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 —計量時間内での処理—

梅 本 敏 孝*・加 門 守 人**・香 川 洋一郎**

Improvement of Accuracy for Continuous Mass Measurement in Checkweighers
with an Adaptive Notch Filter
—Processing in Measurement Time—

Toshitaka UMEMOTO*, Morihito KAMON** and Yoichiro KAGAWA**

As manufacturing processes are steadily automatized, quick and accurate mass measurement systems are in great demand. In this respect, recently, active belt conveyer 'checkweigher' is used by many enterprises. This system possesses a serious technical problem, in which three types of mechanical noises, that is, proper vibration, motor vibration, and belt pulley vibration, are included in detection signals. The noises should be removed to increase the accuracy. In the current mass measurement system, 'moving average method' is applied for the aim. However, it is not enough to realize the quick and accurate measurement. Very recently, we applied 'frequency analysis method' using the complex LMS algorithm for this problem. Only a signal in the stable time had to be used for real-time processing with this method. In this study, therefore, we decreased the moving average filters and increased the adjustment notch filters.

Key Words: adaptive algorithm, dynamic mass measurement, frequency analysis

1. はじめに

質量の正確な測定は、外乱の影響を極力取り除いた理想的な環境下で十分に時間をかけて実施しなければならない。しかし、産業計測の分野ではそのような環境を作り出すことができない場面に遭遇する^{1), 2)}。その1つにオートチェッカと呼ばれる自動重量選別機がある。オートチェッカとは、前段階の工程から一定間隔で送られてくる被計量物をつぎの段階の工程に送り出すまでの間に、はかりへの被計量物の供給・搬出を行なう工程とともに、軽量・過重といった質量上の不良品をライン外へ選別排除する工程のすべてを自動的に行なう目的で開発されたはかりのことである。しかも、一般的には、被計量物が搬送されながらそれらすべての工程が行なわれなければならない。このことから、オートチェッカの開発には計量方式と同時に被計量物の搬送方法の検討が重要である。計量方式としては、ロードセルを用いたものと電磁平衡式は

かりを用いたものの2つがある。また、計量部での被計量物の搬送方法は以下の3つの条件を満たさなければならない。

- 余分な機械的外乱ができるだけ発生しないこと。
- 高速搬送が可能なこと。
- 駆動機構ができるだけ簡単なこと。

現在、これら3つの条件を満たす搬送方法として、能動ベルトコンベア式が一般的に採用されている。しかし、能動ベルトコンベア式では2つの計量方式とも質量検出部が駆動装置を内蔵したベルトコンベアにより構成されているため、コンベアの駆動に伴う周期性をもつ機械的外乱の発生を避けることは原理的に不可能である。選別精度を得るためには、この周期的な外乱を除去する必要がある。近年、高速高精度に計測を行なうためにFIR (Finite Impulse Response) フィルタを用いた方法が提案されている^{3), 4)}。そこで、黒須らは文献3)においてダウンサンプリングを行ない最終的に等リプルFIR フィルタを用いノイズを除去する方法を提案した。しかしながら、この方法では大きなノイズを取り除くために阻止域の全域で大きな減衰量をもつフィルタを設計しなければならない。また、動的質量計測機器はベルトコンベアの速度や設置環境によりノイズの大きさと周波数が変化するという問題があり、このようなノイズには対応できない。さらに、オート

* 大阪府立大学工業高等専門学校 寝屋川市幸町 26-12

** 大和製衡株式会社 明石市茶園場町 5-22

* Osaka Prefecture University College of Technology, 26-12 Saiwai-cho, Neyagawa

** Yamato Scale Co., Ltd., 5-22 Saenba-cho, Akashi

(Received December 27, 2010)

(Revised October 3, 2011)

チェッカでは組み込み機器を用いるのでフィルタ次数や処理速度の制限もある。

能動コンベア式を採用しているオートチェッカで生じる周期性をもつ機械的外乱には、コンベアを構成しているモータが回転することによって生じる振動、プーリが回転することによって生じる振動と計量コンベアの固有振動の3種類がある。これらのうちでモータやプーリが回転することによって生じる外乱は、それらの回転数を計算すれば、その周波数は求めることができる⁵⁾。また、計量コンベアの固有振動は開発した際に、システム同定すれば求めることができる。

市販されているオートチェッカで採用されている移動平均法は、減衰量が非常に小さいという問題があるが、サンプリング周期ごとに一定時間内の信号を単純に平均化する処理を繰り返す方法であるので、組み込み機器でも容易に高速処理が可能である。さらに、外乱の周期と平均値を求める時間を一致させることができればその外乱を完全に除去することが可能となる。これらのことから、市販されているオートチェッカでは外乱の周期に対応したフィルタ長を有する移動平均法を継続接続した処理方法を用いている。

しかし、オートチェッカの場合、フィルタ処理には被計量物全体が計量コンベアに載った時間から計量ポイントと呼ばれる選別が開始される時間内に得られたデータしか用いることができない。この時間を計量時間と呼ぶ。生産コストの面からコンパクトなオートチェッカで寸法の長い製品を計量しなければならないという必要性が高まってきている。被計量物の寸法が長くなった場合、上述の計量時間が短くなるのでフィルタリング処理に用いることができるデータ数が減り、移動平均法で上述の機械的な外乱を除去するのに必要なデータ数を確保できなくなるという問題が生じる⁵⁾。このデータ数の問題を解決する方法としてIIR (Infinite Impulse Response) フィルタが考えられる。このIIR フィルタは、FIR フィルタと同様な仕様のフィルタを低いフィルタ次数で実現できるという利点がある。しかし、フィードバックループをもつために安定性の保証が必要となることやインパルス応答が無限であるために、急峻な変化をする入力があった場合には過渡現象が長時間持続するという問題があり、動的質量計測に向かないとされている⁶⁾。

そこで、われわれは上述の問題を解決するために、LMS アルゴリズムを用いた逐次処理型のスペクトル分析法^{7)~9)}を応用した特定の周波数成分の信号のみを除去できるノッチフィルタを導出し、移動平均法と提案した適応ノッチフィルタを併用した外乱除去システムを提案し、標準仕様外の長さとしていた被計量物に対して、ロードセル式のオートチェッカ(大和製衡株式会社製 CHS22L)を用いてその有効性を確かめた⁵⁾。このオートチェッカは、計量時間内に得ることができるデータ数と外乱の周波数成分を考慮して4種類の移動平均法のフィルタ長を算出し、この4種類のフィルタを継続接続することで質量を求めている。この実験では、オートチェッカが自動的に算出した4種類の移動平均法と3種類のノッ

Fig. 1 Our checkweigher

Table 1 Specifications of checkweigher

Specification	Performance
Weighing Range	20~2200 g
Weighing Speed (Max)	220 packs/min
Sampling Period	2 ms
Weigh Conveyor Length	435 mm
Product Dimensions of Length	300 mm

チフィルタを用いて処理を行なった。4種類の移動平均法のフィルタ長の和と計量時間内に取得されるデータ長が等しくなる。このため、3種類の適応ノッチフィルタにデータを入力するためには、被計量物が計量コンベアに完全に載っていない時間に取得されたデータを用いていることになる。このため、この方法をオートチェッカに用いている組み込み機器に実装する場合には問題であった。

そこで、本論文では移動平均法で使用するデータ数を減らすことで上述の問題を解決する。このようにすることで、計量時間と呼ばれる時間内に取得されたデータのみを用いるシステムを構築する。さらに、標準仕様外の長さとしていた被計量物に対して4種類の移動平均法のみを用いて処理した結果と比較を行なうことによって、その有効性を示す。

2. オートチェッカ

2.1 オートチェッカの仕様

本論文で用いるオートチェッカは、Fig. 1に示す能動ベルトコンベア方式を採用している。この装置は被計量物を搬送するための2つのコンベアと計量コンベアで構成されている。質量検出用センサとして、ロードセルが用いられている。その主な仕様をTable 1に示す。この表において、搬送能力(WS: Weighing Speed)とは1分間に被計量物を選別できる能力であり、つぎに示す式を用いてコンベア速度 v_c が計算できる。

$$v_c = \frac{WS}{60} \cdot L_0 \quad (1)$$

ここで、 L_0 は計量コンベアの長さである。

また、被計量物が計量コンベアに搬入されたか否かは、光電スイッチで判断される。被計量物が搬入コンベアから計量コンベアに運ばれると、ロードセルがひずむ。このひずみ量から質量が求まる。

2.2 オートチェッカに生じる外乱

能動ベルトコンベア式の問題点は、前章で述べたように計量時に機械的外乱が生じることである。その主な外乱の原因は、コンベアを構成しているモータが回転することによって生じる振動、プーリが回転することによって生じる振動と計量コンベアの固有振動の3種類がある。

コンベアのモータやプーリが回転することによって生じる振動による外乱の周波数は、これらの回転数に同期している。このことから、モータやプーリの回転数を計算すれば、これらの外乱の周波数は求めることができる。設定したコンベア速度を v_c とするとプーリが回転することによって生じる振動の周波数 f_p は、つぎのようになる。

$$f_p = \frac{v_c}{\pi d_p} \quad (2)$$

ここで、 d_p はプーリの直径である。また、モータが回転することによって生じる振動による外乱の周波数 f_m は、プーリの歯数 M_p とモータの歯数 M_m との比によって計算でき、つぎのようになる。

$$f_m = \frac{M_m}{M_p} f_p \quad (3)$$

これらの式から、ユーザが搬送能力またはコンベア速度を設定した段階で、モータとプーリの回転によって生じる振動による外乱の周波数は決定できる。また、オートチェッカ本体の固有振動はオートチェッカ本体の形状などに依存して決まり、オートチェッカを設計した段階で周波数は特定することができる。

つまり、オートチェッカで生じる主な外乱の周波数は計量前にすべて推定できるといふ特徴がある。

2.3 計量時間

オートチェッカは、被計量物が計量コンベアに載っている間に軽量・過重といった質量上の不良品をライン外へ選別排除する工程のすべてを自動的に行なわなければならない。一般的には、計量ポイントと呼ばれる時間での質量から、その軽量や過重を判断し、選別が行なわれる。

オートチェッカの組み込み機器の処理能力を考えると、被計量物全体が計量コンベアに載った時間からこの計量ポイントと呼ばれる時間までに得られる信号のみを用いて、前節で述べた外乱を除去しなければならない。この処理に用いることのできる時間を計量時間 τ と定義する。この計量時間 τ は、被計量物の搬送速度や長さによって異なり、つぎに示す式から算出される。

$$\tau = \frac{L_0 - L}{v_c} - \tau_{AD} \quad (4)$$

ここで、 L は被計量物の長さである。また、 τ_{AD} は、組み込み機器のAD変換遅延時間である。つまり、被計量物の寸法が長くなればなるほど、計量に使用できるデータ数は少なくなる。また、コンベアの速度が速くなればなるほど、計量に使用できるデータ数は少なくなる。

Fig. 2 Spectra analysis system with the LMS algorithm

3. 適応ノッチフィルタ

3.1 スペクトル分析型適応アルゴリズム

われわれは、特定の周波数成分を短時間スペクトル分析できる逐次処理型のアルゴリズムをLMSアルゴリズムを用いて提案し^{7),8)}、採譜処理などに応用を行ってきた⁹⁾。文献9)で提案したシステムをFig. 2に示す。このシステムにおいて、 $G(k)$ は時刻 kT (ここで、 T はサンプリング周期である) におけるフーリエ係数、 $X(k)$ はそのときの入力とする。また、 $\bar{G}(k)$ と $\bar{X}(k)$ は $G(k)$ と $X(k)$ の複素共役である。さらに、 $X(k)$ をつぎのように与えられる複素指数関数とする。

$$X(k) = \exp(j2\pi f_a kT) \quad (5)$$

ここで、 f_a は分析周波数である。 $d(k)$ は、一般的に希望応答と呼ばれる。このシステムにおいては、周波数成分 f_a を含んだ分析対象の信号となる。また、適応過程に必要な瞬時誤差 $\epsilon(k)$ は、この分析対象の信号 $d(k)$ とシステムからの出力信号 $y(k)$ との差で定義され、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon(k) &= d(k) - y(k) \\ &= d(k) - \{G(k)X(k) + \bar{G}(k)\bar{X}(k)\} \end{aligned} \quad (6)$$

さらに、この適応アルゴリズムはB. Widrowによって提案されたLMSアルゴリズム¹⁰⁾と同様に瞬時自乗誤差 $\epsilon^2(k)$ を最小にするアルゴリズムである。文献7)より、フーリエ係数 $G(k)$ とその複素共役 $\bar{G}(k)$ はサンプリング周期ごとにつぎの式を用いて連続的に更新される。

$$G(k+1) = G(k) + 4\mu\epsilon(k)\bar{X}(k) \quad (7)$$

$$\bar{G}(k+1) = \bar{G}(k) + 4\mu\epsilon(k)X(k) \quad (8)$$

ここで、 μ は収束性や安定性を制御するパラメータであり、ステップサイズパラメータと呼ばれている。文献9)より、安定条件はつぎのようになる。

$$0 < \mu < \frac{1}{4} \quad (9)$$

また、分析に必要なデータ数を示すこのシステム時定数は、つぎのようになる。

$$\tau_{sys} = \frac{T}{8\mu} \quad (10)$$

Fig. 3 Block diagram of transfer function $A(z)$

3.2 ノッチフィルタへの拡張

Fig. 2 で示したシステムを適応ノッチフィルタとして用いるために、(6) 式において分析対象の信号 $d(k)$ を入力信号、瞬時誤差 $\varepsilon(k)$ を出力信号とするシステムを考える。まず、 $G(k)X(k)$ と $\varepsilon(k)$ との関係を求めるために、(7) 式の両辺に $X(k+1)$ をかけ、 $X(k)$ が複素指数関数であることを用いるとつぎようになる。

$$\begin{aligned} G(k+1)X(k+1) &= G(k)X(k+1) + 4\mu\varepsilon(k)\bar{X}(k)X(k+1) \\ &= G(k)X(k)X(1) + 4\mu\varepsilon(k)X(1) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $G(k)X(k)$ を $W(k)$ とおけば、(11) 式はつぎのようになる。

$$W(k+1) = W(k)X(1) + 4\mu\varepsilon(k)X(1) \quad (12)$$

この式を z 変換することで伝達関数を求める。この式のブロック線図は Fig. 3 に示すことができ、その伝達関数を $A(z)$ とおけば、つぎのようになる。

$$A(z) = \frac{W(z)}{E(z)} = \frac{4\mu X(1)}{z - X(1)} \quad (13)$$

同様に、 $\bar{G}(k)\bar{X}(k)$ と $\varepsilon(k)$ との伝達関数は、つぎのようになる。

$$\bar{A}(z) = \frac{\bar{W}(z)}{E(z)} = \frac{4\mu\bar{X}(1)}{z - \bar{X}(1)} \quad (14)$$

さらに、これら 2 つの伝達関数を用いれば、分析対象の信号 $d(k)$ を入力信号、瞬時誤差 $\varepsilon(k)$ を出力信号と考えたシステムのブロック線図は Fig. 4 のようになる。その伝達関数 $H(z)$ は、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{E(z)}{D(z)} = \frac{1}{1 + A(z) + \bar{A}(z)} \\ &= \frac{z^2 - \{X(1) + \bar{X}(1)\}z + 1}{z^2 - (1 - 4\mu)\{X(1) + \bar{X}(1)\}z + 1 - 8\mu} \end{aligned} \quad (15)$$

また、 $X(1) \cdot \bar{X}(1)$ が 1 であるから、 $z = X(1)$ および $z = \bar{X}(1)$ において $H(z) = 0$ となる。つまり、周波数成分 f_a において、伝達関数 $H(z)$ のゲインは 0 となるので、(5) 式で設定した周波数の信号のみを除去できるノッチフィルタの特性を有していることがわかる。

4. 外乱除去システム

4.1 現状の外乱除去システム

本論文で用いるオートチェッカは、計量コンベアの固有振

Fig. 4 Block diagram of adaptive notch filter with the LMS algorithm

Table 2 Relation between weighing speed and frequency of noise

Weighing speed (packs/min)	Natural Oscillation (Hz)	Oscillation by Motor (Hz)	Oscillation by Pulley (Hz)
57	30.2	9.8	4.9
71		12.2	6.1
83		14.1	7.1
94		16.1	8.1
106		18.1	9.0

Fig. 5 Current system used in checkweigher

動は 30.2 Hz である。また、搬送能力を設定すると、(2) 式と (3) 式によってモータとプーリの回転による外乱の周波数が算出される。このオートチェッカのプーリの直径 d_p が 27 mm であり、プーリとモータの歯数比が 2 : 1 である。搬送能力と機械的な外乱の周波数成分の関係を Table 2 に示す。また、搬送能力と被計量物の長さを設定すると、(4) 式によって計量時間および計量ポイントが求まる。

これら 3 つの外乱と計量時間をもとに 4 種類の移動平均法のフィルタ長が算出される。その算出方法は、オートチェッカを開発時に繰り返し行なう精度確認実験によって求めた最適値である。現状の外乱除去システムは、算出された 4 種類の移動平均法を Fig. 5 に示すように縦続接続したものが用いられている。1 章で説明したように本論文で用いるオートチェッカでは、組み込み機器の制約から計量時間内で取得されたデータのみを Fig. 5 に示した外乱除去システムで処理する。全フィルタ長と計量時間内に取得されるデータ数が同じであるので、このシステムから出力されるデータは 1 点となり、この値から質量が算出される。現状のシステムでは、Table 1 に示したように被計量物は 300 mm までしか計量精度が保証されていない。

被計量物として長さ 350 mm のものを用いた場合の搬送能力と計量時間およびオートチェッカが自動的に算出した移動平均法のフィルタ長を Table 3 に示す。すべての外乱を除去するためには、算出されるフィルタ長は Table 2 に示す外

Table 3 Length of filter calculated from checkweigher

Weighing Speed (packs/min)	Measurement Time (ms)	Length of Filter			
		1	2	3	4
57	168	10	16	51	7
71	130	8	16	30	11
83	104	7	16	15	14
94	88	6	16	15	7
106	36	5	16	15	0

乱の周波数成分に対応したものでなくてはならない. Table 2 に示した外乱を除去するのに必要な移動平均法のフィルタ長を **Table 4** に示す. この表は, オートチェッカのサンプリング周期が 2ms であることをもとに計算したものである. しかし, Table 4 と Table 3 を比較すると, 移動平均法を用いた現状のシステムではすべての外乱成分を除去するのに必要なフィルタ長が得られていない. つまり, 現状のシステムでは除去できる外乱をその周波数成分から選択し, その外乱を除去するための移動平均法を縦続接続したものが用いられている. このことから, 移動平均法だけではすべての外乱を除去することができないので, 必要とされる計量精度を得ることができない可能性がある.

4.2 ノッチフィルタを用いた外乱除去システム

本論文では, 上述の問題を解決するために計量時間内に得られるデータに対して, **Fig. 6** に示すように 2 種類の移動平均法と 3 種類の適応ノッチフィルタを縦続接続したものをを用いた外乱除去システムを提案し, 長さ 350mm までの被計量物が計量可能であることを示す. 3 種類の適応ノッチフィルタは, 外乱の影響が大きいと考えられる順に縦続接続する. この図において, ノッチフィルタ A が固有振動に起因する外乱を除去するためのもの, ノッチフィルタ B がモータの回転によって生じる振動による外乱を除去するためのものであり, ノッチフィルタ C がプーリの回転によって生じる振動による外乱を除去するためのものである. また, これら適応ノッチフィルタへの入力データ数は, (10) 式に示される時定数とステップサイズパラメータとの関係を考慮して 20 点程度になるようにした. さらに, Table 3 で示した各搬送条件から得られた 4 種類の移動平均法のフィルタ長と 2 種類の移動平均法は Table 4 に示す 3 種類の外乱の周波数成分を除去するのに必要なフィルタ長との関係から外乱除去への効果を判断し, 選択した. このシステムで用いる 2 種類の移動平均法のフィルタ長と適応ノッチフィルタへの入力データ数を **Table 5** に示す. この表において, 適応ノッチフィルタへの入力データ数は, Table 3 で示した 4 種類の移動平均法のフィルタ長のうちで選択されなかった 2 種類の移動平均法のフィルタ長の和になる.

ここで, 適応ノッチフィルタが IIR 型のフィルタであることが問題となる. 一般的に, IIR フィルタは急峻な変化をするデータが入力された場合には過渡現象が長時間持続するという問題がある. **Fig. 7** に実際にオートチェッカから得られたデータを示す. この図において, 縦軸の値は AD 変換器

Table 4 Relation between weighing speed and length of filter

Weighing speed (packs/min)	Natural Oscillation	Oscillation by Motor	Oscillation by Pulley
57	16	51	102
71		41	82
83		35	70
94		31	62
106		28	56

Fig. 6 Proposed system used in checkweigher**Table 5** Length of filter with proposed system

Weighing Speed (packs/min)	Length of Filter		Amount of data for Notch Filter
	Filter A	Filter B	
57	16	51	17
71	16	30	19
83	16	15	21
94	16	6	22
106	16	0	20

から出力されるカウンタ値である. この図において, 計量時間は 0.854s から 1.022s 付近である. この図からわかるように, 動的質量計測に用いるデータは被計量物が計量コンベアに載ることによって生じる大きな直流成分に周期的に変化する小さな 3 種類の機械的な外乱が合わさったデータである. このデータを適応ノッチフィルタに入力すると過渡現象が長時間持続し, 20 点程度のデータ数では収束しないと考えられる. そこで, この直流成分の影響を少なくすることでそのような状態にならないようにした. まず, 2 種類の移動平均法から出力されるデータ数を N とし, そのデータを $x(k)$ ($k = 1, \dots, N$) とおく. 適応ノッチフィルタへの入力データ数も N となる. Fig. 6 に示したノッチフィルタ A に入力する $x_1(k)$ ($k = 1, \dots, N$) を直流成分の影響を少なくするためにつぎのようにした.

$$x_1(k) = x(k) - x(1) \quad k = 1, \dots, N \quad (16)$$

そして, ノッチフィルタ A に最後のデータ $x_1(N)$ を入力したときに, ノッチフィルタ C から出力される $\varepsilon_3(N)$ に $x(1)$ を加えたものを最終的な質量とした.

5. 実 験

5.1 ステップサイズパラメータの同定実験

適応ノッチフィルタをオートチェッカで用いるために, 最も問題となるのがステップサイズパラメータの選定方法である.

Fig. 7 Data obtained from checkweigher

Table 6 Relation between optimum value of step-size-parameter and weighing speed

Weighing Speed (packs/min)	Step-size-parameter		
	Natural Oscillation	Oscillation by Motor	Oscillation by Pulley
57	0.094	0.007	0.005
71	0.088	0.007	0.006
83	0.082	0.008	0.006
94	0.077	0.008	0.007
106	0.072	0.009	0.007

サンプリング周期が 2 ms であるので, Table 3 と Table 5 より, 適応ノッチフィルタは 40 ms 程度で収束しなければならない. (10) 式より, ステップサイズパラメータの値は 0.006 程度以上の値であることが望ましい. また, 適応ノッチフィルタに用いている適応アルゴリズムは, ステップサイズパラメータが周波数特性に影響を及ぼすことがわかっている⁹⁾. 低い周波数帯域ではステップサイズパラメータの値を大きくすると直流成分に影響を与えることが考えられる. つまり, オートチェッカの外乱除去に応用する場合には, この値によって, システムの収束性や周波数特性が変化し, その結果, 計量ポイントでの出力値 $\varepsilon(k)$ が変わり, 計量精度に影響することになる.

本論文では上述のことを考慮して, 外乱の周波数成分が低いモータとプーリの回転によって生じる外乱に対しては, ステップサイズパラメータは 0.005 から 0.01 程度の範囲で, オートチェッカの計量精度が最も良くなる値を選定する. 一般的に, オートチェッカでは 30 回程度の計量を繰り返し行ない, その標準偏差を求め, それを 3 倍した値 (3σ) によって計量精度を評価している. 本論文においても, この評価方法を採用して最適なステップサイズパラメータの設定方法を決定した. つまり, 3 種類目の適応ノッチフィルタから出力される計量ポイントでの質量を求める実験を各搬送能力に対して 30 回繰り返し行ない, その標準偏差を 3 倍した値 (3σ) が最小となったステップサイズパラメータを最適値とした. 1030.0 g の被計量物に対して, 搬送条件および移動平均法で用いるフィルタの種類を Table 5 に示す 5 種類とし, 3 種類の外乱の周波数成分は Table 2 として実験を行なった. 求まったステップ

(a) Natural oscillation

(b) Oscillation by motor and pulley

Fig. 8 Identification results of step-size-parameter

サイズパラメータと搬送能力との関係を Table 6 に示す.

さらに, 本論文で用いたオートチェッカの処理システムは, 独自に開発された組み込み機器が採用されており, メモリ上の制約を受ける. つまり, あらかじめすべての条件における最適なステップサイズパラメータを求め, メモリに保存しておくことも困難である. そこで, 最適なステップサイズパラメータの値を搬送能力から算出できるようにするため, 関数近似する方法を採用する. Table 6 をグラフにプロットした結果を Fig. 8 に示す. 簡単に搬送能力から 3 種類の外乱に対するステップサイズパラメータ ($\mu_{Natural}$, μ_{Motor} , μ_{Pulley}) を求めるために 1 次式で近似を行なうことにした. 求まった式は, つぎのようになる.

$$\begin{aligned}\mu_{Natural} &= -0.00045WS - 0.11959 \\ \mu_{Motor} &= 4.0816 \times 10^{-5}WS + 0.00457 \\ \mu_{Pulley} &= 4.0816 \times 10^{-5}WS + 0.00267\end{aligned}\quad (17)$$

ここで, WS は搬送能力を示す.

5.2 精度比較実験

提案する移動平均法と適応ノッチフィルタを併用した外乱除去システムの有効性および前節で提案したステップサイズパラメータの選定方法の有効性を確認するために, Table 7 で示した 5 種類の被計量物に対して Table 2 で示した 5 種類の搬送条件で計量精度を求め, 4 種類の移動平均法のみを用いた方法と比較した.

4 種類の移動平均法のみを用いた質量計測実験では, オー

Table 8 Result of comparative experiment

Weighing Speed (packs/min)	Amount of input data	weight (g)	Three times standard deviation (g)		
			Current Method	Proposed Method	Warranty max. values
57	17	716.0	0.641	0.672	1.0
		1030.0	0.414	0.740	
		1366.0	0.578	0.508	
		1610.0	1.490	0.558	
		1950.0	1.570	1.352	
71	19	716.0	1.000	0.876	1.0
		1030.0	1.327	0.423	
		1366.0	2.807	1.126	
		1610.0	0.996	1.072	1.5
		1950.0	2.298	1.287	
83	21	716.0	2.034	1.148	1.5
		1030.0	0.524	1.235	
		1366.0	2.540	2.181	2.0
		1610.0	2.464	1.016	
		1950.0	4.887	4.855	
94	22	716.0	4.239	2.199	1.5
		1030.0	2.235	2.036	
		1366.0	3.168	2.561	2.0
		1610.0	7.950	3.507	
		1950.0	5.618	5.952	
106	20	716.0	8.406	4.285	2.0
		1030.0	5.360	3.936	
		1366.0	2.614	2.593	
		1610.0	13.613	7.777	
		1950.0	10.002	6.426	

Table 7 Length and weight of measurement objects used to experiment

Length (mm)	Weight (g)
350	716.0
	1030.0
	1366.0
	1610.0
	1950.0

トチェッカが自動的に算出するフィルタ長 (Table 3) を用いた。また、提案している外乱除去システムを用いた質量計測実験では、Table 5 に示す 2 種類のフィルタ長の移動平均法を用い、Table 2 に示す 3 種類の外乱の周波数成分が除去できる 3 種類の適応ノッチフィルタを用いた。この実験を各条件に対して 30 回行ない、その標準偏差を 3 倍した値 (3σ) を求めて、計量精度の比較を行なった。その結果を **Table 8** に示す。

Table 8 における右端の列は、被計量物の長さが 300 mm の場合における保証されている計量精度である。これらの値からわかるように被計量物の長さが同じ場合においても、質量が増加すれば、保証されている計量精度は悪くなっている。これは、被計量物が計量コンベアに搬入された場合に計量コンベアに作用する力の大きさが、質量が増加することによって大きくなるために、Fig. 7 に示した 1.0 ms 付近の振動が大きくなるためである。

この表から、オートチェッカが自動的に算出する 4 種類の

移動平均法のみを用いた外乱除去システムでは、1600 g 以下の被計量物に対して、57 packs/min の搬送能力では、規格内の 300 mm と同程度の精度で計量できた。しかし、それ以外の搬送能力では規格内の 300 mm と同程度の精度で計量はできなかった。一方、本論文で提案している外乱除去システムでは、51 packs/min と 71 packs/min の搬送能力においては規格内の 300 mm と同程度の精度で計量できた。また、83 packs/min の搬送能力においても 1600 g 以下の質量範囲では、規格内の 300 mm と同程度の精度での計量できた。さらに、94 packs/min の搬送能力においても 1000 g 以下の質量範囲では、2.0 g 程度の軽量精度で計量できた。この結果から、これらの範囲では十分に使用可能であると考えられる。しかし、106 packs/min の搬送能力では、オートチェッカが自動的に算出する 4 種類の移動平均法のみを用いた外乱除去システムよりは、計量精度は向上したが、使用可能な精度は得られなかった。

6. 結 果

現在、主に産業計測の分野で使用されているオートチェッカには、構造上、機械的外乱が生じる。近年、高速高精度に計測を行なうために FIR (Finit Impulus Response) フィルタを用いた方法が提案されている^{3), 4)}。オートチェッカの場合、フィルタ処理には計量時間と呼ばれる被計量物全体が計量コンベアに載った時間から計量ポイントと呼ばれる選別が開始される時間までに得られたデータしか用いることができ

ない。さらに、オートチェッカでは組み込み機器を用いるのでフィルタ次数や処理速度の制限もある。そこで、市販されているオートチェッカでは移動平均法が使用されることが多い。被計量物が長い場合、搬送能力を低く設定しても、生じる機械的な外乱の周波数成分は低く、その外乱を除去できるだけのデータ数を確保することはできない。

そこで、本論文では計量時間内に得られるデータを最大限に有効利用するためにオートチェッカが自動的に算出する4種類の移動平均法の中で、外乱除去に効果が少ないと考えられる2種類のフィルタの処理を実施せずに3種類の適応ノッチフィルタの入力として使用する外乱除去システムを提案し、その有効性を実験的に検証するためにオートチェッカの標準仕様外の長さ350 mmの被計量物を用いて実験を行なった。

その結果、オートチェッカが自動的に算出する4種類の移動平均法のみを用いた外乱除去システムでは、1600 g以下の被計量物に対して、57 packs/minのみが規格内の300 mmと同程度の精度で計量可能であったが、それ以外の搬送能力では規格内の300 mmと同程度の精度で計量はできなかった。一方、本論文で提案している外乱除去システムでは、57 packs/minと71 packs/minの搬送能力において規格内の300 mmと同程度の精度で計量が、83 packs/minの搬送能力においても1600 g以下の質量範囲では、規格内の300 mmと同程度の精度での計量が可能となった。さらに、94 packs/minの搬送能力においても1000 g以下の質量範囲では、2.0 g程度の軽量精度で計量できた。この結果から、これらの範囲では十分に使用可能であると考えられる。

移動平均法で使用する全フィルタ数を削減し、削減したデータ長の適応ノッチフィルタを用いた外乱除去システムは、計量時間外から得られたデータを用いない方法である。このことから、被計量物の寸法が長くなり、十分な計量時間を得ることが困難な場合の能動ベルトコンベア式のオートチェッカの性能を向上させるために有効な方法であるといえる。

参 考 文 献

- 1) 小野敏郎：動的質量計測の考え方，計測自動制御学会学術講演会予稿集，43/44 (1999)
- 2) 小野敏郎：動的質量計測，設計工学，**38-10**, 489/495 (2003)
- 3) 山崎・黒須ほか：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)
- 4) 山崎・黒須ほか：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**, 1205/1201 (2004)
- 5) 梅本ほか：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)
- 6) 宮田・相川：コンベアライン上での動的重量計測のための可変直線位相 FIR フィルタの一設計法，信学技報，**109-435**, SIP2009-124, 7/12 (2010)
- 7) 梅本・青島：適応技術を用いた採譜に有効な周波数分析法，計測自動制御学会論文集，**28-5**, 619/625 (1992)
- 8) 梅本・青島：適応フィルタによる周波数分析におけるステップサイズパラメータの選定，計測自動制御学会論文集，**28-10**, 1257/1262 (1992)
- 9) 梅本・青島：適応離散フーリエ変換とその応用，計測自動制御学会論文集，**30-8**, 959/965 (1994)

- 10) B. Widrow and S.D. Stearns: Adaptive Signal Processing, New Jersey, Prentice-Hall, Inc. (1985)

[著 者 紹 介]

梅 本 敏 孝 (正会員)

1986 年防衛大学校卒業。同年陸上自衛隊入隊。94 年筑波大学博士課程修了。博士 (工学)。95 年大阪府立高専講師。2010 年同教授。2011 年大阪府立大高専教授，現在に至る。動的質量計測，適応フィルタなどに関する研究に従事。

加 門 守 人

大和製衡株式会社に在職。

香 川 洋一郎

大和製衡株式会社に在職。