その平滑化信号 $\{x_2(kT)\}$ ，計量値列 $\{m_2(kT)\}$ および判定された乗込開始点 S ，有効部開始点 A および終了点 B を Fig. 17 に示す．新計量方法の設定値は 5. 1 と同一である．ここでも $m_2(kT)$ は乗込時点 s の直前に激しい変動を示すが，Fig. 17 を見る限り，妥当な乗込開始時点 $s = 1.014 \text{ s}$ (有効時間終了点 $b = 1.244 \text{ s}$) を得ている．また，有効時間開始点は $a = 1.144 \text{ s}$ となった．Fig. 18 に有効部近辺の計量値列 $\{m_2(kT)\}$ と動的成分周波数列 $\{f_2(kT)\}$ を示す．不等式(36)を満たす最初の時点の計量値は $m_2(1.144) = 491.67 \text{ g}$ である．真値とみなしている静止計量値 486.7 g と比較すると，この計量値は

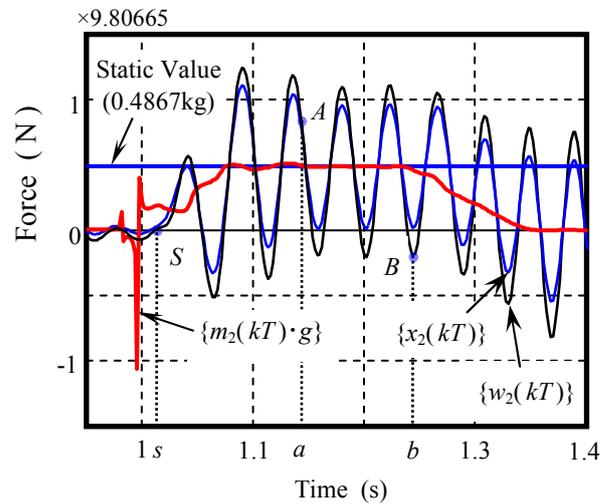


Fig. 17 Discrete time signal $\{w_2(kT)\}$ ， $\{x_2(kT)\}$ and series $\{m_2(kT)\}$

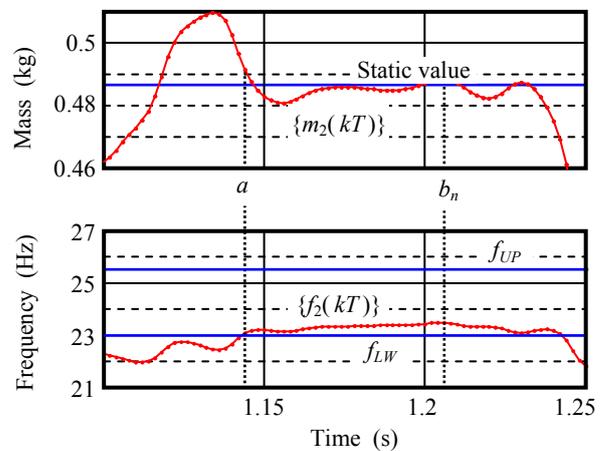


Fig. 18 Measurement value series $\{m_2(kT)\}$ and the dynamic component frequency series $\{f_2(kT)\}$

不適切である。 $a=1.144$ s 以降のデータ範囲においても、秤機構が受けた乗込衝撃の影響が持続していると考えられる。過渡応答の影響を排除するために、Step6, Step8を適用する必要がある。

Fig. 19 は、Step6 を実行したときの結果をまとめたものである。数値、記号は Fig. 15 と同様の意味を持つ。図を見ると、最大の要素数、最小の分散を持つ区分は 2 番目の区分 $[d_2, d_2 + \Delta d) = [23.25\text{Hz}, 23.50\text{Hz})$ となり、 $n_2 = 22$ であるので、測定質量値

$$\hat{m}_2 = \frac{1}{22} \sum_{m(kT) \in M_2} m_2(kT) = 486.05 \text{ g} \quad (39)$$

が得られる。誤差は-0.65 g となる。荷重信号の大きな動的成分を考慮すると、ほぼ満足できる精度であろう。

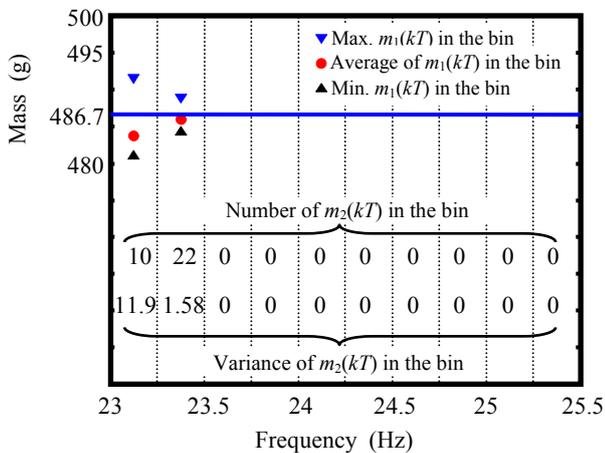


Fig. 19 Arrangement of values obtained from $m_2(kT)$ classified into frequency bins

6. おわりに

提案した新計量方法は、光電管などのハードウェアに頼っていた計量開始タイミングをアルゴリズム的に判定することに第一番目の特徴がある。その判定のため、秤機構を質量一ばね系の振動系とみなし、その計量値 $m(kT)$ と動的成分周波数 $f(kT)$ を推定することに第二番目の特徴がある。新提案方法の特徴をまとめると以下のようになる。

- i) 荷重信号 $\{w(kT)\}$ のノイズ成分の除去に小タップ数 FIR フィルタを用いて、 $\{w(kT)\}$ のノイズ成分の除去した信号 $\{x(kT)\}$ を得る。 n 個のデータ列 $\{x(kT), \dots, x((k+n-1)T)\}$ に有効な 2 次対称係数適応 FIR フィルタを用いて、時間区間 $[kT, (k+n-1)T]$ における秤機構の固有振動を除去する。

- ii) 上記の適応フィルタ伝達関数 $G_{kT}(z)$ から計量値 $m(kT)$ と動的成分周波数 $f(kT)$ を算定する。
- iii) 被計量物のすべての部分が計量コンベア上にあるとき、動的成分周波数列 $\{f(kT)\}$ がほぼ一定になることに着目し、 $\{f(kT)\}$ が設定された範囲に収まるか否かを判断し、計量開始タイミングを判定する。
- iv) 計量値列 $\{m(kT)\}$ が部分的に滑らかなことを利用して、被計量物が計量コンベアに接触する時点を判定し、その時点から、計量終了時点を算定する。
- v) 誤差のより小さい測定質量値 \hat{m} を得る必要があるならば、動的成分周波数 $f(kT)$ にしたがって計量値 $m(kT)$ を分類した度数分布表を作成する。そして、各区間に属する $m(kT)$ の度数、分散などの統計値を評価し、最適な区間に属する $m(kT)$ の平均値を \hat{m} とする。

これまでの計量方法は計量値 $m(kT)$ の妥当性を判定する手段を持たなかったが、iii)および v)は動的成分周波数 $f(kT)$ を $m(kT)$ の妥当性を判定する手掛かりとしている。これが新計量方法の第三番目の特徴である。

新計量方法の有用性を例証するために、コンベア速度 80 m/min の高速計量実験で得られた、著しく異なった特徴を示す二つの荷重信号標本 $\{w_1(kT)\}$, $\{w_2(kT)\}$ から測定質量値 \hat{m}_1 , \hat{m}_2 を推定したところ、以下の結果を得た。

- vi) 乗込時の衝撃により、有効部には約 45 Hz の卓越成分が認められるので、i)の小タップ数ノイズ除去用フィルタとして、45 Hz にノッチを持つ 2 次 FIR フィルタを用いところ、最小タップ数ではあるが、十分に効果があった。
- vii) 適切な計量時間区間（有効時間区間）が得られ、誤差の小さい測定計量値 \hat{m}_1 , \hat{m}_2 が得られた。

2 次適応 FIR フィルタの係数更新は単回帰直線の計算に帰着される。行列計算は不要であるので、CPU の負荷は小さい。しかし、iii), iv)の有効部判定はやや煩雑であり、度数分布表の作成も必要であるので、実装しても新計量方法の演算量が CUP の処理能力を超えてしまうことが懸念される。

次段階として、リアルタイム処理の成否を確認することが不可欠である。また、本論文で示した事例だけでは精度の評価が不十分であるので、多くの実測荷重信号を取得し、統計的な分析を行い新計量方法の公称精度を明らかにしたい。

謝辞 大阪府立大学名誉教授 小野敏郎先生に有益な議論と助言を頂いた。心からの謝意をここに表す。

参考文献

- 1) 小野, 中島, 西口: レバー式重量自動選別機の動的補償(線形推定理論の一応用), 日本機械学会論文集(第1部), **43-369**, 1744/1754 (1977)
- 2) 小野, 島岡: 速度・変位検出形質量動的推定システム, 計測自動制御学会論文集, **20-4**, 322/328 (1984)
- 3) 小野, 島岡: 無重量状態における質量動的測定 計測自動制御学会論文集, **21-11**, 1184/1190 (1985)
- 4) 孫, 藤岡, 小野, 長尾, 考橋: 床振動環境下における高速高精度質量計測について, 精密工学会誌, **64-4**, 567/572 (1998)
- 5) T. Ono: Basic points of dynamic mass measurement, *SICE Annual Conference 1999*, 43/44 (1999)
- 6) 福田, 鳥取, 亀岡, 小野, 吉田: 走行車両の軸重計測 Axle Weighing of In-motion Vehicles 計測自動制御学会論文集, **38-8**, 653/659 (2002)
- 7) 小野: 動的質量計測, 日本設計工学会, **38-10**, 489/495 (2003)
- 8) W. G. LEE, J. W. Chung and K. P. Kim: Development of Speed and Accuracy for Mass Measurements in Check Weighers and Conveyor Belt Scales, *The Second International Symposium on Measurement of Force and Mass between Janan and China (ISMFM'94)*, 23/28 (1994)
- 9) K. Kameoka, et al.: Signal processing for checkweigher, Proc. of APMF'96, 122/128 (1996)
- 10) 野田, 桜井, 山崎, 大西, 小林, 黒須: コンベアライン上での連続秤量における精度の向上, 計測自動制御学会論文集, **38-9**, 759/764 (2002)
- 11) 田崎, 山崎, 大西, 小林, 黒須: 多連秤によるコンベアライン上での連続秤量, 計測自動制御学会論文集, **39-11**, 1022/1028 (2003)
- 12) 田崎, 山崎, 大西, 小林, 黒須: 多連秤による改良型連続秤量法, 計測自動制御学会論文集, **40-12**, 1205/1210 (2004)
- 13) 梅本, 土井: 適応アルゴリズムを用いた周波数推定法と動的質量計測への応用, 日本機械学会論文集(C編), **74-738**, 278/284 (2008)
- 14) 梅本, 笹本, 安達, 香川: 適応ノッチフィルタを用いたコンベアライン上での連続計量における精度の向上, 日本機械学会論文集(C編), **74-745**, 2122/2128 (2008)
- 15) Y. Yamakawa, T. Yamazaki, J. Tamura and O. Tanaka: Dynamic Behaviors of a Checkweigher with Electromagnetic Force Compensation, *XIX IMEKO World Congress*, 208/211 (2009)
- 16) 亀岡, 関口: 重量選別機基礎の振動外乱が選別精度の及ぼす影響, 精密機械, **45-2**, 174/179 (1979)
- 17) 中谷, 亀岡, 内藤, 中島: ウエイトチェッカーにおける基礎振動補償法, 第17回センシングフォーラムシンポジウム, 141/144 (2000)
- 18) K. Fukuda, K. Yoshida, T. Kinugasa, K. Kanazawa and T. Ono: A Dynamic Model for the Weighbridge of an Axle Weighing System for In-motion Vehicles with High Velocity, *APMF 2007 International Symposium*, CD-ROM (2007)
- 19) K. Fukuda, K. Yoshida, T. Ono, K. Kameoka and T. Hirata: An Advanced Algorithm for Estimating Axle Weights of In-motion Vehicles, *19th International Conference on Force, Mass & Torque (IMEKO TC3)*, 20.pdf, CD-ROM (2005)
- 20) K. Fukuda, K. Kameoka, T. Ono and K. Yoshida: Evaluation of a New Mass-estimation Method for Axle Weights of In-motion Vehicles Using Vehicle Models, *17th International Conference on Force, Mass, Torque and Pressure Measurements (IMEKO TC3)*, 219/229 (2001)
- 21) K. Fukuda, H. Tottori, K. Kameoka, T. Ono and K. Yoshida: A Method for Estimating Axle Weights of In-motion Vehicles and Its Evaluation, *SICE Annual Conference Osaka*, 71/75 (2002)
- 22) K. Fukuda, K. Yoshida, T. Kinugasa, S. Fujimoto, M. Kamon, Y. Kagawa and T. Ono: A New Weighing Method for Checkweighers by Using Signal Processing, *XIX IMEKO World Congress (IMEKO 2009)*, 373/378 (2009)

[著者紹介]

福田 謙 吾 (正会員)



1983年, 大阪府立大学工学部機械工学科卒業。大和製衡(株)を経て, 95年応用計測工業(株)入社。その後, 2003年に姫路工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2009年, 応用計測工業(株)を退社。はかりの設計, 研究開発, 振動データの現場計測, 解析などに従事した。現在は軸重計や高速自動重量選別機に関する研究に従事。

吉田 浩 治 (正会員)



1993年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程単位取得認定退学, 同年大阪府立大学助手, 1997年岡山県立大学講師, 助教授を経て, 2006年岡山理科大学工学部機械システム工学科准教授。2008年同教授。1998年~1999年, Institute de Recherche en Communications et Cybernetique de

Nantes 客員研究員。制御工学，ロボティクスに関する研究に従事。日本ロボット学会，日本機械学会，IEEE 各会員。

衣 笠 哲 也 (正会員)



1999 年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年津山工業高等専門学校助手，2002 年岡山理科大学工学部機械システム工学科講師を経て，2008 年同准教授。2006 年～2007 年，Institute de Recherche en Communications et Cybernetique de

Nantes 客員研究員。制御工学，ロボティクスに関する研究に従事。日本ロボット学会，日本機械学会，システム制御情報学会，IEEE 各会員。

加 門 守 人

大和製衡株式会社所属

香 川 洋 一 郎

大和製衡株式会社所属