動的質量計測における時系列データによる
モデル同定と信号処理に関する研究

２０１６年　３月

青木　伸夫

動的質量計測における時系列データによる
モデル同定と信号処理に関する研究

青木　伸夫

システム情報工学研究科

筑波大学

２０１６年　３月

概要

本論文の目的は，質量計測システムであるロードセル式はかりを対象に，動物や移動物体が動いている状態で，被測定物と質量計測システムの動特性を同定し，適応フィルタで質量を計測する動的質量計測法を確立することにある．

第２章では，静止状態が存在する被測定対象に対して，まず質量計測システムの原理ならびに信号処理の過程から，そのシステムが状態方程式でモデル化できることを明らかにした．この出力信号をサンプリングして得られる時系列データから，動的質量計測の基礎となる質量計算式を導出した．動的質量計測には，質量計測システムのパラメータ同定を行い，そのパラメータと過渡データから質量が求められることを明らかにし，この手法を使うことで，台はかりの計量の高速化が可能となることを示した．

第３章では，質量計測システムだけでなく被測定物の動特性にも着目し，被測定物も含めたシステムの状態方程式から，走行車両の質量計算式を導出した．ただし，被測定物ごとにパラメータが変化することから，出力信号をサンプリングして得られる時系列データからオンラインでパラメータを同定する手法を明らかにした．その結果，適応フィルタを構成して走行車両の質量計測を実システムに適用し，十分な精度が得られることを示した．

第４章では，家畜が歩行している状態で体重計測を行う動的質量計測が，牛の歩行状態での質量変動の解析を行い，歩行周期の同定から可能であることを示した．牛が歩行する毎に，出力信号をサンプリングして得られる時系列データから歩行周期を同定し，次数可変の適応フィルタを構成し，歩行時の体重計測を実現した．実際の牛群に適用し飼養管理に必要な精度を有することを示した．

第５章では，本研究で得られた成果をまとめ，モデル同定による動的質量計測は，新たな計量方式を確立できることを示した．

目次

第１章　序論　1

1.1　研究の背景　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　1

1.2　研究の目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3

1.3　本論文の構成　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4

第２章　はかりのモデル同定による高速計量　5

2.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5

2.2　台はかりのデータ解析　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5

2.3　台はかりの高速計量　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9

2.4　実システムへの適用　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　１６

2.5　まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２０

第３章　パラメータ可変フィルタによる動態計量　２１

3.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２１

3.2　走行車両のデータ解析　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２２

3.3　走行車両の動態計量　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２４

3.4　実システムへの適用　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　３４

3.5　まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４２

第４章　次数可変フィルタによる動態計量　４３

4.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４３

4.2　牛の歩行時のデータ解析　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４４

4.3　歩行動物の動態計量　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４７

4.4　実システムへの適用　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５５

4.5　まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５８

第５章　結論　５９
5.1　研究成果　・・・

図　目次

Fig.1	Outline of this thesis	4
Fig.2	Measurement system	6
Fig.3	Measurement data	7，8
Fig.4	Measurement data and computed result	１８
Fig.5	Measurement system	２２
Fig.6	Vehicle scale	２３
Fig.7	Measurement data	２３
Fig.8	Series connection of FIR filters	３３
Fig.9	Output signal of low-pass filter	３４
Fig.10	Output of fixed-parameter filter	３６
Fig.11(a)	Output of second-order adaptive filter	３７
Fig.11(b)	Output of forth-order adaptive filter	３８
Fig.11(c)	Output of sixth-order adaptive filter	３９
Fig.11(d)	Output of eighth-order adaptive filter	４０
Fig.12	Measurement system	４５
Fig.13	Measurement data	４５
Fig.14	Series connection of FIR filters	５１
Fig.15	Output of rectangular filter	５３
Fig.16	Gain frequency characteristic	５４
Fig.17	Output of Hamming filter	５５
Fig.18	Experimental result	５８

表目次

Table 1 Measuring time under perturbations ２０
Table 2 Specification of scale ５８

第１章
序論

1.1 研究の背景

質量計測が今日まで発展してきた背景には，貴金属や宝石など高額な商取引において，公正性を必要としたことが大きな要因の一つである．現在でも計量法の第一条には，「計量の基準を定め，適正な計量の実施を確保し，もって経済の発展及び文化の向上に寄与することを目的とする．」と制定されており，正確な計量は，貨幣制度と並び経済活動の根幹をなすものである．

同時に質量計測は，科学技術の発展や品質管理には，なくてはならない計測として，高精度化・高速化が進んできている[1]．例えば，原材料の配合や薬の調合に対しては、正確な質量計測がその品質向上につながるものである．また，一番身近な質量計測として，体重は健康管理の重要な指標の一つになっている．

この質量計測に用いるはかりとは，「物体に作用する重力を利用して，その物体の質量を計量するために使用する計量器」と定義されており，現在では，センサとしてひずみゲージ式ロードセルを用いたはかりが主流となっている．質量計測では，計量対象を静止した状態にして，センサ信号が整定したデータを用いる．すなわち，計測には十分な時間が必要となる．一方，産業計測の分野においては，

・工場ラインでの製品の重量チェック
・トラックなどの走行車両の重量測定
・家畜の体重測定

など十分な時間をかけて測定できないような事例，あるいは，被測定対象が静止しない事例が多く存在する[2][3][4]．これらの事例では，センサ信号のデータには過渡状態しか存在しないため，従来の整定したデータを用いる質量計測方法では正確な計測が困難である．

動的質量計測は，このような測定対象に対しても，計量できるようにする計測手法であり，それぞれ次のような効果が期待出来る．まず，工場ラインで使用される重量チェッカは，ライン上で前工程から供給される製品の正量・過量・不足のチェックを行い，選別を行うはかりである．ライン上を移動する被測定物を，より高速に計量することで生産性向上が期待できる[5][6][7]．次に，走行車両の質量計測は，例えば鉱石や生コンクリートなどを搬入または搬出する工場に必要とされる．これらの工場では，積載の前後の車両質量の差として積載物の質量を求める目的で，出入り口にトラックスケールが設置されている．従来，車両はトラックスケールの上で一旦停止し，静止状態で質量を測定していた．もし停止する必要が無くなれば，時間当たり測定できる車両の数は飛躍的に増大し，搬入，搬出が集中した場合の作業の遅れを解消または大幅に緩和することができる[8][9][10]．家畜の体重計測は，飼養管理に役立つ情報を提供する．肉用牛であれば，体重値自体が農家の収益につながることから，体重計測は定期的な成長過程の把握とともに，成長過程に応じた最適な飼養方法の選択を可能とする．また，乳用牛であれば，体重は健康管理のバロメータであり，人間と同様に毎日計ることで体温など他の指標とともに健康管理に用いることができる．すなわち，牛の体重は，肉質向上・乳質向上につながる重要な管理指標の一つとなっている[11][12]．

動的質量計測が必要とされる台はかり[13][14][15][16]，チェッカ[17][18][19]，軸重計[20]，家畜計量器[21][22][23][24][25][26][27][28][29]を対象として，各種研究がなされている．このうち，被測定物が静止する対象については，ばね式の計測システムの動特性を用いて，質量を測定する手法が提案され成果を上げている．一方，被測定物が静止しない対象については，従来の平均化手法が用いられていることがほとんどであり，被測定物の動特性に基づく測定方法とはなっていない．

動的質量計測は，動的な状態の時系列データから計測システム・計測対象を同定し，質量計測するものである．計測の本質は，結果から原因へ因果律を逆にたどる情報処理[30]であることから，動的状態の時系列データを用いる場合，逆にたどるべきデータの発生メカニズム，すなわち，被測定物や測定方法を含めた質量計測システム全体の動特性を把握している必要がある．そして，その動特性に基づいてデータを処理しなければならない．

動的質量計測の中で，被測定物が動いている状態での計量方法を動態計量と呼ぶ．一方，たとえ静止した状態で計測可能な場合でも，計測データが整定するのを待たず過渡状態のデータから質量が求まれば，計量の迅速化が実現するこのような計量を，高速計量と呼ぶ．

本研究では，ロードセル式はかりを対象に，測定対象のダイナミクスによる信号成分の時系列的性質を同定し，その成分を取り除く方法を提案し，今まで難しかった計量を実現することで，質量計測機器であるはかりに新たな可能性をもたらすものである．

1.2 研究の目的

本研究の目的は，上で述べた２種類の動的質量計測である高速計量・動態計量の計測方法とその実用性について明らかにすることである．

高速計量は，静的状態は存在するが，それに至るまでの過渡データから質量を迅速に求める問題である．対象とする質量計測システムは，ロードセル式はかりで．被測定物の質量によって生じる非線形性の影響を小さくすることができ，線形システム理論の範疇での取扱いが可能となる．

静的状態に至るまでの動的な過渡データを用いて質量を計算する問題の困難さは，被測定物を計量台へ載せる際，そっと載せても落下させても，質量による力以外の余計な力が計量台に作用する点にある．この力の存在は避けられず，また指定できるものではないので，同一の被測定物に対しても過渡データに再現性はない．

本研究では，その力の影響を消去するという考えで質量計算式を導く．得られた計算法の高速計量への有効性を，実験結果により示す．次に，動態計量では，質量計測システムの動特性だけでなく，計測ごとに異なる被測定物の動特性もモデル化し，統合したモデルから，質量計算式を走行車両・家畜に対して導出する．走行車両では，走行している車両の状態を運動方程式で表し，高速計量と同じ質量計算式を導出し，オンラインでパラメータ同定して，計量ごとにパラメータ可変フィルタの実現方法を示す．家畜の計量では， 計量ごとに次数を可変とするフィルタにより，動態計量を実現する．

1.3 本論文の構成

本論文の構成を，Fig.1 に示す．第２章では，台はかりのモデル同定による高速計量について述べる．第３章では，走行車両を対象に，パラメータ可変フィルタによる動態計量について述べる．第４章では，家畜を計量対象とし，家畜の歩行周期に着目し，次数可変フィルタによる動態計量について述べる．第５章で，本研究で得られた成果について述べる．

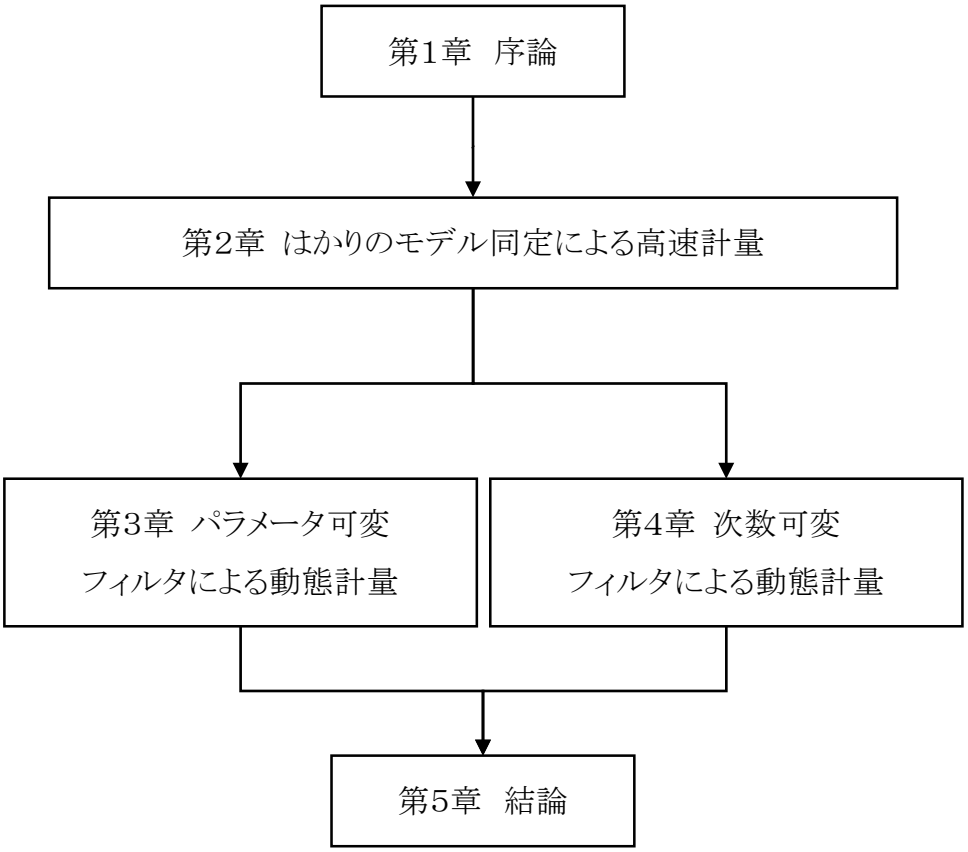


Fig.1 Outline of this thesis

第２章
はかりのモデル同定による高速計量

２.１ はじめに

本章では，２種類の動的質量計測問題のうち，高速計量すなわち静的状態は存在するが，それに至るまでの過渡データから質量を迅速に求める問題を考える．

静的状態に至るまでの動的な過渡データを用いて質量を計算する問題の困難さは，被測定物を計量台へ載せる際，そっと載せても落下させても，質量による力以外の余計な力が計量台に作用する点にある．この力の存在は避けられず，また指定できるものではないため，同一の被測定物に対しても過渡データに再現性はない．

本章では，その力の影響を消去するという考えで質量計算式を導く．得られた計算法の高速計量への有効性を，実験結果により示す．

2.2 台はかりのデータ解析

対象とする質量計測システムは，Fig.2 のブロック図で構成されるロードセル式台はかりである． このシステムの基本をなすロードセルは，金属弾性体にひずみゲージを取り付け，これを測定しようとする質量が作用するようにしたものである．金属弾性体は加えられた荷重に比例してたわみ，その結果，ひずみゲージの抵抗が変化して，それを流れる電流の変化から荷重の値を知ることができる．ばねに比べると，ロードセルの金属弾性体の剛性は非常に高く，固有振動数が高く，応答は早い．しかし，その変形は小さく，ひずみゲージの電流変化も小さいため，それを直流増幅器で増幅する．得られた信号は金属弾性体の高い固有振動を含んでいるので，それをローパスフィルタで除去する．

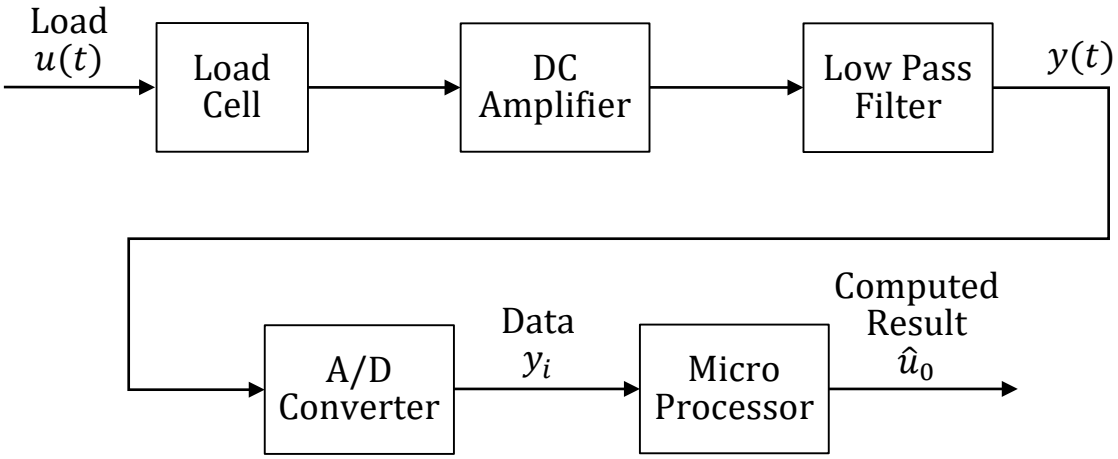
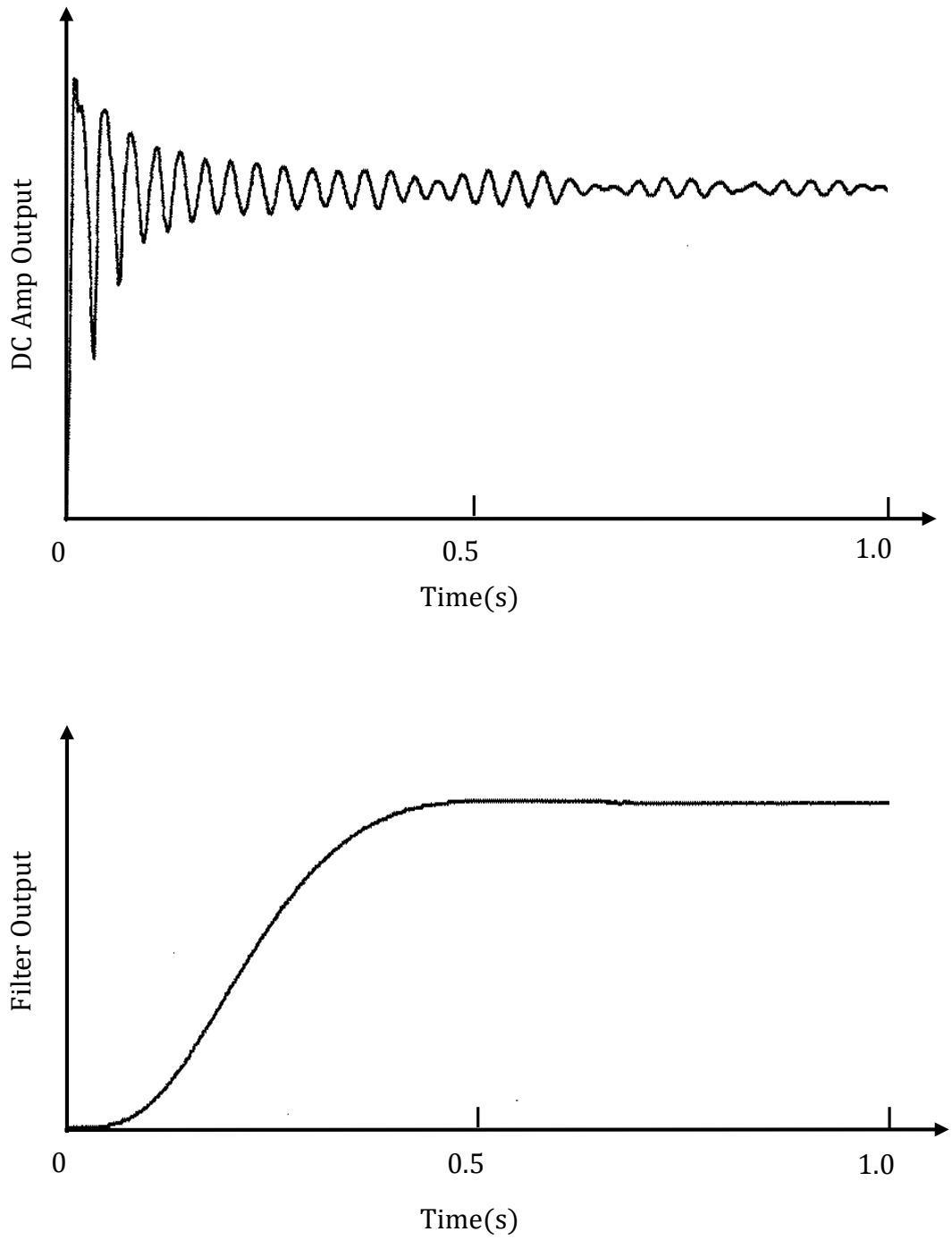


Fig.2 Measurement system

従来は，被測定物を計量台に載せ，十分時間が経過してローパスフィルタ出力が一定値になった後のデータを, マイクロプロセッサが質量に変換していた. つまり，静的な質量計測であった.

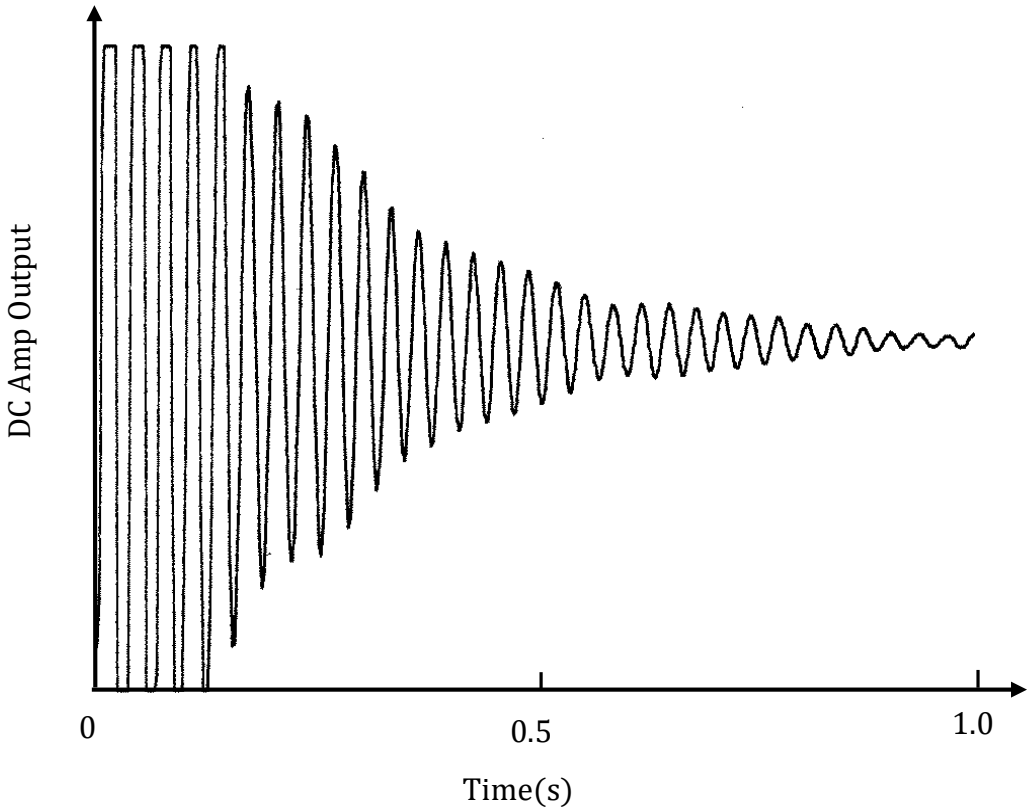
静的状態に至るまでの動的な過渡データを用いて質量を計算するとしたとき, その問題の困難さは, 被測定物の計量台への載せ方によって荷重が異なるため, 同一の被測定物に対しても動的状態のふるまいが再現性をもたない点にある. そして，その載せ方は不確定で，未知と考えざるをえない．したがって，被測定物の載せ方の影響をなんらかの方法で除去しなければならない.

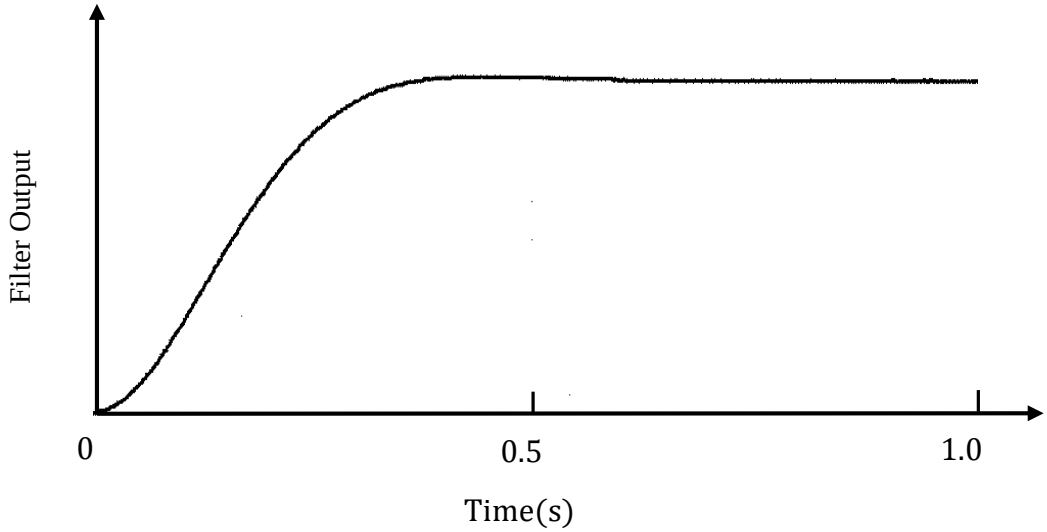
質量計測システムが静的状態に至るまでの動的状態のふるまいを知るために，ロードセル式はかりについて測定したデータが Fig.3 である．Fig.3 (a)は分銅を計量台のそっと載せた時のデータで，上が直流増幅器の出力，下がローパスフィルタの出力である．また，Fig.3 (b)は同じ分銅を計量台の上に落下させて載せた時のデータである.



(a) Soft loading

Fig.3 Measurement data





(b) Hard loading

Fig.3 Measurement data

これらの図によると，被測定物を計量台に載せる際に加わる余計な力の影響は，直流増幅器出力においてはかなり大きいが，ローパスフィルタ出力においては小さくなっている．この事実より，被測定物を計量台に載せる際の余計な力は，高い固有振動数からなる金属弾性体の弾性振動モードを励起するが，それによって生じる信号のほとんどがローパスフィルタによって除去されている．したがって，ローパスフィルタ出力は，主に被測定物の質量による金属弾性体の弾性変形によって生ずる低周波の信号成分と考えることができる．本論文は，この低周波信号を用いて質量を求めようというものである．

2.3 台はかりの高速計量

本論文では，Fig.2 で表される計測システムのうち，ロードセルからローパスフィルタまでの部分を線形として，そのメカニズムを解析する．厳密には，ロードセル中の金属弾性体を表わす運動方程式の質量パラメータが，被測定物が加わったことにより変化するので，このシステムは非線形の部分を含む．ただし，金属弾性体の大きな剛性パラメータのため，その非線形性の影響を主に受けるのは，動特性の高周波成分である．その成分はローパスフィルタによって十分に除去されるので，入出力関係としては線形として扱える．

2.3.1 台はかりのモデル化

Fig.2 の荷重からローパスフィルタ出力までは，安定かつ時間不変のシステムである．したがって，データの発生メカニズムは状態方程式

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + bu(t) \\ y(t) &= cx(t) \end{aligned} \tag{1}$$

で表わせる．ここに，入力 $u(t)$ は荷重，出力 $y(t)$ はローパスフィルタの出力電圧で，いずれもスカラである．$x(t)$ はシステムの状態変数で，n 次元ベクトルとする．荷重が加わる前にはこのシステムは静止状態にあるので，初期状態は

$$x(0) = 0 \tag{2}$$

とする．

荷重入力 $u(t)$ は，被測定物の質量による定数部分 u_0 と，それを計量台へ載せる際に加わった余計な力による部分 $u_\delta(t)$ の和と考えることができる．つまり，

$$u(t) = u_0 + u_\delta(t) \tag{3}$$

である．このとき，式(1)の出力は

$$y(t) = \int_0^t ce^{A(t-\tau)}\, bu_0 d\tau + \int_0^t ce^{A(t-\tau)} bu_\delta(\tau) d\tau \tag{4}$$

と書ける．ここで，式(1)のシステムは安定であるから，行列 A の固有値の実部はすべて負である．したがって，A は正則であり，式(4)の第1項はつぎのように計算できる．

$$\int_0^t ce^{A(t-\tau)}\, bu_0 d\tau = c(e^{At} - I)A^{-1} bu_0 \tag{5}$$

一方，被測定物を計量台に載せる際の余計な力 $u_\delta(t)$ は，それがどのようなものであっても，ある有限の時刻 t' までしか存在しないと考えられるので，$t \geq t'$ のとき，第2項は，

$$\int_0^t ce^{A(t-\tau)} bu_\delta(\tau) d\tau = ce^{At} \int_0^{t'} e^{-A\tau} bu_\delta(\tau) d\tau \tag{6}$$

と書ける．したがって，出力データは

$$y(t) = c(e^{At} - I)A^{-1} bu_0 + ce^{At} d \ , \qquad t \geq t' \tag{7}$$

と表わすことができる．ただし，

$$d = \int_0^{t'} e^{-A\tau} b u_\delta(\tau) d\tau \tag{8}$$

であり，これは未知で不確定なベクトルである．

2.3.2 質量計算式の導出

いま, 時間 T ごとに全部で $(n+1)$ 個の出力データをサンプルしたとする．すなわち,

$$\begin{gathered} t' \leq t_0 < t_1 \cdots < t_n \\ t_{i+1} - t_i = T \ , \qquad i = 0,1,2,\cdots \end{gathered} \tag{9}$$

を満たす時刻 t_i において，データとして

$$y_i = c(e^{At_i} - I)A^{-1}bu_0 + ce^{At_i}d \ \ , i = 0,1,2,\cdots \tag{10}$$

を得る．この式(10)を次のように書き換える．

$$\begin{aligned} y_0 + cA^{-1}bu_0 &= ce^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) \\ y_1 + cA^{-1}bu_0 &= ce^{AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) \\ &\vdots \\ y_{n-1} + cA^{-1}bu_0 &= ce^{(n-1)AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) \\ y_n + cA^{-1}bu_0 &= ce^{nAT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) \end{aligned} \tag{11}$$

ここで，e^{AT} の特性多項式を

$$\det(\lambda I - e^{AT}) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \ \cdots + a_1\lambda + a_0 \tag{12}$$

としたとき,

$$e^{nAT} + a_{n-1}e^{(n-1)AT} + \cdots + a_1 e^{AT} + a_0 I = 0 \tag{13}$$

が成立することを用いる. 式(11)の n 個の各式の両辺に $a_0, a_1, \cdots a_{n-1}, 1$ を順番に掛け，それらの総和をとると右辺が 0 になり

$$
\begin{aligned}
y_n + a_{n-1}y_{n-1} + \cdots + a_1 y_1 + a_0 y_0 \\
+ (1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0) c A^{-1} b u_0 = 0
\end{aligned}
\tag{14}
$$

を得る．これにより，質量は

$$
u_0 = -\frac{y_n + a_{n-1}y_{n-1} + \cdots + a_1 y_1 + a_0 y_0}{(1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0) c A^{-1} b}
\tag{15}
$$

で計算できる．以上が高速計量の質量計算式の基本的考えである．

式(15)は時刻 $t_0, t_1, \cdots, t_n$ の値は必要としていない．また，特性多項式の係数 $a_0, a_1, \cdots a_{n-1}$ およびシステムの定常ゲインである $-cA^{-1}b$ の値だけがわかっていれば，この計算は可能である．分母に $1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0$ を含んでいるが，これが 0 でないことは，A の安定性によって保証されている．すなわち，A の固有値の実部はすべて負であるから e^{AT} の固有値の絶対値は 1 未満であり，したがって，特性多項式は，$\lambda = 1$ に対して 0 にならない．

2.3.3 時系列データによるパラメータ同定

式(15)による質量計算のために必要なデータの数は，式(1)の状態方程式の次元 n によって決まる．その状態方程式を Fig.2 の計測システムの構成から導くことは，理論的に可能かもしれない．しかし，それは金属弾性体という正確には分布乗数系を対象としたものであるから，非常に手間のかかる仕事である．しかも，式(15)に必要なパラメータは，状態方程式の係数 A, b, c そのものではなく，e^{AT}の特性多項式の係数 a_i と定常ゲイン$-cA^{-1}b$ だけであるので，状態方程式の導出に労力を費やすのは得策ではない．

一方，式(15)では e^{AT} の特性多項式の係数 a_i を用いた質量計算式を導出したが，実際には特性多項式そのものの係数を用いる必要はなく，任意の u_0, d について，

$$
\begin{aligned}
&ce^{mAT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d)\\
&\quad+\alpha_{m-1}ce^{(m-1)AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d)\\
&\quad+\cdots+\alpha_1 ce^{AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d)\\
&\quad+\alpha_0 ce^{At_0}(A^{-1}bu_0+d)=0\\
&\quad t_0\geq t'
\end{aligned}
\tag{16}
$$

となる正整数 m と係数 $\alpha_0,\alpha_1,\cdots,\alpha_{m-1}$ である．行列の多項式の性質から，$n=m,\ a_i=\alpha_i$ とすれば式(16)が成立することは保証される．ただし，係数 a_i に関する式(12)がシステム内部の性質であるのに対し， α_i に関する式(16)は入出力関係というシステムを外から見た性質に対するものである．すなわち，システムが不可制御や不可観測の場合には $n>m$ となる．これは，より少ないデータで質量計算ができることを示唆している．システムが厳密に不可制御や不可観測になることは少ないが，ここで考えている質量計測システムのようにローパスフィルタを含む場合には，高い周波数の振動モードが近似的に不可観測になっていると考えることができる．

ここで，式(16)が成立する最小の正整数 m を求める方法を考える．これはオフラインで求めることができる．出力の定常値 $y_\infty=-cA^{-1}bu_0$ がわかっており，

$$
z_i=y_i-y_\infty\ ,\qquad i=0,1,2,\cdots \tag{17}
$$

という値を用いることができる．明らかに，

$$
z_i=ce^{iAT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d) \tag{18}
$$

であり，式(16)の意味するところは

$$
z_m+\alpha_{m-1}z_{m-1}+\cdots+\alpha_1 z_1+\alpha_0 z_0=0 \tag{19}
$$

である．また，式(16)は任意の初期時刻について成立することを要求しているが，１サンプリング遅れた時刻を初期時刻とすると，それは

$$
z_{m+1}+\alpha_{m-1}z_m+\cdots+\alpha_1 z_2+\alpha_0 z_1=0 \tag{20}
$$

を意味する．同様に，２サンプリング遅れた時刻，３サンプリング遅れた時刻，…，を初期時刻とした関係式を整理すると，係数 $\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_{m-1}$ が満たすべき条件がつぎのように得られる．

$$\begin{bmatrix} z_0 & z_1 & \cdots & z_{m-1} & z_m \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_m & z_{m+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ z_{m-1} & z_m & \cdots & z_{2m-2} & z_{2m-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{m-1} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{21}$$

これより，整数 m としては，無限ハンケル行列

$$H_\infty = \begin{bmatrix} z_0 & z_1 & z_2 & \cdots \\ z_1 & z_2 & z_3 & \cdots \\ z_2 & z_3 & z_4 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \end{bmatrix} \tag{22}$$

の階数をとればよいことがわかる．すなわち，

$$m = \mathrm{rank} H_\infty \tag{23}$$

である．

ところで，システムの次元が n のとき，$z_{i+n} (i \geq 0)$ がその前の n 個のデータ $z_{i+n-1}, \cdots, z_{i+1}, z_i$ に従属であることは保証されている．したがって，$(n+1) \times (n+1)$ 以上のハンケル行列を考えても階数は増加しない．ゆえに，n が既知の場合には，$n \times n$ ハンケル行列

$$H_{n-1} = \begin{bmatrix} z_0 & z_1 & \cdots & z_{n-1} \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{n-1} & z_n & \cdots & z_{2n-2} \end{bmatrix} \tag{24}$$

を使って

$$m = \mathrm{rank} H_{n-1} \tag{25}$$

とすることができる．

整数 m の決定方法は理論的にはこのようにして可能であるが，実際の数値

データを使う場合には階数の判定は容易でない．そのような場合には，十分大きな整数 p を考え，$(p+1)\times(p+1)$ ハンケル行列 H_p の特異値分解により，m を決定する方法が妥当である．すなわち，H_p を

$$H_p = UDV \tag{26}$$

と表わす．ここに，U, V は直交行列，D は H_p の特異値を大きい順に並べた対角行列

$$\begin{aligned} &D = \mathrm{diag}\{\sigma_0, \sigma_1, \cdots, \sigma_{l-1}, \sigma_l, \cdots, \sigma_p\} \\ &\sigma_{j-1} \geq \sigma_j \geq 0 \ , \qquad j = 1,2,\cdots,p \end{aligned} \tag{27}$$

である．ここで，H_p は対称行列であるから，σ_j はその固有値の絶対値である．もし，σ_l が σ_{l-1} に比べて十分に 0 に近いと判断できるなら，$m = l$ とする．実際には，被測定物を計量台に載せる際に加わる余計な力の影響やサンプリングの初期時刻 t_0 の不確定性を考慮し，複数のデータについて整数 m を求めて，そのうち最も大きいものを採用する．整数 m が定まれば，その整数 m を与えるデータについて，式(21)より，重み係数 α_i は

$$\begin{bmatrix} z_0 & z_1 & \cdots & z_{m-1} \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_m \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_p & z_{p+1} & \cdots & z_{P+m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{m-1} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} z_m \\ z_{m+1} \\ \vdots \\ z_{m+p} \end{bmatrix} \tag{28}$$

を最小二乗法で解いて求めればよい．これを用いて，質量は

$$\hat{u}_0 = -\frac{y_m + \alpha_{m-1}y_{m-1} + \cdots + \alpha_1 y_1 + \alpha_0 y_0}{(1 + \alpha_{m-1} + \cdots + \alpha_1 + \alpha_0)cA^{-1}b} \tag{29}$$

で計算できる．

式(29)の計算式は，定常ゲインの部分を除いて出力データだけから簡単に導くことができる．

2.3.4 外部環境の影響に関する考察

以上は計測システムの製作段階での各定数の定め方である．実際に使用する状況を考えると，温度などの外部環境の変化によってこれらの定数の値が変化することも考えられる．

高速計量に必要な定数は，式(29)の必要データ数を決める整数 m ，定数ゲイン $-cA^{-1}b$ ，重み係数 α_i である．このうち，m は外部環境によって変化することはほとんど考えられない．ゲイン $-cA^{-1}b$ はすでに静的状態での質量計算

$$u_0 = -\frac{y_\infty}{cA^{-1}b} \tag{30}$$

につかわれており，静的計量が十分な精度を実現していることから見て，これも外部環境の影響をほとんど受けない．したがって，環境の影響を受けるとすれば，α_i だけである．α_i の変化はシステムの構成素子の特性に依存するので，必要であれば，同定プログラムを組み込んでおき，適宜補正すればよい．

最後に，次の点を指摘しておく．それは，たとえ α_i の変化や同定誤差があっても，初期時刻 t_0 を十分に大きくとった静的状態では

$$y_0 = y_1 = \cdots = y_{m-1} = y_m = y_\infty \tag{31}$$

が成立することから，式(29)は式(30)に帰着し，正しい質量を与えることになる．高速計量という立場からすると，α_i の変化や同定誤差は計量時間が長くなるという点で不都合であるが，計量結果の信頼性に影響しない．α_i の誤差と計量時間の関係については，実験結果の次に述べる．

2.4 実システムへの適用

2.4.1 計量時間

高速計量の有効性を Fig.2 の質量計測システムを実際に構成し実験を行った．使用したロードセルは，秤量 5 kg の台はかりに使われていたもの，ローパスフィルタのカットオフ周波数は 1 Hz，A/D 変換器のサンプリング時間は

0.05 s である．まず, ハンケル行列の特異値分解による方法で, 質量計算に必要なデータ数を決める整数 m を求め

$$m = 4 \tag{32}$$

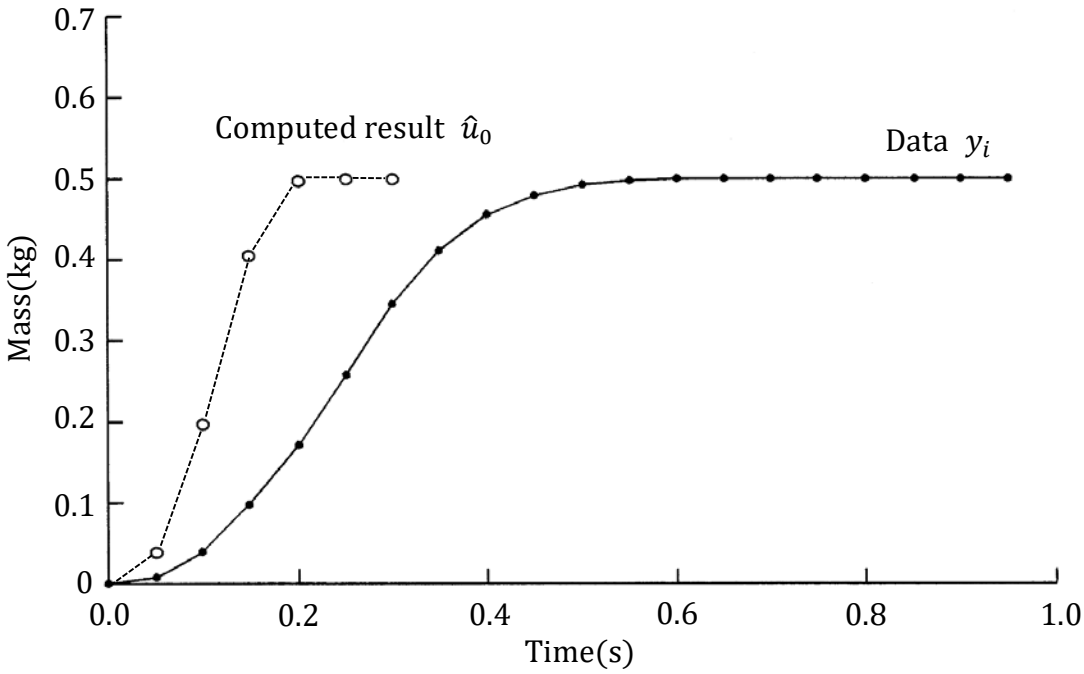
を得た．つぎに，式(28)の最小二乗法より，質量計算式(29)の係数を計算した結果並びに，静的状態での定常ゲインは

$$\begin{aligned} &\alpha_0 = 0.3253, \quad \alpha_1 = -0.4365 \\ &\alpha_2 = -0.8190, \quad \alpha_3 = 0.9328 \\ &-\mathrm{c}A^{-1}b = 1.0074 \end{aligned} \tag{33}$$

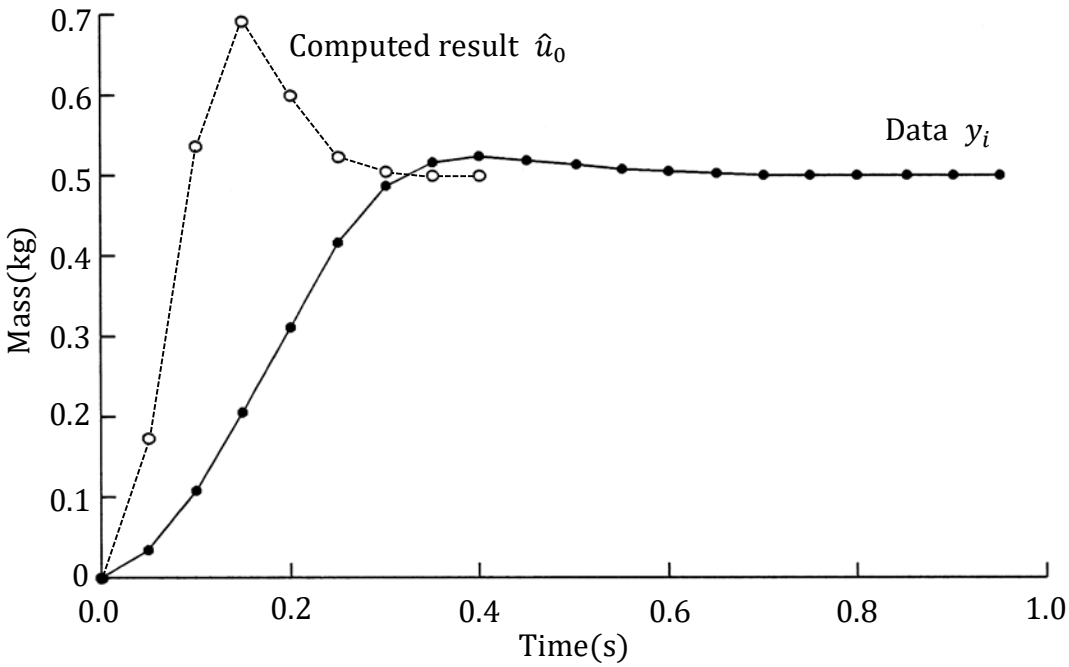
である．

計量対象を 0.5kg の分銅とした場合の実験結果を述べる．この実験では，式(29)の計算結果が 0.5 kg $\pm$ 0.001 kg 以内に落ち着いたとき，計量が完了したと考えた．式(29)によれば $5(= m + 1)$ 点のデータで質量が計算できるはずである．しかし, 分銅を計量台に載せる際の余計な力 $u_\delta(t)$ が加わっている時刻 t' までのデータは有効でないため，初めの５点目までのデータで計量値が得られるというものではない．その時刻 t' は，分銅をどのようにして計量台へ載せるかによって異なる．

Fig.4 に，被測定物をそっと載せた場合と，落下させた場合の実験結果を示す．図中〇印が質量計算結果で，値が 0.5 kg $\pm$ 0.001 kg の範囲に落ち着くまでをプロットし，点線で結んでいる．その後のプロットは省略したが，計算結果はこの範囲にとどまっている. Fig.4(a) そっと載せた場合, t' は小さく, 0.3 s で計量値を得る．Fig.4(b) 落下させた場合，分銅が計量台の上でバウンドするため t' は大きくなるが，それでも 0.4 s で計量値が得られる．データが静的状態に落ち着くためには約 0.8 s を要するので，本研究の方式により計量時間が約 1/3～1/2 に短縮できることになる．



(a)Soft loading



(b)Hard loading

Fig.4 Measurement data and computed result

2.4.2 係数の誤差の影響

式(29)の質量計算式の係数に同定誤差があれば，それが計量時間にどう影響するか調べるため，式(33)の $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ を変更して計量を行った．動的データは，Fig.4 と同じものを用いている．結果は，Table1 のとおりである．Table1(a)は各係数を ±1% 変化させた場合である．表の中の＋は係数を 1% 増加させたことを意味し，－は係数を 1% 減少させたことを示す．Table1(b)は ±2% 変化させた場合である．

この表から，誤差が大きくなるにつれて計量時間も長くなっている．同定誤差がない場合の計量時間が 0.3 s であったのに対して，その２倍近いものもある．しかし，それでも静的計量に比べると短時間である．式(29)の質量計算式を固定しても，ロードセルからローパスフィルタまでの多少の特性変化は許せるということである．

2.5. まとめ

本章では, ひずみゲージ式ロードセルをもちいた質量計測システムを対象に, 過渡データを用いて被測定物の質量を計算する高速計量の手法を提案した．そして，この方法が計量の高速化のために有効であることを実験によって確かめた．

実験では台はかりを対象にしたが，重量チェッカを対象としても適用が可能である．これは，被測定物自体が運動しているのではないため，計測システムの動特性を同定し，質量を計算する高速計量の手法が適用できる．

Table1 Measuring time under perturbation

(a) 1% Perturbation

Parameters	1% Perturbations							
α_0	+	+	+	+	+	+	+	+
α_1	+	+	+	+	−	−	−	−
α_2	+	+	−	−	+	+	−	−
α_3	+	−	+	−	+	−	+	−
Measuring time(s)	0.35	0.35	0.40	0.30	0.45	0.30	0.45	0.45

Parameters	1% Perturbations							
α_0	−	−	−	−	−	−	−	−
α_1	+	+	+	+	−	−	−	−
α_2	+	+	−	−	+	+	−	−
α_3	+	−	+	−	+	−	+	−
Measuring time(s)	0.45	0.50	0.40	0.45	0.40	0.45	0.40	0.30

(b) 2% Perturbation

Parameters	2% Perturbations							
α_0	+	+	+	+	+	+	+	+
α_1	+	+	+	+	−	−	−	−
α_2	+	+	−	−	+	+	−	−
α_3	+	−	+	−	+	−	+	−
Measuring time(s)	0.35	0.40	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.50

Parameters	2% Perturbations							
α_0	−	−	−	−	−	−	−	−
α_1	+	+	+	+	−	−	−	−
α_2	+	+	−	−	+	+	−	−
α_3	+	−	+	−	+	−	+	−
Measuring time(s)	0.45	0.50	0.40	0.45	0.40	0.45	0.40	0.30

第３章
パラメータ可変フィルタによる動態計量

3.1 はじめに

本章では，第１章で述べた２種類の動的質量計測問題のうち，走行車両を計量対象とした動態計量すなわち，車両を停止させることなく，その質量を測定する方法を考える．

測定には，トラックスケールと呼ばれ，車両全体を載せることができるはかりを用いる．通常，この装置を用いる場合，車両をその上に停止させて，静止状態に至った後のデータから質量を求める．車両を停止させない場合，定常状態のデータを期待することはできない．したがって，過渡的なデータから質量を計算しなければならないが，それには以下のような困難さが伴う．その第一は，計量台に加わる荷重が車両の質量だけでなく，サスペンションやタイヤの弾性による車両の縦方向運動による力や，車両が計量台に載る際の衝撃力等を含むことである．第二に，計量台の長さが短いため，測定対象が短時間しかその上になく，得られるデータが少ないことである．

この問題を，剛体を測定対象とする台はかりを用いた高速計量の問題と比較すると，測定対象が計量台に乗る際に加わる衝撃力の影響を除かなければならないという点では同じである．違いは，測定対象自体が運動しており，それによって加わる力の影響をも取り除かなければならない点である．衝撃力によって生ずる信号の時間的ふるまいは，既知である計測システムの動特性によって決まり，その影響を除く方法は，第２章の高速計量で示した通りである．測定対象の運動によって生ずる信号は，計測システムの動特性に加え，測定対象のダイナミクスにも依存する．このダイナミクスが対象の車両ごとに異なり，未知であるので，その影響の除去は容易でない．

本章では,測定対象のダイナミクスによる信号成分の時系列的性質を同定し,

その成分を取り除く方法を，線形システム理論の知識を用いて与える．そうして，走行車両の質量計算法を導く．また，実際に十分な精度の測定結果が得られることを実験によって確かめ，この方法が実用になることを示す．

3.2 走行車両のデータ解析

トラックスケールの計測システムのブロック図を Fig.5 に示す．トラックスケールは，Fig.6 に示すように車両全体を載せることができる長い計量台が必要なことから，ロードセル１点支持の台はかりとは異なり４点～６点のロードセルで計量台を支持する構造である．ただし，複数のロードセルから出力された信号は和算箱で並列接続されて，直流増幅器への入力はロードセル１点支持のはかりと同じため, 直流増幅器以降の信号処理は台はかりと同じ構成である．

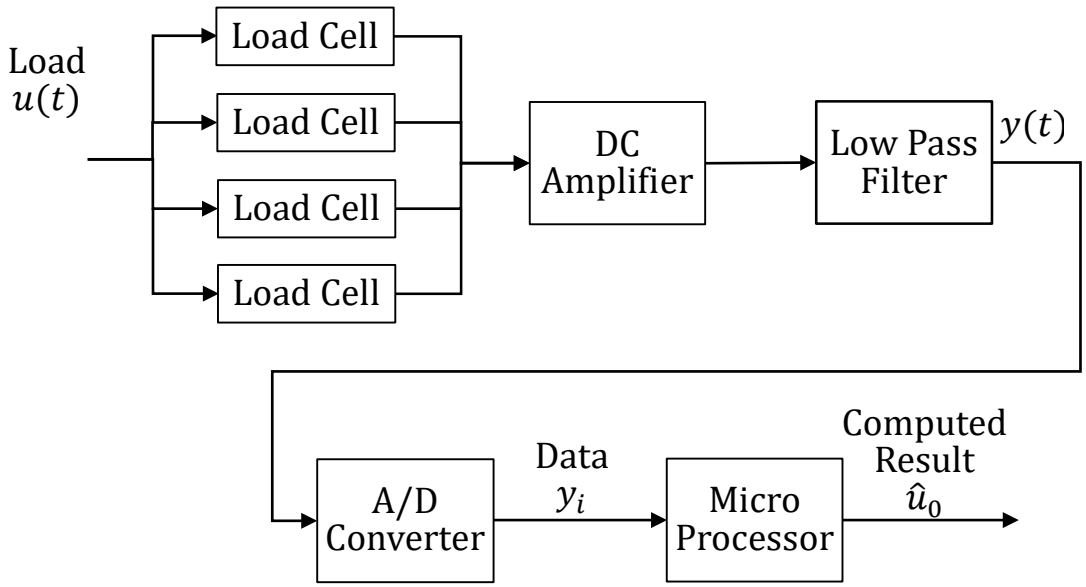


Fig.5 Measurement system

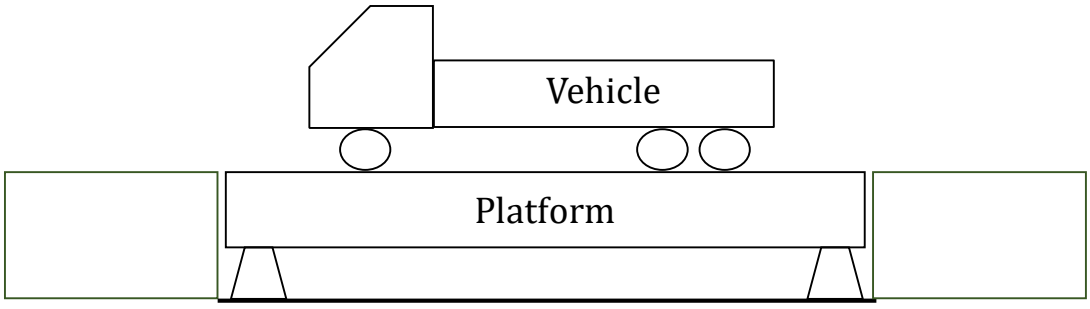


Fig.6 Vehicle scale

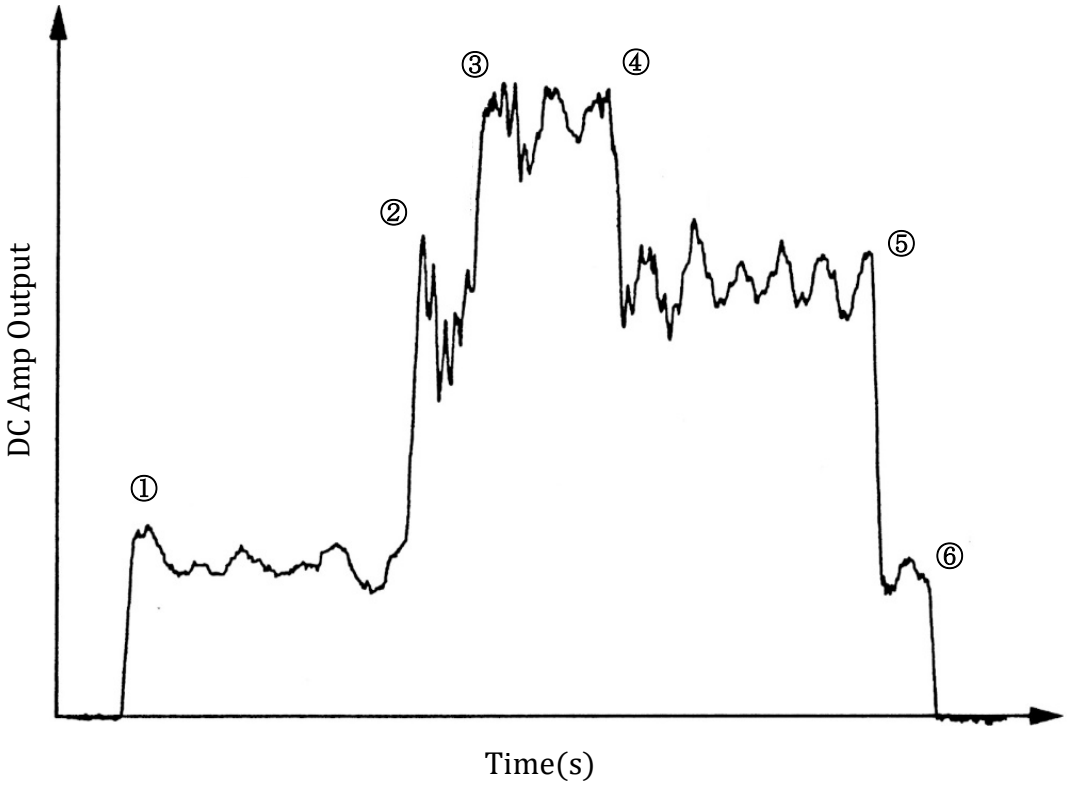


Fig.7 Measurement data

トラックスケールから得られたデータを Fig.7 に示す．これは，前輪が１軸，後輪が２軸の大型トラックを走行させて測定したものである．Fig.5 の計測システムのブロック図における直流増幅器の出力である．①は前輪が計量台の載ったところ，②，③はそれぞれ後輪の第１軸，第２軸が計量台に載ったところである．そして，④は前輪が降りたところ，⑤，⑥は後輪の第１軸．第２軸が降りたところである．トラックスケールはもともと静止計量のために作られたものであるから，全車輪が同時に計量台に載れるだけの大きさがある．したがって，車両を走行させた場合も短時間であるが③と④のあいだに存在する．以下では，この間のデータを用いて車両の質量を計算するものである．

このデータの中で，比較的高周波の振動が，主に計測システムのダイナミクスによる成分で，車輪が計量台に載った衝撃力で励起されたものと考えられる．そして，振幅の大きな低周波の振動成分が車両のダイナミクスによるものと考えられる．

3.3 走行車両の動態計量

3.3.1 走行車両のモデル化

トラックスケールの信号処理に関するハードウェア構成自体は通常の台はかりと同じである．したがって，Fig.5 の荷重 $u(t)$ からローパスフィルタ出力 $y(t)$ （オフセット分は除いたもの）までの計測システムは，状態方程式

$$\begin{aligned} \dot{x_1}(t) &= A_1 x_1(t) + b_1 u(t) \\ y(t) &= c_1 x_1(t) \end{aligned} \tag{34}$$

で表わすことができる．ここに，$x_1(t)$ は計測システムの状態変数で，n_1 次元ベクトルとする．$u(t)$ と $y(t)$ はスカラ量である．荷重が加わる前，このシステムは静止状態にあり，入力 $u(t)$ と出力 $y(t)$ は 0 であるから，初期状態は $x_1(0) = 0$ とする．ただし，初期時刻は被測定車両のすべての車輪が計量台に乗り始めた時刻とする．A_1 は定数行列で，その固有値の実部はすべて負である．b_1, c_1 は適当なベクトルである．

荷重入力 $u(t)$ は，被測定物の質量 u_0，計量台に乗ることによる衝撃力に

よる成分　$u_\delta(t)$，および車両の縦方向運動の力による成分 $v(t)$ の和

$$u(t) = u_0 + u_\delta(t) + v(t) \tag{35}$$

と考えられる．このうち，u_0 の値を出力 $y(t)$ のデータから知ることが目的である．高速計量と同様 $u_\delta(t)$ は衝撃力によるものであるから，車両が計量台に乗った瞬間しか存在せず，ある時刻 $t' > 0$ 以降は 0 である．

$$u_\delta(t) = 0 \ , \qquad t \geq t' \tag{36}$$

$v(t)$ は車両の力学的運動によって発生していることから，車両のダイナミクスを表わす状態方程式

$$\begin{aligned} \dot{x_2}(t) &= A_2 x_2(t) + B_2 g_\delta(t) \\ v(t) &= c_2 x_2(t) \end{aligned} \tag{37}$$

の出力である．ここに，$x_2(t)$ は（車両の）状態変数で，n_2 次元ベクトルとする．$g_\delta(t)$ は車両の縦運動を励起する道路の凸凹等による外乱で，適当な次元のベクトルである．これは車両が計量台に乗る前から加わっており，道路と計量台の段差により乗った瞬間にも加わるものである．しかし，$u_\delta(t)$ と同様，平坦な計量台に乗ったのちの時刻 t' 以降は 0 である．

$$g_\delta(t) = 0 \ , t \geq t' \tag{38}$$

A_2 は固有値の実部がすべて負の行列で，B_2, c_2 は適当な行列とベクトルである．以上をまとめると，データの発生メカニズムは状態方程式

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + bu_0 + f(t) \\ y(t) &= cx(t) \end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned} &A = \begin{bmatrix} A_1 & b_1 c_2 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix}, \qquad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{c} = [c_1 \quad 0] \\ &x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \qquad f(t) = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix} u_\delta(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} g_\delta(t) \end{aligned} \tag{40}$$

で書くことができ，A_2, B_2, c_2 の値は被測定車両ごとに異なる．

3.3.2 走行車両に対する質量計算式の導出

データの発生メカニズムが式(39)の形に書けるということは，高速計量の場合と同様の方法で質量が計算できる可能性を示している．違いは，係数行列の要素の一部が被測定車両ごとに異なるため，質量計算式のパラメータ同定をオンラインで行なわなければならない点である．

まず，出力 $y(t)$ は

$$y(t) = \int_0^t ce^{A(t-\tau)}\, bu_0 d\tau + \int_0^t ce^{A(t-\tau)} bf(\tau) d\tau \tag{41}$$

と表せる．u_0が定値であることを使って右辺第１項の積分を計算し，また，

$$f(t) = 0 \ , \qquad t \geq t' \tag{42}$$

であることを使って第２項を簡単にして

$$y(t) = c(e^{At} - I)A^{-1}bu_0 + ce^{At}d \ , \ t \geq t' \tag{43}$$

と書ける．ただし，

$$d = \int_0^t ce^{A(t-\tau)} f(\tau) d\tau \tag{44}$$

である．$y(t)$ を時間 T ごとに，時刻 $t_i (= t_0 + iT \geq t', i = 0,1,2,\cdots)$ においてサンプルし，データ $y_i = y(t_i)$ としたとき，y_i は

$$\begin{aligned} y_0 + cA^{-1}bu_0 &= ce^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) \\ y_1 + cA^{-1}bu_0 &= ce^{AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) \\ &\vdots \\ y_i + cA^{-1}bu_0 &= ce^{iAT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) \\ &\vdots \end{aligned} \tag{45}$$

を満たす．e^{AT} の特性多項式を

$$\det(\lambda I - e^{AT}) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \ \cdots + a_1\lambda + a_0 \tag{46}$$

としたとき，

$$e^{nAT} + a_{n-1}e^{(n-1)AT} + \cdots + a_1 e^{AT} + a_0 I = 0 \tag{47}$$

が成立することを用いるただし，$n = n_1 + n_2$ である．式(45)において，任意の k 番目の式から $(k+n)$ 番目の式までに順に $a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}, 1$ を掛け，それらの総和をとると，右辺は 0 になり，

$$\begin{aligned} y_{k+n} + a_{n-1}y_{k+n-1} + \cdots + a_1 y_{k+1} + a_0 y_k \\ + (1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0)cA^{-1}bu_0 = 0 \end{aligned} \tag{48}$$

を得る．これにより，質量の計算式

$$u_0 = -\frac{y_{k+n} + a_{n-1}y_{k+n-1} + \cdots + a_1 y_{k+1} + a_0 y_k}{(1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0)cA^{-1}b} \tag{49}$$

が形式的に求まる．しかし，行列 A が測定対象に依存するので，この式の係数は未定である．

この式中，$\mathrm{c}A^{-1}b$ は，A, b, c の定義より，

$$\mathrm{c}A^{-1}b = c_1 {A_1}^{-1} b_1 \tag{50}$$

であることがわかる．これは計測システムの定常ゲイン（符号は逆）であって，測定対象に独立であることから，計測システムを製作した段階で決定できる．したがって，考えるべき問題は，測定が始まってから行列 A が具体的になるような状況で，式(49)の係数 $a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}$ をオンラインでいかにして求めるかということになる．

3.3.3 パラメータ可変フィルタによる動態計量

式(49)では，e^{At} の特性多項式から求められる係数 $a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}$ を用いて質量計算式を与えた．高速計量と同様，それらのパラメータを特性多項式の係数と考える必要はなく，任意の質量 u_0，外乱の影響 d に対して，すべての正整数 k について

$$\begin{aligned} & ce^{(k+m)AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d) \\ & +\alpha_{m-1}ce^{(k+m-1)AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d) \\ & +\cdots+\alpha_1 ce^{(k+1)AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d) \\ & +\alpha_0 ce^{kAT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d)=0 \\ & t_0 \geq t' \end{aligned} \tag{51}$$

が成立する正整数 m と係数 $\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_{m-1}$ である．行列の多項式の性質から，$m=n, \alpha_i=a_i$ とすれば式(51)が成立することは保証される．また，式(39)の状態方程式が計測システムと測定対象を表わす最小次元のものならば，特別な場合を除いて，このような選択しかなく，係数 a_i に関する式(47)と α_i に関する式(51)は等価である．

さて，式(45)によると

$$\begin{aligned} y_i+cA^{-1}bu_0 &= ce^{iAT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0+d)\ , \\ & i=0,1,2,\cdots \end{aligned} \tag{52}$$

である．ゆえに変数，

$$z_i=y_i+cA^{-1}bu_0 \tag{53}$$

を定義すると，式(51)がすべての正整数 k について成立することは，

$$\begin{bmatrix} z_0 & z_1 & \cdots & z_{m-1} & z_m \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_m & z_{m+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ z_{m-1} & z_m & \cdots & z_{2m-2} & z_{2m-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{m-1} \\ 1 \end{bmatrix}=0 \tag{54}$$

が成立することを意味する．高速計量の場合，この関係を用いて整数 m と係数 $\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_{m-1}$ が求められている．その場合は，パラメータが測定対象に依存しないから，既知の u_0 を用いて式(53)の z_i を定義し，オフラインで同定を行なっておけば十分であった．しかし，トラックスケールのようにオンライン同定をしなければならない場合には，u_0 が既知でないため，z_i という変数は実際には得られない．したがって，式(54)に基づく同定は不可能である．

そこで，式(54)の各式からその次の式を引くという操作を上から順に加えていき，符号を逆転する．こうして得られる式は，式(54)と等価で，z_i を

$$\Delta z_i = z_{i+1} - z_i \ , \qquad i = 0,1,2,\cdots \tag{55}$$

で置き換えたものになる．ところが，式(53)から

$$z_{i+1} - z_i = y_{i+1} - y_i \tag{56}$$

だから，それは，出力データの差分

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \tag{57}$$

を使って

$$\begin{bmatrix} \Delta y_0 & \Delta y_1 & \cdots & \Delta y_{m-1} & \Delta y_m \\ \Delta y_1 & \Delta y_2 & \cdots & \Delta y_m & \Delta y_{m+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \Delta y_{m-1} & \Delta y_m & \cdots & \Delta y_{2m-2} & \Delta y_{2m-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{m-1} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{58}$$

と書くことができる．この式は実際に得られるデータだけで関係を表わしているから，オンライン同定を考える上で基本とすることができる．

オンライン同定は，まず，整数 m の決定から始めなければならない．式(58)を満たす $\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_{m-1}$ が存在するということは，その係数行列の列が従属であるということである．そのような次数 m の最小値を求める問題は，動的システムの次数決定問題[31]に当たり，次の方法を用いることができる．すなわち，十分大きな整数 p について，Δy_i のハンケル行列

$$H_p = \begin{bmatrix} \Delta y_0 & \Delta y_1 & \cdots & \Delta y_p \\ \Delta y_1 & \Delta y_2 & \cdots & \Delta y_{p+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta y_p & \Delta y_{p+1} & \cdots & \Delta y_{2p} \end{bmatrix} \tag{59}$$

を構成し，その独立な行または列の数を求めればよい．実際にはデータがノイズを含んでいるので，特異値分解を用いて独立な行または列の数を決定する．

すなわち，H_p を

$$H_p = UDV \tag{60}$$

と表わす．ここに，U, V は直交行列，D は H_p の特異値を大きい順に並べた対角行列

$$\begin{aligned} &D = \mathrm{diag}\{\sigma_0, \sigma_1, \cdots, \sigma_{l-1}, \sigma_l, \cdots, \sigma_p\} \\ &\sigma_{j-1} \geq \sigma_j \geq 0 \ , \qquad j = 1,2,\cdots,p \end{aligned} \tag{61}$$

である．ここで，H_p は対称行列であるから，σ_j はその固有値の絶対値である．もし，σ_l が σ_{l-1} に比べて十分に 0 に近いと判断できるなら，$m = l$ とする．次数 m が定まれば，係数 $\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_{m-1}$ は，式(58)を適当に有限で打切った，

$$\begin{bmatrix} \Delta y_0 & \Delta y_1 & \cdots & \Delta y_{m-1} \\ \Delta y_1 & \Delta y_2 & \cdots & \Delta y_m \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta y_{p-1} & \Delta y_p & \cdots & \Delta y_{p+m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{m-1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta y_m \\ \Delta y_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta y_{p+m} \end{bmatrix} \tag{62}$$

（$p \geq m - 1$ であればよい）を最小二乗法で解いて求めることができる．この結果を用いて式(49)より，質量は

$$\hat{u}_0 = -\frac{y_{k+m} + \alpha_{m-1} y_{k+m-1} + \cdots + \alpha_1 y_{k+1} + \alpha_0 y_k}{(1 + \alpha_{m-1} + \cdots + \alpha_1 + \alpha_0) c_1 {A_1}^{-1} b_1} \tag{63}$$

で計算できる．k は正整数で，時刻 t_{k+m} では車両はまだトラックスケールの上にいるとする．

3.3.4 パラメータ同定の低次元化

パラメータ同定法では，オフライン同定が可能である計測システムをも含めてオンライン同定を行なっている．計測システムは測定対象とは独立で，測定前に既知情報として得られるものであるから，それを有効に使うことで，パラメータ同定の低次元化が可能である．議論の簡単のため，式(39)の状態方程式は計測システムと測定対象を表わす最小次元のもので，式(46)の n，a_i と式(51)の m，α_i は同じものであるとする．

さて，式(39)の A 行列の構造から

$$\det(\lambda I - e^{AT}) = \det(\lambda I - e^{A_1 T})\det(\lambda I - e^{A_2 T}) \tag{64}$$

である．したがって，

$$\det(\lambda I - e^{A_1 T}) = \lambda^{n_1} + \beta_{n_1-1}\lambda^{n_1-1} + \cdots + \beta_1\lambda + \beta_0 \tag{65}$$

$$\det(\lambda I - e^{A_2 T}) = \lambda^{n_2} + \gamma_{n_2-1}\lambda^{n_2-1} + \cdots + \gamma_1\lambda + \gamma_0 \tag{66}$$

とおくと，これらの特性方程式の係数の間につぎの関係が成立する．

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \\ \alpha_{m-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0 & 0 & & & & \\ \beta_1 & \beta_0 & \ddots & & & \\ \vdots & \beta_1 & \ddots & \ddots & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \\ \beta_{n_1-1} & \vdots & & \ddots & \beta_0 & 0 \\ 1 & \beta_{n_1-1} & & & \beta_1 & \beta_0 \\ 0 & 1 & \ddots & & \vdots & \beta_1 \\ & 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ & & \ddots & \ddots & \beta_{n_1-1} & \vdots \\ & & & \ddots & 1 & \beta_{n_1-1} \\ & & & & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_{n_2-1} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{67}$$

これらの係数のうち，n_1，β_i は計測システムによって決まるものだから，高速計量の方法と同様オフラインで同定しておくことができる．この関係を式(58)に代入し，新たに

$$
\begin{aligned}
&\Delta w_i = w_{i+1} - w_i \\
&w_i = y_{i+n_1} + \beta_{n_1-1} y_{i+n_1-1} + \cdots + \beta_1 y_{i+1} + \beta_0 y_i
\end{aligned}
\tag{68}
$$

という変数を定義して整理すると，

$$
\begin{bmatrix}
\Delta w_0 & \Delta w_1 & \cdots & \Delta w_{n_2-1} & \Delta w_{n_2} \\
\Delta w_1 & \Delta w_2 & \cdots & \Delta w_{n_2} & \Delta w_{n_2+1} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
\Delta w_{n_2} & \Delta w_{n_2+1} & \cdots & \Delta w_{2n_2-2} & \Delta w_{2n_2} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & \vdots
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_{n_2-1} \\ 1
\end{bmatrix} = 0
\tag{69}
$$

となる．これは式(58)とまったく同じ形をしているので，前節で m とα_i を求めたのと同様にして，n_2 とγ_i を求めることができる．その結果を式(67)に代入すると，m と α_i が計算できる．一般に特異値分解や最小二乗法に要する計算量は次元の２乗以上に比例するから，前節の α_i を直接計算する方法より本節の方法の方が，計算量がかなり少なくて済むと期待できる．

こうして求めた α_i とデータ y_i を用いて式(63)より質量を計算してもよいが，γ_i と式(68)で定義した w_i を用いても質量を計算することができる．すなわち，式(67)の関係を使って，式(63)はつぎのように書き変えることができる．

$$
\begin{aligned}
\hat{u}_0 = &-\frac{w_{k+n_2} + \gamma_{n_2-1} w_{k+n_2-1} + \cdots + \gamma_1 w_{k+1} + \gamma_0 w_k}{\left(1 + \gamma_{n_2-1} + \cdots + \gamma_1 + \gamma_0\right)} \\
&\cdot \frac{1}{(1 + \beta_{n_1-1} + \cdots + \beta_1 + \beta_0) c_1 {A_1}^{-1} b_1}
\end{aligned}
\tag{70}
$$

w_i はパラメータ同定のためにすでに計算されている変数のため，それを用いることによって計算量を式(63)より少なくすることができる．ただし，質量計算のための元々のデータ y_i の必要数は，式(63)の場合でも，$m + 1 (= n_1 + n_2 + 1)$ である．

式(70)をさらに書き変えると，この質量計算式の意味が明確になる．いま，式(68)の w_i の代わりに，高速計量の質量計算式を施して得られる

$$\widetilde{w}_i = -\frac{y_{i+n_1} + \beta_{n_1-1} y_{i+n_1-1} + \cdots + \beta_1 y_{i+1} + \beta_0 y_i}{\left(1 + \beta_{n_1-1} + \cdots + \beta_1 + \beta_0\right) c_1 {A_1}^{-1} b_1} \tag{71}$$

という変数を導入する．これは，

$$\widetilde{w}_i = \frac{w_i}{\left(1 + \beta_{n_1-1} + \cdots + \beta_1 + \beta_0\right) c_1 {A_1}^{-1} b_1} \tag{72}$$

という関係から，w_i と同様に n_2 や γ_i の決定に用いることができる．そして，質量は

$$\hat{u}_0 = -\frac{\widetilde{w}_{k+n_2} + \gamma_{n_2-1} \widetilde{w}_{k+n_2-1} + \cdots + \gamma_1 \widetilde{w}_{k+1} + \gamma_0 \widetilde{w}_k}{\left(1 + \gamma_{n_2-1} + \cdots + \gamma_1 + \gamma_0\right) c_1 {A_1}^{-1} b_1} \tag{73}$$

で計算できる．つまり，式(70)の質量計算式は式(71)，式(73)の二つの計算に分解できる．これらの計算はいずれもFIR型のディジタルフィルタとして実現できるから，Fig.8 のブロック線図のように質量計算を実行することができる．その前段はパラメータ固定型であり，衝撃力などの外乱を除くフィルタの働きをする．そして，後段はパラメータ可変のセルフ・チューニング適応型であり，車両のダイナミクスの影響を除くフィルタとして働く．こうして，質量の計算値 $\hat{u}_0$ が求まる．

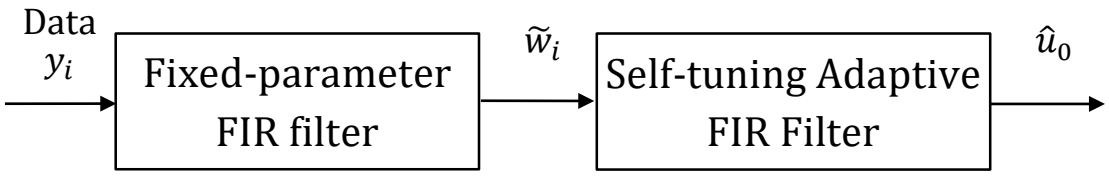


Fig.8 Series connection of FIR filters

3.4 実システムへの適用

3.4.1 トラックの動態計量

実システムにおいては,多少ではあっても雑音がいろいろなところに存在し,式(63)による計算結果が理論通りになるとは限らない．そこで，どの程度の精度で質量が求まるか実験を行なった．実験には，長さ 10.5 m で，秤量 30000 kg のトラックスケールを用いた．測定対象は前輪１軸，後輪２軸の大型トラックで，前輪と後輪第１軸間 5.4 m ，後輪第１軸と第２軸間 1.3 m ，質量(運転者を含む)12145 kg である．

Fig.8 は，このトラックの荷台に約 6000 kg の分銅を載せて総質量を 18255 kg とし，時速約 12 km/h で走行させた場合のロードセル，直流増幅器，アナログのローパスフィルタを通って得られた信号で，これを 0.05 s のサンプリング周期でＡ/Ｄ変換して質量計算式のデータとした．

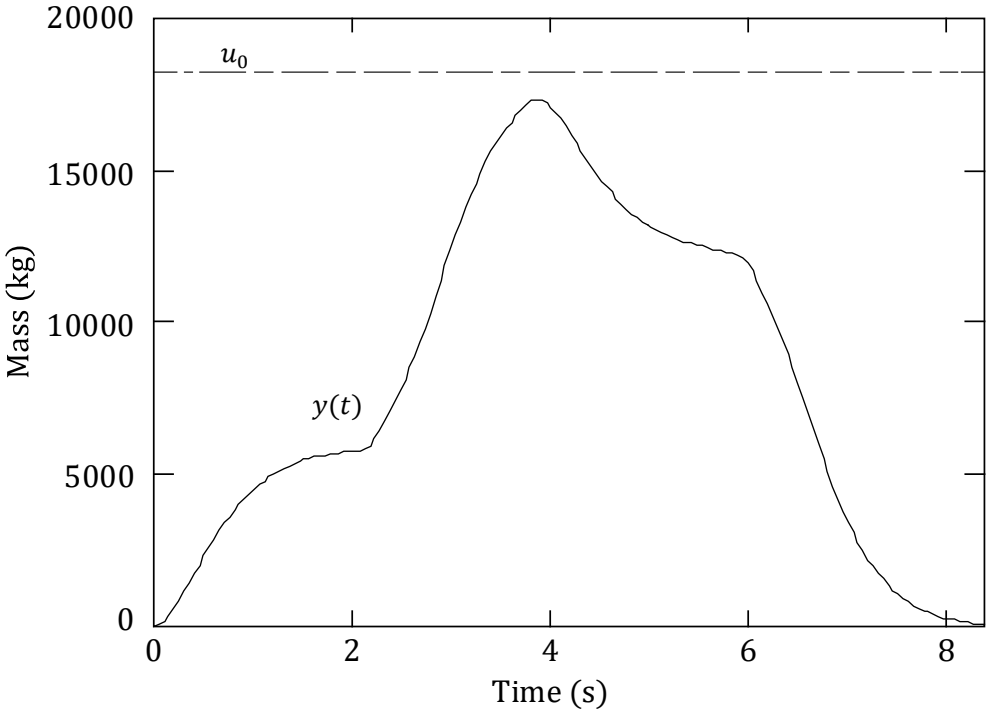


Fig.9 Output signal of low-pass filter

Fig.10 が，式(71)によるパラメータ固定ディジタルフィルタの結果である．ここで，本来の計算結果はサンプリング周期ごとに離散時間的に得られるが，見やすさのため，それらを直線で結んでいる．上図が，測定対象が計量台に乗り始めてから降り終わるまでの全体であり，下図はすべての車輪が計量台に乗った辺りの拡大図である．下図において，３本の水平線の真中は，質量の真値を表わし，上下の２本は精度1500分の１を要求したときの検定公差 $\pm 30\,\mathrm{kg}$ の範囲を表わしている．この結果では，測定対象のダイナミクスによる成分が取り除かれていないため，要求精度を満たしていない．

Fig.11(a)～(d) が，Fig.10の結果に，式(73)による適応型ディジタルフィルタを適用した結果である．ここでは，測定対象のダイナミクスの次数推定は行わず，Fig.11(a)２次，Fig.11(b)４次，Fig.11 (c)６次，Fig.11(d)８次と仮定して式(69)により係数 γ_i を求めてから，式(73)による計算を行った．また，式(69)には，車両のすべての車輪が計量台に乗っている部分のデータを用いた．次数が高くなるにつれて，計算結果が平坦になり，要求精度が満たされている．

これは，適応型ディジタルフィルタの次数が高くなるにつれて高次のダイナミクスの影響が除去されているとも考えられるが，実際には有限のデータを扱っているので，データ数によって決まるある次数になると，式(69)に基づく係数の推定が最少二乗推定でなくなり一意の決定になるからである．

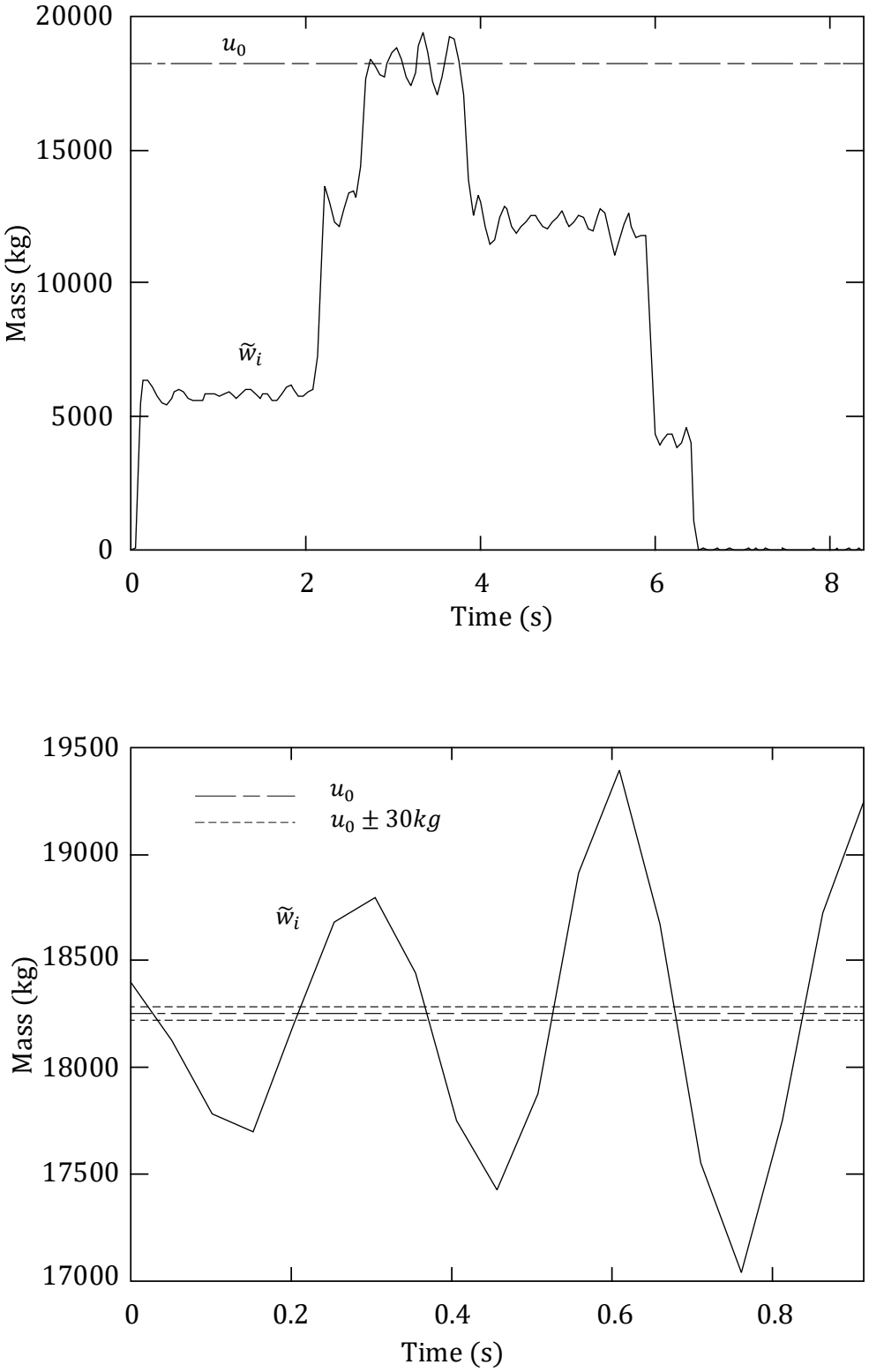


Fig.10 Output of fixed-parameter filter

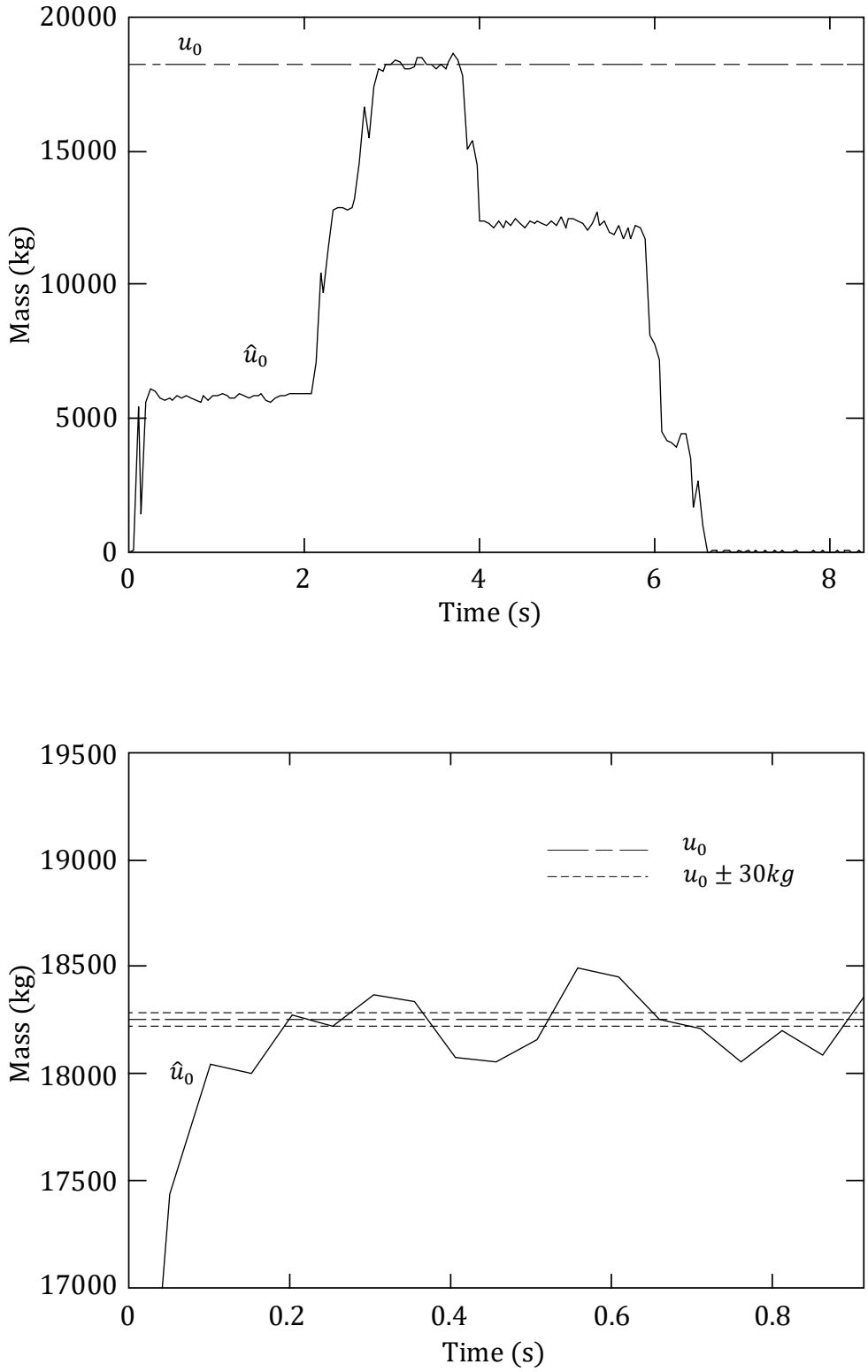


Fig.11 (a) Output of second-order adaptive filter

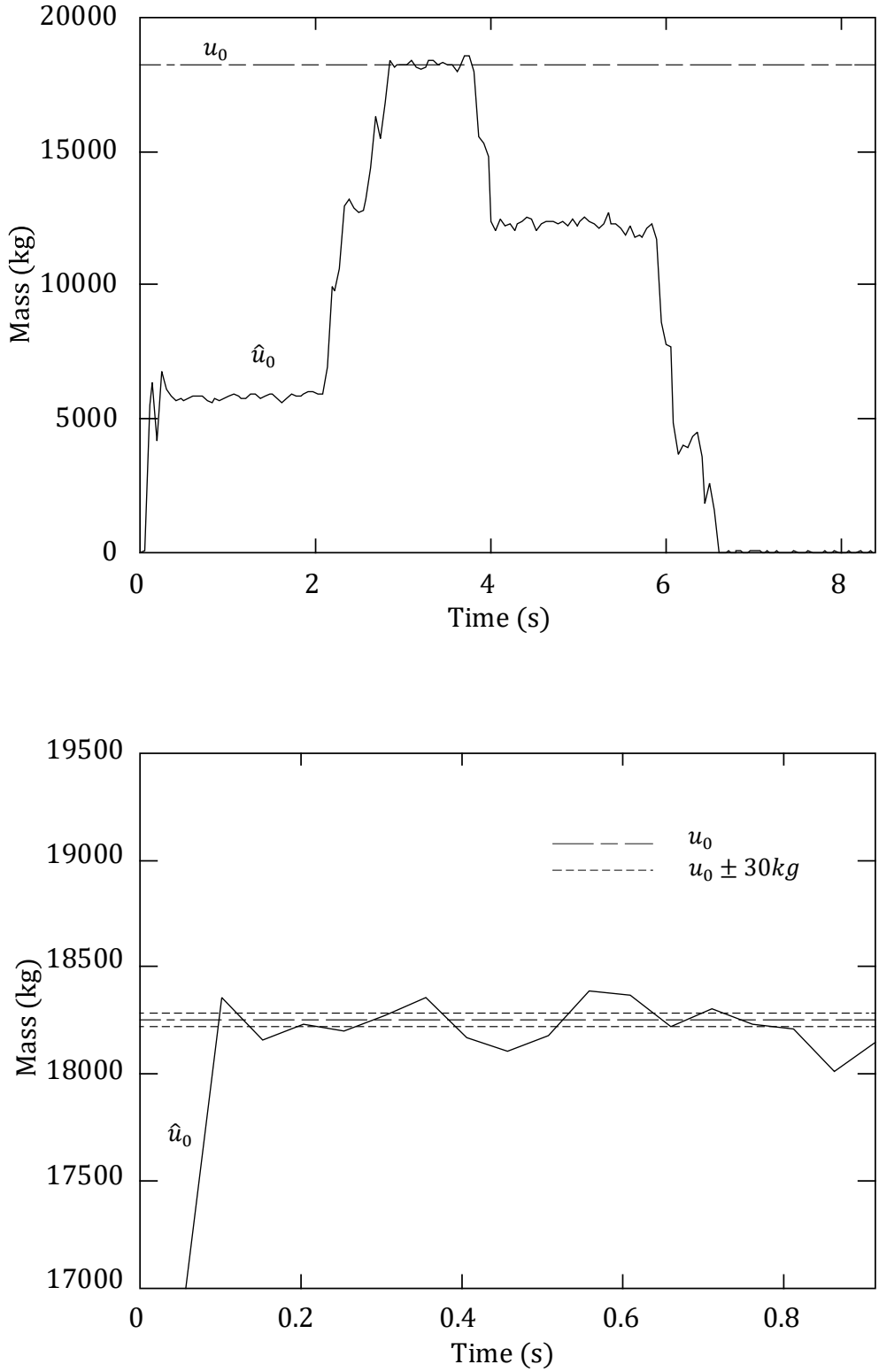


Fig.11 (b) Output of fourth-order adaptive filter

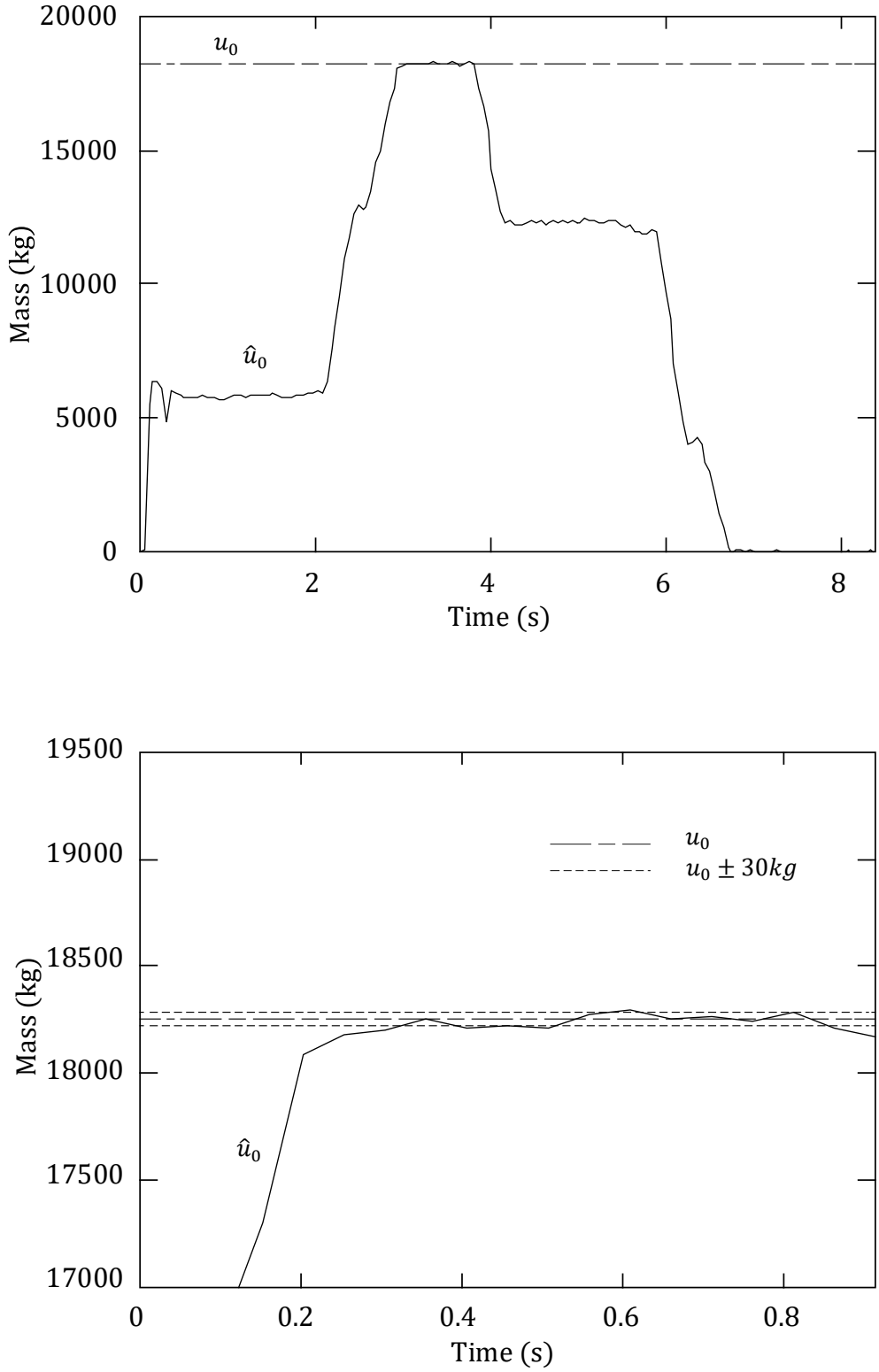


Fig.11 (c) Output of sixth-order adaptive filter

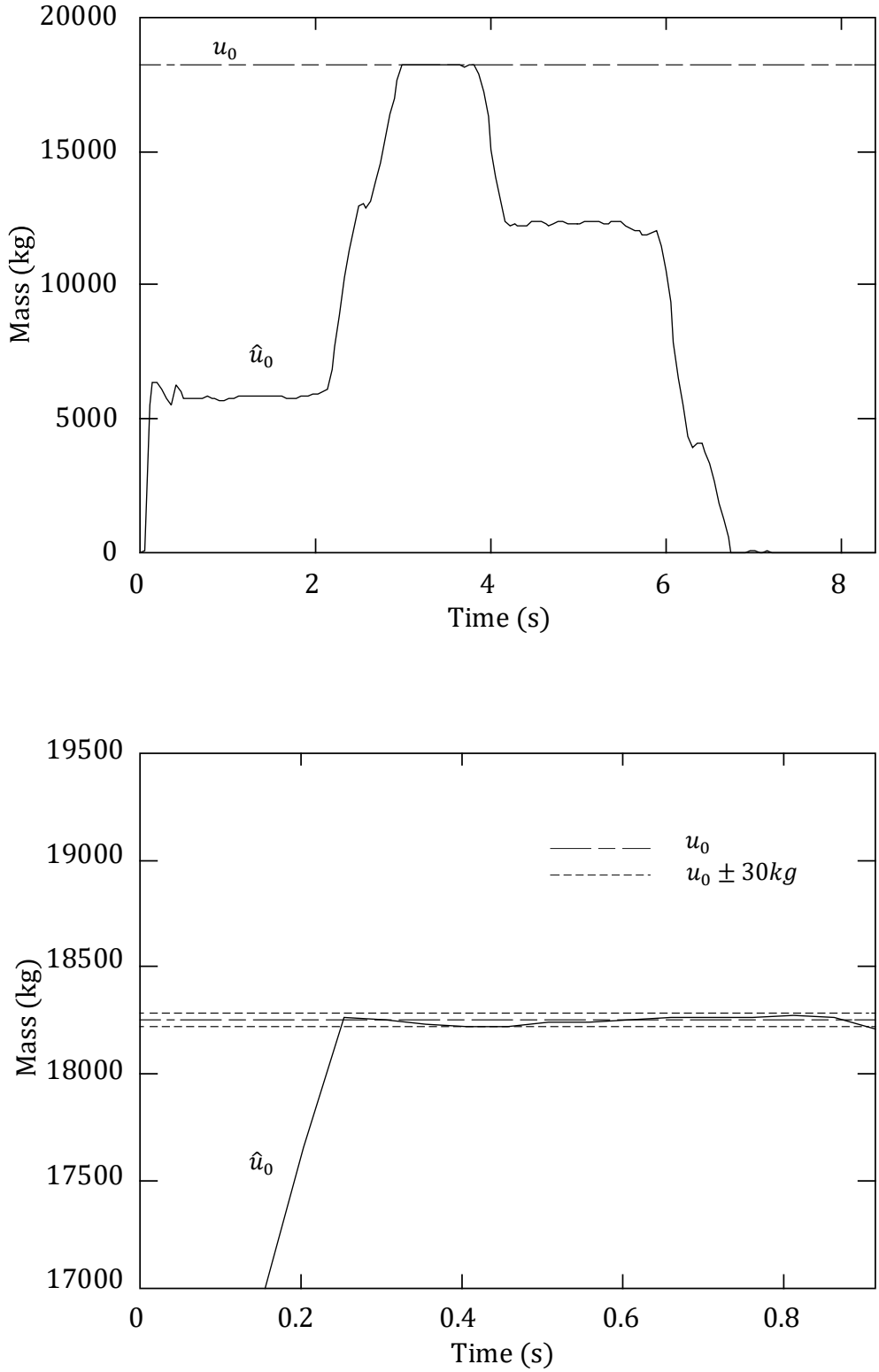


Fig.11 (d) Output of eighth-order adaptive filter

3.4.2 次数の同定

式(69)によると, 次数 n_2 の適応型ディジタルフィルタのパラメータγ_i を決定するためには, 少なくとも$(2n_2+1)$ 個の Δw_i が必要である. そのためには, 式(68)より $(2n_2+2)$ 個の w_i が，つまり$(2n_2+2+n_1)$ 個の y_i のデータが必要である．いま，y_i のデータ数 n_d が一定としたとき，適応型ディジタルフィル他の次数を高くしていくと, $n_2=(n_d-n_1-2)/2$ となったとき, 式(69)は完全な等式として成立する. その等式を $\Delta w_i = w_{i+1}-w_i$ を使って w_i について書き換えると

$$\begin{aligned} w_{k+n_2+1}+\gamma_{n_2-1}w_{k+n_2}+\cdots+\gamma_1 w_{k+2}+\gamma_0 w_{k+1} \\ = w_{k+n_2}+\gamma_{n_2-1}w_{k+n_2-1}+\cdots+\gamma_1 w_{k+1}+\gamma_0 w_k \quad (74) \\ k=0,1,\cdots,n_2 \end{aligned}$$

を得る．この結果，$\widetilde{w}_i$ が w_i の定数倍であることに注意すると，式(73)が同じ値の $\hat{u}_0$ を $(2n_2+2)$ 個発生することが言える．以上が，適応型ディジタルフィルタの次数が高くなるにつれて，計算結果が平坦になる理由である．

実験で用いたトラックスケール自体から決まるパラメータ固定ディジタルフィルタの次数は２次であった. したがって, n_2 次の適応型ディジタルフィルタで質量計算するためには，$(2n_2+4)\times 0.05\mathrm{s}$ の間はトラックスケール上にトラックの全車輪が載っていなければならない．計量台と車軸間距離の差は 3.8 m であるから，これはトラックの時速が $(3.8/0.05(2n_2+4))\times 3600/1000\mathrm{km/h}$ 以下であることを要求している．

適応型ディジタルフィルタの次数 n_2 について，ハンケル行列を用いた次数同定は，データ数が多いとき高い結果を，データ数が少ないとき低い結果を与える．また，一意に決定するのが困難な場合も多い．実用的には，質量計算の結果の平坦さをもとに，適応的に変更すべきである．

データ数が少ない場合，もっとも低い次数を設定するとしても，この車軸数３の測定対象のトラックのダイナミクスの影響を取り除くには，タイヤやダンパなどの振動的要素から考えて，６次は必要である．したがって，$n_2=6$ を上述の式に代入して，約 17 km/h が今回の動的質量計測におけるトラックスケールへの進入速度の一応の上界と考えられる．

3.5 まとめ

本章では，トラックスケールによる走行車両の動的質量計測法を与えた．この方法は，動的データに基づく質量計算であるにもかかわらず，十分な精度の測定結果が得られることが，実験によって確かめられた．実験に使用したトラックスケールは，通常の静止計量用のはかりであり，動態計量のために特別に準備したものではない．車両が，計量台に載る際の衝撃力を弱めるような構造的改善により，高い精度を実現することも可能である．

第４章
次数可変フィルタによる動態計量

4.1 はじめに

本章では,家畜の中でも体重管理が重要視される牛を計量対象として考える．家畜用の牛は大きく分けて肉用牛と乳用牛の２種類に分類できる．肉用牛は体重値自体が農家の収益につながることから，体重計測は定期的な成長過程の把握とともに，成長過程に応じた最適な飼養方法の選択を可能とする．また，乳用牛の体重は健康管理のバロメータであり，人間と同様に毎日計ることで体温など他の指標とともに健康管理に用いることができる．すなわち，牛の体重は，肉質向上・乳質向上につながる重要な管理指標の一つである[11][12].

牛の体重を計量する方法は古くから研究されている[21][22][23]．いずれも，檻・柵で牛の動きを規制し，それでも整定しない信号を平均化処理で計測しようというものである．体重計測は，農家から見れば牛をはかりまで誘導し，はかりに閉じ込め計量するという非常に手間のかかる作業である．牛から見れば檻に閉じ込められることでストレスのたまる方式となっている． 一方，牛がはかりを通過する際の計測システムからの信号を平均化処理して体重値を求める手法[24][25][26][27][28]が提案されているが，センサ信号をアナログ処理したのちのデータをそのまま使用し，計測システムの動特性を考慮しない計測方法となっている．

本章では，牛の歩行周期に基づき，フィルタ次数を計量ごとに変える体重の動的計測方式を提案する．そこで牛の動的計測では，歩行時に牛の重心の上下運動により計測データに変動が生じるが，歩行特性に周期性があることに着目する．牛がはかりを通過したときの歩行周期をオンラインで同定して，歩行周期でその変動を最小限にする適応フィルタの設計方法を提案する．これには，はかりのアナログ信号処理部分は新たなハードウェアを付加せず，乳用牛での

歩行状態での計測に適用しその有効性を検証する．

歩行状態での計量が実現すれば，日常通過する通路上にはかりを設置し，牛にはかりの上を歩いているという意識をさせずに計量することが可能になる．しかも，ほとんど手間をかけずに体重計測が実現できる．このことは，計量効率の向上だけでなく，檻などが必要なくなることから，はかりの機械設計においても簡素化ができることを示している．さらに，個体識別技術・データ通信技術を組み合わせることで牛の自動体重計測・管理システムを構築することができる．

4.2 牛の歩行時のデータ解析

牛の計量用いたはかりの計測システムは，トラックスケールと同じく複数のロードセルで計量台を支持する Fig.12 の構成である．Fig.13 に，計量対象である牛がはかりの上を歩行した荷重データを示す．このデータはローパスフィルタの出力を記録したものである．荷重の変動は，歩行にともなう重心の上下動に起因している．牛の移動状態とデータの照合は次のとおりである．全重がはかりに載っているのは区間 (t_s, t_f) で，その前後は，いずれかの足がはかりの外の地面を踏んでいる．ビデオから歩行動作と荷重データを照らし合わせると，歩行パターンのピークは前足の蹴りに対応することがいえる．それに続く後ろ足の蹴りはデータではほとんど識別できない．そこで，姿勢がもとに戻る２ピーク間の時間幅を歩行周期 T_w と定義する．

歩行にともなう荷重変動はかなり大きく，体重の 5～10 % にも達する．計量対象が牛の場合, データから読み取れるように歩行特性には周期性が存在し, この区間に注目してデータ処理を行えば体重を求めることができることを示す.

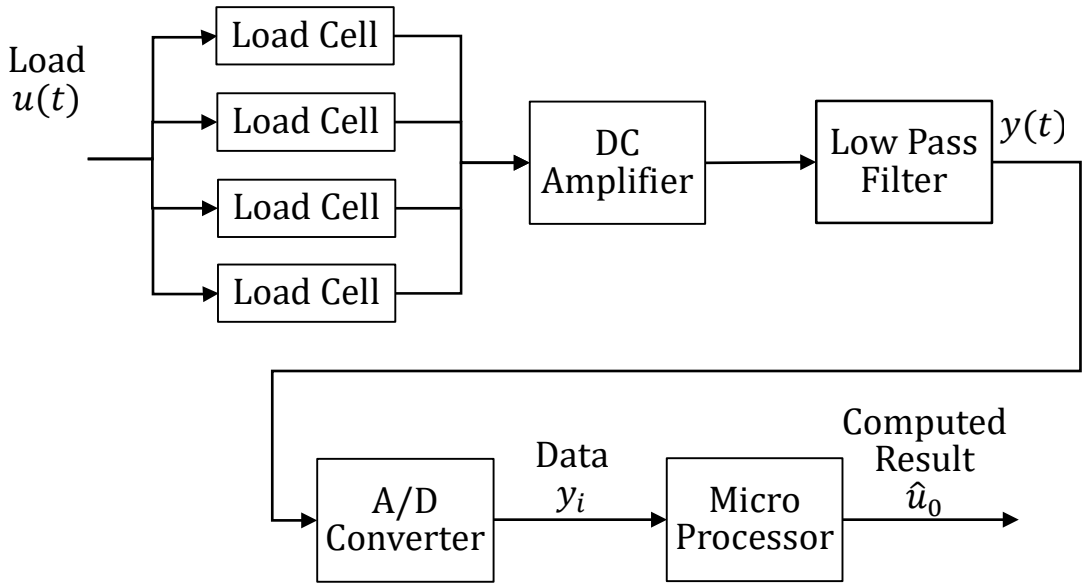


Fig.12 Measurement system

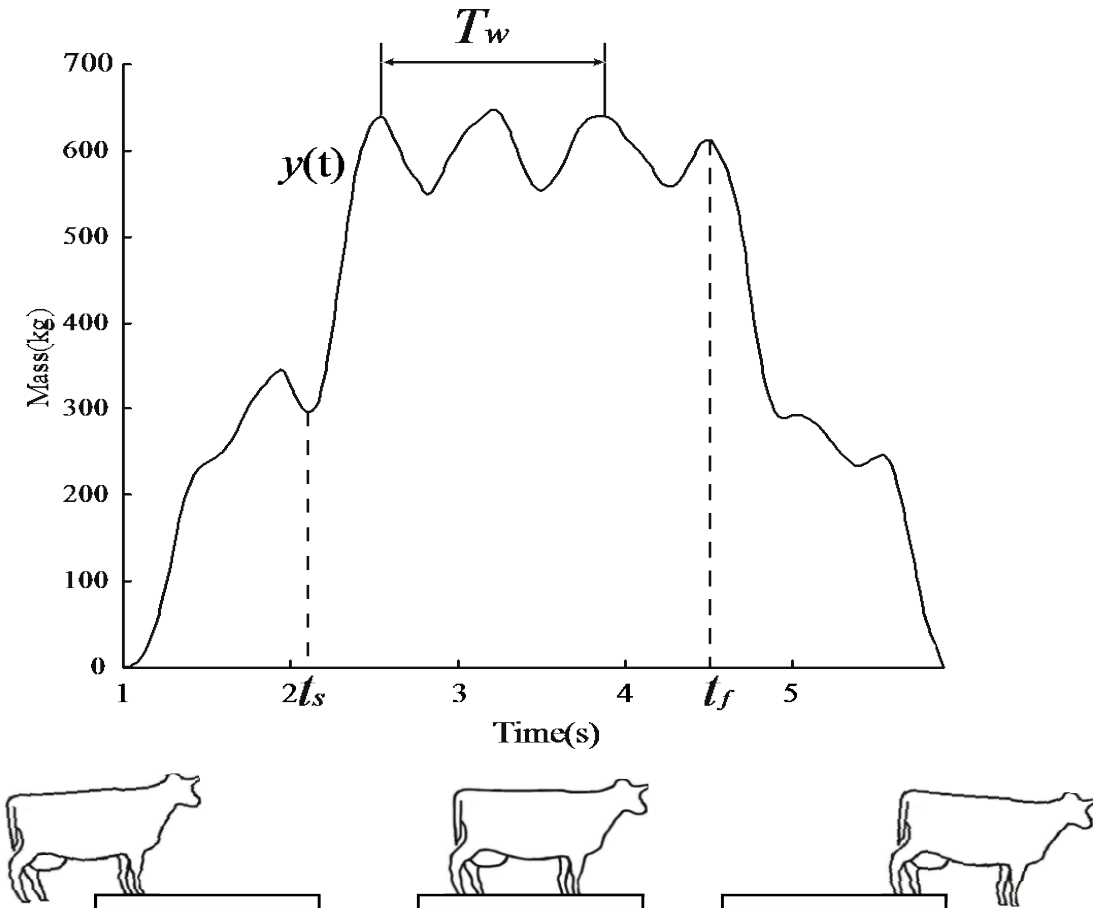


Fig.13 Measurement data

計量対象の力学モデルをたてると，動物の筋力から発生する回転トルクから重心が，足の着地点を基点として回転運動をしながら進んでいく倒立振子の運動とみることができる[32]．荷重データのダイナミクスに影響するのは重心の上下方向の動きであり，その振舞いは重心の加速度から生成され，

$$u(t) = Mg + M\ddot{w} + h(w, \dot{w}) \tag{75}$$

で表現できる．ここで $u(t)$ は，はかり載台の反力，M は計量対象の体重，w は計量対象の重心位置，$h(w, \dot{w})$ は内部状態に起因する非線形力である．また，歩行はなめらかで周期性があることから，重心の運動について次の仮定を行う．

$$\begin{aligned} w(t) &\approx w(t + T_w) \\ \dot{w}(t) &\approx \dot{w}(t + T_w) \end{aligned} \tag{76}$$

まず式(75)の両辺を時間幅 T_w で積分し $u(t)$ について整理する．

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_w}\int_t^{t+T_w} u(\tau) = Mg + \frac{M}{T_w}\int_t^{t+T_w} \ddot{w}(\tau)d\tau \\ + \frac{1}{T_w}\int_t^{t+T_w} h(w, \dot{w})d\tau \end{aligned} \tag{77}$$

右辺第３項は，牛の筋肉で発生・散逸されるエネルギーに起因する平均的な力であり，他の項に比べて十分小さいと考えられる．したがって，式(77)は次のように変形できる．

$$\tilde{u}(t) = Mg + \frac{M}{T_w}\int_t^{t+T_w} \ddot{w}(\tau)d\tau \tag{78}$$

ただし，

$$\tilde{u}(t) = \frac{1}{T_w}\int_t^{t+T_w} u(\tau)d\tau \tag{79}$$

ここで，$\tilde{u}(t)$ は平均反力である．式(78)の右辺第２項が 0 になれば，平均反力 $\tilde{u}(t)$ は静止時荷重と一致する．そこで，第２項の大きさについて検討する．

$$\frac{M}{T_w}\int_t^{t+T_w}\ddot{w}(\tau)d\tau = \frac{M}{T_w}(\dot{w}(t+T_w)-\dot{w}(t)) \tag{80}$$

式(76)より

$$\frac{1}{T_w}(\dot{w}(t+T_w)-\dot{w}(t)) \ll g \tag{81}$$

すなわち，歩行が安定し式(76)が成り立てば，式(78)の第２項は無視できる．実際には，歩行状態がゆらいで周期性や連続性が乱れるため 0 にはならないが，式(78)の第１項に比べると十分小さい．したがって

$$\tilde{u}(t) \approx Mg \tag{82}$$

と考えることができる．$u(t)$ の平均を重力加速度で割ったものとして体重 M は計算できる．しかし $u(t)$ は直接測定できない．測定データは計量システムを通った後の信号である．その信号からいかに体重 M を計算するかそのアルゴリズムを以下に述べる．

4.3 歩行動物の動態計量

動的なデータから体重を求めるには，データの発生メカニズムを同定する必要がある．Fig.12 の計測システムは，安定な有限次元線形時間不変システムとしてモデル化し，状態方程式

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t)+bu(t)\\ y(t) &= cx(t)\end{aligned} \tag{83}$$

として表す．ここに，x は計測システムの状態変数で，n 次元ベクトルとする．$u(t)$ と $y(t)$ はスカラ量である．初期状態 $x(0)=x_0$ とする．ただし，初期時刻は計量対象のすべての荷重がはかり載台に乗った時刻とする．A は定数行列で，その固有値の実部はすべて負である．b, c はベクトルである．

荷重入力 u は，体重による成分 u_0 ，計量対象がはかり載台に乗ることによる衝撃力による成分 $u_\delta(t)$ ，および計量対象の縦方向運動の力による成分 $v(t)$ の和

$$u(t) = u_0 + u_\delta(t) + v(t) \tag{84}$$

である．ただし，

$$\begin{aligned} u_0 &= Mg \\ v(t) &= M\ddot{w} + h(w, \dot{w}) \end{aligned} \tag{85}$$

である．このうち，体重による成分 u_0 は一定値であり，体重 M の値を出力 $y(t)$ のデータから知ることが目的である．$u_\delta(t)$ は衝撃力によるものであるから，計量対象がはかり載台に乗った瞬間しか存在せず，ある時間 $t'(>0)$ 以降は 0 である．平均反力 $\tilde{u}(t)$ を計算するためには， $u_\delta(t)$ の影響を除去しなければならない．

4.3.1 体重計算式の導出

ローパスフィルタの出力は，式(83)より

$$\begin{aligned} y(t) = ce^{At}x_0 &+ \int_0^t ce^{A(t-\tau)}\, bu_0 d\tau \\ &+ \int_0^t ce^{A(t-\tau)} bu_\delta(\tau) d\tau + \int_0^t ce^{A(t-\tau)} bv(\tau) d\tau \end{aligned} \tag{86}$$

である．u_0 が定値であることを使って右辺第１項の積分を計算し，また，

$$u_\delta(t) = 0 \ , \quad t \geq t' \tag{87}$$

であることを使って第２項を簡単にして

$$y(t) = c(e^{At} - I)A^{-1}bu_0 + ce^{At}(x_0 + d) + f(t) \tag{88}$$

と変形する．ただし，

$$
\begin{aligned}
d &= \int_0^{t'} e^{-A\tau} b u_\delta(\tau) d\tau \\
f(t) &= \int_0^{t} c e^{A(t-\tau)} b v(\tau) d\tau
\end{aligned}
\tag{89}
$$

である．いま，出力 $y(t)$ を周期 T ごとに，時間 $t_i(= t_0 + iT \geq t',\ i = 0,1,2,\cdots)$ においてサンプルし，データ $y_i = y(t_i)$ を得たとする．また，サンプリング時間ごとの $f(t_i)$ を f_i とする．このとき，式(88)(89)より y_i は

$$
\begin{aligned}
y_0 + cA^{-1}bu_0 &= ce^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) + f_0 \\
y_1 + cA^{-1}bu_0 &= ce^{AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) + f_1 \\
&\vdots \\
y_{n-1} + cA^{-1}bu_0 &= ce^{(n-1)AT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) + f_{n-1} \\
y_n + cA^{-1}bu_0 &= ce^{nAT}e^{At_0}(A^{-1}bu_0 + d) + f_n
\end{aligned}
\tag{90}
$$

を満たす．ここで，e^{AT} の特性多項式を

$$
\det(\lambda I - e^{AT}) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + a_1\lambda + a_0 \tag{91}
$$

としたとき，

$$
e^{nAT} + a_{n-1}e^{(n-1)AT} + \cdots + a_1 e^{AT} + a_0 I = 0 \tag{92}
$$

が成立することを用いる．式(90)において，上から順に $a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}, 1$ を掛け，それらの総和をとると，右辺の第１項の総和は 0 になり，

$$
\begin{aligned}
y_n + a_{n-1}y_{n-1} + \cdots + a_1 y_1 + a_0 y_0 \\
+(1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0)\mathrm{cA}^{-1}bu_0 \\
= f_n + a_{n-1}f_{n-1} + \cdots + a_1 f_1 + a_0 f_0
\end{aligned}
\tag{93}
$$

を得る．これより，体重の計算式

$$u_0 = -\frac{y_n + a_{n-1}y_{n-1} + \cdots + a_1 y_1 + a_0 y_0}{(1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0)\mathrm{cA}^{-1}b} + \frac{f_n + a_{n-1}f_{n-1} + \cdots + a_1 f_1 + a_0 f_0}{(1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0)\mathrm{cA}^{-1}b} \tag{94}$$

が形式的に求まる．ここで $a_0, a_1, \cdots a_{n-1}$ および $-cA^{-1}b$ は計測システムの動特性を表す係数と定常ゲインである．すなわち，計測システムを設計した段階で事前に求めることができる．一方，f_n は計量対象の重心の縦運動に依存し計測できないので，式(94)をそのまま用いて体重を計算することはできない．

式(94)で計量対象の運動による影響を表す第２項が，歩行周期区間 T_w のデータ区間に注目すれば，その影響がほぼ無視できることを示す．

4.3.2 次数可変フィルタによる動態計量

いま，式(94)の右辺第１項，第２項をそれぞれ

$$\hat{u}_{n+i} = -\frac{y_{n+i} + a_{n-1}y_{n+i-1} + \cdots + a_1 y_{i+1} + a_0 y_i}{(1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0)\mathrm{cA}^{-1}b}\ , \quad i = 0,1,2,\cdots \tag{95}$$

$$\hat{v}_{n+i} = -\frac{f_{n+i} + a_{n-1}f_{n+i-1} + \cdots + a_1 f_{i+1} + a_0 f_i}{(1 + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0)\mathrm{cA}^{-1}b}\ , \quad i = 0,1,2,\cdots \tag{96}$$

と表す．ここに $\hat{u}_{n+i}$ は，出力 y_{n+i} までの $n+1$ 個のデータから入力 $u_{n+i} = u(t_{n+i})$ を計算した値であり，$\hat{v}_{n+i}$ は f_{n+i} が計測できた場合の重心の縦運動による力の成分 v を計算した値である．

式(94)は，式(95)(96)を使って

$$\hat{u}_{n+i} = u_0 + \hat{v}_{n+i}\ , \qquad i = 0,1,2,\cdots \tag{97}$$

で表すことができ，式(97)の左辺は，式(84)のはかり載台の反力の計算値であ

る．すなわち，牛の歩行データ解析で示した通り，式(97)を歩行周期 T_w で積分すれば，牛の体重を求めることができる．なお，式(97)はサンプリング周期 T ごとの離散データのため，平均化処理で v_k の影響を除去する．

いま，歩行周期 T_w とサンプリング周期 T の関係を，整数 ℓ を使って

$$T_w = \ell T \tag{98}$$

としたとき，式(97)を ℓ 点加算したものは

$$\begin{aligned}\hat{u}_n + \hat{u}_{n+1} + \cdots + \hat{u}_{n+\ell-1} \\ = \ell u_0 + (\hat{v}_n + \hat{v}_{n+1} + \cdots + \hat{v}_{n+\ell-1})\end{aligned} \tag{99}$$

となる．式(99)の括弧内の積算した結果は，歩行周期 T_w で積分したものと同等でほぼ無視できることから，体重の計算値 $\hat{u}_0$ は

$$\hat{u}_0 = \frac{\hat{u}_n + \hat{u}_{n+1} + \cdots + \hat{u}_{n+\ell-1}}{\ell} \tag{100}$$

で十分近似することができる．つまり，各サンプル点で求めたはかりの荷重入力の推定値を歩行周期区間 T_w で平均化処理することで体重を求めることができることを示している．

式(100)の体重計算式は，走行車両の動態計量と同じく Fig.14 に示す２段のフィルタ構成となる．前段の固定フィルタは式(95)で構成され，サンプリングデータから，特性多項式の係数を使って $\hat{u}_{n+i}$ を計算している．また，後段の次数可変適応フィルタは，牛の歩行ごとに歩行周期を同定し，フィルタの次数 ℓ を可変させて計算を行う．すなわち，本論文による動的計測は，牛が歩行する度にその牛の歩行周期に合わせて，この適応型フィルタを作るところに特長がある．

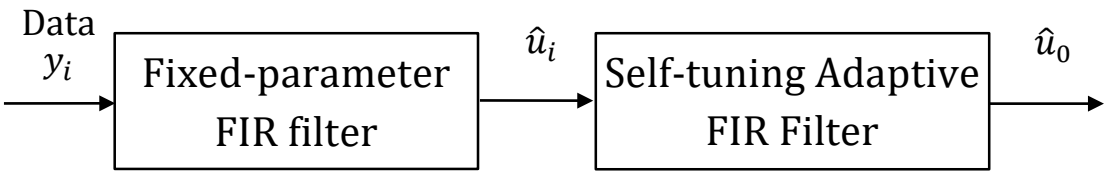


Fig.14 Series connection of FIR filters

4.3.3 歩行周期の同定

荷重データを収集しながら，牛の歩行周期区間 T_w を同定できれば，オンラインで計量値を求めることができる．歩行周期を求めるには，収集したデータから牛の全体重が載っている区間を切り出し，その区間の荷重データを用いて推定を行う．牛の位置を検出するセンサ（例えば赤外線センサなど）を用いれば，牛がはかりに載っている区間を特定することは容易にできるが，システム構成が複雑になることから，本論文では荷重データから牛の全体重が載っている区間と牛の歩行周期を求める方法を提案する．

Fig.13 の牛の歩行データに見られるように，牛が前足をはかりの載台面につけて体を前に引っ張る際に重心の上下動が生じ荷重データに極大値が生じる．この極大値に注目すれば牛の歩行速度に関係なく，同じ姿勢に戻る区間を同定することができる．すなわち歩行周期区間を求めることができる．まず，計測できる出力 y_i の極大値の中から最大値を求める．その最大値の 90 %以上の極大値を牛の全体重が載台に乗っている間のデータとする．この極大値の最大区間を牛がはかりに完全に載ってから降り始めるまでの区間とする．この全体重が載台に乗っている区間のなかで，３つの極大値の区間が歩行周期 T_w となる．そして，$\ell = T_w/T$ から式(100)の FIR 型フィルタで平均化処理する次数が求まる．

4.3.4 適応フィルタの設計

Fig.15 は，Fig.13 のデータをサンプリング時間 0.05 s で計測したデータから，フィルタ次数 $\ell = 27$ で式(100)を適用した結果である．点線で接続しているデータ(◆)が計測データで，接続していないデータ(▲)が平均化処理を行ったデータである．重心の上下運による変動はかなり減衰したが，計算値に 10 kg のばらつきが残っている．これを，Fig.16 のゲインー周波数特性を用いて説明する．姿勢が元に戻る歩行周期には，左右の足の移動に伴う荷重の変動が２つ存在する．その変動周期近傍を表したのが，点線が囲った周波数である．式(100)は単純移動平均であり，Fig.16 の点線で示す通り変動周期が少し外れるとその減衰特性が急激に低下する特性がある．このため，単純移動平均だけでは変動成分が残ることになる．

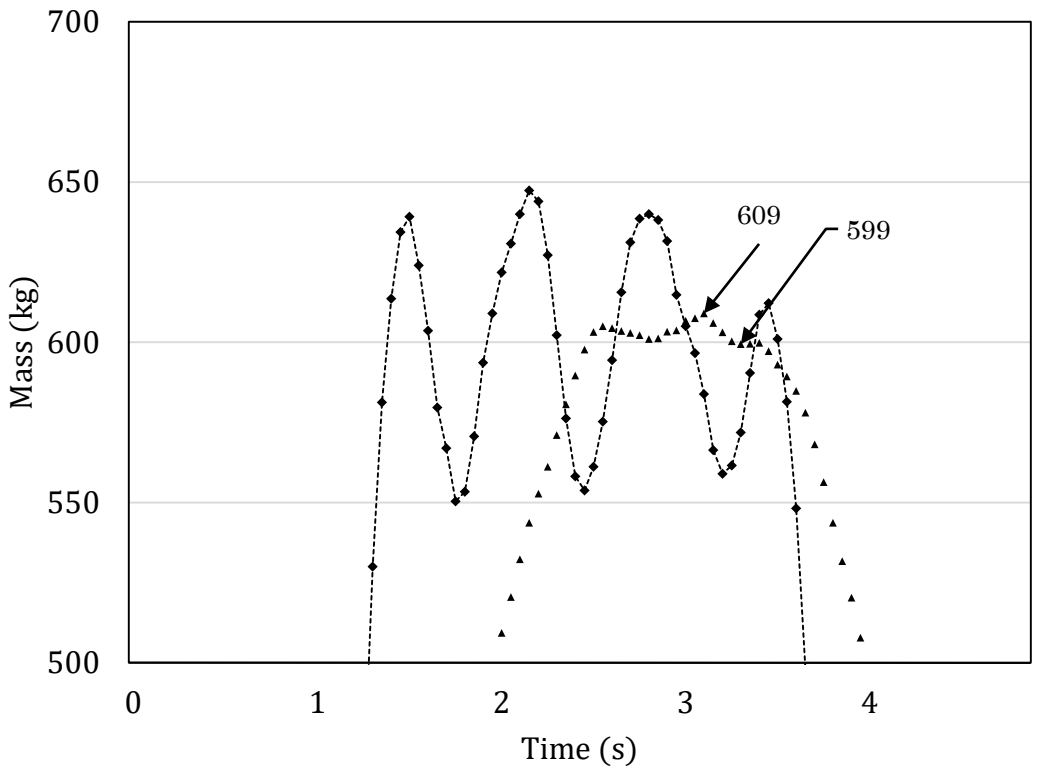


Fig.15 Output of rectangular filter

そこで，変動周期近傍で減衰特性の優れたハミング窓関数を用い加重移動平均を適用することを考える．Fig.16 の実線で示す通り，変動周期近傍では単純移動平均に比べると減衰特性が優れていることがわかる．

ハミング窓による係数は，フィルタ次数 ℓ から

$$h_k = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi k}{\ell - 1}\right) \quad (0 \le k \le \ell - 1) \tag{101}$$

で計算でき，体重計算式は加重移動平均化処理，

$$\hat{u}_0 = \frac{h_0\hat{u}_n + h_1\hat{u}_{n+1} + \cdots + h_{l-1}\hat{u}_{n+\ell-1}}{(h_0 + h_1 + \cdots + h_{\ell-1})\ell} \tag{102}$$

となる．Fig.17 が Fig.13 のデータに対して式(102)の加重移動平均を適用した結果である．ハミング窓の減衰特性により体重の推定値が±1 kg に収まった．

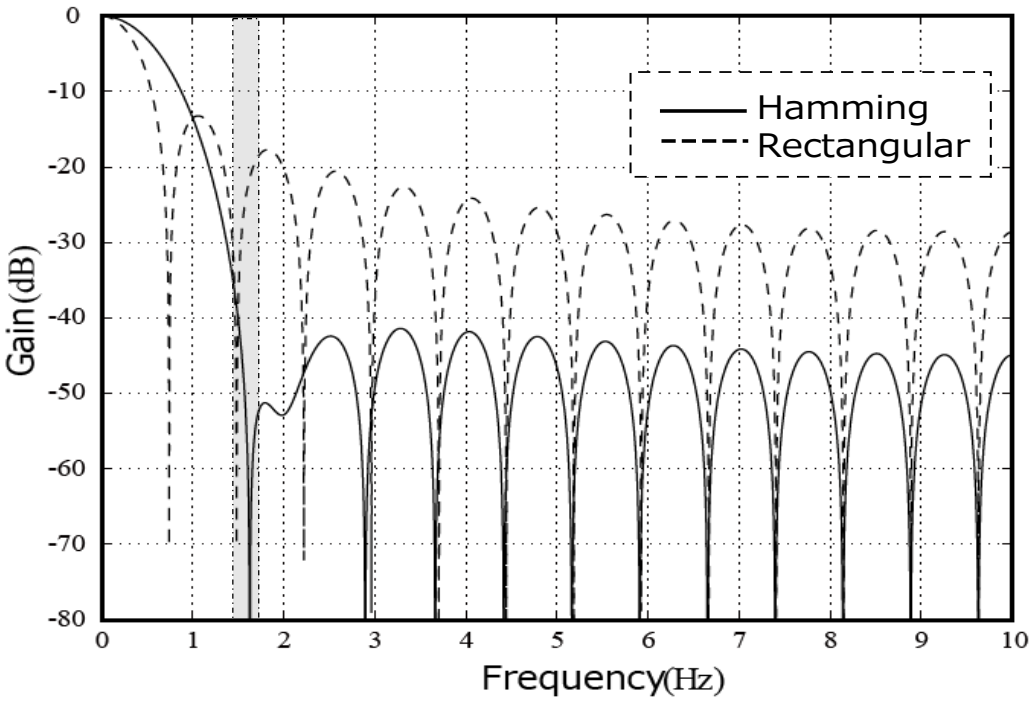


Fig.16 Gain frequency characteristic

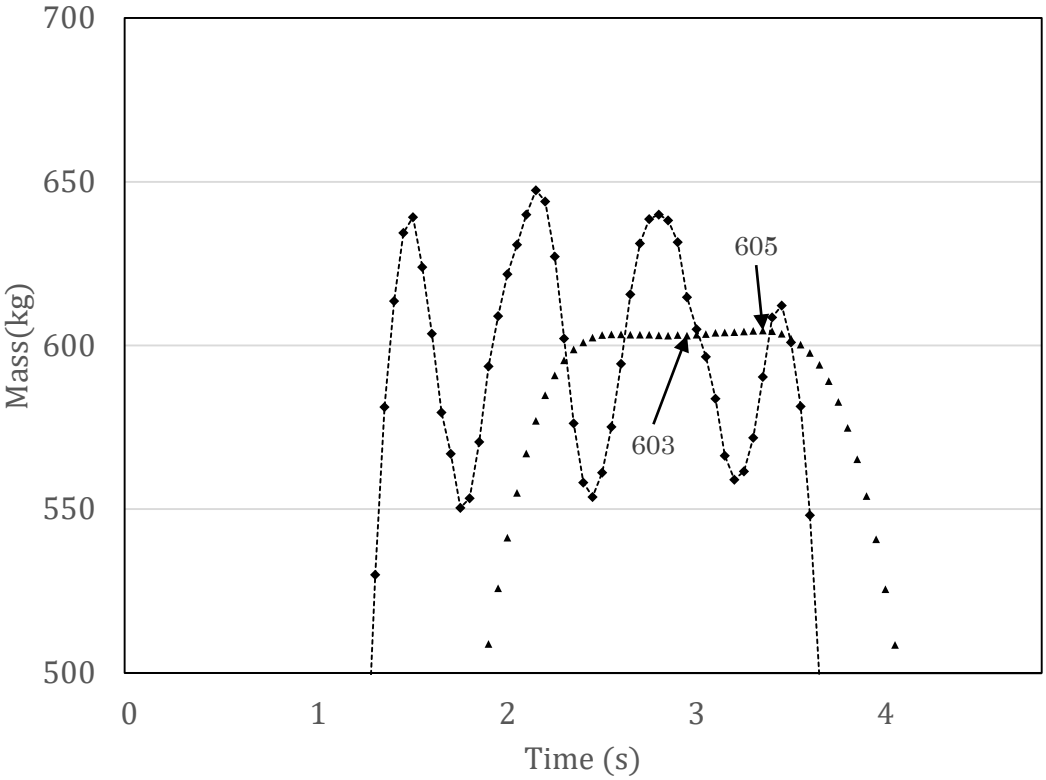


Fig.17 Output of Hamming filter

4.4 実システムへの適用

4.4.1 乳用牛の動態計量

以上で導いた牛の体重計測法の有効性を実験によって確かめた．実験に使用したはかりの仕様を Table2 に示す.，定格容量 1000 kg のロードセルをはかりの載台の四隅に固定して，秤量 1000 kg として使用した.

Table2　Specification of scale

項目	仕様
はかり本体形式	ひずみゲージ式ロードセル４点支持式
ロードセル容量	1000 kg× ４
ひょう量	1000 kg
載台寸法	3.5 m×0.9 m
ローパスフィルタ カットオフ周波数	1 Hz
サンプリング周波数	20 Hz
A/D 変換器分解能	30000 カウント

はかりにおいて計量値を出力するまでには Fig.12 の処理をおこなう．実際のはかりの設計においては，使用するロードセルと載台も含めた構造の設計も重要であるが，信号処理の側面を見ると

(1) ローパスフィルタの設計

(2) サンプリング周波数の選択

(3) A/D コンバータの分解能の決定

を的確に行う必要がある．これらはロードセル特性と計量対象の歩行周期を考慮して以下のように定める.

ロードセル自身の固有振動数は，比較的高い周波数を持っている[33][34]．はかりとして，ロードセルを台に取り付けた状態で固有振動数を計測すると標準の台はかりで約 10 Hz である．精度の良い計測を行うために，この振動数を除去する前処理をローパスフィルタに持たせる必要がある．通常の静的計量のは

かりでは，0.1～1 Hz のカットオフ周波数のローパスフィルタを用いる．特に，計量対象が動く場合は変動を極力抑えるために 0.2～0.3 Hz 程度のカットオフ周波数のローパスフィルタを用いることが多い．牛の動的計測法では，歩行周期の振る舞いをほぼ損なうことなく，はかりの固有振動による振動成分を除去することを目的とし，牛の歩行周期がほぼ 1～2 Hz にあることから，1 Hz のカットオフ周波数のローパスフィルタを用いた．

サンプリング周波数は，後のデジタル信号処理を考え，システム同定でも経験的に用いられるデータ振動成分の約 10 数倍の周波数である 20 Hz でサンプリングを行った．実際，これ以上早いサンプリングを行っても，信号がサンプリング間でほとんど変動しないため，性能向上が見込めずマイクロプロセッサの処理負荷が重くなるだけである．A/D コンバータについては，静止時のはかりの精度が 1/1000 であることから，15～16 bit の分解能が必要である．実験では，30000 カウントの積分型 A/D コンバータを使用した．

計量台の長さは，牛の歩幅や前後の足の距離をもとに決定すればよい．牛が，はかりを自然状態で歩行して，計量可能な歩行周期を確保するためには

$$L = L_1 + L_2 + 2L_3 \tag{103}$$

の長さが必要である．ここで，L_1は計量台に最初に着地した後ろ足の入口からの距離，L_2は前足と後ろ足の距離，L_3は歩幅である．

4.4.2 乳用牛への適用結果

実際の乳用牛を用いて歩行時の体重計測を行い，同じ個体での計量値のばらつきを検証するとともに，静止時の体重との比較を行った．なお，静止時体重は，はかりの上で牛を停止させ数秒のデータの平均を求めたものである．

牛を計量するはかりとして要求される性能は，一日の採食・排泄により体重変動が 10 kg 程度あることから，繰り返し精度として 2σ＜5 kg であればあれば日々の飼養管理の指標として用いることができる．

Fig.18 が延べ 110 頭（324 kg～595 kg, 平均 457 kg）計量した結果である．静止時の体重と歩行時の体重値を比較し，その差をヒストグラムに表した結果である．84 頭（76 %）の計量値が±1 kg 以内の範囲で表示され，±2 kg に範囲を

広げると 99 頭(90 %)の計量値がその範囲に入る．計量値の再現性はきわめて高く信頼性の高い計量値が得られることを示している．110 回の計量結果のなかで，5 kg 以上異なる計量値を 3 回出力したが，はかりの上を早い速度で歩行したためと考えられる．

ただし，この結果ははかりに慣れていない牛を対象としたものであり，通路に設置し毎日計量するような状況であれば，通常の牛の歩行速度は 0.8～1.0 m/s 程度であるため，精度を保証することができる．

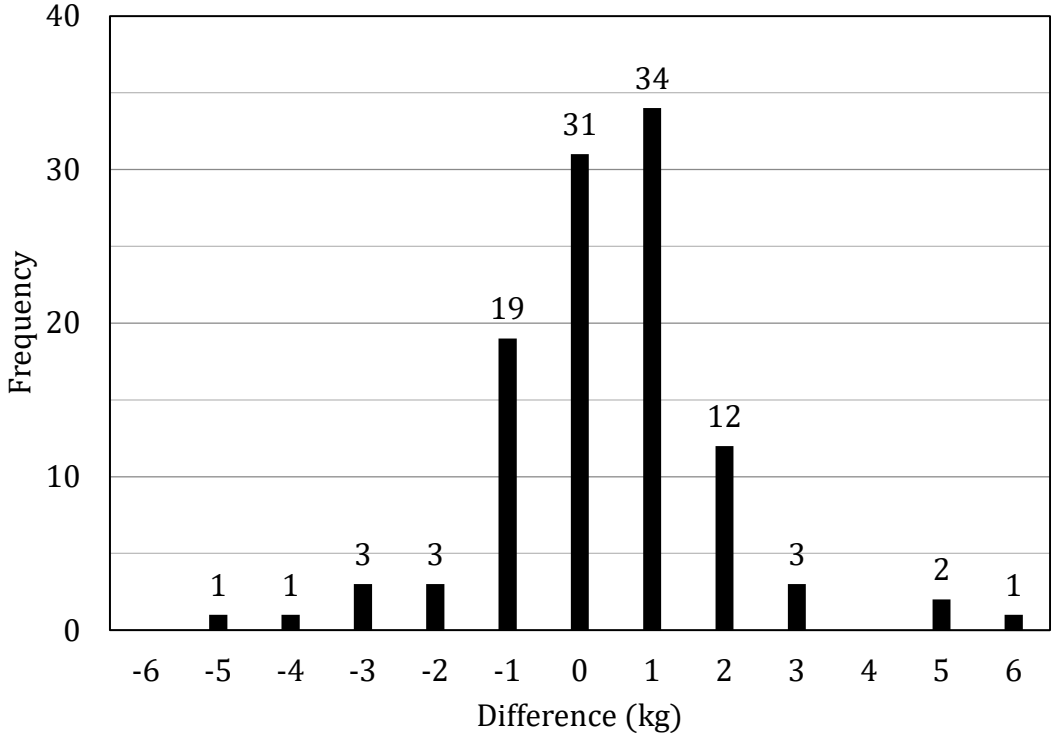


Fig.18 Experimental result

4.5 まとめ

本章では，牛の体重計測を，静止させることなく積極的に歩行させることにより，荷重変動に周期性を持たせて可能にした．動的データにもかかわらず，従来の平均化処理では，静止時体重と歩行時体重で±5 kg の差があったものが，±1 kg の差に収まった．乳用牛に対する歩行計測での実験結果で，実用上十分な精度が得られることを確認できた．

第５章
結　論

5.1 研究成果

本研究では，質量計測システムであるロードセル式はかりを対象に，動物や移動物体が動いている状態で，被測定物と質量計測システムの動特性を同定し，適応フィルタで質量を計測する動的質量計測法を確立した．

第２章では，静止状態が存在する被測定対象に対して，まず質量計測システムの原理ならびに信号処理の過程から，そのシステムが状態方程式でモデル化できることを明らかにした．この出力信号をサンプリングして得られる時系列データから，動的質量計測の基礎となる質量計算式を導出した．動的質量計測には，質量計測システムのパラメータ同定を行い，そのパラメータと過渡データから質量が求められることを明らかにし，この手法を使うことで，台はかりの計量の高速化が可能となることを示した．

第３章では，質量計測システムだけでなく被測定物の動特性にも着目し，被測定物も含めたシステムの状態方程式から，走行車両の質量計算式を導出した．ただし，非測定物ごとにパラメータが変化することから，出力信号をサンプリングして得られる時系列データからオンラインでパラメータを同定する手法を明らかにした．その結果，適応フィルタを構成して走行車両の質量計測を実システムに適用し，十分な精度が得られることを示した．

第４章では，家畜が歩行している状態で体重計測を行う動的質量計測では，牛の歩行状態での質量変動の解析を行い，歩行周期の同定から可能であることを示した．牛が歩行する毎に，出力信号から得られる時系列データから歩行周期を同定して，次数可変の適応フィルタを構成することで，歩行時の体重計測を実現した．実際の牛群で飼養管理に必要な精度を有することを示した．

モデル同定に基づく動的質量計測は，従来の静止状態での計測では正確に計測できなった移動物体や動物の質量計測を実現し，質量計測分野に新たな展開をもたらすことを示した．

5.2 今後の展望

本研究では，静止計量を対象とした台はかり，トラックスケール，家畜計量器を対象に，はかりのハードウェアは大きく変更することなく，ソフトウェアにより動的質量計測を実現した．これは，計測システムと被測定物の動特性をモデル化することで実現できた手法である．同様に計測システムと被測定物の動特性を同定することができる計測システムであれば展開が可能となる．

まず，はかりへの展開では，実システムでの検証は必要であるが，高い可能性で実現できると考えられる．第２章の高速計量は，チェッカの高速化に適用が可能であると考えられる．これは，チェッカを構成するコンベアは動いているが，高速計量に影響する上下動の動きがないためである．第３章のパラメータ可変フィルタによる動態計量は，軸重計への適用を考えた場合．非常に短いデータしか得られないため計量精度が悪化すると考えられるが，軸重計として実用上問題ない精度で計量できる可能性がある．第４章の次数可変フィルタによる動態計量は，牛以外の豚・馬などの他の家畜にも適用が十分可能である．これは，家畜の大きさに合わせてはかりを設計し，計量台へのスムーズな誘導を検討すれば実現ができると考えられる．

さらに，他の計測分野においては，第３章のパラメータ可変による動態計量が，例えば，サーミスタを用いた温度計測への適用できる可能性がある．サーミスタ自身が持つ熱時定数を同定することで，高速な温度計測法として利用できる可能性を持っている．

謝辞

本論文は，筆者が株式会社クボタ 技術開発研究所に所属していた当時の研究結果をもとに，筑波大学大学院 システム情報工学研究科 知能機能システム専攻 音響システム研究室で研究成果としてまとめたものです．本論文の執筆にあたり，多くの方々から様々なご指導とご協力を頂きました．

筑波大学システム情報系 知能機能工学域 教授 水谷孝一先生には，社会人のための博士後期課程早期終了プログラム説明会でお会いして以来，主指導教員として，音響システム研究室に快く受け入れて下さり，この研究をまとめる機会を与えていただきました．また，先生の幅広い研究のおかげで，農業施設での論文発表も機会を与えていただきました．ここに深く感謝申し上げます．

筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 准教授 若槻尚斗先生には，学会発表の原稿や論文の内容のチェックを頂きました．ここに深く感謝申し上げます．

また，本論文を執筆するにあたり，筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 教俊 藪野浩司先生，筑波大学 生命環境系 生命産業科学域 教授 北村豊先生，筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 助教 海老原 格先生，筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 助教 前田祐佳先生には，副査として本論文をご精読頂きました．予備審査を通じて専門的な見地から大変有益なご指導を頂き，本論文の内容を大いに改善することができました．ここに深く感謝申し上げます．

大阪大学 大型教育研究プロジェクト支援室 教授 池田雅夫先生には，神戸大学大学院在学中から，線形制御理論の基礎とその応用についてご指導いただくとともに，動的質量計測の研究にあたり，理論的な構築をご指導いただきました．ここに深く感謝申し上げます．

帯広畜産大学 畜産衛生学研究科 教授 梅津一孝先生には，家畜の動態計量において実験にご協力いただくとともに，家畜の生態についてご指導いただきました．ここに深く感謝申し上げます．

最後に，本研究を遂行するにあたり多くの方にご協力とご声援を頂きました.
心より御礼申し上げます.

参考文献

[1] 一般社団法人 日本計量機器工業連合会編：はかりハンドブック

[2] 小野敏郎：カルマン・フィルタのハカリへの応用，システムと制御，22(1)，37-44（1978）

[3] 小野敏郎：動的高速質量測定，精密工学会誌，52(4)，627-630(1986)

[4] 青木伸夫:動的質量計測の動向,システム／制御／情報，41(9)，372-379(1997)

[5] 梅本敏孝，笹本勇輝，安達元之，香川洋一郎：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] 福田謙吾，吉田浩治，衣笠哲也，加門守人，香川洋一郎：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,計測自動制御学会産業論文集，10(12)，100-112（2011）

[7] 梅本敏孝，加門守人，香川洋一郎：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−
計測自動制御学会論文集，47(10)，477-484（2011）

[8] 池田雅夫，青木伸夫，小野敏郎：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)

[9] Masao Ikeda, Toshiro Ono, Nobuo Aoki : Dynamic Mass Measurement for Moving Vehicles, 13th International Conference on Force and Mass Measurement, 245-250(1993)

[10] 小野敏郎:走行車両の軸重計測―軸重計測の現状と課題―,計測と制御，37(2)，123-128（1998）

［11］J.R.Roche, J.M.Lee, K.A.Macdonald, D.P.Berry: Relations Among Body Condition Score, Body Weight, and Milk Production Variables in Pasture-Based Dairy Cows, Journal of Dairy Science, 90, 3802-3815(2007)

［12］D.P.Berry, J.M.Lee, K.A.Macdonald, K.Stafford, L.Mattews, J.R.Roche: Associations Among Body Condition Score, Body weight, Somatic Cell Count, and Clinical Mastitis in Seasonally Calving Dairy Cattle, Journal of Dairy Science, 90, 637-648 (2007)

［13］小野敏郎，島岡治夫：速度・変位検出形質量動的推定アルゴリズム，計測自動制御学会論文集，19(4)，300-307（1983）

［14］小野敏郎，島岡治夫：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）

［15］小野敏郎，島岡治夫：速度・変位検出形質量動的推定システムのソフトウェア，計測自動制御学会論文集，21(4)，382-388（1985）

［16］池田雅夫，青木伸夫，羽室浩，後藤行夫：過渡データを用いた高速重量計測,計測自動制御学会論文集，24(6)，563-568(1988)

［17］小野敏郎，中島粂男，西口長嗣：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）

［18］Nobuo Aoki, Yoshiaki Yukami : High-speed Weight Measurement & Dynamic Weight Measurement The First International Symposium on Measurement of Force and Mass 49-54(1992)

［19］梅本敏孝，土井智晴：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）

［20］福田謙吾，鳥取久治，亀岡紘一，小野敏郎，吉田浩治：走行車両の軸重計測，計測自動制御学会論文集，38(8)，653-659（2002）

［21］R.A.Smith, M.J.B.Turner: Electronic Aids for Use in Fat Stock Weighing, Journal of Agricultural Engineering Research, 19, 299-311(1974)

［22］D.E.Filby, M.J.B.Turner, M.J.Street: A Walk-through Weigher for Dairy Cows, Journal of Agricultural Engineering Research, 24, 67-78 (1979).

［23］S.Hirsch: The Design of Electronic Stock Weighing Equipment Using a Digital Filtering Technique for Damping, Journal of Agricultural Engineering Research,32, 131-142(1984)

［24］J.Long, H.Takahata, K.Umetsu, H.Hoshiba, I.Takeyama: A livestock Walk-through Scale System, Journal of the Society of Agricultural Structures, 21, 175-182(1991)

［25］J.Long, H.Takahata, K.Umestu, H.Hoshiba, I.Takeyama, Y.Nishioka: Walk-through Loads and Factors Influencing the Measurement Accuracy of Cattle Weight, Journal of the Society of Agricultural Structures, 22, 95-102(1992)

［26］J.Ren, N.L.Buck S.L.Spahr: A Dynamic Weight Logging System for Dairy Cows, Transactions of the ASAE, 35(2), 719-725(1992)

［27］U.M.Peiper, Y.Edan, D.Devir, M.Barak, E.Maltz: Automatic Weighing of Dairy Cows, Journal of Agricultural Engineering Research, 56, 13-24(1993)

［28］J.I.Alawneh, M.A.Stevenson, N.B.Williamson, N.Lopez-villalobos, T.Otley: Automatic recording of daily walkover liveweight of dairy cattle at pasture in the first 100 days in milk, Journals of Dairy Science, 94, 4431-4440(2011)

［29］青木伸夫，水谷孝一，若槻尚斗，梅津一孝：歩行周期に基づく次数可変適応フィルタを用いる家畜の動的体重計測，農業施設，45(4)，155-161(2014)

［30］北森俊行:計測の本質と計測工学，計測と制御，26(2)，145-152（1987）

［31］相良節夫，秋月影雄，中溝高好，片山徹：システム同定，計測自動制御学会　（1981）

[32] 伊藤聡，湯浅秀男，伊藤宏司：エネルギー消費量による四足歩行パターン遷移の発振器－力学モデル，計測自動制御学会論文集，32(11)，1535-1543(1996)

[33] 亀岡紘一，関口久美，落合芳博，小野敏郎：ビーム型ロードセル式上皿ばかりの固有振動数（計量皿の剛性および荷重位置の影響），日本機械学会論文集（C 編），53(490)，1133-1140(1987)

[34] 亀岡紘一，藤井通弘，浅見敏彦，長谷川繁由，小野敏郎：ビーム型ロードセル式上皿はかりに及ぼす基礎振動の影響，日本機械学会論文集（C 編）56(524)，858-863(1990)

著者論文

公表済み論文（学位請求申請に関連のある論文）
査読付き雑誌論文

（J-1）池田雅夫，青木伸夫，羽室浩，後藤行夫：過渡データを用いた高速重量計測，計測自動制御学会論文集，Vol.24，No.6，563-568(1988)

（J-2）池田雅夫，小野敏郎，青木伸夫：走行車両の動的質量計測，計測自動制御学会論文集，Vol.28，No.1，50-58(1992)

（J-3）青木伸夫，水谷孝一，若槻尚斗，梅津一孝：歩行周期に基づく時数可変フィルタを用いる家畜の動的体重計測，農業施設，Vol.45，No.4，155-161(2014)

国際会議論文

(P-1) **Nobuo Aoki,** Yoshiaki Yukami : High-speed Weight Measurement & Dynamic Weight Measurement The First International Symposium on Measurement of Force and Mass 49-54(1992)

(P-2) Masao Ikeda, Toshiro Ono, **Nobuo Aoki** : Dynamic Mass Measurement for Moving Vehicles, The First International Symposium on Measurement of Force and Mass, 61-66(1992)

(P-3) Masao Ikeda, Toshiro Ono, **Nobuo Aoki** : Dynamic Mass Measurement for Moving Vehicles, 13th International Conference on Force and Mass Measurement, 245-250(1993)

査読なし発表論文

(1) 青木伸夫，羽室浩，後藤行夫，池田雅夫：過渡データを用いた重量計測の高速化，第 26 回計測自動制御学会学術講演会

(2) 池田雅夫，小野敏郎，青木伸夫：走行車両の動的質量計測，第 34 回自動制御連合講演会

(3) 池田雅夫，小野敏郎，青木伸夫：走行車両の動的質量計測，第 9 回センシングフォーラム

(4) 青木伸夫：動的質量計測の動向，システム／制御／情報

表彰

(1) 1989 年度計測自動制御学会論文賞

対象論文：池田雅夫，**青木伸夫**，羽室浩，後藤行夫：過渡データを用いた高速重量計測

(2) 1993 年度計測自動制御学会蓮沼賞

対象論文：池田雅夫，小野敏郎，**青木伸夫**：走行車両の動的質量計測

(3) 1995 年度機械学会第 2 回関西支部賞

対象：家畜の動的体重計測システムの開発

付録
有効データ区間の抽出

A.1 はじめに

パラメータ可変フィルタ，次数可変フィルタいずれの場合も，被測定物の全重が計量台に載っているデータで設計する必要がある．被測定物が計量台に完全に載っている時間間隔に対応したデータ区間を「有効データ区間」とする．

A.2 有効データ区間の抽出

被測定物をはかりのみで自動的に検知し，適応フィルタに必要な時系列データを収集する．

（1）被測定物がはかりに載っている区間の抽出

①適当なしきい値 w_0(≪ 被測定物の質量) を設定する．

②固定フィルタの出力 w_i が，しきい値 w_0 を超えたとき，被測定物が計量台に載り始めたと判断して，データ収集を開始する．

③データ収集は，w_i がしきい値 w_0 以下になるまで続ける．

（2）有効データ区間の抽出

①固定フィルタの出力 w_i から，ピークの検出を行う．

②最大ピーク値 w_{Pmax} を基準に，しきい値 $w_e = \eta \cdot w_{pmax}$を設定する．

$$w_e = \eta \cdot w_{pmax} \ ,\eta = 0.8 \sim 0.9$$

③しきい値w_eより大きいピークを含む区間を，有効データ区間とする．