Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00163

Received date : 19 May, 2021

Accepted date : 26 September, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 6 October, 2021

速度フィードバック形リレー制御式質量測定における剛性を考慮した 質量推定と周期測定デバイスの開発

水野 毅^{*1}, 江川 拓^{*2}, 高崎 正也^{*1}, 石野 裕二^{*3}

Mass estimation considering stiffness and fabrication of period measurement device in mass measurement using velocity-feedback relay control

Takeshi MIZUNO^{*1}, Taku EGAWA^{*2}, Masaya TAKASAKI^{*1} and Yuji ISHINO^{*3}

^{*1, *2} Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama 338-8570, Japan

^{*3} Research and Development Bureau, Saitama University

255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama 338-8570, Japan

Abstract

A mass measurement system with a relay feedback of velocity has been developed to achieve measurement without gravity. In this system, mass is estimated from the periods of oscillation in the relay-feedback system. Originally, the velocity of the object was solely fed back, which caused the orbit of the object to drift easily. A restoring force compensation by a spring was introduced to avoid such drift. However, a slight drift still occurs in spite of the restoring force element. A new estimation formula has been derived which can estimate mass regardless of the position of the closed orbit. An analytical study on this formula shows that mass is overestimated when the restoring force is neglected in the estimation. Several experimental results show that the estimated mass is slightly larger than the actual value even though the new formula is used in estimation. In the measurement, the periods of oscillation are measured with a digital oscilloscope. A delay in the period measurement is expected to cause such overestimation. To reduce the error due to delay in measuring periods, a new device for rapid period measurement is developed, which uses the edge detecting function of a micro-computer. It is experimentally demonstrated that the measurement error is reduced by the developed measurement device.

Keywords : Measurement, Nonlinear Control, Self-Excited Vibration, Electromagnetic Actuator, Motion Control, Vibration Control, Mass Measurement

1. 緒 言

宇宙空間では、無重力環境（厳密には微小重力環境）の特徴を生かした各種の実験が試みられ、地上では容易に得られない多くの知見をもたらしている。国際宇宙ステーションの建造も進展しており、将来的には、人間が長期に涉って宇宙空間に滞在し、無重力環境を利用した新物質の創製実験などに取組む時代の到来が期待されている。現在は、宇宙で実験を行う場合、予め地上で準備されたサンプルが用いられている。また、実験の成果物についての評価も地上に戻ってから行われているので、それらについて無重力環境で質量測定を実施する必要はない。しかし、宇宙での滞在期間が長期に渉ようになり、本格的な実験が宇宙で実施されるようになれば、そのような環境で質量を正確に測定する装置が必要不可欠となる。その場合、理想的には、地上で測定と同程度の精度で質量を測定できることが望ましい。

これまでに、無重力環境下での質量測定法として次のような方式が提案されている。

(1) 質量・ばね系を振動させ、その振動周期から質量を求める方式 (Sarychev et al., 1980) (Solberg, 1985)

No.21-00163 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00163]

^{*1} フェロー, 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

^{*2} 埼玉大学大学院理工学研究科

^{*3} 正員, 埼玉大学研究機構総合支援センター

E-mail of corresponding author: mizar@mech.saitama-u.ac.jp

- (2) 質量・ばね系の振動の変位と加速度から、動的測定法によって質量を推定する方式 (小野, 島岡, 1985)
- (3) 質量・ばね系の自然角周波数を一定に保つ可変剛性制御を利用する方式 (Ono et al., 1997)
- (4) 被測定物を回転させ、その時の遠心力から質量を推定する方式 (前田他, 1993) (Rivetti et al., 1997)
- (5) 動吸振器を利用した方式 (水野, 荒木, 1996) (水野他, 2002)
 - (5.a) 測定対象物を回転させる方式 (水野, 荒木, 1996)
 - (5.b) 測定対象物を振動させる方式 (水野他, 2002)
- (6) 運動量保存則に基づいた測定法 (水野, 箕輪, 2000) (藤井, 2002)
 - (6.a) 二物体の速度比から質量を推定する方式 (水野, 箕輪, 2000)
 - (6.b) 運動量の変化と力積が等しいことを利用する方式 (藤井, 2002)

しかしながら、これらの方法には一長一短があり、決定的な方式が確立されているとは言い難い。方式(1)では、原理的に減衰の小さいバネ-質量系で測定を行うので、外部からの振動が伝わると、その影響による振動が減衰せず、精度の高い測定が難しくなる。方式(2)では、過渡応答から質量を推定するので、方式(1)と比較して測定時間を短くできるという利点があるが、正確な測定にはセンサの動特性を考慮した、かなり複雑な推定アルゴリズムが必要となる。方式(3)は、自然角周波数を正確に一定とするために剛性を繰返し調整する必要がある。方式(4)は、測定中に遠心力が外部に伝わってしまうので、宇宙ステーションのような柔軟構造物内で使用すると、振動問題を引き起こす可能性がある。これに対し方式(5)は、動吸振器によって振動を吸振しながら測定を行うため、振動問題は回避できるが、反面、機構が複雑になってしまうという問題がある。方式(6)では、繰返し測定によって測定精度を向上させるには、初期条件設定機構などを工夫する必要がある。

著者らは、外乱の影響を受けにくく、かつ比較的簡単な機構で正確な測定を行える装置の実現を目指して、

- (7) リレーフィードバック系を利用した測定法 (水野, 高橋, 2000) (Mizuno et al., 2005)

を提案している。この方式では、測定対象物をリニアアクチュエータで駆動する運動制御系にリレーフィードバックを加えて持続振動を発生させ、その振動周期から質量を推定する。このようなリレーフィードバック系に発生する持続振動を積極的に利用した例としては、PID コントローラの自動チューニング (Yu, 1999) (Hang et al., 2002) (Berner et al., 2014) や2 慣性系のバックラッシュの同定 (Ruderman et al., 2019) などが挙げられるが、質量測定に利用しようとする試みは、著者らの研究を除いて報告されていない。この方式では、リニアアクチュエータによって対象物を駆動して持続振動を発生させる必要があるため、体重のような数 10kg オーダの質量には適していないが、一方で、MEMS 技術を利用して製作すれば、超小型の質量測定装置も実現可能であり、その場合には、 μg ~ mg オーダの質量測定も期待できる。また、測定中に持続振動が伴うので、測定対象としては、原理的には剛体が想定されるが、粉体であれば静電吸着を利用して可動部に固定したり、液体であればカプセルに充填するなどの工夫を施せば、様々な物体を測定の対象にできると考えられる。

方式(7)は、フィードバックする物理量によって、さらにつぎの二つの方式に分類できる。

- (7.a) 変位をフィードバックする方式 (Mizuno et al., 2005)
- (7.b) 速度をフィードバックする方式 (水野, 高橋, 2000)

方式(7.a)では、測定対象物の変位を不感帯を持つリレー要素を介してフィードバックした系に生じる持続振動の周期から質量を推定する。この測定法では、安価なフォトインタラプタを用いてリレー切換え信号を生成できるという利点がある。しかしながら、リレー出力は、正、零、負の三つの値を取るため、対称性を仮定しない限り、それぞれの状態の周期を測定しなければならないので、周期の測定に工夫が必要となる。方式(7.b)では、測定対象物の速度をヒステリシスを持つリレーを介してフィードバックした系に生じる持続振動の周期から質量を推定する。この方式では、リレー出力は正・負の二値であり、この二つの状態の周期をそれぞれ測定すれば良いので、周期測定が(7.a)に比べて簡単である。

本論文は、比較的簡単な機構で高精度の質量測定を実施できる可能性がある方式(7.b)を対象とする。この方式に関しては、まず、原理を検証するため、試作した実験装置を用いて測定実験を行い、どの程度の測定精度が得られるかが調べられた (水野, 高橋, 2000)。つぎに、測定中に測定対象物の位置を中央に保つために用いられている平衡ばねや、可動部を支持する軸受部で生じる粘性抵抗が測定精度に与える影響について評価した (Mizuno et

al., 2008). その結果, 平衡ばねの剛性を大きくすると, 質量が実際の値より小さく推定されることが実験的に示された. そして, 平衡ばねを導入することによって静的なつり合い位置は唯一に決まるものの, 動的には位相面軌道は一つに定まらないことが示され, 実験的にも軌道が緩やかにドリフトすることが観測された (Mizuno et al., 2019). これに対応して, 平衡ばねの剛性を考慮した運動方程式に基づき, 新たな質量推定式が解析的に導出され, その過程で, リレー動作するときの変位がゼロでない限り, 二つの状態の周期が等しくならないことも解析的にも示された (Mizuno et al., 2021). 一方, 平衡ばねを用いない場合, 原理的に二つの状態の周期は等しくなるが, 速度検出の遅れが質量測定誤差の要因となることが示された (石橋他, 2017).

本論文では, 導出された推定式を解析し, ばね剛性を無視して質量を推定すると, 推定値は実際より小さくなることを一般 (スイッチングの位置が任意) の場合について示す. さらに測定実験の結果に基づいて, ばね剛性を考慮した推定式を用いた場合の推定誤差の要因分析を行い, その要因の一つである周期測定について改良を試みる. 具体的には, マイクロコンピュータの立ち上がり・立ち下がりエッジ検出機能を利用した, 専用の周期測定デバイスの開発を行う. そして, このデバイスを用いた測定実験から, 周期の測定精度や分解能を向上させることによって, 測定誤差を低減できることを実証する.

2. 測定原理

提案する質量測定方法の原理を図1に基づいて説明する. 図1(a)に示すように, 測定対象物 (質量: m) をアクチュエータに取り付け, 往復運動をさせる. 測定対象物に作用するアクチュエータの駆動力 $F(t)$ は, 測定対象物の速度 v に応じて, 正または負の一定値をとるように切換えられる. 切換え時点は, ヒステリシス特性を持つリレー要素によって定められる. すなわち, 全体の構成は, 図1(b)に示すような速度制御系となる.

この系の具体的な動作を図2を用いて説明する. 測定対象物の速度 v が増加して v_0 に達すると $F(t) = -F_0$, 減少して $-v_0$ に達すると $F(t) = F_0$ に切換えられる. 測定対象物に $F(t) = F_0$ の力が作用しているとき, この系の運動方程式は, 次式ようになる.

$$m \frac{dv}{dt} = F_0 \quad (1)$$

初期条件を $v(0) = -v_0$ とし, 式(1)を解くと,

$$2v_0 = \frac{F_0}{m} \cdot T_p \quad (2)$$

Fig.1 Original measurement and control system. The velocity of the object is fed back through a relay with hysteresis.

Fig.2 Operation of the measurement and control system. An oscillation is induced due to the relay feedback.

ここで T_p は、 $v(t) = v_0$ となるまでの時間を表している．同様に、 $F(t) = -F_0$ の力が作用しているとき、この系の運動方程式は次式のようにになる．

$$m \frac{dv}{dt} = -F_0 \quad (3)$$

$v(t) = v_0$ となって、 $F(t)$ が F_0 から $-F_0$ に切換えられてから、 $v(t) = -v_0$ となるまでの時間を T_n と表すと、

$$2v_0 = \frac{F_0}{m} \cdot T_n \quad (4)$$

が得られる．式(2)、(4)から、明らかに

$$T_p = T_n \quad (5)$$

が成立する．この和を T とすると、次式が成立する．

$$T = T_p + T_n = \frac{4v_0}{F_0} m \quad (6)$$

$$\therefore m = \frac{F_0}{4v_0} T \quad (7)$$

したがって、リミットサイクルの周期 T を測定すれば、測定対象物の質量 m は、式(7)から求められる．

3. 平衡ばねの影響を考慮した推定式

3.1 推定式の導出

図 1(b)に構成を示す制御系では、速度だけがフィードバックされている．したがって、例えば、測定対象物に何らかの外乱が作用して位置が変動したとしても、復元力が作用しない．また、実際には、測定対象物に作用させる正負の力の絶対値を完全には一致させられない．さらに、切換え時点を決めるための速度検出においても、ある程度の誤差が避けられない．このため、実際の測定では、測定対象物がドリフトしてしまい、長時間にわたる測定はできない．このようなドリフトを防止する有効な方法は、可動範囲の中央（平衡位置）への復元力を作用させることである．これまでに行われてきた測定実験では、ばね（以下では、平衡ばねと呼ぶ）要素を用いて、このような復元力を与えていた（水野、高橋, 2000）(Mizuno et al., 2008)．また、実際に無重力環境で質量測定を行

(a) Physical system

(b) Relay feedback with restoring force

Fig.3 Physical model with a spring. The spring generates restoring force action on the object. The static equilibrium point is unique and corresponds to the natural length of the spring.

う場合、測定対象物の運動を並進 1 自由度に拘束するためにも、このような機構は必要となる。ここでは、平衡ばねの影響を考慮した質量推定式を導出する。

平衡ばねの影響を考慮したときの物理モデルを図 3 に示す。ばねによる剛性を k で表すと、式(1), (3)に対応する式は、以下ようになる。

$$m \frac{dv}{dt} = F_0 - kx \quad (8)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -F_0 - kx \quad (9)$$

ここで、 x は、測定対象物の平衡位置からの変位を表しており、次式が成立する。

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

速度が時刻 $t=0$ で $v(0)=-v_0$ となり、測定対象物に作用する力が $F(t)=F_0$ に切り換えられたときの変位を $x(0)=x_0$ とする。式(10)を式(8)に代入し、初期条件を $v(0)=-v_0$ 、 $x(0)=x_0$ としてラプラス変換すると、次式が得られる。

$$X(s) = \frac{F_0 + ms(sx_0 - v_0)}{(ms^2 + k)s} = \frac{\alpha + (s^2 x_0 - sv_0)}{(s^2 + \omega^2)s} \quad (11)$$

ここで、

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{F_0}{m} \quad (13)$$

式(11)をラプラス逆変換すると、次式が得られる。

$$x(t) = \frac{\alpha}{\omega^2} + (x_0 - \frac{\alpha}{\omega^2}) \cos \omega t - \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t \quad (14)$$

また、これを微分すると次式が得られる。

$$v(t) = \omega(\frac{\alpha}{\omega^2} - x_0) \sin \omega t - v_0 \cos \omega t \quad (15)$$

つぎに、速度が v_0 に達し、測定対象物に作用する力が $F(t) = -F_0$ に切り換えられる時刻を T_p とすると、式(15)から、

$$v(T_p) = \omega(\frac{\alpha}{\omega^2} - x_0) \sin \omega T_p - v_0 \cos \omega T_p = v_0 \quad (16)$$

が成立する。式(16)から、次式が導出される。

$$v_0(1 + \cos \omega T_p) = \omega(\frac{\alpha}{\omega^2} - x_0) \sin \omega T_p \quad (17)$$

これに半角の公式を適用すると

$$v_0(2 \cos^2 \frac{\omega T_p}{2}) = \omega(\frac{\alpha}{\omega^2} - x_0)(2 \cos \frac{\omega T_p}{2} \sin \frac{\omega T_p}{2}) \Rightarrow \cot \frac{\omega T_p}{2} = \frac{\omega}{v_0}(\frac{\alpha}{\omega^2} - x_0) \quad (18)$$

また、式(17)を利用して、 $x(T_p)$ を計算すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} x(T_p) &= \frac{\alpha}{\omega^2} + (x_0 - \frac{\alpha}{\omega^2}) \cos \omega T_p - \frac{v_0}{\omega} \sin \omega T_p = \frac{\alpha}{\omega^2} + (x_0 - \frac{\alpha}{\omega^2}) \cos \omega T_p + (x_0 - \frac{\alpha}{\omega^2}) \frac{\sin \omega T_p}{1 + \cos \omega T_p} \sin \omega T_p \\ &= \frac{\alpha}{\omega^2} + (x_0 - \frac{\alpha}{\omega^2}) \frac{(1 + \cos \omega T_p) \cos \omega T_p + \sin^2 \omega T_p}{1 + \cos \omega T_p} = \frac{\alpha}{\omega^2} + (x_0 - \frac{\alpha}{\omega^2}) \frac{1 + \cos \omega T_p}{1 + \cos \omega T_p} \\ &= x_0 \end{aligned} \quad (19)$$

すなわち、測定対象物に作用する力の切り換えは、同じ位置で行われる。また、与えられた条件だけからでは x_0 の値を一意的に定めることはできない。これは、解析的には、解軌道が無数に存在することを意味する。

同様に、 $F(t) = -F_0$ となっている状態の周期を T_n とすると、次式が成立する。

$$\cot \frac{\omega T_n}{2} = \frac{\omega}{v_0}(\frac{\alpha}{\omega^2} + x_0) \quad (20)$$

式(18)、(20)から、次式が得られる。

$$\cot(\frac{\omega T_p}{2}) + \cot(\frac{\omega T_n}{2}) = \frac{\omega}{v_0}(\frac{\alpha}{\omega^2} - x_0) + \frac{\omega}{v_0}(\frac{\alpha}{\omega^2} + x_0) = \frac{2\alpha}{v_0\omega} = \frac{2\omega}{v_0} \cdot \frac{F_0}{k} \quad (21)$$

すなわち、

$$\omega = \frac{kv_0}{2F_0} (\cot(\frac{\omega T_p}{2}) + \cot(\frac{\omega T_n}{2})). \quad (22)$$

この式(22)が、平衡ばねの剛性を考慮した推定式となる。具体的には、以下のような手順で測定対象物の質量を求める。

- (1) 予め、平衡ばねの剛性 k の値を求めておく。
- (2) リミットサイクルの周期 T_p と T_n を測定する。
- (3) 式(21)から ω を求める。

(4) $m = k / \omega^2$ を計算する

注目すべきことは、式(21)が切り換え位置 x_0 を含んでいないことである。すなわち、任意の解軌道から質量を推定することができる。

3・2 解 析

平衡ばねの剛性が小さく、

$$\tan \omega T \cong \omega T \quad (T = T_p + T_n) \quad (23)$$

と近似できる場合について考察する。式(22)から、次式が得られる。

$$\omega \cong \frac{kv_0}{2F_0} \left(\frac{2}{\omega T_p} + \frac{2}{\omega T_n} \right) = \frac{kv_0}{\omega F_0} \cdot \frac{T_p + T_n}{T_p T_n} \Rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} \cong \frac{kv_0}{F_0} \cdot \frac{T_p + T_n}{T_p T_n}. \quad (24)$$

したがって、質量の推定式は、以下ようになる。

$$m \cong \frac{F_0}{v_0} \cdot \frac{T_p T_n}{T_p + T_n}. \quad (25)$$

式(25)に相加相乗平均の公式を適用すると、

$$m \cong \frac{F_0}{v_0} \cdot \frac{T_p T_n}{T_p + T_n} \leq \frac{F_0}{v_0} \cdot \left(\frac{T_p + T_n}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{T_p + T_n} = \frac{F_0}{4v_0} T. \quad (26)$$

式(26)の右辺で等号が成立するのは、

$$T_p = T_n (= \frac{T}{2}). \quad (27)$$

のときである。この場合、式(22)に基づいて推定される質量は、平衡ばねがない場合の推定式(7)に基づいて計算されたものとほぼ一致することになる。

また、式(18)と式(20)からわかるように、式(27)が成立するのは

$$x_0 = 0. \quad (28)$$

すなわち、力の切り換えが原点で行われる場合である。逆に、 $T_p \neq T_n$ の場合には、

$$m \cong \frac{F_0}{v_0} \cdot \frac{T_p T_n}{T_p + T_n} < \frac{F_0}{4v_0} T. \quad (29)$$

となるので、力の切り換えが原点以外で行われる場合には、リミットサイクルの周期 T だけから質量を推定すると、実際の質量より大きく推定されてしまうことが予想される。このことは、式(23)の近似式を用いなくても解析的に示すことができる (Mizuno et al., 2021).

式(23)の一次近似を用いると、式(25)からわかるように、ばね剛性の大きさが質量の推定に与える影響を評価することはできない。この影響を評価するために、3次多項式による近似を用いて、質量の推定式を導出する。

$$\tan \omega T \cong \omega T + \frac{1}{3}(\omega T)^3 \quad (30)$$

これを式(22)に適用すると

$$\omega \cong \frac{kv_0}{2F_0} \left(\frac{1}{\frac{\omega T_p}{2} + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega T_p}{2} \right)^3} + \frac{1}{\frac{\omega T_n}{2} + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega T_n}{2} \right)^3} \right) = \frac{kv_0}{\omega F_0} \left(\frac{1}{T_p \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega T_p}{2} \right)^2}} + \frac{1}{T_n \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega T_n}{2} \right)^2}} \right)$$

$$\cong \frac{kv_0}{\omega F_0} \left\{ \frac{1}{T_p} \left(1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\omega T_p}{2} \right)^2 \right) + \frac{1}{T_n} \left(1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\omega T_n}{2} \right)^2 \right) \right\} \quad (31)$$

両辺に ω を掛け、さらに式(12)の関係をを用いると

$$\frac{1}{m} \cdot \frac{F_0}{v_0} \cong \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_n} - \frac{1}{12} \frac{k}{m} (T_p + T_n) \Rightarrow m \cong \frac{F_0}{v_0} \cdot \frac{T_p T_n}{T_p + T_n} + k \frac{T_p T_n}{12} \quad (32)$$

式(32)から、ばね剛性を無視した場合と比較すると、質量は大きく推定されることがわかる。これは、ばねを挿入すると、ばねの復元力によって振動の周期が短くなり、そのため、質量が小さくなったように見えることに対応している。

なお、スイッチング位置が原点 ($x_0 = 0$) の場合、 $T_p = T_n = T/2$ が成立し、式(32)は、このことを前提として導出した式 (Mizuno et al., 2019) と一致する。

3・3 数値例

ここでは、平衡ばねの剛性 k とスイッチングの位置 x_0 と解軌道及び質量推定との関連について、シミュレーション及び数値計算によって調べる。駆動力 F_0 及び切り換え速度 v_0 は、実験の条件と合わせて、以下のように設定した。

$$F_0 = 0.712 \text{ N}, \quad v_0 = 0.025 \text{ m/s} \quad (33)$$

まず、位相面上での軌道を図4に示す。これらの軌道は、Simulink®上で図3(b)に示すブロック線図を構成し、求めている。質量 m 及び切り換え位置 x_0 は

$$m = 0.5868 \text{ kg}, \quad x_0 = -0.1 \text{ mm} \quad (34)$$

と設定して、ばね剛性をつぎの3通りに変化させている。

$$(a) k = 0, \quad (b) k = 283.7 \text{ N/m}, \quad (c) k = 577.4 \text{ N/m} \quad (35)$$

Fig.4 Phase portraits of the control system. The switching positions are at $x_0 = -0.1$ mm. The amplitude of oscillation in the negative direction becomes smaller as the stiffness increases.

図から、スイッチングの位置が負の方向へずれると、ばねの復元力によって、負の方向の最大変位が小さくなっていることがわかる。また、式(18)と式(20)からも推測できるが、 $F(t) = -F_0$ となっている周期 T_n が短くなり、逆に、周期 T_p は長くなる。また、切り換え位置を

$$x_0 = -0.2 \text{ mm}$$

としたときの結果を図 5 に示す。軌道の中心が -0.1 mm 移動しているが、形状はほとんど変化していない。

つぎに、二つの近似式(25)と(32)とを用いて質量を推定した結果を図 6 に示す。この数値計算では、 $x_0 = -0.1 \text{ mm}$ ，ばね剛性 k を

$$(a) k = 283.7 \text{ N/m}, (b) k = 577.4 \text{ N/m} \quad (36)$$

として、Excel®を利用して計算している。具体的には、 m を $0.3 \text{ kg} \sim 0.6 \text{ kg}$ に変化させながら、式(18)から T_p ，式(20)から T_m を計算で求め、これらを式(25)，式(32)へ代入して、それぞれの場合の質量の推定値を求めている。図から、近似式(32)を用いると、近似式(25)を用いた場合に比べて、ほぼ真値と等しい推定が可能であることがわかる。また(a)と(b)を比較すると、ばね剛性が大きくなると、推定誤差が大きくなることもわかる。図 7 は、(a) $x_0 = -0.1 \text{ mm}$ ，(b) $k = 577.4 \text{ N/m}$ と設定したときの、近似式(32)を用いた場合の推定誤差を示している。図 7(a)から、ばね剛性 k が大きくなると、推定誤差が大きくなることがわかる。また、図 7(b)から、スイッチング位置の原点からのずれ $|x_0|$ が大きくなると、推定誤差が大きくなることがわかる。

Fig.5 Phase portraits of the control system. The switching positions are at $x_0 = -0.2 \text{ mm}$.

Fig.6 Comparison between mass estimations according to Eq.(24) and Eq.(31). The estimation errors are reduced by considering the third-order term. They become larger as the stiffness increases.

Fig.7 Error of mass estimation according to Eq.(32). The estimation error becomes larger as (a) the stiffness increases and (b) the deflection of the switching position $|x_0|$ increases.

Fig.8 Experimental apparatus. The moving part is suspended by three air bearings to minimize the effects of friction.

4. 実 験

4.1 実験装置

実験で使用した装置の概観及び模式図を図 8 に示す．二つのボイスコイルモータ（Voice Coil Motor: VCM）の出力軸をカップリングで直結している．図に向かって左側の VCM（VCM1）はアクチュエータとして測定対象物に駆動力 $F(t)$ を与えている．また，もう一つの VCM（VCM2）は，剛性の大きさを調整したり，粘性抵抗など諸因子が測定精度に与える影響を実験的に調べる時に用いる．測定対象物を含む可動部は，摩擦の影響を最小限にするため，空気軸受によって支持している．三つの空気軸受を使用することで，可動部の運動を並進 1 自由度に拘束している．なお，本実験では，後述する変位センサの出力信号に比例した力を VCM2 で発生させることによって復元力を得ている．そして，ばね剛性の大きさは，比例ゲインによって調整した．

速度の検出には，応答の速いレーザドップラ振動計（Polytec, OFV-5000, Signal delay 24 μ s）を用いている．変位の検出には，レーザドップラ変位計（KEYENCE, LC-2400, Signal delay 100 μ s）を使用している．センサ係数は 2 V/mm である．また，周期の測定には，デジタルオシロスコープを用いた．そのときのサンプリングレートは，20 kHz である．

4.2 実験結果

まず、可動部に静的な変位を与え、そのときに作用する復元力との関係から剛性 k を求めた。

$$k = 577.4 \text{ N/m.}$$

つぎに、実際に持続振動を発生させる実験を行った。質量、駆動力及び切換え速度を

$$m = 0.5868 \text{ kg} \quad F_0 = 0.712 \text{ N}, \quad v_0 = 0.025 \text{ m/s}$$

と設定したときの測定対象物の変位の時間変化を図9に示す。図から、振動しながら、ゆるやかに正の方向にドリフトしている様子が観測できる。これらに対し、式(22)に基づいて、質量を推定した結果を図10に示す。ここでは、真値 (Actual mass) に対する誤差の値が示されている。真値としては、電気天秤 (最小分解能 1[mg]) で測定した値を用いている。図からわかるように、スイッチングを行う位置 x_0 にほとんど依らず、ほぼ一定の値となっている。この結果は、式(22)に基づく質量推定の有効性を示している。

つぎに、以下の条件で、種々の質量に対して測定実験を行った結果を図11に示す。図11(a)の結果から、推定値 m_e と真値 m_a との関係式が、以下のように得られる。

$$m_e = 0.987m_a + 0.011 \quad (37)$$

一方、推定誤差は、0.4kg 付近では約 1.5%、0.5kg 付近では約 1%となっている。このような誤差が生じる要因としては、つぎのようなことが挙げられる。

- ①パラメータ k の同定誤差
- ②パラメータ F_0 の同定誤差～直接設定できるのは、ボイルコイルの駆動電流 (パワーアンプの出力) I_0 であり、これを力に換算するときの係数 $k_f (= F_0 / I_0)$ の同定誤差に起因する。

Fig.9 Displacement of the object during measurement. A slight drift is observed. The switching positions are approximately at $x_0 = -0.1 \text{ mm}$.

Fig.10 Error of mass estimation at each period. The errors are almost constant and the dependency on the switching position is relatively small.

Fig.11 Mass measurement results. They are numerically calculated from the measured periods according to Eq.(21) and not to the approximated equation (31). The error is approximately 1.5% around 0.4 kg and 1.0% around 0.5 kg.

- ③パラメータ v_0 の同定誤差～速度検出センサのセンサ定数の同定誤差に起因する.
- ④速度検出センサの遅れ
- ⑤パワーアンプでの遅れ～ボイスコイルモータのコイルにインダクタンスがあり、コイルに印加する電圧に上限があるので、コントローラからの指令信号と実際の電流波形との間に位相遅れが生じる.
- ⑥周期 T_p 、 T_n の測定誤差

これらの中、①～③は、推定式(22)に直接現れるパラメータに係わるもので、適切な較正を行えばこれらに起因する誤差は小さくできると考えられる。一方、④～⑦は、推定式(21)には直接現れない要因であり、これらの要因について調べるには、3章で示したような解析とは異なるアプローチが必要となる。④については、平衡ばねがない場合についてではあるが、実験的な検討が行われ、さらに遅れを補正する式まで示されている(石橋他, 2017)。この結果を踏まえて、本実験でも、速度の検出には応答の速いレーザドップラ振動計を用いているので、この影響は小さいと考えられる。また、⑤についても、数学モデルを基に解析がなされ、補正式が導出されている(Mizuno et al., 2014)。以下では、⑥について、実験的な検討を行う。

5. 周期測定法の改良

5.1 周期測定デバイスの開発

4章で示した実験では、汎用のデジタルオシロスコープを用いて、周期 T_p と T_n を測定していた。この場合、周期の測定精度は、周期を読み取る時の時間軸の最小分解能 Δt に大きく依存する。4章で示した実験では、 $\Delta t = 0.05 [\text{ms}]$ であったので、力が切り換わるタイミングによっては、最大 $2\Delta t$ の誤差が生じうる。周期が一定であるならば、測定時間を長くして平均化することによって、このようなサンプリングに起因する誤差は小さくできる。しかしながら、図9に示した時間波形からもわかるように、実際にはドリフトが生じることが避けられず、これに伴って周期も変化するので、単純な平均化では測定精度は向上できない可能性がある。これらのことから、マイクロコンピュータの立ち上がり・立ち下がりエッジ検出機能を利用した、専用の周期測定デバイスの開発を行った。

使用したマイクロコンピュータは、SH-7045F (ルネサスエレクトロニクス) で、クロック周波数は $28.7 [\text{MHz}]$ である。立ち上がり・立ち下がりエッジ検出信号間のクロック数をカウントし、その値を順次出力するようにしている。

5.2 測定実験

開発したデバイスを用いて実測した周期から、式(21)に基づいた質量を推定した結果を図 12 に示す。図 12(a)の結果から、推定値 m_e と真値 m_a との間の関係式が、以下のように得られる。

$$m_e = 1.001m_a + 0.005 \quad (38)$$

式(37)と式(38)とを比較すると、開発したデバイスを用いて実測した場合の方が傾きが1に近く ($0.987 \rightarrow 1.001$)、また切片の値も半分以下になっている ($0.011 \rightarrow 0.005$) ので、線形性が向上していることが確認できる。また、図

Fig.12 Mass measurement results. The errors are reduced by improving the period measurement.

Table 1 Clock frequency of experimental conditions ($\phi = 28.4$ MHz).

Prescaler	Clock frequency [MHz]	Average error [%]	R^2
$\phi / 1$	28.70	1.092	0.99995
$\phi / 2$	14.35	1.070	0.99704
$\phi / 4$	7.715	1.260	0.99608
$\phi / 8$	3.588	1.421	0.99623
$\phi / 16$	1.794	1.536	0.99403
$\phi / 32$	0.8969	1.523	0.99323
$\phi / 64$	0.4484	1.621	0.99268

Fig.13 Measurement error and correlation coefficient in linear approximation to clock frequency. The error tends to decrease as the clock frequency increases. The coefficient of determination approaches to 1 as the clock frequency increases.

10(b)と図 11(b)とを比較すると、後者の方が推定誤差の質量依存性が小さくなっており、さらに誤差の平均的な大きさも小さくなっていることがわかる。しかしながら、質量の測定精度そのものは、周期の測定精度ほどは改善されていない。これは、周期の測定誤差以外の要因からも質量の推定誤差が生じているためであると考えられる。

つぎに、時間測定の分解能が質量測定に与える影響を調べるために、クロック周波数を変化させて、質量測定を行った。クロック周波数を高くしてマイコンを動作させることは難しいので、クロックを分周して低周波数化することによって実験を行った。測定の対象としては、図 12 に結果を示した実験と同じものを用いている。実験結果を纏めて表 1 及び図 13 に示す。測定精度の指標としては、相対誤差の絶対値の平均値を用いている。また、 R^2 は、決定係数 (coefficient of determination) と呼ばれる指標で、1 に近いほど式(38)で与えられるような近似直線の当てはまりが良いことを意味している (坂口, 2017)。これらの結果から、クロック周波数を高くし、時間測定の分解能を向上させると、質量測定の精度も向上する傾向が確認できる。

なお、クロック周波数を f_c 、立上り・立下りエッジ検出時の最大遅延サイクル数を n_e 、エッジ検出からカウンタクリアまでの最大遅延クロックサイクル数を n_p とすると、1 周期 (T_p または T_n) の測定に生じる最大の誤差 ΔT は

$$\Delta T = \frac{n_e + n_p}{f_c} \quad (39)$$

となる。ただし、 n_p の項は、遅延を補正するようなプログラムを組めば、これに起因する誤差をなくすことは可能である (本実験で用いたプログラムでは、そのような工夫はしていない)。

6. 結 言

速度フィードバック型リレー制御系に発生する持続振動の周期から質量を測定する装置において、平衡ばねの剛性を考慮した理論式に基づいて、質量測定実験を実施し、理論式の妥当性を示した。また、マイクロコンピュータを核とする周期測定デバイスを開発し、周期測定における時間分解能が質量測定に与える影響について実験的に調べた。その結果、クロック周波数を高くし、時間測定の分解能を向上させると、質量測定の精度も向上することが確認された。

本研究で得られた質量測定の精度は 1% 程度であり、理想的な精度の質量測定を実現するには、更なる改良が必要であると思われる。

文 献

- Berner, J., Åström, K. and Hägglund, T., Towards a new generation of relay autotuners, Proceedings of the 19th World Congress of IFAC (2014), pp.11288-11293.
- 藤井雄作, マイクログラビティ下における質量測定法—被測定物が剛体でない場合に関する検討—, 計測自動制御学会論文集, Vol.38, No.4 (2002), pp.337-344.
- Hang, C., Åström, K. and Wang, Q., Relay feedback auto-tuning of process controllers—A tutorial review, Journal of Process Control, Vol.12, No.1 (2002), pp.143-162.
- 石橋尚宜, 水野毅, 石野裕二, 高崎正也, 山口大介, 原正之, 渡邊怜, リレー制御を利用した質量測定における速度検出の遅れについての検討と補正式の導出, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.849 (2017), DOI: 10.1299/transjsme.16-00404.
- 前田親良, 増尾龍一, 馬場健, 無重力環境下における遠心力を利用した質量測定, 第 32 回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1993), pp.890-899.
- Mizuno, T., Adachi, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Mass measurement system using relay feedback with hysteresis, Journal of System Design and Dynamics, Vol.2, No.1 (2008), pp.188-196.
- 水野毅, 荒木献次, 動吸振器を利用した無重力環境下での質量測定, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.8 (1996), pp.1145-1151.
- Mizuno, T., Egawa, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Position-insensitive estimation of mass from limit cycle of velocity feedback relay system with spring, Measurement and Control (2021), DOI: 10.1177/00202940211021874.

- Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Analysis on first-order lag in mass measurement using a relay feedback of velocity, Proceedings of SICE Annual Conference 2014 (2014), pp.1190-1193.
- 水野毅, 箕輪淳, 運動量保存則に基づく質量測定の研究—衝撃電磁力を利用した質量測定装置—, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.12 (2000), pp.1059-1066.
- Mizuno, T., Nishizawa, K., Takasaki, M., Ishino, Y., Hara, M. and Yamaguchi, D., Realization of stable trajectory in mass measurement system using relay feedback of velocity and restoring force compensation, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.12, No.3 (2019), pp. 68-75, DOI: 10.9746/jcmsi.12.68.
- 水野毅, 佐藤伸介, 石野裕二, 非減衰形動吸振器を利用した振動式質量測定装置の開発, 日本機械学会論文集C編, Vol.68, No.665 (2002), pp.37-43.
- 水野毅, 高橋知行, リレー制御系の自励振動を利用した質量測定, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集 (II) (2000), pp.515-516.
- Mizuno, T., Takeuchi, M., Takasaki, M. and Ishino, Y., Mass measurement using a system containing an on-off relay with dead zone, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineering, Vol.41, No.1 (2005), pp.1-6.
- 小野俊郎, 島岡治夫, 無重量状態における質量動的測定, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.11 (1985), pp.1184-1190.
- Ono, T., Uozumi, H., Honda, O. and Nagata, K., Mass-measurement under weightless conditions by the frequency-controlled method, Measurement, Vol.22 (1997), pp.87-95.
- Rivetti, A., Martini, G., Birello, G., Alasia, F., Gatti, L. and Solitro, F., The measurement of inertial mass in a micro-gravity environment: theory and practice of the centrifugal method, Acta Astronautica, Vol.41 (1997), pp.301-310.
- Ruderman, M., Yamada, S. and Fujimoto, H., Backlash identification in two-mass systems by delayed relay feedback, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.141, No.6 (2019), pp.061007-1-061007-10.
- 坂口英一郎, 研究発表での r^2 の使用について思うこと, 農業食料工学会誌, Vol.75, No.5 (2017), pp.383-384, DOI: https://doi.org/10.11357/jsamfe.79.5_383
- Sarychev, V.A., Sazonov, V.V., Zlatorunsky, A.S., Khlopina, S.F., Egorov, A.D. and Somov, V.L., Device for mass measurement under zero-gravity conditions, Acta Astronautica, Vol.7 (1980), pp.719-730.
- Solberg R.F., Instrument to measure weight in space, Proceedings of the 31st International Instrumentation Symposium (1985), pp.467-476.
- Yu, C.C., Autotuning of PID controllers: relay feedback approach, Springer (1999), pp.7-23.

References

- Berner, J., Åström, K. and Hägglund, T., Towards a new generation of relay autotuners, Proceedings of the 19th World Congress of IFAC (2014), pp.11288-11293.
- Fujii, Y., Method for measuring mass of non-rigid objects under microgravity conditions, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.38, No.4 (2002), pp.337-344 (in Japanese).
- Hang, C., Åström, K. and Wang, Q., Relay feedback auto-tuning of process controllers—A tutorial review, Journal of Process Control, Vol.12, No.1 (2002), pp.143-162.
- Ishibashi, N., Mizuno, T., Ishino, Y., Takasaki, M., Yamaguchi, D., Hara, M. and Watanabe, R., Study on the delay of velocity detection and derivation of a correction formula in mass measurement using relay feedback, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 83, No. 849, pp.16-00404 (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00404.
- Maeda, C., Masuo, R. and Baba, T., Mass measurement using centrifugal force under weightless condition, Proceedings of the 32nd SICE Annual Conference (1993), pp.899-890 (in Japanese).
- Mizuno, T., Adachi, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Mass measurement system using relay feedback with hysteresis, Journal of System Design and Dynamics, Vol.2, No.1 (2008), pp.188-196.
- Mizuno, T. and Araki, K., Mass measurement using a dynamic vibration absorber under weightless condition, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.32, No.8 (1996), pp.1145-1151 (in Japanese).
- Mizuno, T., Egawa, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Position-insensitive estimation of mass from limit cycle of velocity feedback relay system with spring, Measurement and Control (2021), DOI: 10.1177/00202940211021874.
- Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Analysis on first-order lag in mass measurement using a relay feedback of velocity, Proceedings of SICE Annual Conference 2014 (2014), pp.1190-1193.
- Mizuno, T. and Minowa, J., Mass measurement based on the law of conservation of momentum (mass measurement system

- using electromagnetic impulsive force), Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.36, No.12 (2000), pp.1059-1066 (in Japanese).
- Mizuno, T., Nishizawa, K., Takasaki, M., Ishino, Y., Hara, M. and Yamaguchi, D., Realization of stable trajectory in mass measurement system using relay feedback of velocity and restoring force compensation, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.12, No.3 (2019), pp. 68-75, DOI: 10.9746/jcmsi.12.68.
- Mizuno, T., Sato, S. and Ishino, Y., Vibration-type mass measurement system with an undamped dynamic vibration absorber, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 68, No.665 (2002), pp.37-43 (in Japanese).
- Mizuno, T. and Takahashi, T., Mass measurement using the self-excited vibration of a relay control system, Proceedings of JSME Annual Conference 2000, Vol.II (2000) pp.515-516 (in Japanese).
- Mizuno, T., Takeuchi, M., Takasaki, M. and Ishino, Y., Mass measurement using a system containing an on-off relay with dead zone, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineering, Vol.41, No.1 (2005), pp.1-6.
- Ono, T. and Shimaoka, H., Dynamic mass-measurement under weightless conditions, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.21, No.11 (1985), pp.1184-1190 (in Japanese).
- Ono, T., Uozumi, H., Honda, O. and Nagata, K., Mass-measurement under weightless conditions by the frequency-controlled method, Measurement, Vol.22 (1997), pp.87-95.
- Rivetti, A., Martini, G., Birello, G., Alasia, F., Gatti, L. and Solitro, F., The measurement of inertial mass in a micro-gravity environment: theory and practice of the centrifugal method, Acta Astronautica, Vol.41 (1997), pp.301-310.
- Ruderman, M., Yamada, S. and Fujimoto, H., Backlash identification in two-mass systems by delayed relay feedback, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.141, No.6 (2019), pp.061007-1-061007-10.
- Sakaguchi, E., Thinking on the use of r^2 in research presentations (*This title is translated by Mizuno, T.*), Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers, Vol.79, No.5 (2017), pp.383-384 (in Japanese), DOI: https://doi.org/10.11357/jsamfe.79.5_383
- Sarychev, V.A., Sazonov, V.V., Zlatorunsky, A.S., Khlopina, S.F., Egorov, A.D. and Somov, V.L., Device for mass measurement under zero-gravity conditions, Acta Astronautica, Vol.7 (1980), pp.719-730.
- Solberg R.F., Instrument to measure weight in space, Proceedings of the 31st International Instrumentation Symposium (1985), pp.467-476.
- Yu, C.C., Autotuning of PID controllers: relay feedback approach, Springer (1999), pp.7-23.