多連秤による改良型連続秤量法[†]

田 崎 良 佑*・山 崎 敬 則**・大 西 秀 夫***
小 林 政 明***・黒 須 茂****

Improved Continuous Weighing by Multi-stage Conveyor Belt Scale[†]

Ryosuke TASAKI*, Takanori YAMAZAKI**, Hideo OHNISHI***,
Masaaki KOBAYASHI*** and Shigeru KUROSU****

In this paper, we propose higher speed and highly accurate weighing method of packages during crossing a conveyor belt. Continuous weighing means that the masses of discrete packages on a conveyor belt are determined in sequence. Through the new weighing method, a weighing scale (called a multi-stage conveyor belt scale) can be created so as to adjust the conveyor belt length to the product length. In a previous paper, the masses of products have been estimated successfully as the maximum values evaluated from the output smoothed signals. However, there have been still some crucial problems that the estimation errors were sometimes getting worse. One of causes has been due to the fact that the output signals had several peak values like a winding path. In this paper, our interest is directed to solve many technical problems when we put the multi-stage conveyor belt scale into practical use. Consequently, our weighing method proposed here is not sufficient for highly accurate weighing, but the limit of practicability has been verified by experiment.

Key Words: weighing, mass measurement, conveyor belt scale

1. はじめに

近年, 物流, 食品業界などにおいて, 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, ロードセル(はかり)により秤量された計測データから, 質量をいかに効率よく推定するかが重要な課題となっている。すでに, 異なる長さ, 質量の秤量物を, 複数個の計量コンベア(以下, 多連秤とよぶ)を配置し, 秤量物の長さに応じてその出力を組み合わせた多連秤による連続秤量が実用化されている^{1),2)}。

計量コンベア上に搬送される秤量物の質量測定は, 動的質量計測の分野に属し, この分野での研究は, 前田らによる「船上での計測」^{3)~8)}, 小野らの「動的質量計測」^{9)~12)}, 「相対補償法」^{13)~16)}があり, 最近においても多くの研究が精力的

に行なわれている。

秤量物の動的質量測定では, 秤量物と計量システムとからなるシステムの厳密な数学モデルが前提となる。著者らはシステム全体をあまり難しくせず, できるだけ簡易化したモデルで一般化する方法をとる。また, FIR フィルタによって平滑化されたデータの最大値から秤量物の質量を推定する簡易測定法を提案し, 報告している^{17)~20)}。

工業的使用条件において厳しい要求が課せられる状況下で, 多連秤は実用上の問題点が多く, 高速, 高精度化の要求には必ずしも答えられていない。メーカ側では優れた性能を実現するために, 機構の改良などハードウェアの側面からの改善に力が注がれているようである。既論文¹⁸⁾では多連秤による連続秤量を信号処理として捕らえ, ソフトウェアの側面から数理的に検討した簡易測定法を提案しているが, 本論文ではこの方法の技術的な問題点を明らかにし, 改善策を施した実験結果を通して多連秤の実用性の限界を検証する。

2. 計量システム

コンベアライン上に搬送された物体を, 連続的に秤量する計測システムを考える。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, これを計量コンベアとよぶ。各計量コンベア間に配置してある光電スイッチにより, 秤量物の長さ, 間隔, 搬入してくる時刻が計測され

[†] SICE Annual Conference 2004 in Sapporo で発表(2004・8)

* 京都工芸繊維大学 京都市左京区松ヶ崎橋上町

** 小山工業高等専門学校 小山市中久喜 771

*** 新光電子(株) 下妻市高道祖 4219-71

**** クロテック(研究所) 下館市女方 61-88

* Kyoto Institute of Technology, Kyoto

** Oyama National College of Technology, Oyama

*** Shinko Co., Ltd., Shimotsuma

**** Research Inst. Crotech, Shimodate

(Received May 28, 2004)

(Revised September 17, 2004)

Fig. 1 Multi-stage conveyor belt scale

る. Fig. 1 において, 連続する秤量物の長さ l_i [cm], 連続する秤量物の間隔 d_i [cm], 計量コンベアの長さ $L_1=L_2=40$ [cm], $L_3=60$ [cm], 搬送速度 $v=132$ [m/min] である.

本研究で述べる多連秤では, 既論文¹⁸⁾ よりつぎのような計量コンベアの組み合わせを考えている.

$20 \leq l_i \leq 40$ [cm] に対して単連秤 ($L_3=60$ [cm]),

$40 < l_i \leq 60$ [cm] に対して二連秤 1 ($L_1+L_2=80$ [cm]),

$60 < l_i \leq 80$ [cm] に対して二連秤 2 ($L_2+L_3=100$ [cm]),

$80 < l_i \leq 125$ [cm] に対して三連秤 ($L_1+L_2+L_3=140$ [cm]).

一般に, デジタルフィルタ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, 入力データのみで出力が計算され, 過渡現象が持続しない. したがって, 連続秤量のように高速処理を要求される分野では FIR フィルタが適切である. FIR フィルタの設計法については既論文¹⁷⁾ に述べたので割愛する. 通過域と阻止域の設計条件 ($\Omega_p=0.002$, $\Omega_s=0.05$) とし, 阻止域の低いエッジ周波数 $f_s=12.5$ [Hz], パルス伝達関数の次数 $M=42$ 次の FIR フィルタによって, 周期 0.5 [ms] の測定データをダウンサンプリング (周期 4 [ms]) してフィルタ処理を行なう. その後, 一次系のフィルタ (シャ断周波数 80 [Hz]) を通過させて平滑化する. また, 二連秤, 三連秤の場合には, 各計量コンベアの平滑化されたデータを足し合わせた後, 再度同じ一次系フィルタを通過させる.

3. 実用上の問題点

3.1 最小間隔(幾何学的測定可能条件)

連続秤量の高速化のためには, コンベアラインの搬送速度 v を上げるか秤量物の間隔をできるだけ狭くすればよいが, 搬送速度を上げると秤量物が計量コンベア上に搭載される時間が短くなり, 測定誤差をマイナス側に増大させてしまうので, ここでは測定可能となる秤量物の最小間隔を検討する.

多連秤の長さを L (三連秤では $L=L_1+L_2+L_3$) とし, 多連秤の出力波形が定常値を示すのに必要な秤量物の移動距離を S とする. Fig. 1 より, 質量 m_i の秤量物が多連秤に搭載し, 移動距離 S を確保するための最小間隔 d_s はつぎのように書ける.

$$2d_s \geq L - l_i + S \quad (d_s = \min(d_{i-1}, d_i)) \quad (1)$$

(1) 式において $S=20$ [cm] とした場合に, 各多連秤におけ

Fig. 2 Minimum space between the products

Fig. 3 Experimental result (three products in sequence)

Fig. 4 Experimental result (a single product)

る最小間隔 d_s を計算した結果を示したのが Fig. 2 である. これより, $d_s \geq 40$ [cm] であればよいことになる. ただし, S の値は v によって変える必要がある.

3.2 不等分布荷重

多連秤からの出力を FIR, 一次系フィルタによって平滑化した測定データの最大値から, 秤量物の質量を推定する簡易測定法を明らかにしてきたが^{17), 18)}, 秤量物を連続して搬送するさいに, この方法が適用できない事例が生じた.

Fig. 3 は三連秤の出力波形の一例であり, $l_i=100$ [cm], $m_i=80$ [kg] の秤量物を間隔 $d_i=60$ [cm] で 3 個連続して搬送したときの出力波形である. 秤量物の底板が平坦で荷重を等分布荷重と考えれば, その出力波形は明確な 3 つのピーク

値をもつが、実際の出力波形にはいくつかのうねりが出現している。これは、秤量物の底板の反りやそれぞれの計量コンベア間の微小な段差により、計量コンベアに加わる荷重が不等分布荷重であることに起因している。

つぎに、Fig. 3の場合と同じ長さ、質量の秤量物を単体で搬送したさいの出力波形を Fig. 4に示す。各計量コンベアの出力を加えた合計の出力波形は、山の裾野を広げている。このとき、秤量物が多連秤から搬出される以前に、つぎの秤量物が搬入されると、Fig. 3に示すようなうねりが出現する。うねりは常時現われるわけではないが、秤量物の間隔が狭いほど出現頻度は増える。

4. 最大値を探索する時間区間 T_b

Fig. 3に示す出力波形に、秤量物の正しい質量 80 [kg]を示す区間があることは、破線上に示す○印から明らかである。このことは、出力波形のある特定の時間範囲 T_b 内で最大値を探索すればよいことを示唆している。以下に述べる結果はシミュレーションによるものであり、計量コンベアの数学モデル、信号処理のアルゴリズムはすでに報告している^{17)~19)}。数学モデルは質量一ばね系から構成され、秤量物の質量 m_i が計量コンベアに搬入されたときに入力荷重の変化となり、ロードセルの出力をもって m_i を推定する。

4.1 等分布荷重における最大値時刻 T_M

多連秤の出力波形において、秤量物が計量コンベア上に搬入してから最大値を示すまでの時間(最大値時刻 T_M とよぶ)を測定する。ここでは、秤量物は単体で搬送した場合を想定している。20 ≤ l_i ≤ 125 [cm], 20 ≤ m_i ≤ 80 [kg] についての最大値時刻 T_M の分布を Fig. 5に示す。これより、すべての多連秤で T_M は秤量物の長さに比例して増加していることがわかる。 T_M についての近似式はつぎのようになる。

$$T_M = a_0 + a_1 l_i \quad (2)$$

ここに、係数 a_0, a_1 を Table 1に示す。 T_M は秤量物が多連秤のほぼ中央に位置した時刻であるから、 a_0, a_1 の違いは各多連秤の長さの違いによる。

4.2 不等分布荷重での最大値時刻の変動

つぎに、Fig. 6のような両端に質量が偏った不等分布荷重

Fig. 5 Distributions of maximum times T_M with product length l_i

をもつ秤量物を考え、秤量物と計量コンベアとの接触長さ l_c 、分布荷重 m_a, m_b ($m_i = m_a + m_b$) を変更して最大値時刻の分布を調べた。ここで、秤量物は単体で流した場合を想定し、秤量物の長さは、単連秤: $l_i = 30$ [cm], 二連秤 1: $l_i = 50$ [cm], 二連秤 2: $l_i = 80$ [cm], 三連秤: $l_i = 110$ [cm] である。また、 $l_c = 0.2l_i \sim 0.6l_i$ [cm] ($0.2l_i$ 刻み), $m_a = 0.1m_i \sim 0.9m_i$ [kg] ($0.1m_i$ 刻み) と変更した。

Fig. 7(a)~(d)は、各条件において m_a を変えたときの最大値時刻を示した結果で、図中の実線は等分布荷重での最大値時刻 T_M 、破線は $T_M \pm 10$ [ms] を示している。三連秤において $l_i = 110$ [cm], $m_i = 20$ [kg], $l_c = 0.4l_i$ [cm] の場合に、 m_a を変更したときの出力波形の一例を Fig. 8に示す。 m_a の変化とともに、最大値時刻が連続的に移動している。

Fig. 7において $T_M \pm 10$ [ms] から最大値時刻が逸脱している測定点について説明する。とくに、Fig. 7(d)における $l_c = 0.6l_i$ では、全データがこの領域から離れたところにある。それはつぎの理由による。Fig. 9は二連秤1の実験結果で、実線は $l_c = 0.2l_i$, $m_a = 0.1m_i$ (Fig. 7(b)の○)の不等分布荷重での出力波形、破線は同じ長さの秤量物を等分布荷重と想定した場合の足し合わせた出力波形を示している。不等分布荷重での足し合わせた出力波形は、真の質量ではないピーク値を生み出していることがわかる。このピーク値は、質量 $m_b (= 0.9m_i)$ が2段目の計量コンベアへ搬入するときの過渡応答と、1段目の計量コンベアから搬出するときの過渡応答とが重なるときに発生している。この部分では急峻な入力荷重が加わることによって、直線となるべき波形が曲線となり、それらが重なることで真の質量ではないピーク値を生み出している。しかしながら、このようなピーク値をもつ出力波形(実線)と等分布荷重での出力波形(破線)とが、真の質量であるピーク値近傍で一致していることがわかる。この事実が、うねりをもつ出力波形から正確な質量測定値を得るための重要な情報となる。以上のことから、秤量物の正確な質量はつぎの範囲内に存在することが明らかである。

$$T_b \leq T_M \pm 10 \text{ [ms]} \quad (3)$$

Table 1 Coefficients a_0 and a_1

	a_0	a_1
single-stage	0.2187	0.0024
two-stage 1	0.2387	0.0028
two-stage 2	0.2995	0.0025
three-stage	0.3275	0.0030

Fig. 6 Schematic view of a product with non-uniformly distributed weight

(a) single-stage conveyor belt scale

(b) two-stage 1 conveyor belt scale

(c) two-stage 2 conveyor belt scale

(d) three-stage conveyor belt scale

Fig. 7 Distributions of maximum times for non-uniformly distributed load

Fig. 8 Time behaviors around peak values (magnified)

Fig. 9 Simulation result for unwanted quasi-maximum

5. 多連秤における実測例

5.1 測定誤差率の分布

以上の考察をもとに、多連秤による測定実験を実施する。長さ l_i と質量 m_i が同じ秤量物を3個連続して搬送する。ここで、 $20 \leq l_i \leq 130$ [cm] (10 [cm] 刻み)、 $20 \leq m_i \leq 80$ [kg] (20 [kg] 刻み)、 $d_1 = d_2 = 40, 50$ [cm] とし、各秤量物の長さ l_i 、質量 m_i について、同じ条件で7回搬送を行なっている。実験で得られた測定誤差率 ε [%] の分布を Fig. 10 (a) ~ (d) に示す。これらより、要求された精度 ± 0.7 [%] の許容範囲に収まっているものの、一部に逸脱したデータもある。また、秤量物の間隔 d_i の違いによって、 ε とその分布にほとんど違いがない。

各秤量物の長さ l_i に関して、平均誤差率 $\bar{\varepsilon}$ を求めた結果を Table 2 に示す。これより、ほぼすべての条件における $\bar{\varepsilon}$ が、 ± 0.7 [%] の許容範囲に収まっているが、単連秤において $l_i = 20$ [cm] が許容範囲をプラス側に逸脱している。これは、 l_i が短くなると、搬入と搬出時の入力荷重のパターンがパルス状となり、その過渡現象の影響が出てきたものと考えられる。ここで、三連秤における $l_i = 90$ [cm] の場合に、秤量物の間隔 d_i の違いによって $\bar{\varepsilon}$ が最も大きく異なっている。これは、 $d_i = 40$ [cm] の場合に(1)式の測定可能条件をほぼ限界で満足することが原因であり、 ε をプラス側に大きくしている。

5.2 低周波ノイズによる攪乱

実測例の中でごく少ない頻度ではあるが、要求精度から外れたデータが収録された。出力波形を時系列で見ると、2~13 [Hz] の低周波ノイズによって測定データが乱されていることが判明した。一例として、 $l_i = 50$ [cm]、 $d_i = 40$ [cm] で、 $m_i = 20$ [kg] ならびに $m_i = 60$ [kg] の秤量物を3個連続して搬送したときの1段目の計量コンベアの出力行を Fig. 11 (a), (b) に示す。 $m = 20$ [kg] の場合では2~2.5 [Hz]、 $m_i = 60$ [kg] では5~6.5 [Hz] の低周波ノイズによって出力波形が汚されていることがわかる。この場合、 $l_i = 50$ [cm] であるから二連秤で秤量すべきである。ところが、同じ条件で三連秤に加わる入力荷重を示したのが Fig. 12 (a), (b) である。(a)は等分布荷重、(b)は不等分布荷重($l_c =$

(a) single-stage conveyor belt scale

(b) two-stage 1 conveyor belt scale

(c) two-stage 2 conveyor belt scale

(d) three-stage conveyor belt scale

Fig. 10 Distributions of estimation errors

Table 2 Mean estimation errors

conveyor belt scale	length of product [cm]	mean value of ε [%]	
		$d_i=40$ [cm]	$d_i=50$ [cm]
single-stage	$l_i=20$	1.041	0.942
	$l_i=30$	0.340	0.384
	$l_i=40$	-0.118	-0.040
two-stage 1	$l_i=40$	-0.153	0.096
	$l_i=50$	-0.102	-0.019
	$l_i=60$	-0.228	-0.264
two-stage 2	$l_i=60$	-0.521	-0.665
	$l_i=70$	-0.426	-0.151
	$l_i=80$	-0.635	-0.700
three-stage	$l_i=90$	0.371	-0.102
	$l_i=100$	-0.106	-0.120
	$l_i=110$	-0.440	-0.243
	$l_i=120$	-0.574	-0.271
	$l_i=130$	-0.649	-0.736

(a) $m=20$ [kg](b) $m=60$ [kg]

Fig. 11 Experimental results (first-stage)

(a) $m=20$ [kg](b) $m=60$ [kg]

Fig. 12 Time behavior of loading input

0.2 l_i , $m_a=m_b=0.5m_i$)を想定している。計量コンベアの入力荷重を合計すると2.5 [Hz], 5 [Hz]のパルス状の衝撃力が出現している。

低周波ノイズの発生には、入力荷重の衝撃力による影響が考えられるものの、6 [Hz]以上となると入力荷重の衝撃力からは考えにくい。この低周波ノイズによる測定データへの攪乱は、持続するものではなくすぐに減衰するが、少ない頻度とはいえ質量測定には悪影響を与える。低周波ノイズの発生に対する原因究明は今後の課題であり、多連秤の連続秤量では解決されるべきである。

6. 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を高速、高精度で測定するために、複数の計量コンベアの出力を組み合わせた多連秤による改良型連続秤量法を提案し、工業的使用条件下でその実用性を検討した。

本研究の成果をまとめると、つぎのようになる。

- 1) 多連秤によって秤量物の質量を連続測定するさいに必要な秤量物の最小間隔 d_s の幾何学的条件を示した。
- 2) 多連秤の出力波形に複数のピーク値が発生する問題を不等分布荷重によるものと考え、特定の範囲内における最大値をもって質量を推定する方式を提案した。
- 3) 秤量物の長さ 20~130 [cm] に対して多連秤による改良型連続秤量法を適用し、多くの実験例で平均誤差率 $\pm 0.7\%$ 以下が保証できるものの、個々の測定点ではこの範囲を逸脱するものがあつた。

本研究では、秤量物の長さに応じた多連秤の問題点を数理的、実験的に検証し、その実用性の限界を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) R. Schwartz: Automatic weighing-principles, applications & developments, Proceedings of XVI IMEKO World Congress (Vienna), 259/267 (2000)
- 2) 公開特許公報：特開平 10-122940 (1998), 特許第 3249055 号 (2001), European Patent Application EP 0953828 A 1 (1999)
カタログ：OCS In-Motion Scales (OCS Checkweigher GmbH (Germany)) (Post-Expo 2002)
- 3) T. Nishiyama and C. Maeda: Shipboard Scale, ACTA IMEKO, 415/424 (1976)
- 4) C. Maeda and T. Nishiyama: Dynamics of a Shipboard Scale, ACTA IMEKO, 105/114 (1982)
- 5) C. Maeda and R. Masuo: A Shipboard Scale of Electro-mechanical Type Using Strain-Gage, IMEKO TC 3 Kobe, 169/174 (1984)
- 6) C. Maeda and R. Masuo: Electric Type Shipboard Scale, ACTA IMEKO, 299/306 (1985)
- 7) C. Maeda and R. Masuo: Electric Type Shipboard Scale (New System by Measuring Oscillating Period of the Scale), ACTA IMEKO, 215/222 (1988)
- 8) 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)
- 9) T. Ono: Applications of the Estimation Theory to Dynamic Weighing Problems, ACTA IMEKO-1976, 2, 425/434 (1977)
- 10) 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)
- 11) 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)
- 12) 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)
- 13) 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)
- 14) 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)
- 15) 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)
- 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) 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)
- 18) 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)
- 19) T. Yamazaki, et al.: Continuous Mass Measurement in Check weighers and Conveyor Belt Scales, Proceedings of IMEKO TC 3/TC 5/TC 20, Celle in Germany 295/301 (2002)
- 20) R. Tasaki, et al.: Technical Problems in Multi-stage Conveyor Belt Scale, Proceedings of APMF 2003/IMEKO TC 3, Shang-hai in China 145/153 (2003)

[著 者 紹 介]

田 崎 良 佑 (学生会員)

2004 年小山工業高等専門学校機械工学科卒業。現在、京都工芸繊維大学工学部機械システム工学科在学中。

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。2002 年小山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利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。2003 年同校退職。現在、クロテック(研究所)代表、空調システムの解析と制御に従事。(工学博士)