同次元オブザーバの調整と空圧式除振装置の制御*

涌井 伸二** 堀田 大吾***

Parameter Tuning and Control for an Air Type Anti-Vibration Apparatus Using Identity Observer

Shinji WAKUI, Daigo HOTTA

In the field of semiconductor exposure machines, air-type active anti-vibration apparatuses are widely used. This apparatus equips an actively controlled air spring which has a pair of anti-resonance and resonance on frequency response. Due to this characteristic, it is known that deformation of main body supported the air springs occurs because of the difference of pressure in each air spring. In order to restrain the deformation of main body and to control their generated forces, the pressure feedback was especially implemented as a minor loop for the main position and acceleration loops. However, it is gradually undesirable to install pressure sensors in the field of industrial application because it takes cost and the sensors have low resolution for the management of the generated force. Then, this paper proposes an identity observer that estimates inner pressure of the air spring and shows that the estimated pressure signal can be used as a feedback one. Firstly, a tunable block diagram, which is equivalently transformed from the formal identity observer, is shown. Next, tuning results based on both frequency and time responses are shown and then feedback results using the estimated acceleration and pressure signals are successfully shown.

Key words: identity observer, pneumatic equipment, air spring, vibration isolation, vibration control

1. 緒 言

精密位置決め・計測分野では、高精度化により振動許容条件が厳しくなっている。そのため、床振動やその他の外乱振動を精密機器などに伝えないように、空圧式除振装置が用いられる。同装置には、除振台の位置を制御する位置フィードバック（以降、フィードバックをFBと略記）と外乱振動を抑える加速度FBが標準的に備えられる。さらに、空気ばねの駆動力管理、圧力特性の改善、そして除振率向上のために、圧力FB付き空圧式除振装置が生産装置として稼動している¹⁾。したがって、必然的にコスト高となる欠点がある。コスト低減のため、ここでは加速度センサおよび圧力センサ代替のための同次元オブザーバを構築する。この設計理論そのものは周知であり、圧力推定信号を実機に適用した研究例は多い^{2)~5)}。しかし、不可避な同定誤差を持つパラメータを同次元オブザーバに設定した後のパラメータ調整方法やFB適用時の留意点は必ずしも明確とは言い難い。

そこで、本論文では、まず同定結果の数値に関して、信頼のおけるパラメータと、そうでないものとにわけた調整容易なブロック構造を提案する。次に、これを使って実験的に見出した同次元オブザーバの調整手順を示す。最後に、実センサに代えて、同次元オブザーバからの加速度および圧力信号を使ったFBが施せることを示す。このとき、加速度については実際のセンサ出力と一致するFBが容易に施せる。一方、内部の状態量である内圧推定については、圧力に関する周波数応答において、ゲイン曲線で1dB以内、位相曲線で5deg以内の微調整が必要であり、さらに同次元オブザーバの修正ゲインに飽和および非線形関数を導入することによって、はじめて実用的なFBセンサとして代替可能であることを示す。

2. 同次元オブザーバの設計と調整

2.1 設計

図1の破線内が制御対象の空圧式除振装置（付録1参照）である。ここで、 $G_q[m^3/s \cdot V]$ は流量ゲイン、 $V_0[m^3]$ は空気ばねの体積、 $\beta_0[1/(N/m^2)]$ は圧縮率、 $c[(m^3/s)/(N/m^2)]$ は流量コンダクタンス、 $A_0[m^2]$ は受圧面積、 $M[kg]$ は除振台の質量、 $D[N \cdot s/m]$ は粘性比例係数、そして $K[N/m]$ はばね定数を示す。さらに、 $w[V]$ ：供給空気量を増減するサーボバルブの操作量、 $p[Pa]$ ：空気ばねの内圧、 $x[m]$ ：除振台の変位、 $x_0[m]$ ：床振動の変位、である。下付き添字 n は、公称値を意味する。

ここで、推定状態量に「 $\hat{\cdot}$ 」を付けた同次元オブザーバを含めた拡大系の状態方程式は、文献6)に基づき式(1)となる。なお、図1では、 f_{12} の出力に対する加算点を容易に導くために、下付き添字 1, 2 を用いて $\hat{x}_1$ と $\hat{x}_2$ を区別した。本節以降では、除振台の変位 x に対して、同次元オブザーバが推定する除振台の変位

Fig.1 Designed identity observer

* 原稿受付 平成 27 年 3 月 11 日

掲載決定 平成 27 年 6 月 29 日

** 正 会 員 東京農工大学（東京都小金井市中町 2-24-16）

*** （元）東京農工大学（東京都小金井市中町 2-24-16）

を $\hat{x}$ と記載した方が容易な理解を得る。そのため、 $\hat{x}_2$ を $\hat{x}$ と記載する。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 - \ddot{x}_0 \\ \dot{x}_2 - \ddot{x}_0 \\ \dot{p} \\ \dot{\hat{x}}_1 - \ddot{x}_0 \\ \dot{\hat{x}}_2 - \ddot{x}_0 \\ \dot{\hat{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{K}{M} & \frac{A_0}{M} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\beta_0 V_0} & 0 & -\frac{c}{\beta_0 V_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{11} & 0 & -\frac{D_n}{M_n} & -\frac{K_n}{M_n} - f_{11} & \frac{A_{0n}}{M_n} \\ 0 & f_{12} & 0 & 1 & -f_{12} & 0 \\ 0 & f_{13} & 0 & -\frac{A_{0n}}{\beta_{0n} V_{0n}} & -f_{13} & -\frac{c_n}{\beta_{0n} V_{0n}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 - \dot{x}_0 \\ x_2 - \dot{x}_0 \\ p \\ \hat{x}_1 - \dot{x}_0 \\ \hat{x}_2 - \dot{x}_0 \\ \hat{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_q}{\beta_0 V_0} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{G_{qn}}{\beta_{0n} V_{0n}} \end{bmatrix} w \quad (1)$$

ここで、オブザーバの極を P_1, P_2, P_3 と指定のとき、修正ゲインは、 f_{12}, f_{11}, f_{13} の順番で次式のように求められる。

$$f_{12} = -(P_1 + P_2 + P_3) - \frac{D_n}{M_n} - \frac{c_n}{\beta_{0n} V_{0n}} \quad (2)$$

$$f_{11} = -\left(\frac{D_n \beta_{0n} V_{0n} + c_n M_n}{M_n \beta_{0n} V_{0n}} \right) f_{12} - \frac{A_{0n}^2 + K_n \beta_{0n} V_{0n} + D_n c_n}{M_n \beta_{0n} V_{0n}} + P_1 P_2 + P_2 P_3 + P_3 P_1 \quad (3)$$

$$f_{13} = -\frac{M_n}{A_{0n}} P_1 P_2 P_3 - \frac{c_n K_n}{\beta_{0n} V_{0n} A_{0n}} - \frac{c_n M_n}{\beta_{0n} V_{0n} A_{0n}} f_{11} - \frac{A_{0n}^2 + c_n D_n}{\beta_{0n} V_{0n} A_{0n}} f_{12} \quad (4)$$

さて、同次元オブザーバの実現にあたっては、制御対象の複

製を構築する必要がある。つまり、図1下側で下付き添字 n を付けた物理量を、制御対象のそれに一致させる調整を要する。もちろん、真値がセットできれば調整不要である。しかし、一般には、同定値をセットしてからの調整は不可避である。この場合、 $G_{qn}, c_n, \beta_{0n}, V_{0n}, A_{0n}, M_n, D_n, K_n$ の計8個のパラメータを個別調整することは困難である。

そこで、調整パラメータを集約して、図1から図2の等価変換を施す。このとき、図2に記載の調整パラメータ $G_1 \sim G_6, F_{11}, F_{12}, F_{13}$ は、以下の関係式で結ばれる。そして、新たな記号 k_{pos} は位置センサの検出感度[V/m]である。仕様書の数値を使って、 k_{pos} の公称値 $k_{pos(n)}$ は正確に設定される。同様に、圧力センサの検出感度は k_{pres} [V/Pa]であり、式(7)の $k_{pres(n)}$ も正確に設定可能である。

$$G_1 = \frac{G_{qn} A_{0n}}{c_n M_n} \quad (5)$$

$$G_2 = \frac{A_{0n}^2}{c_n M_n} \quad (6)$$

$$G_3 = \frac{k_{pres(n)} M_n}{A_{0n}} \quad (7)$$

$$G_4 = 4\pi \zeta f_n \quad (8)$$

$$G_5 = (2\pi f_n)^2 \quad (9)$$

$$G_6 = \frac{1}{9.8} \cdot k_{acc} \cdot 10 \quad (10)$$

$$F_{11} = f_{11} \quad (11)$$

$$F_{12} = f_{12} \quad (12)$$

$$F_{13} = \frac{\beta_{0n} V_{0n} A_{0n} f_{13}}{c_n M_n} \quad (13)$$

ここで、式(5)~(13)のパラメータ集約は、ブロック線図の等価変換に基づくが、信号検出感度として唯一に定められる G_3 と G_6 を除外して、同次元オブザーバのダイナミクスの容易な調整を実現している。具体的に、除振台の性能を言い表すとき、例えば「固有振動数 $f_n = 2$ Hz の除振台」と言う。 M, D, K の個別の数値で除振台の性質は表現されない。表現せずとも、外力印加に対する除振台の位置の減衰波形から $f_n (= (K_n/M_n)^{1/2}/2\pi)$ の値は確度よく同定でき、同時にダンピング係数 $\zeta (= D_n/2(M_n K_n)^{1/2})$ の値も容易に取得できる。したがって、図2を参照して、実測結果に基づいてゲイン G_4 と G_5 をセットしたとき、これらの調整はほぼ不要になる。一方、文献7)では、周波数応答に基づいて G_q, c の数値を同定したが信頼性がない。そのため、同次元オブザーバ構築にあたって調整せねばならない。さらに、大型除振台の場合、基本物理量であり計測容易と思われる M でさえ、実は正確な値は把握できないからである。そのため、例えば「約10tの除振台」という大雑把な言い方しかできない。そこで、曖昧なパラメータをゲイン G_1, G_2 に集約して、一括調整できるようにした。

2.2 調整

調整では、まず制御対象と同一のモデルを構築し、次に修正ゲ

Fig.2 Modified identity observer for implementation

Fig.3 Introduction of switching

Fig.4 Effects of tuning gains G_1 and G_2

インをセットする順序となる。つまり、図2を参照して、修正ゲイン F_{11} , F_{12} , F_{13} をともに零とし、 G_1 , G_2 を調整して制御対象とほぼ同一のモデルの構築を確認する。次に、 F_{11} , F_{12} , F_{13} に式(11)~(13)の計算に基づいて公称値をセットし、続いて周波数応答、あるいは時間応答に基づき調整することになる。

まず、図2のように、ゲイン k_p [V/V]、時定数 T_{pos} [s] の位置のPI補償を施す。そして、目標値 r [V] にステップ信号 5 V を入力した。このときの除振台の位置 $k_{pos}(x-x_0)$ と推定位置 $k_{pos(n)}(\hat{x}-\hat{x}_0)$ (ここでは、 $\hat{x}_0 = 0$ と設定) を比較した。図3に結果を示す。除振台の位置は+5 V (平衡浮上位置から上方+750 μ m) に収束せねばならない。この段階では、パラメータ同定値を公称値とみなして、これを同一次元オブザーバに設定しただけなので、過渡現象を含む最終値までの一致は期待できない。しかし、図中の without SW で指し示す負方向のシフトを許容したままでは、調整を進めていけない。ステップ信号の印加は、着座状態の除振台を平衡位置に定位させてから後になるが、このとき、同一次元オブザーバのダイナミクスの中に大きな時定数 $T_{air(n)}$ の1次遅れ系が、すなわち擬積分分器があり、この出力が逆振れの原因と考えられた。つまり、着座から平衡位置へ浮上までの過渡現象波形が擬積分分器に入力されるため負方向のシフトが生じる。この現象を回避するため、図2のようにスイッチ SW を設け、浮上時には Off の状態で立ち上げ、平衡位置に到達したとき SW を On でオブザーバを投入した。このとき、図3の with SW の波形のように、 $k_{pos}(x-x_0)$ と $k_{pos(n)}\hat{x}$ の定常値は一致しないが、負方向へのシフトはなくなる。

次に、図3の $k_{pos(n)}\hat{x}$ の定常値を $k_{pos}(x-x_0)$ のそれと一致するように、 G_1 と G_2 を調整する。調整効果を図4の左側と中央に示す。この結果を踏まえ、まず G_2 を使って過渡応答の波形を整形する。具体的に、図4中央に示す推定位置信号の場合、立ち上がり部分が先鋭的であるが、これが生じないよう G_2 を大きくセットする。次に、 $k_{pos(n)}\hat{x}$ の定常値を $k_{pos}(x-x_0)$ と同じになるように G_1 を使ってシフトさせた。最終的に、 F_{11} , F_{12} , F_{13} 未投入にあつて、図4右側のように $k_{pos(n)}\hat{x}$ を $k_{pos}(x-x_0)$ にほぼ一致させられる。

図4右側の波形を得た G_1 と G_2 の設定によって、制御対象の複製がほぼ構築できたと言える。そこで、式(11)~(13)に基づく F_{11} , F_{12} , F_{13} を投入する。そして、圧力に関する周波数応答 $k_{pres}p/w$ と対比しながら、同一次元オブザーバ内のパラメータに微調整をかける。そのために、同一次元オブザーバの圧力に関する周波数応

答 $G_3\hat{p}/w_{ob}$ に及ぼすパラメータ調整の影響を捉える。この応答を採用する理由は、ゲイン曲線にはノッチ・ピークの対が生じ、この対の箇所では位相進みという空圧式除振装置に特有のダイナミクスを表現するからである。以下、制御対象の複製構築に影響を及ぼす G_1 , G_2 , G_4 , G_5 , $T_{air(n)}$ の調整効果をシミュレーションと実測結果で示す。なお、付録2の数値を用いた前者の周波数範囲は0.1~100 Hzで、実測のそれは1~100 Hzである。後者が0.1 Hzからでない理由は、正弦波掃引を原理とする周波数応答分析装置を使用のため、低周波掃引に計測時間がかかり過ぎるためである。

まず、図5は G_1 の調整効果を示す周波数応答であり、高周波ゲインと反共振特性に影響を及ぼす。図6は G_2 の調整効果であり、ゲイン曲線を参照すると反共振特性に影響する。図7は G_4 の調整効果を示す周波数応答であり、反共振特性に影響する。図8は G_5 の調整が低周波ゲインと反共振特性に影響することを示す。最後に、図9に $T_{air(n)}$ の調整効果を示す。ノッチ・ピークを対とするゲイン曲線全体が上下する。なお、 F_{11} , F_{12} , F_{13} の調整による周波数応答は省略する。理由は、制御対象の複製が構築されたとき、図2を参照して F_{11} , F_{12} , F_{13} への入力信号は零となるため、これらの変更でゲイン・位相曲線に変化はないからである。

図5~9を踏まえ、以下(1)~(4)の調整順序を見出した。

- (1) 圧力に関する周波数応答 $k_{pres}p/w$ は、ノッチ・ピークを対とする特徴的なゲイン曲線となる。そこで、 $T_{air(n)}$ を微調整して、同一次元オブザーバにおける圧力に関する周波数応答 $G_3\hat{p}/w_{ob}$ のゲインピークを、比較の基準である $k_{pres}p/w$ のそれに合わせる。
- (2) 次に、ゲインピークの一一致状態を変えない G_5 のわずかな調整により、低周波域のゲイン $G_3\hat{p}/w_{ob}$ を基準の $k_{pres}p/w$ に一致するように合わせ込む。
- (3) さらに、ゲインピークと低周波域のゲインの一一致を崩さない

Fig.5 Frequency responses for tuning G_1

Fig.6 Frequency responses for tuning G_2

 Fig.7 Frequency responses for tuning $G_4 (=4\pi\zeta f_n)$

 Fig.8 Frequency responses for tuning $G_5 (=2\pi\zeta f_n)^2$

 Fig.9 Frequency responses for tuning $T_{air(n)}$

G_1 により、高周波域のゲイン曲線 $G_3\hat{p}/w_{ob}$ を基準の $k_{pres}p/w$ に一致するように調整する。

(4)上記(1)~(3)の調整により、ノッチの深さを除外したゲイン特性の合わせ込みができる。最後の調整は、 G_2 を使って、 $G_3\hat{p}/w_{ob}$ のノッチの深さを基準の $k_{pres}p/w$ に合わせ込む。

2.3 調整結果

2.2 節で既述した調整順序(1)~(4)に基づき、圧力に関する周波数応答 $k_{pres}p/w$ と一致するように $G_3\hat{p}/w_{ob}$ のそれを合わせ込んだ。しかし、両周波数応答の一致にもかかわらず圧力の時間応答にはずれが発生する。そのため、時間応答が一致するように調整した結果も示す。両調整によらず、位置の応答である $k_{pos}(x-x_0)$ と $k_{pos(n)}\hat{x}$ はほとんど一致する。加速度信号についても同様である。

まず、図10は平衡位置からステップ状の目標値 $r=5$ V 印加時の $k_{pos}(x-x_0)$ (青色) と $k_{pos(n)}\hat{x}$ (赤色) の波形であり、完全に一致する。この状態は、図2を参照して、制御対象とモデルとの差分

である誤差信号 e をとる伝達関数 $(\hat{x}-x)/w$ から理解できる。これは、正確に $k_{pos(n)}=k_{pos}$ とできることに注意して、[同一次元オブザーバ: $n_{ob}(s)/d_{ob}(s)] \times [\text{制御対象: } x/w]$ の式構造となる。具体的には、次式である。

$$\frac{\hat{x}-x}{w} = \frac{n_{ob}(s)}{d_{ob}(s)}$$

$$\frac{A_0 G_q}{\beta_0 V_0 M s^3 + (cM + \beta_0 V_0 D) s^2 + (A_0^2 + cD + \beta_0 V_0 K) s + cK} \quad (14)$$

ここで、

$$n_{ob}(s) = \left(\frac{\beta_0 V_0 M G_1}{A_0 G_q} - T_{air(n)} \right) s^3 + \left\{ \frac{(cM + \beta_0 V_0 D) G_1}{A_0 G_q} - (1 + G_4 T_{air(n)}) \right\} s^2 + \left\{ \frac{(A_0^2 + cD + \beta_0 V_0 K) G_1}{A_0 G_q} - (G_2 + G_4 + G_5 T_{air(n)}) \right\} s + \left(\frac{cK G_1}{A_0 G_q} - G_5 \right) \quad (15)$$

$$d_{ob}(s) = T_{air(n)} s^3 + \{1 + (G_4 + k_{pos(n)} F_{12}) T_{air(n)}\} s^2 + \{G_2 + G_4 + T_{air(n)} G_5 + k_{pos(n)} T_{air(n)} F_{11} + (1 + T_{air(n)} G_4) k_{pos(n)} F_{12}\} s + \{G_5 + k_{pos(n)} F_{11} + (G_2 + G_4) k_{pos(n)} F_{12} + k_{pos(n)} F_{13}\} \quad (16)$$

式(15)の $n_{ob}(s)$ を参照すると、 s の各係数が零となるように制御対象のモデル構築のとき、 $\hat{x}$ は過渡現象を含めて x のそれに一致する。つまり、図10は、制御対象の複製構築の事実を示す。

しかし、 $k_{pos}(x-x_0)$ と $k_{pos(n)}\hat{x}$ の両者の一致にもかかわらず、圧力信号 $k_{pres}p$ と $G_3\hat{p}$ の一致を図ることは容易ではない。具体的に、図11は目標値 r にステップ信号を印加したときの圧力信号 $k_{pres}p$ と $G_3\hat{p}$ の時間応答である。図中の param.1 (付録3参照) は周波数応答 $G_3\hat{p}/w_{ob}$ が $k_{pres}p/w$ に合うように、param.2 (付録3参照) はさらに図11の時間応答を観察して、 $G_3\hat{p}$ が $k_{pres}p$ に一致するように調整したときである。param.2 を採用のとき、図11に示すように過渡と定常状態の両方で時間応答は圧力センサのそれと一致する。param.1 と 2 による時間応答に関する差異は大きい、 $k_{pres}p/w$ と $G_3\hat{p}/w$ の周波数応答の差は図12のようにわずかである。これら周波数応答はノッチとピークを対とする特徴的形状であり、両パラメータの使用による差異はほとんどない。差異は破線で囲む低周波域にあり、param.2の方が低域ゲインをわずかに上げ、位相曲線をみると圧力センサの特性にわずかに接近させている。具体的に、前者は1 dB 以内、後者は5 deg 以内である。

2.4 圧力信号不一致の原因と極指定

$k_{pos}(x-x_0)$ と $k_{pos(n)}\hat{x}$ の一致にもかかわらず、圧力信号 $k_{pres}p$ と

Fig.10 Step response about position signals

Fig.11 Pressure time responses using parameters 1 and 2

Fig.12 Frequency responses for Fig.11

Fig.13 Initial value responses

$G_3 \hat{p}$ の一致を図ることが容易ではない理由を考察する。

まず、図 2 のブロック構造にはない $(\hat{p} - p)/w$ の伝達関数を、式(14)と同様に[オブザーバ]×[制御対象: p/w]の形に整理すると次式である。ここで、 $n_{obp}(s)$ は 5 次の、 $d_{obp}(s)$ は 3 次の多項式である。

$$\frac{\hat{p} - p}{w} = \frac{n_{obp}(s)}{d_{obp}(s)G_q(Ms^2 + Ds + K)} \quad (17)$$

定常偏差に関係する $n_{obp}(s)$ の s^0 項の係数を整理すると、

$$(cKG_1G_3 - k_{pres}G_qK)\{G_5 + k_{pos(n)}(F_{11} + G_4F_{12})\} + (A_0G_3G_5k_{pos} - k_{pres}Kk_{pos(n)})G_q(G_2F_{12} + F_{13})$$

である。上記で、 $(cKG_1G_3 - k_{pres}G_qK)$ と $(A_0G_3G_5k_{pos} - k_{pres}Kk_{pos(n)})$ の両項の零は、式(15)の s^3 および s^0 項の零に対応している。つまり、同一次元オブザーバのダイナミクスを調整して制御対象の複製を構築したとき、 $n_{obp}(s)$ の s^0 項の係数も零となるため、 $k_{pres}p$ と $G_3 \hat{p}$ の両最終値はたがい一致してもちろん定常偏差は発生しない。しかし、パラメータ誤差に起因した両項の零が不完全な場合、両項には F_{11} , F_{12} , F_{13} が乗算されている式構造のため a_0 は非零となる。そして、オブザーバの極指定を左半平面奥に設定するほど F_{11} ,

F_{12} , F_{13} の値は大きくなるので、パラメータ誤差は拡大されることになる。したがって $G_3 \hat{p}$ と $k_{pres}p$ の定常値には差異が発生する。 $n_{obp}(s)$ の s^1 項以上も同様の式構造である。一方、式(15)では、分子多項式の各係数に F_{11} , F_{12} , F_{13} の乗算はなく、したがって、制御対象の複製がほぼ構築されていれば、 $k_{pos}(x-x_0)$ と $k_{pos(n)}\hat{x}$ は一致する。加速度信号も同様である。

次に、図 2 で、 w_{ob} から $\hat{p}$ までの伝達関数は、[オブザーバ]×[制御対象: p/w]の形にまとめると次式となる。

$$\frac{\hat{p}}{w_{ob}} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (18)$$

$$\frac{G_q(Ms^2 + Ds + K)}{\beta_0V_0Ms^3 + (cM + \beta_0V_0D)s^2 + (A_0^2 + cD + \beta_0V_0D)s + cK}$$

$N(s)$, $D(s)$ はともに 5 次であり、 s の各係数には F_{11} , F_{12} , F_{13} が含まれ、両者が極零相殺のときにはじめて $G_3 \hat{p}$ の応答は $k_{pres}p$ のそれと一致する。したがって、図 11 に示す $k_{pres}p$ と $G_3 \hat{p}$ の不一致解消のため極指定を変えたとき、 $G_3 \hat{p}$ の波形を観測しているだけではその効果は不明である。実際、周波数応答 $G_3 \hat{p}/w_{ob}$ が $k_{pres}p/w$ に合うよう調整して param.1 を得たとき、 $k_{pres}p$ を基準にした $G_3 \hat{p}$ の時間応答は不一致であり、そのため、 s 平面左奥に極を再指定して F_{11} , F_{12} , F_{13} を実装した。しかし、 $G_3 \hat{p}$ の波形が $k_{pres}p$ のそれに一致するという傾向は識別できない。加えて、公称値を使った極配置から、さらに調整を施しているの、実根あるいは複素根という極配置も $G_3 \hat{p}$ の観測波形からは判定できない。

そこで、極配置を実機で確認するために、図 2 において $\hat{x}$ を得る積分器出力に初期値 IV を印加する加算端子を新たに設ける。つまり、図 13 左側図面内に記載したブロック図のとおりである。このとき、位置の PI 補償を施した状態であっても、 IV から $e = k_{pos}(x - \hat{x})$ までの伝達関数は、次数 3 の分母多項式を有する次式となる。

$$\frac{e}{IV} = \frac{k_{pos(n)}\{T_{air(n)}s^3 + (1 + T_{air(n)}G_4)s^2 + (G_2 + G_4)s\}}{T_{air(n)}s^3 + (1 + T_{air(n)}G_4 + k_{pos(n)}T_{air(n)}F_{12})s^2 + (G_2 + G_4 + T_{air(n)}G_5 + k_{pos(n)}F_{12} + k_{pos(n)}T_{air(n)}G_4F_{12})s + k_{pos(n)}T_{air(n)}F_{11} + G_5 + k_{pos(n)}F_{11} + k_{pos(n)}(G_2 + G_4)F_{12} + k_{pos(n)}F_{13}}$$

式(19)を参照すると、分子多項式には F_{11} , F_{12} , F_{13} がなく、これらは分母多項式に存在する。したがって、時間応答 e/IV を観測して収束性の判定ができる。確認のため、ステップ信号 $IV_0 = 0.001$ V 印加時の時間応答 e を、実測結果と数値計算で図 13 に示す。左側は実験結果を、右側は計算結果を示す。いずれも、3 重根 $P_{1,2,3} = -80 \pi$ (折点 40 Hz) と -120π (折点 60 Hz) の 2 種類を指定した。左右の比較から、実機には、指定通りの 3 重根が配置されている。さらに、入力 $IV = IV_0/s$ に対して初期値定理を式(19)に適用するとき、 $e(t=0) = k_{pos(n)} \cdot IV_0 = 0.667$ V となり、図 13 左右ともに一致している。なお、図 13 の状態から F_{11} 大の調整をしたとき、図には示さないが e は振動波形になる。つまり、「負実根+複素根」の配置が確認できる。

3. 同一次元オブザーバの出力を用いた FB

空圧式除振装置では、除振台定位の位置 FB、除振台の揺れにダンピングをかける加速度 FB、そして空気ばねの内圧管理の圧

Fig.14 Position time responses using both real and estimated acceleration feedbacks

Fig.15 Real and estimated accelerations signals

力FBが施される。そのため、順番に位置、加速度、そして圧力センサが実装される。これらセンサの出力に代えて、同次元オブザーバの3種類の信号を個別および同時にFBしたとき安定に平衡位置に定位させられる。以下では、加速度および圧力センサの代替ができることを示す。

3.1 加速度FBの適用

加速度FBは、ダンピングを除振台に付与する機能を持つ。図14左側上段は、加速度センサの感度を $k_{acc}[V \cdot s^2/m]$ とおき、同センサの出力 $k_{acc}\ddot{x}$ を用いてFBゲイン $k_a[V/V]$ を徐々にあげたときの除振台の位置である。 k_a 増加にともない振動的な位置応答にダンピングが付与される。同図左側下段は、上段に対応する $k_{acc}\ddot{x}$ である。一方、図14右側は、推定加速度 $G_6\ddot{x}$ に基づくFBのときである (param.2使用)。この場合も、除振台の揺動に対してダンピングが付与できる。したがって、 $G_6\ddot{x}$ はFBに活用できる。

注意することは、 $G_6\ddot{x}$ に重畳するノイズである。図15は、推定加速度FBを $k_a=1.0$ で行なったときの $G_6\ddot{x}$ と $k_{acc}\ddot{x}$ の比較である。同図左側では param. 1 を、右側では param. 2 を用いた。このように多くのノイズが $G_6\ddot{x}$ に重畳している状態のまま、同信号のFBを行なった結果が図14右側である。除振台という機械系は一種のローパスフィルタであり、高周波ノイズに反応しないため、図14右側に示すダンピング効果を得る。図15左側については、 $k_{acc}\ddot{x}$ のエンベロープに対して、 $G_6\ddot{x}$ のそれがほぼ一致している様子はわかる。しかし、図15右側の場合、両波形の一致は判別できない。ここで、 $G_6\ddot{x}$ に折点周波数 100 Hz の1次ローパスフィルタを2段挿入して $k_{acc}\ddot{x}$ と比較したとき、結果を図面に示さないが、完全に両信号は一致する。したがって、加速度センサ代替として同次元オブザーバの使用が可能である。なお、 F_{11} 大のとき、図15右側のように、 $G_6\ddot{x}$ に重畳するノイズが増大する理

Fig.16 Step responses of position using estimated pressure feedback

Fig.17 Pressure and estimated pressure signals under the estimated pressure feedback

由は、図2を参照して $k_{pos}(x-x_0)$ には床振動の変位 x_0 が含まれる一方で、 $k_{pos(n)}(\hat{x}-\hat{x}_0)$ の出力は $\ddot{x}_0=0$ の設定で $\hat{x}_0=0$ のためと考えられる。すなわち、 F_{11} の増大により x_0 の成分だけが同次元オブザーバのダイナミクスに入力されたためである。

3.2 圧力FBの適用

空気ばねの支持脚を複数台使って大型除振台を支持する場合、支持脚ごとに駆動力のばらつきがあると、剛な除振台でさえも変形させる。これを回避するために圧力FBを備える¹⁾。

図16は、圧力センサの信号および param. 1, 2 を用いた推定圧力信号の圧力FBを施したうえで、ステップ状の目標値 $r=5$ V を印加したときの除振台の位置 $k_{pos}(x-x_0)$ である。圧力FBループの前向きゲイン $k_{pr}[V/V]$ は、同図左で1, 4であり、左側に対して右側の方が圧力FBは強い。圧力センサを使ったFBの $k_{pos}(x-x_0)$ を基準にしたとき、推定圧力信号を使用した圧力FBでは、 k_{pr} 増加にともない基準からのずれが大きくなる。

さらに、図17は、 param. 2 の採用下で推定圧力FBを施しており、ステップ状の目標値 $r=5$ V を印加したときの空気ばねの内圧変化である。圧力センサの出力 $k_{pr}p$ と推定圧力 $G_3\hat{p}$ の両者を重ね書きしている。同図左側は弱いFBの $k_{pr}=1$ であり、過渡現象波形は両者ともに一致しているが、徐々に定常値の箇所で差異がでる。一方、右側は推定圧力FBを強めた $k_{pr}=4$ の場合であり、過渡現象初期から両信号には差異が生じる。図16, 17の右側では、左側に比較して差異が拡大する。この原因と対策については、次の3.3節で後述する。

3.3 飽和関数の組み込みと振幅依存性の解消

図17左側では、2.3節で述べた再調整の実施にも関わらず圧力センサの出力を基準として差異があり、同図右側ではさらに差異が拡大する。このままでは、圧力センサ代替として、同次元オブザーバの活用はできない。原因は二つである。一つ目は図16, 17の各右側には飽和が存在することである。二つ目は操作量 w の振幅に依存した w から p までの特性変化に起因する。

まず、前者の問題を解消するために、同次元オブザーバに飽和現象を再現する関数を組み込む。図1あるいは2を参照して、流量ゲイン G_q は、サーボバルブおよびこれを駆動する電流アンプの両者を含めたゲインである。この部分にはバルブ全開・全閉とともに電流アンプの飽和がある。図10を参照して、ステップ状

Fig.18 Pressure responses with saturated function

Fig.19 Pressure responses without and with non-linear function

の目標値 $r=5\text{ V}$ のとき G_q に飽和は無い。そして、推定圧力 FB を $k_{pr}=1$ で施した図 16, 17 左側の場合にも、 G_q に飽和は無い。しかし、両図右側の場合、 $k_{pr}=1$ から 4 の変更により操作量 w が増大して G_q は飽和している。そこで、同一次元オブザーバの入力端に、図 18 の図面内に記載した飽和関数を挿入する。同図は、推定圧力 $G_3\hat{p}$ を用いた圧力 FB を $k_{pre}=4$ で投入のうえで、目標値 $r=5\text{ V}$ のときの $G_3\hat{p}$ と圧力センサの出力 $k_{pres}p$ の対比である。図 18 を図 17 右側と比較したとき、前者では、飽和関数の挿入により、 $G_3\hat{p}$ は $k_{pres}p$ と完全に一致している。

しかし、目標値 r を変えたとき、 $k_{pres}p$ に対する $G_3\hat{p}$ のずれが顕著になる振幅依存性がある。これを解消するために、 F_{11} に 2 次関数を組み込む。具体的には、目標値 r ごとに、圧力の時間応答が一致する F_{11} を予め実験で求めておく。そして、 F_{11} への入力を 2.4 節と同様に e とおき、 $F_{11}=7.149e^2-0.2712e+5.6641$ の 2 次関数を組み込んだ。この結果を図 19 に示す。同図左側では $r=5\text{ V}$ の入力で推定圧力を実圧力に一致させる F_{11} を使って、 $r=4, 3\text{ V}$ のステップ信号を印加したとき圧力信号にずれが生じている。一方、図 19 右側では、2 次関数の導入によって、 r の大きさにかかわらず推定圧力信号と実圧力信号の一致が図れる。図面に示さないが、 r が負のときも、両信号は一致する。

なお、空圧式除振装置に製造ばらつきが存在する場合、あるいは機種が異なる場合、圧力センサを備えた状態で F_{11} の算出をそのつど行う必要がある。このとき、圧力センサの代替として同一次元オブザーバの推定圧力信号を使う、という目的に反する。しかし、空気ばねに対する配管のつなぎ替えによって、調整時にだけ圧力センサを用いねばよい。

4. 結 論

本論文の結論は以下の通りである。

- (1) 同定誤差を持つパラメータを使って制御対象の複製を構築した後、次に修正ゲインが投入される同一次元オブザーバに対して、周波数応答に基づく調整手順を実験に基づき見出した。
- (2) その際、容易に同定できる固有振動数 f_n 、ダンピング係数 ζ 、そして空圧系の時定数 $T_{air(n)}$ と、これ以外の曖昧な同定値が集約された同一次元オブザーバのブロック構造を示した。
- (3) 推定加速度信号については、上記(1)の周波数応答に基づく調整によって、ほぼ実信号との一致がはかれる。しかし、この状態が実現されても、パラメータ誤差が修正ゲインによって拡大される内部の状態量の推定圧力については実圧力信号と差異が生じる。そのため、さらに時間応答を観察して、先に調整した周波数応答にわずかな変化しかもたらさない微調整を要する。具体的には、ゲイン 1 dB 以内、かつ位相 5 deg 以内である。
- (4) 空圧式除振装置では、位置、加速度、そして圧力の FB が施されており、対応する同一次元オブザーバの状態量を個別に、あるいは全部同時に FB に活用できる。この実験検証を通して、加速度センサの代替は容易である。
- (5) しかし、圧力センサ代替のためには、上記(3)の微調整に加えて、さらに操作量 w の飽和を模擬する飽和関数、および振幅依存性を解消する 2 次関数の導入を行ったとき、同一次元オブザーバの推定圧力信号が FB 信号として活用できる。

付 録 1

付 録 2

Parameter	Symbol	Value	Unit
Mass	M	120.33	kg
Viscous damping coefficient	D	479	N · s/m
Spring constant	K	5122	N/m
Flow gain	G_q	1.6×10^{-5}	m ³ /s/V
Compressibility	β_0	2.74×10^{-6}	1/Pa
Flow conductance	c	4.60×10^{-10}	m ³ /s/Pa
Air spring volume	V_0	1.50×10^{-3}	m ³
Received area	A_0	7.80×10^{-3}	m ²
Pressure sensor sensitivity	k_{pres}	$10/(7 \times 10^5)$	V/Pa
Accelerometer sensitivity	k_{acc}	5.0	V/(m/s ²)
Position sensor sensitivity	k_{pos}	$2/3 \times 10^4$	V/m
Pressure PI parameter	k_{pr}	1, 2, 4	-
	T_{pr}	8.928	s
Position PI parameter	k_s	0.02	-
	T_s	17.6	s
Pressure feedback gain	k_g	30	-
Acceleration feedback gain	k_a	0.2, 1, 4	-

DC cut filter(DC_cut)	$2 \cdot \frac{2.2s}{1+2.2s}$ (used in Fig.14)
Butterworth filter(Btw_filter)	$\frac{1}{0.0000025s^3 + 0.002s + 1}$ (used in Fig.14)

付 録 3

Parameter	Nominal value	Parameter 1	Parameter 2
G_1	2.253	6	6
G_2	1099.73	3200	3200-3300
G_3	0.2203	0.18	0.18
G_4	3.9807	3.9807	3.9807
G_5	42.566	80	75-80
$T_{air(n)}$	8.929	20	20
F_{11}	27.938	27.938	300
F_{12}	0.1125	0.1125	0.1125
F_{13}	521.02	521.02	521.02
$k_{pos(n)}$	$2/3 \times 10^4$	$2/3 \times 10^4$	$2/3 \times 10^4$
$k_{acc(n)}$	5	5	5
k_{g2}	30	30	30

参 考 文 献

- 1) キヤノン：能動的除振装置，特許第 3286201 号 (2002).
- 2) ZHU Xiao-cong, TAO Guo-liang, CAO Jian: Pressure observer based adaptive robust trajectory tracking control of a parallel manipulator driven by pneumatic muscles, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, **8**, 12 (2007)1928.
- 3) Kihoon NAN, Maru TOON, Seungbum PARK, Myoungcho SUNWOO: Development of a Sensorless Estimation Algorithm of the Injection Timing and Rate for an HSDI Common-Rail Injector, *JSME International Journal Series C*, **47**, 3, (2004) 882.
- 4) 朝倉俊行, 高野宣也, 国慶志：空気圧マニピュレータのロバストサーボ設計, 日本機械学会論文集 (C 編), **64** 622 (1998)2124.
- 5) 小嶋貴弘, 佐野学：空気圧サーボ系の圧力センサレス制御のためのオブザーバ, 日本機械学会論文集 (C 編), **73**, 736, (2007) 3159.
- 6) 古郷寛, 美多勉：システム制御理論入門, 実教出版株式会社, (1979)121.
- 7) 涌井伸二, 長谷川雄三, 藤原真樹, 高橋正人：相対位置の微分信号を用いた空圧式除振装置の制御, 日本機械学会論文集 (C 編), **73**, 726, (2007)453.