コンベアライン上での連続秤量における精度の向上[†]

野田 善之*・桜井 祥晴**・山崎 敬則***
大西 秀夫****・小林 政明****・黒須 茂**

Improvement of Accuracy for Continuous Mass Measurement in Checkweighers[†]

Yoshiyuki NODA*, Yoshiharu SAKURAI**, Takanori YAMAZAKI***
Hideo OHNISHI****, Masaaki KOBAYASHI**** and Shigeru KUROSU**

This work is concerned with the development of a signal processing algorithms for checkweighers to realize much higher speed of operation and highly accurate measurement of mass of object during crossing a conveyor belt. Continuous measurement means that the masses of discrete objects on a conveyor belt are determined in sequence. Checkweighers usually have maximum capacities of less than 75 kg and achieve measuring rates of 150 packages per minute and more. The output signals from the checkweighers are always contaminated with noises due to vibrations of the conveyor and the object to be measured in motion. In this paper an employed digital filter is of Finite-duration Impulse Response (FIR) type that can be designed under the consideration on the dynamics of the checkweigher. The experimental results on the checkweigher suggest that the filtering algorithms proposed in this paper are effective enough to practical applications.

Key Words: mass measurement, checkweigher, conveyor belt scale, digital filter

1. はじめに

近年、コンベアライン上に搬送される秤量物の質量測定の高速、高精度化の要求にともない、質量測定器(はかり)により秤量された計測データに関係のない誤差信号が重畳されており、その対策が重要な課題となっている。とくに、コンベアライン上で秤量する場合には、コンベア本体ならびに秤量物の固有振動による周期的な誤差成分が発生しやすい。

従来の研究を見ると、

- ・船上での計測(前田 1976~1988, 田中 1933)
- ・相対補償法(小野 1998, 亀岡 1999)
- ・動的質量計測(小野 1977, Lee 1994, 池田 1992)

があり、船上での計測に関しては、前田らの一連の研究がよ

く知られている。前田らは、てこ式変位検出はかりおよびロードセル式はかりを対象として、さまざまなアイデアを試みている^{1~6)}。

また、別のアプローチとして、小野らは質量の動的測定問題を線形システムの状態推定問題に帰着させて推定し、「質量の動的計測」の重要性和有効性を示している^{7~10)}。さらに Lee らの研究も、小野らが提案した「質量の動的計測」の流れをくむもので、秤量物とロードセルを組み合わせたばね-質量系のモデルに対して、回帰形最小自乗法によって秤量物の質量を測定している¹¹⁾。

亀岡らは、本体ロードセル(計測セル)とは別のロードセル(補償セル)を基礎面に設置し、これによってロードセルにおよぼす基礎振動の影響成分のみを検出している。基礎振動の影響成分を含む計測セル出力から補償セル出力を差引いた後の信号を処理して、測定値を得るという小野が提案した「相対補償原理」を適用した計測法である^{12~16)}。亀岡らは、ロードセルの質量(6 kg)ならびにコンベアラインの質量に比較して、秤量物の質量が 500 g 程度で十分小さく、誤差信号ははかりの固有振動数より低い基礎振動(5~10 Hz)によるものと捉えている。

このほか、このような計測環境を考慮に入れた研究としては、池田、小野、青木らによる走行車両の動的質量計測がある。トラックスケールの上に静止せずにスケール上を走行さ

[†] 第 40 回 SICE 学術講演会で発表(2000・7)

* 豊橋技術科学大学大学院 豊橋市天伯町 1-1

** 小山工業高等専門学校 小山市中久喜 771

*** 東京都立工業高等専門学校 東京都品川区東大井 1-10-40

**** 新光電子(株) 下妻市高道祖 4219-71

* Toyohashi University of Technology, Toyohashi

** Oyama National College of Technology, Oyama

*** Tokyo Metropolitan College of Technology, Shinagawa-ku, Tokyo

**** Shinko Co., Ltd., Shimotsuma

(Received March 22, 2002)

(Revised June 17, 2002)

せて、はかりにより静止荷重を測るものであり、ダイナミックスをできるだけはかりの出力に反映させた逆問題を解いている¹⁴⁾。しかし、コンベアライン上では秤量された実測データを見る限り、どの時点で秤量物が荷重受部(ロードセル)に載っているか、判然としない。したがって、本研究では、FIRフィルタと2次的にローパスフィルタとを併用したデータ処理による簡易測定法を提案する。

まず、秤量物がコンベアライン上に搬入され、荷重受部を通過していくさいの、秤量物とロードセルを含むコンベアラインの動的モデルを構成する。そして、計測システムのもつ固有振動成分をFIRフィルタによって除去し、その過渡応答から秤量物の質量を推定することを目的とする。

2. 問題設定

2.1 計測システムの概要

コンベアライン上に搬送されたダンボール箱に装てんされた物体を連続的に秤量する計測システムを考える。その計測システムの基本的な構成の概略を示したのがFig.1である。荷重受部は1点でロードセルによって支持されたベルトコンベアであり、これを計測コンベアとよぶ。秤量物が計測コンベアに載ると、搬入側に取り付けられた光電スイッチが働き、計測が開始される。秤量物の通過する時間内に荷重がロードセルによって検知され、電圧信号として取り出される。電圧信号はA/D変換を通してパソコン上に送られる。パソコン上では、FIRフィルタのアルゴリズムによって測定信号に重畳された雑音成分が除去され、過渡応答の形状から秤量物の質量が推定される。以上の基本動作からも、搬送物の質量測定の高効率化の要点は、計測の精度を低下させることなく搬送速度を上げることにある。

計測コンベアの諸元はつぎのとおり。

コンベアの搬送速度：	$v=2.2[\text{m/s}]$
秤量物の質量：	$m=20\sim75[\text{kg}]$
計測コンベアの質量：	$M=64[\text{kg}]$
要求される計測精度：	0.7%以下

(実測データのサンプリング周期)： $T_m=0.5[\text{ms}]$

Fig. 1 Checkweigher

2.2 計量システムの数学モデル

ロードセルを含む計測コンベアとダンボール箱に装てんされた秤量物の鉛直方向だけの運動を考え、計量システムのモデルをFig.2に示す。質量-ばね系モデルとして、運動方程式を導くと、つぎようになる。

$$\begin{cases} M\ddot{X} = -KX - k(X-x) + Mg \\ m\ddot{x} = -k(x-X) + mg \end{cases} \quad (1)$$

ここに、

x ：秤量物のばねの自由長(無荷重時)からの変位[m]

X ：計測コンベアのばねの自由長(無荷重時)からの変位[m]

m ：秤量物の質量[kg]

M ：計測コンベアの質量[kg]

k ：秤量物のばね定数[N/m]

K ：計測コンベアのばね定数[N/m]

である。

このとき、

l ：秤量物の長さ[cm]

L ：計測コンベアの長さ[cm]

d ：連続した秤量物の間隔[cm]

としたとき、 $L=60[\text{cm}]$ 、 $l=40[\text{cm}]$ の場合に計測コンベアに印加される入力荷重 m の時間的変化の一例を示したのがFig.3である。衝撃パルスは前段のコンベアと計量コンベアとの僅かな段差によって生ずる衝撃力を模擬したものである。Fig.2より連続秤量する場合、 m を測定できる条件はつぎようになる。

$$d > L - l > 0 \quad (2)$$

(2)式を満たす条件で、(1)式において、 $l=40[\text{cm}]$ 、 $L=60[\text{cm}]$ 、

秤量物の固有振動数： $f_m=15[\text{Hz}]$

計測コンベアの固有振動数： $f_M=200[\text{Hz}]$

秤量物の質量： $m=20[\text{kg}]$

Fig. 2 Mathematical model of weighing system

Fig. 3 Time changes of loading input acting on a checkweigher

Fig. 4 Simulation result of a weighing system

Fig. 5 Experimental result of a weighing system

計測コンベアの質量: $M=64[\text{kg}]$

としたさいの、計測コンベアの変位 X から秤量物の質量 m を求めたシミュレーション結果を示したのが Fig. 4 である。実際の秤量物の質量 20 kg を計測したさいの実測データを Fig. 5 に示す。この結果より、計測コンベアの駆動によって低周波成分を含んでいるが、(1)式が実際の計測システムを忠実に再現していることがわかる。このデータからどのように秤量物の質量 m を推定するかが本研究の狙いである。

3. フィルタの設計

一般に、デジタルフィルタにはインパルス応答が有限長であるか無限長であるかによって、FIR フィルタと IIR フィルタに分けられる。FIR フィルタはコンボリューションフィルタともよばれ、入力データのみで現在の出力が計算されるが、IIR フィルタはフィードバックフィルタともよばれ、過去の出力も現在の出力にフィードバックされる形で出力が計算される。IIR フィルタは急峻なしゃ断特性をもつフィルタをつくるのに適しているが、過去の出力がフィードバックされるので、過渡現象がいつまでも持続することになる。そのため、本研究のように連続的に高速で秤量する場合に、IIR フィルタは適していない。以下に、FIR フィルタの設計法について述べる。

3.1 FIR フィルタ

FIR フィルタの伝達関数は、インパルス応答列 $\{h_m\}$ ($m=0, 1, \dots, M$) とすれば、

$$H(z) = \sum_{m=0}^M h_m z^{-m} \quad (3)$$

で与えられ、ここに z^{-1} は 1 サンプルの時間おくれを表わす演算子である。FIR フィルタの設計では、規格化周波数 $\Omega = fT$ としたとき、

通過域 ($0 \leq \Omega \leq \Omega_p$, $\Omega_p = f_p T$) では 1

阻止域 ($\Omega_s \leq \Omega \leq 0.5$, $\Omega_s = f_s T$) では 0

なる所望の周波数特性 $H_d(e^{j\Omega})$ と設計する周波数特性 $H(e^{j\Omega})$ との重みつき誤差

$$E(e^{j\Omega}) = W(e^{j\Omega})[H_d(e^{j\Omega}) - H(e^{j\Omega})] \quad (4)$$

に対して、

$$\min_{\Omega \in [0, 0.5]} \max |E(e^{j\Omega})| \quad (5)$$

を求める Chebyscheff 近似による方法が知られている。設計法は Remez のアルゴリズムとして知られている¹⁸⁻²⁰⁾。

設計するさいに、通過域、阻止域の規格化周波数 ($0 < \Omega < 0.5$) の設定において、阻止域の周波数 $\Omega_s < 0.05$ になると減衰量が激減して設計不能となり、サンプリング周期 T を変更しなければならない。このとき入力信号の最高周波数を $f_{\max} (\approx 200 \text{ Hz})$ としたとき、サンプリング定理より、 $T = 4[\text{ms}]$ が限界であると判定した。本稿では、 $M=42$ 次とし、サンプリング周期 $T=2, 3, 4[\text{ms}]$ として、サンプリング周期 $0.5[\text{ms}]$ の実測データよりダウンサンプリングしてデータ処理する。

ここに、通過域と阻止域の設計条件 ($\Omega_p=0.002$, $\Omega_s=0.05$) は共通しているので、インパルス応答列 $\{h_m\}$ は 3 つの場合について同じになることに注意しよう。阻止域の低いエッジ周波数 $f_s=25, 16.7, 12.5[\text{Hz}]$ に対して、振幅特性とインパルス応答を示したのが Fig. 6(a), (b) である。

Fig. 4 に示したシミュレーションデータに対して FIR フィルタを適用して高周波成分を除去したときの出力応答を示したのが Fig. 7 である。これより、サンプリング周期 T を大きくすると応答が平坦になることがわかる。

(a) Frequency response

(b) Impulse response

Fig. 6 Frequency response and impulse response

Fig. 7 Simulation result for FIR filter

3.2 連続秤量におけるシミュレーション

秤量物の質量 $m=20, 50, 75[\text{kg}]$ に対して、計測コンベアの長さ $L=40, 60[\text{cm}]$ 、秤量物の長さ $l=40[\text{cm}]$ (20 と $50[\text{kg}]$ に対して) と $l=60[\text{cm}]$ ($75[\text{kg}]$ に対して) として、同質量の秤量物を 5 個連続して測定データを取り、計測コンベアを通過試行回数を 10 回とする。その最大値をもって推定値 $\hat{m}$ としたとき、測定誤差率 $\varepsilon[\%]$ をつぎのように定義する。

$$\varepsilon = \frac{\hat{m} - m}{m} \quad (6)$$

FIR フィルタのサンプリング周期 $T=2, 3, 4[\text{ms}]$ を通

Fig. 8 Measured errors (simulation)

して、シミュレーション結果による測定誤差率 ε の分布は Fig. 8 に示すとおりである。

これより、つぎのことがわかる。

- 1) $L=40[\text{cm}]$ は $\varepsilon[\%]$ が大きくて計測不能である。
- 2) $L=60[\text{cm}]$ において $T=4[\text{ms}]$ のときの $m=20, 50[\text{kg}]$ が辛うじて精度 0.7% 以下となる。
- 3) 連続秤量を可能とする条件 (2) 式において $L-l=0$ のときは原理的に可能であるが、現実問題として計測不能である。
- 4) 測定誤差にバラツキがでるのは、過渡現象の影響がでている。

4. 連続秤量における実測例

以上の考察のもとに、秤量物の質量

$$m=20, 30, 40, 50, 60, 75[\text{kg}]$$

に対して、5 個の組み合わせ、たとえば

$$75 \text{ kg} \rightarrow 50 \text{ kg} \rightarrow 20 \text{ kg} \rightarrow 50 \text{ kg} \rightarrow 75 \text{ kg}$$

の順番に、 $60, 75[\text{kg}]$ は $l=60[\text{cm}]$ 、 $20 \sim 50[\text{kg}]$ は $l=40[\text{cm}]$ のダンボール箱に梱包して、 $d=30, 40[\text{cm}]$ について測定を実施した。組み合わせ数は 9 組、コンベアの通過回数は 11 回、各秤量物の測定点は 60 点になる。

さて、サンプリング周期 $T_m=0.5[\text{ms}]$ の実測データをダウンサンプリング(間引き)して、サンプリング周期 $T=2, 3, 4[\text{ms}]$ の FIR フィルタを通してデータ処理する。このとき、全実測データを処理すると、平滑化されたデータに高周波成分がノイズとして出現する。この事実、 $H(e^{j\omega})$ の振幅特性がサンプリング周波数 $f=1/T$ の整数倍で繰り返すことによって知られている。FIR フィルタのみを適用したデータとさらに 1 次フィルタ(シャ断周波数 $10[\text{Hz}]$)を適用した平滑化されたデータの一例を示したのが Fig. 9(a), (b) である。Fig. 9(a) より高周波成分が顕著に現れているのが、 $T=4[\text{ms}]$ の場合である。これは $f=1/T=250[\text{Hz}]$ が計測コンベアの固有振動数 $f_m \approx 200[\text{Hz}]$ に近いことに起因

Fig. 9 Smoothed data by FIR filter before and after low pass filter

Fig. 10 Distributions of estimation errors

Table 1 Coefficients of second-order polynomial

T[ms]	20~50[kg]			50~75[kg]		
	a	b	c	a	b	c
2	0.0027	-0.1817	3.1770	0.0047	-0.6404	20.9960
3	0.0018	-0.1217	1.9667	0.0033	-0.4454	14.4904
4	0.0015	-0.1050	1.5850	0.0029	-0.4049	13.0009

していると考えられる。

このようにして得られた平滑化されたデータから秤量物の質量 m を推定するが、Fig. 9(b)を見てもわかるように、データの頭上部は平坦というより一瞬の点で与えられる。そこで秤量物の質量 m は平滑化されたデータの最大値をもって推定値 $\bar{m}$ とする簡易測定法を提案する。

測定データより秤量物の質量 m ごとに測定誤差率 ε を算出した結果を示したのが Fig. 10(a)~(c)である。これより誤差率の分布に2つの谷間が存在している。これは秤量物の長さ l の違いに起因している。

誤差率 ε による補正法を考慮するさいに、つぎのような2次方程式を与える

$$\varepsilon[\%] = am^2 + bm + c \quad (7)$$

このとき、20~50[kg] と 50~75[kg] に対して異なる2次方程式をあてはめ、最小自乗法によってパラメータを求めた結果が Table 1 である。

つぎに求められた2次方程式を用いて、実測データを補正したときの誤差率 ε の分布を示したのが Fig. 11 である。補正後の誤差率の標準偏差と算術平均誤差は Table 2 のよう

Fig. 11 Distributions of estimation errors (after compensation)

Table 2 The standard deviation and the average estimation errors

	standard deviation	estimation errors
T=2[ms]	0.475[%]	$-2.14 \times 10^{-3}[\%]$
T=3[ms]	0.462[%]	$-6.72 \times 10^{-4}[\%]$
T=4[ms]	0.463[%]	$-2.34 \times 10^{-3}[\%]$

になる。

こうして求めた2次曲線は Fig. 10 において実線で示している。Table 2 より、すべてのサンプリング周期とも要求された計測精度である0.7%以内である。そして、標準偏差 ε は FIR フィルタのサンプリング周期 $T=3[\text{ms}]$ が一番少なく精度がよいという結果になった。

5. おわりに

本研究では、コンベアライン上に搬送される秤量物の質量測定の高速、高精度化の要求にともない、実測データの平滑処理による簡易測定法を提案した。

本研究の成果をまとめると、つぎのようになる。

- 1) コンベアライン上で搬送される秤量物の幾何学的条件から計測可能となる条件を示した。
- 2) 平滑化処理に FIR フィルタを用いて、実測データをサンプリング周期 $T=2, 3, 4[\text{ms}]$ でダウンサンプリングして処理した。さらに高周波ノイズを消去するために2次的に1次フィルタを通した。得られた平滑化された測定データの最大値をもって秤量物の質量の推定値とした。
- 3) 秤量物の質量20~75[kg] に対して5個の組み合わせを選んで、9組について連続秤量11回を実施した。各質量に関して60点以上の測定データを収録し、測定誤差率を算出し、その分布を調査した。その結果より2つの補正式が得られ、実測データを補正し、誤差率の分布を算出した。その結果、0.7%以下の高精度が保証され、 $T=3[\text{ms}]$ の FIR フィルタが最も性能が優れていることがわかった。
- 4) 本研究で提案した簡易測定法が実用性の高いことが明らかとなった。

参考文献

- 1) T. Nishiyama and C. Maeda: Shipboard Scale, ACTA

- IMEKO, 415/424 (1976)
- 2) C. Maeda and T. Nishiyama: Dynamics of a Shipboard Scale, ACTA IMEKO, 105/104 (1982)
 - 3) C. Maeda and R. Masuo: A Shipboard Scale of Electromechanical Type Using Strain-Gage, IMEKO TC-3 Kobe, 169/174 (1984)
 - 4) C. Maeda and R. Masuo: Electric Type Shipboard Scale, ACTA IMEKO, 299/306 (1985)
 - 5) C. Maeda and R. Masuo: Electric Type Shipboard Scale (New System by Measuring Oscillating Period of the Scale), ACTA IMEKO, 215/222 (1988)
 - 6) 田中正吾: 船舶加速度外乱場での重量自動計測について, 計測自動制御学会論文集, 29-1, 18/25 (1993)
 - 7) T. Ono: Applications of the Estimation Theory to Dynamic Weighing Problems, ACTA IMKO-1976, 2, 425/434 (1977)
 - 8) 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, 43-396, 1744/1754 (1977)
 - 9) 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)
 - 10) 小野, 島岡: 動的計測方式による質量測定, 計測技術, 12-2, 35/41 (1984)
 - 11) 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, Proc. ISMF '94 (Tsukuba, Japan), 23/28 (1994)
 - 12) 孫, 藤岡, 小野, 長尾, 孝橋: 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)
 - 13) 孫, 藤岡, 小野, 長尾, 孝橋: 床振動環境下における高速高精度質量計測について(オンライン同定を用いない動特性補償手法の提案), 精密工学会誌, 64-7, 1029/1034 (1998)
 - 14) 孫, 小野: 線形信号検出機構のダイナミックスの相対補償, SICE 関西支部シンポジウム資料, 53/58 (1991)
 - 15) M. Nakatani, et al.: Effect of Floor Vibration on a Double-Beam Type Loadcell Scale, Proc. IMEKO TC 3/ APMF '98, 460/467 (1998)
 - 16) 亀岡, 中谷, 小松, 内藤: 質量計測における基礎振動法, 計測自動制御学会論文集, 35-5, 616/622 (1999)
 - 17) 池田, 小野, 青木: 走行車両の動的質量計測, 計測自動制御学会論文集, 28-1, 50/58 (1992)
 - 18) 三谷正昭: デジタルフィルタデザイン, 昭晃堂, 86/96 (1987)
 - 19) 武部幹: デジタルフィルタの設計, 東海大学出版会, 70/76 (1990)
 - 20) 高橋進一ほか: デジタルフィルタ, 培風館, 77/91 (1999)

[著者紹介]

野田 善之 (学生会員)

2001年小山工業高等専門学校電子システム工学専攻科修了。現在、豊橋技術科学大学大学院生産システム工学専攻(修士課程)在学中。

桜井 祥晴

2002年小山工業高等専門学校機械工学科卒業。現在、三桜工業(株)勤務。

山崎 敬則 (正会員)

2000年東京農工大学大学院生物システム応用科学研究科博士課程修了。同年東京農工大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー特別研究員。2001年東京都立工業高等専門学校助手。工作機械の運動制御、空調システムの制御などを研究(博士(工学))。

大西 秀夫

1980年中央大学理工学部電気工学科卒業。同年新光電子(株)設計課勤務。現在、産業用計測制御機器の開発設計に従事。

小林 政明

1972年東京理科大学理学部応用物理学科卒業。同年新光電子(株)設計課勤務。現在、差動トランス、変位測定制御機器の設計、音叉センサとそれを応用したはかりの開発に従事。

黒須 茂 (正会員)

1962年新潟大学工学部機械工学科卒業。70年慶應義塾大学工学部(計測工学科)助手。74年同大学大学院博士課程(計測工学専攻)退学。同年小山工業高等専門学校講師。88年教授。78~80年カリフォルニア大学(パークレー校)客員研究員。システム制御、ジャイロセンサの研究に従事(工学博士)。