異なる物理量の同時信号検出におけるセンサの動特性差違の測定と補償

——改良型二重計測法に基づくアプローチ——

孫 建新*・小 野 敏 郎*

Identification and Compensation of the Differences in Dynamics between Sensors for Simultaneous Sensing of Physical Quantities

——An Approach via Improved Double Measuring Method——

Jianxin SUN* and Toshiro ONO*

In the previous paper, the authors proposed the improved double measuring method for calibration in dynamics of linear sensors, and also presented the novel method to identify and compensate the differences in dynamics between two sensors with the aid of the improved double measuring method. From the practical point of view, however, the discussion about the novel method seems to be insufficient.

This paper is devoted to further discussions about the novel method.

Firstly, we extend the measuring method to the case where the sensors are used for simultaneous sensing of the different kinds of physical quantities. Secondly, we consider how to compensate the differences in dynamics between the sensors. Finally, with the experimental results of the dynamic mass-measurement, we demonstrate the validity and applicability of the novel method.

Key Words : improved double measuring method, dynamics of sensor, differences in dynamics, system identification, dynamic compensation

1. はじめに

著者らは、先の論文¹⁾において、改良型二重計測法による線形センサの動特性の校正方法を提案した。この方法を利用すれば、二つの線形センサ間の動特性差違がそれぞれの伝達関数の比として測定できることから、基準のセンサを用いることによって、センサの動特性の校正が可能となる。

また、このように測定された伝達関数の比を利用すれば、二つの線形センサを用いて取り扱う対象からの二つの信号を同時に測定する際の信号検出におけるセンサの動特性差違の補償が簡単に実現できることも指摘した¹⁾。すなわち、改良型二重計測法によって同時信号検出に用いる二つのセンサの伝達関数の比を測定し、この比

に着目してセンサ動特性の適切な同一化を図るという方法である。

しかし、この方法に関する先の論文での議論は、一般的な実用という観点に立てば、まだ不十分であったといえる。

たとえば、先の論文では、動特性差違の測定は同種かつ同型式のセンサに限定して議論されていた。そのために、この測定方法をそのまま異なる種類のセンサに適用することはできなかった（ここで、センサへの入力信号が異なる種類の物理量であるとき、それらのセンサを、簡単のため、「異なる種類のセンサ」と略記する。以下、同じ）。しかし、異なる種類の物理量を同時に検出する場合においても、センサの動特性差違を補償するという問題は重要である。

また、先の論文では、測定された伝達関数の比をどのように利用してセンサの動特性差違を補償するか、さらに、この動特性差違の測定とその補償方法のもつ有効性および実現性についての十分な議論と検討がなされていなかった。

* 大阪府立大学工学部 堺市学園町 1-1

* College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai

(Received December 9, 1991)

(Revised April 27, 1992)

本論文では、これらの問題点について考察と検討を行う。

本論文の構成はつぎのとおりである。第2章において、著者が先の論文で示した同時信号検出におけるセンサの動特性差違の測定と補償の方法について、その原理を簡単に説明する。第3章では、その測定方法を異なる種類のセンサに拡張するときの二つの問題点について考察を加える。そして、ある種の条件の下では、異なる種類のセンサに対しても、この測定方法を拡張して適用できることを明らかにする。第4章においては、測定された伝達関数の比をどのように利用してセンサの動特性差違を補償するかという問題に検討を加える。さらに、質量の動的測定実験結果を引用して、この同時信号検出におけるセンサの動特性差違の測定とその補償方法のもつ有効性と実現性を確認する。第5章は、まとめである。

2. センサの動特性差違の測定と補償の原理

まず、伝達関数 $m(s)$, $M(s)$ をもった同種かつ同型式の二つのセンサ m , M 間の動特性差違をそれぞれの伝達関数の比でもって測定することを考える。そこで、この測定に必要な観測信号（観測データ）を取得するために、伝達関数 $G_a(s)$, $G_b(s)$ をもった2台の測定装置 G_a , G_b を用いることにする。

Fig. 1 に、改良型二重計測法¹⁾ による動特性差違の測定過程をブロック線図で示す。

[測定1] センサ m , M に同じ入力 $x_1(t)$ を同時に与え、それぞれの観測信号 $y_1(t)$, $u_1(t)$ を記録する。□

このとき、つぎの関係が成り立つ。

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{G_a(s)m(s)}{G_b(s)M(s)} \quad (1)$$

[測定2] 測定装置 G_a , G_b の入力信号の種類に応じた物理量 $x_2(t)$ を、直接、 G_a と G_b に入力し、それぞれの観測信号 $y_2(t)$, $u_2(t)$ を記録する。□

このとき、つぎの関係が成り立つ。

[1st measurement]

[2nd measurement]

Fig. 1 Block diagram of the improved double measuring method

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{G_a(s)}{G_b(s)} \quad (2)$$

(1), (2)式から $G_a(s)$, $G_b(s)$ を消去して、

$$\frac{Y_1(s)U_2(s)}{U_1(s)Y_2(s)} = F(s) \quad (3)$$

を得る。ただし、 $F(s) = m(s)/M(s)$ である。

左辺の観測信号から計測方程式(3)を解くと、右辺のセンサの間の伝達関数の比 $F(s)$, すなわち動特性の差違がわかる。しかも、その差違を動的環境下において、測定装置の伝達関数 $G_a(s)$, $G_b(s)$ とはまったく独立に測定できることもわかる。

(3)式を解くことは、アルゴリズムの問題であり、伝達関数 $F(s)$ をもつ線形システム F の同定問題に帰着される。

したがって、基準のセンサを用いることによって、基準との差違が測定できる。すなわち、動特性の校正が可能となる。または、この測定された伝達関数の比を利用すれば、同時信号検出における二つのセンサ m , M の動特性差違の補償が簡単にできる¹⁾。

実際にはセンサに適当な測定装置を付けて、観測される信号をデータとして利用する場合が多い。たとえば、後述の適用事例の場合である。このような場合の同時信号検出における動特性差違の補償には、センサだけでなく、接続した測定装置の動特性を含めて動特性の差違を補償すべきである。このような動特性の差違の測定とその補償は、前述の改良型二重計測法による方法の一つの特別な場合と考えることができる。つまり、等価センサ $m^*(s)$, $M^*(s)$ がそれぞれ $m(s)G_a(s)$, $M(s)G_b(s)$, 等価測定装置 $G_a^*(s)$, $G_b^*(s)$ がともに1であると考えればよい。

したがって、異なる種類のセンサの動特性差違の測定に関する次章の議論も、二つのセンサ間の動特性差違を測定するという一般的な場合を想定してすすめることにする。

(注意1) 以上の取り扱いでは、動特性差違の測定と補償の原理をセンサに限定して議論しているが、この原理はセンサに限られたものではなく、アクチュエータや調整器などの動特性差違の測定と補償にも適用できる。

3. 異なる種類のセンサの動特性差違の測定

3.1 問題点の指摘

2章の測定方法をそのまま異なる種類のセンサに適用しようすると、以下のような二つの問題が起こる。ここでは、異なる種類の二つのセンサは、入力信号は異なる種類の物理量であるが、出力信号は同じ種類の物理量をもつものとする。

(指摘 1) [測定 1] という測定が実施できない。

[測定 1] では、前章で述べたように、二つのセンサ m , M の入力信号の種類に応じた物理量を表わす同一信号を m , M に入力し、それぞれの観測信号を記録する。このような二つのセンサに同一入力を与えることは、これらの二つのセンサへの入力信号は同じ種類の物理量、すなわち、これらの二つのセンサが同じ種類でなければならないことを意味している。たとえば、変位と力のセンサに同じ入力（同一の物理量）を与えることは不可能であるので、[測定 1] は実施できない。

(指摘 2) 同定対象となるシステム F (二つのセンサの伝達関数の比) の入出力信号の間に因果律が成立しない場合がある。

同種かつ同型式の二つのセンサでは、これらの伝達関数の形が同じと考えられる。したがって、同定対象となるシステムの入出力信号の間には因果律が成り立つ。しかし、同種の異なる型式、さらには異なる種類のセンサを用いるときには、そのようなことは稀であろう。このとき、たとえば、二つのセンサの動特性 $m(s)$, $M(s)$ がそれぞれ

$$m(s) = \frac{K_m}{1 + a_ms} \quad (4)$$

$$M(s) = \frac{K_M}{1 + a_Ms + b_Ms^2} \quad (5)$$

である場合を考える。ただし、 K_m , K_M , a_m , a_M , b_M ($\neq 0$) はそれぞれの伝達関数のパラメータである。この場合、同定対象となるシステム $F(F(s) = m(s)/M(s))$ の入出力信号の間には因果律が成立しない。

このような因果律が成立しない同定対象をそのまま同定すれば、真の対象の動特性が正確に得られない。

3.2 拡張

以下では、前述の測定方法を異なる種類のセンサに拡張することを試みる。

3.2.1 [測定 1] の実施

まず Fig. 1 を参照して、従来の改良型二重計測法の [測定 1] で同じ入力を与えるという行為の本質的な意味を浮き彫りにしてみよう。

[測定 1] は、つぎのような二つの意味をもっている。

一つの意味は、センサ m , M にそれぞれの入力 $x_a(t)$, $x_b(t)$ (これらは未知でよい) を与えて、それぞれの測定装置 G_a , G_b により観測信号 $y_1(t)$, $u_1(t)$ を記録することである。

このとき、つぎの二つの式が成り立つ。

$$Y_1(s) = G_a(s)m(s)X_a(s) \quad (6)$$

$$U_1(s) = G_b(s)M(s)X_b(s) \quad (7)$$

もう一つの意味は、何らかの方法で、センサ m , M に

与える入力 $x_a(t)$, $x_b(t)$ の間に既知の線形時不変モデルを介在させることである。

同じ入力を与えることは二つのセンサへの入力 $x_a(t)$, $x_b(t)$ の間につぎのようなモデルを介在させていることに相当している。

$$X_a(s)/X_b(s) = 1 \quad (8)$$

そして、(6) 式と (7) 式に (8) 式を用いて $X_a(s)$, $X_b(s)$ を削除すると、2 章で得られた

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{G_a(s)m(s)}{G_b(s)M(s)} \quad (2)$$

となる。

上述の考察からわかるように、[測定 1] でセンサ m , M に同じ入力を与えることの本質は、二つの計測方程式 (6) と (7) において、それぞれの入力信号のラプラス変換 $X_a(s)$, $X_b(s)$ の間に既知の線形時不変モデル (8) 式を拘束方程式として導入することである。そして、この導入した拘束方程式を利用することによって、(6), (7) 式の未知である $X_a(s)$, $X_b(s)$ を消去し、 $G_a(s)m(s)/G_b(s)M(s)$ を観測信号のラプラス変換 $Y_1(s)$, $U_1(s)$ と既知の線形時不変モデル ($X_a(s)/X_b(s) = 1$) を用いて表わすことにほかならない。

[測定 1] のこの本質から考えると、異なる種類の二つのセンサにおいても、これらのセンサに固有の入力信号である物理量間に、もし既知の線形時不変モデル (厳密に言えば、安定かつ不確定性要素を含まない既知の線形時不変モデル) を介在させることができれば、そのモデルを拘束条件として用いることによって、[測定 1] が実施できることになる。

たとえば、変位センサと力センサの場合を考える。ここでは、変位センサを m 、力センサを M 、2 台の測定装置をそれぞれ G_a , G_b とする。

よく知られているように、線形弾性ばねの両端の相対変位 $x(t)$ と力 $f(t)$ の間には、つぎのような既知の線形時不変モデルが成立する。

$$F(s)/X(s) = k \quad (9)$$

ただし、 $X(s)$, $F(s)$ はそれぞれの相対変位 $x(t)$ および力 $f(t)$ のラプラス変換、 k はばね定数である。

したがって、[測定 1] を Fig. 2 のブロック線図のような形式で実施すればよいことになる。

[測定 1] ばね定数 k が既知である一つの線形弾性ばねを用意する。ばねの一端を固定し、他端を自由とする。自由端に変位 $x_1(t)$ を与え、変位センサ m および測定装置 G_a により観測信号 $y_1(t)$ を記録する。ばねの固定端に力センサ M および測定装置 G_b を付け、力 $f(t)$ の観測信号 $u_1(t)$ を記録する。 □

このとき、つぎの二つの関係が成り立つ。

Fig. 2 Block diagram for displ. sensor and force sensor

$$Y_1(s) = G_a(s)m(s)X_1(s) \quad (10)$$

$$U_1(s) = G_b(s)M(s)F_1(s) \quad (11)$$

(10), (11)式および導入されたモデル関係(9)式を用いて, $X_1(s)$, $F_1(s)$ を消去すると,

$$\frac{Y_1(s)k}{U_1(s)} = \frac{G_a(s)m(s)}{G_b(s)M(s)} \quad (12)$$

を得る.

[測定2] 従来の改良型二重計測法の測定と同じである. $\square$

(12), (2)式から $G_a(s)$, $G_b(s)$ を消去して,

$$\frac{Y_1(s)U_2(s)k}{U_1(s)Y_2(s)} = \frac{m(s)}{M(s)} \quad (13)$$

となる.

ここで

$$U(s) = \mathcal{L}[u(t)] = U_1(s)Y_2(s) \quad (14)$$

$$Y(s) = \mathcal{L}[y(t)] = kY_1(s)U_2(s) \quad (15)$$

と置く.

(13)式に(14), (15)式を代入して,

$$Y(s) = F(s)U(s) \quad (16)$$

を得る. ただし, $F(s) = m(s)/M(s)$ である.

したがって, 変位センサと力センサの動特性差違 $F(s)$ を測定するという問題は, 最終的には, ばね定数 k と四つの観測信号 $u_1(t)$, $y_1(t)$, $u_2(t)$, $y_2(t)$ から(14), (15)式を用いて計算された $u(t)$, $y(t)$ を, それぞれ入力, 出力とみなした線形システムの同定問題に帰着される. (14), (15)式のコンボリューションは, 実用面において, ある程度の高周波雑音を自動的に除去するという重要な役割を演じる²⁾.

3.2.2 入出力信号の因果関係

二つのセンサの動特性差違の測定処理に離散時間系のシステム同定アルゴリズム^{3),4)}が用いられていたことに対応させて, ここでは離散時間系を用いて説明する.

連続時間系での表現(16)式に対応する離散時間系での表現は, 次式となる.

$$y(j) = F(z)u(j) \quad (17)$$

ただし, $F(z) = m(z)/M(z)$ であり, $u(j)$, $y(j)$ は, (16)式の入出力信号の j サンプル時点でのサンプル値, $m(z)$, $M(z)$ は二つのセンサのパルス伝達関数である.

さて, $F(z)$ の入出力信号が(4), (5)式で示すように

因果律を満たさない場合には, 以下に述べるいずれかの方法を採用すればよいと考えられる. その一つは, (17)式において, $y(j-L)$ ($L=1, 2, \dots$)を出力とみなして, $z^{-L}F(z)$ を同定するという考え方である. ここに, L は整数で, L の値としては因果関係が成り立つときの最小値に設定する. つまり, コンボリューションの計算を行ったのちの信号 $y(j)$ を L サンプル遅らせて因果関係をもたせるというものである.

ほかは, 入出力関係を逆にして入力 $y(j)$, 出力 $u(j)$ として, 入出力信号の因果関係を満足させるという考え方である. もちろん, この場合に同定されるのは $F^{-1}(z)$ である.

いずれにしても, $F(z)$ を求めることは可能である. 同定された $F(z)$ をどのように利用するかについては, 次章で述べる.

4. 補償方法と適用事例

4.1 補償方法

ここでは, 測定された二つのセンサの動特性差違が離散時間系において表わされることを考えて, 以下の補償方法に関する議論も離散時間系において取り扱う. すなわち, 二つのセンサ m , M の動特性をパルス伝達関数 $m(z)$, $M(z)$, 測定された動特性差違 ($m(z)/M(z)$)を $F(z)$ と表わすことにしよう.

測定された伝達関数の比をどのように利用して同時信号検出におけるセンサの動特性差違を補償するかという問題は, 適用の場合や測定された伝達関数の比のもつ性質などによって異なる. したがって, この問題についてより具体的な議論は困難である. そこで, 最も基本的な立場から議論をすすめる. すなわち, センサの補償要素の設計に関して, 最も基本的な性質であるプロパ性 (ここでのプロパとは広義の意味と解釈し, 分母, 分子とも同次数まで認めるものとする) および安定性の性質のみを考えることにする. このとき, 補償方法としては, つぎの三つの方式が原理的に可能である.

(方式1) 測定された $F(z)$ がプロパであり, 安定な性質をもっている場合には, $F(z)$ に等しい補償要素を設計し, センサ M に補償する.

(方式2) 測定された $F^{-1}(z)$ がプロパであり, 安定な性質をもっている場合には, $F^{-1}(z)$ に等しい補償要素により, センサ m に補償する.

(方式3) 測定された $F(z)$ を

$$F(z) = F_m(z)/F_M(z) \quad (18)$$

というように, プロパかつ安定な二つの有理パルス伝達関数 $F_m(z)$, $F_M(z)$ の比に分解する. たとえば, 同定された $F(z)$ を $F(z) = B(z)/A(z)$ とする場合に, $\deg C(z)$

$\geq \max \{ \deg A(z), \deg B(z) \}$ をみたす適当なフルビッツ多項式 $C(z)$ を用いれば, $B(z)/C(z)$, $A(z)/C(z)$ をプロバかつ安定な有理パルス伝達関数とすることができる. ただし, $\deg(\cdot)$ は多項式の次数を表わしている. $F_m(z)$, $F_M(z)$ としては, それぞれの既約形を用いればよい. そして, $F_m(z)$, $F_M(z)$ に等しい補償要素を実現して, センサ M , m をそれぞれ補償する.

ここで, (方式 1) と (方式 2) とは (方式 3) の特殊な場合であることが容易にわかる.

結局, 以上の補償方式によれば, 同時信号検出におけるセンサの動特性を補償後には同一とさせることができる.

実際の信号検出においては, 雑音の存在を無視できない場合がある. このような場合の補償要素の設計には雑音低減のための配慮も必要である⁹⁾.

補償要素を具体的に実現するには, (1) アナログ信号の段階で処理するか, (2) デジタル信号の段階でするか, 大きく二つの方法に分けられる. どちらを選ぶかについては, 適用事例ごとにその都度決定すべき問題である^{6)~8)}.

4.2 適用事例

Fig. 3 に示すような質量—ばね振動機構 (ばね式はかり) のモデルを考える. 図より, ばね式はかりの運動方程式は, つぎのように表現できる.

$$(m+M)\ddot{x} + kx = 0 \quad (19)$$

ただし, M は被測定物の質量, m は品物台の質量, k はばね定数, $\ddot{x}$ は品物台および被測定物の加速度, x は平衡位置からの品物台の変位である.

被測定物を装着した品物台に初期変位を与えて振動させ, $\ddot{x}$ と x を検出することによって被測定物の質量 M を動的に推定することを考える. ただし, m と k の値を既知としておく.

このとき, $\ddot{x}$ および x を検出するためのセンサ (厳密に言えば, 2 章で指摘した等価センサ) の動特性差違が重要な問題となる. そこで, その動特性差違によって生じる影響を除去し, より正確に質量を推定するためには, 同時信号検出におけるセンサの動特性差違を測定して, 補償を行うという方法がとられる.

Fig. 3 Model of the spring scale

著者の一人は, すでに, 無重量状態での質量測定方法の展開にあたって, このような立場からセンサの動特性差違の測定と補償を行い, その結果を報告した⁹⁾. その報告で取り扱った事例は, 2 章で指摘したような特別な場合に相当している. したがって, 等価測定装置の伝達関数比も 1 となるので, [測定 2] は省略できることを注意しておこう.

Fig. 4 に, (19) 式の定義にしたがった m , k および M を, それぞれ 1.640 kg, 9950 N/m および 1 kg とする場合における変位と加速度の検出信号の一例を示す. ただし, 検出信号のサンプリング周期を 0.5 ms である. それぞれの検出信号は, AD コンバータのフルスケールで正規化した数値で示されている. Fig. 4 に示した検出信号を処理して得た質量推定値の誤差の時間的挙動を Fig. 5 に示す.

Fig. 5(b) の場合, センサの動特性差違を無視したた

(a) Displacement of the goods-plate

(b) Acceleration of the goods-plate

Fig. 4 Observed signals in the experiment⁹⁾

(a) In the case where the differences of sensor dynamics are compensated

(b) In the case where the differences of sensor dynamics are ignored

Fig. 5 Time behavior of the estimated value in the experiment⁹⁾

めに、推定誤差には周期的な変動が生じている。これは特に位相特性の影響によるものと考えられる。Fig. 5(a)の場合に示すように、ディジタル・フィルタによってセンサの動特性差違を補償すれば、この変動はほぼ完全に除去できる⁹⁾。

以上の結果は、同時信号検出におけるセンサの動特性差違の測定と補償の方法の有効性と実現性を示す一つの事例であると考えることができる。

(注意2) このような測定と補償の方法の適用は、センサを二つ用いた同時信号検出に限られたものではない。多数のセンサを用いる場合の同時信号検出においては、一つのセンサによる信号検出過程のダイナミックスを基準にして考えればよい。

5. ま と め

本論文では、改良型二重計測法を用いることによって、同時信号検出における二つのセンサの動特性差違の測定とその補償方法¹⁾について、詳細な考察と検討を行った。その内容をまとめると、つぎのようになる。

1) センサの動特性差違の測定方法¹⁾を異なる種類のセンサに拡張するときの問題点を検討した。その結果、異なる種類のセンサに対しても、これらのセンサに固有の入力信号である物理量間に、既知の線形時不変モデルを介在させることができれば、これらの動特性差違が測定できることを明らかにした。

2) 測定された二つのセンサの伝達関数の比を利用して、センサの動特性差違を補償する方法は、測定された伝達関数の比のもつ性質により、原理的には三つの方式が可能であることを指摘した。

3) 質量の動的測定実験結果を例示して、本論文で議論したセンサの動特性差違の測定と補償方法のもつ有効性および実現性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 小野, ほか: 改良型二重計測法の提案, 計測自動制御学会論文集, 27-2, 224/226 (1991)
- 2) R. N. Bracewell: The Fourier Transform and Its Applications, McGraw-Hill (1965)
- 3) 相良, ほか: システム同定, 計測自動制御学会 (1981)
- 4) 中溝高好: 信号解析とシステム同定, コロナ社 (1988)
- 5) 平山, ほか: 雑音処理, 計測自動制御学会 (1988)
- 6) Nathan H. Cook and Ernest Rabinowicz: Physical Measurement and Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1963)
- 7) Ernest O. Doebelin: Measurement System: Application and Design, McGraw-Hill (1966)
- 8) 山本, 玉木: 実験・計測技術の基礎, 学研 (1986)
- 9) 小野, 島岡: 無重量状態における質量動的測定—地球上での基礎実験—, 計測自動制御学会論文集, 22-6, 677/684 (1986)

[著 者 紹 介]

孫 建 新 (学生会員)

1991年, 大阪府立大学大学院機械工学専攻博士前期課程修了。現在同専攻博士後期課程在学中。質量動的測定, システム同定などの研究に従事, システム制御情報学会の会員。

小 野 敏 郎 (正会員)

1965年, 京都大学大学院航空工学専攻博士課程修了。京都大学工学部数理工学科助手, 講師を経て, 68年大阪府立大学工学部機械工学科助教授, 83年同学科教授, 現在に至る。質量動的測定システム, 宇宙はかり, マニピュレータなどへの制御理論の応用研究に従事 (工学博士)。