

多変数システム同定結果に基づく除振マウント支持 による半導体露光装置の物理パラメータ推定*

高梨 宏之[†]・間山 武彦[‡]・涌井 伸二[‡]・足立 修一[†]

Physical Parameter Estimation of Semiconductor Exposure Apparatus Supported by Anti-Vibration Units Based on Multivariable System Identification Results*

Hiroyuki TAKANASHI[†], Takehiko MAYAMA[‡], Shinji WAKUI[‡] and Shuichi ADACHI[†]

1. はじめに

除振マウント支持による半導体露光装置のような大型構造物では、その質量や慣性モーメントなどの物理パラメータは事前に未知であり、それらを正確に測定することも困難であるため、物理法則に基づく物理モデリングの適用は難しかった。そこで筆者らは、そのような対象に対してシステム同定理論に基づいた多変数システムのモデリング法を提案した [1]。提案法では対象の物理パラメータが未知であってもモデリングは可能であったが、制御のためのモデリングやチューニングの観点からは、物理パラメータを正確に推定することが望まれる。物理パラメータを推定することによりチューニングや故障検出を定量的に判断できること、そして制御系再設計のための事前情報としての利用が期待できる。

そこで本論文では、多変数システム同定によって得られた多入出力離散時間状態空間モデル [1] に基づいて、除振マウント支持による半導体露光装置の物理パラメータを推定する手法を提案する。具体的には、イナータンス特性から慣性行列と重心位置を、コンプライアンス特性から剛性行列を推定する手法を提案する。

2. 対象の力学モデル

本論文で扱う装置は 4 台の除振マウントによって浮上支持された半導体露光装置であり、除振マウントが装置設置基礎から伝播する振動の影響を除去している [2]。現在ではセンサ、アクチュエータを装備したアクティブ除振マウントが実用化されている。

半導体露光装置の支持機構である除振マウントの特性

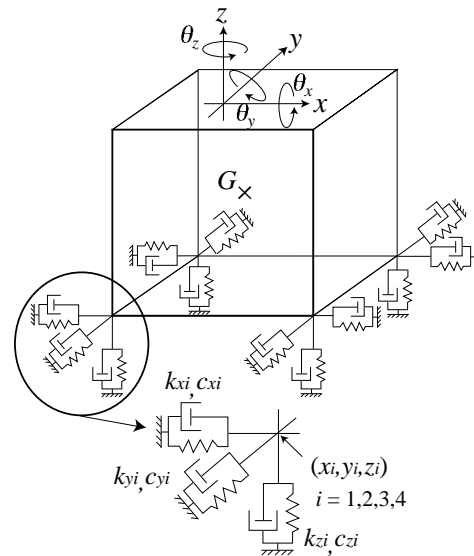


Fig. 1 Dynamical model of the system

は、非制御時には空気ばねの特性が支配的であるので、動学的には、除振マウントは剛性要素と粘性要素から構成されると考えられる。除振マウントが支持する半導体露光装置を一つの剛体とみなすと、対象の力学モデルは剛体、剛性要素、そして粘性要素を用いて Fig. 1 のように表わされる。剛体の運動は重心の並進と回転運動であるので、対象は 6 自由度運動機構となる。なお、Fig. 1 において、空間に固定された直交座標系の原点は、平衡状態においては剛体の重心と一致する。

剛体の変位 $X(t)$ と速度 $\dot{X}(t)$ が微小であり、剛体の重心が慣性主軸の原点に一致するという仮定のもとで、運動方程式

$$M\ddot{X}(t) + C_D\dot{X}(t) + KX(t) = F_0(t) \quad (1)$$

が得られる。(1) 式において $F_0(t)$ は重心位置での駆動力、 M 、 C_D および K はそれぞれ、慣性行列、減衰行列および剛性行列であり、次式のように定義される。

$$X(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t) \ \theta_x(t) \ \theta_y(t) \ \theta_z(t)]^T$$

* 原稿受付 2000 年 12 月 13 日

[†] 宇都宮大学 工学部 Faculty of Engineering, Utsunomiya University; 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, JAPAN

[‡] キヤノン (株) 宇都宮光学機器事業所 Utsunomiya Optical Products Operations, CANON Inc.; 20-2 Kiyohara-Kogyo-danchi, Utsunomiya, Tochigi 321-3292, JAPAN
Key Words: semiconductor exposure apparatus, physical parameter, subspace method, state space model.

$$\mathbf{F}(t) = [F_x(t) \ F_y(t) \ F_z(t) \ M_x(t) \ M_y(t) \ M_z(t)]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & -I_{xy} & -I_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{zx} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & k_{15} & k_{16} \\ 0 & k_{22} & 0 & k_{24} & 0 & k_{26} \\ 0 & 0 & k_{33} & k_{34} & k_{35} & 0 \\ 0 & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & 0 & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & 0 & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix}$$

ここで, m は剛体の質量, I_x, I_y, I_z は慣性モーメント, そして I_{yz}, I_{zx}, I_{xy} は慣性乗積である. また, \mathbf{K} の各要素 k_{ij} は Fig. 1 の k_{xi}, k_{yi}, k_{zi} ($i=1, 2, 3, 4$) から決定される. なお, \mathbf{C}_D は \mathbf{K} の各要素 k_{ij} を c_{ij} で置き換えたものと等しいので, ここでは省略する.

3. 物理パラメータ推定法

(1) 式において状態変数を $\mathcal{X}(t) = [\mathbf{X}^T(t) \ \dot{\mathbf{X}}^T(t)]^T$ とし, 加速度を出力 $\mathcal{Y}(t) = \ddot{\mathbf{X}}(t)$ とすると, 状態空間モデル

$$\dot{\mathcal{X}}(t) = \mathbf{A}\mathcal{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{F}_0(t) \quad (2)$$

$$\mathcal{Y}(t) = \mathbf{C}\mathcal{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{F}_0(t) \quad (3)$$

が得られる. ここで,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \mathbf{M}^{-1}.$$

このとき伝達関数行列 $G_a(s)$ は次式となる.

$$G_a(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (4)$$

本論文では, 加速度を出力としたときの伝達関数行列を $G_a(s)$, 変位を出力としたときの伝達関数行列を $G_d(s)$ とし, それぞれに対するシステム行列 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ および \mathbf{D} は, 部分空間法によって離散時間形式で得られているものとする [1].

3.1 慣性行列と重心位置の推定

一般に, イナータンス特性は高周波帯域で平坦な特性となる. いま,

$$\lim_{s \rightarrow \infty} G_a(s) = \mathbf{D} = \mathbf{M}^{-1} \quad (5)$$

より, 高周波帯域のゲインが慣性行列の逆行列と等しくなることがわかる. ここで, 直達項 \mathbf{D} は, 入出力間の静的な関係を表現するため状態変数に依存せず, 連続時間と離散時間モデルの両方で等しいので, \mathbf{M} は物理的

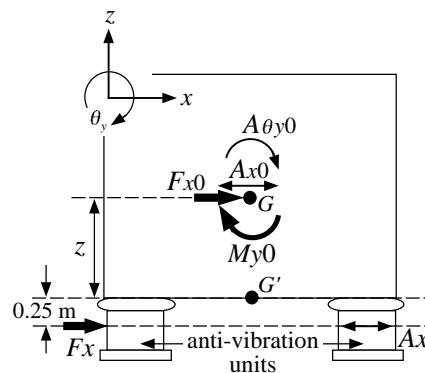


Fig. 2 True center of gravity (CG) position of the system

な意味を持つ任意の次数に対する離散時間同定モデルより推定可能である.

さて, 実際の装置においては真の重心位置 G は未知であるので, 仮想重心座標系と真の重心座標系との変換行列を導入する. 仮想重心位置 G' は装置構造の対称性から, 除振マウントと半導体露光装置の締結部平面内に設定する. Fig. 2 を例にとると, 仮想重心位置と真の重心位置は, 高さ z の違いが存在するため, アクチュエータによる x 軸方向への駆動力 F_x は, 真の重心位置では F_{x0} とモーメント M_{y0}, M_{z0} に影響を与える. また, センサによって検出される加速度 A_x は, 真の重心位置の x 方向加速度 A_{x0} と y, z 軸まわりの角加速度 $A_{\theta y0}, A_{\theta z0}$ である. このようにして, 駆動力と加速度に関する変換行列 T_f, T_a が定義できる.

つまり, アクチュエータ, センサ位置と真の重心位置における 6 モードの駆動力と加速度をそれぞれ F, A と F_0, A_0 とすれば, それらは T_f, T_a を用いて次式のように関係付けられる.

$$F_0 = T_f F, \quad A = T_a A_0 \quad (6)$$

ここで, T_f, T_a はともに 6×6 正則行列である. (6) 式を (2), (3) 式に代入して整理すると, 次式となる.

$$\mathbf{D}^{-1} = T_f \mathbf{M} T_a \quad (7)$$

以上より, 測定データから部分空間法によって同定された \mathbf{D} の逆行列と (7) 式右辺の行列演算後の各要素を比較することで, \mathbf{M} と真の重心位置が推定できる.

3.2 剛性行列の推定

コンプライアンス特性は, イナータンス特性とは逆に低周波帯域で平坦な特性であり, 低周波帯域の定常ゲインが剛性行列の逆行列と等しくなる.

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_d(s) = T_a \hat{\mathbf{C}} \hat{\mathbf{A}}^{-1} \hat{\mathbf{B}} T_f = \mathbf{K}^{-1} \quad (8)$$

ここで, $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{B}}, \hat{\mathbf{C}}$ は連続時間状態空間モデルのシステム行列とする. この場合も, (8) 式はモデル次数に依存することなく常に 6×6 正則行列となる. ここでは連続時間モデルを用いてきたが, システム同定によって得られ

Table 1 Estimation results of M and CG position

Symbol	Estimate	Nominal
m [kg]	2.89×10^3	2.70×10^3
I_x [kgm ²]	0.84×10^3	0.75×10^3
I_y [kgm ²]	0.65×10^3	0.60×10^3
I_z [kgm ²]	0.54×10^3	0.50×10^3
I_{yz} [kgm ²]	0.68×10^2	0.64×10^2
I_{zx} [kgm ²]	-9.20	-4.20
I_{xy} [kgm ²]	7.50	1.20
x [m]	0.01	0.00
y [m]	0.10	0.10
z [m]	0.25	0.25

Table 2 Estimation results of K (diagonal)

Symbol	Estimate	Nominal
k_{11} [N/m]	116.00×10^4	117.56×10^4
k_{22} [N/m]	112.29×10^4	117.56×10^4
k_{33} [N/m]	190.09×10^4	179.16×10^4
k_{44} [N/m]	41.44×10^4	41.24×10^4
k_{55} [N/m]	64.37×10^4	59.80×10^4
k_{66} [N/m]	55.75×10^4	57.36×10^4

ているモデルは離散時間モデルである．ここで，連続時間の s 平面での $s \rightarrow 0$ は，離散時間の z 平面では $z \rightarrow 1$ に対応するので，(8) 式は次式のように変形される．

$$\lim_{z \rightarrow 1} G_d(z) = T_a C (I - A)^{-1} B T_f = K^{-1} \quad (9)$$

以上より，部分空間法によって同定されたシステム行列を (9) 式に代入することにより K が推定できる．なお， C_D の推定は今後の課題である．

4. 数値シミュレーション

提案法の有効性を，数値シミュレーションによって検証する．2. で述べた力学モデルを計算機上に構築し，多変数システム同定実験で用いた無相関な M 系列信号を入力信号とした [1]．そのときの装置の変位と加速度を測定し，部分空間法によって状態空間モデルを同定した．同定された状態空間モデルに対し，提案法を適用して物理パラメータの推定を行った．ただし，計算機上に構築した対象の力学モデルには，計算により得られている物理パラメータ値を用い，それらをノミナル値とした．

Table 1 に M および重心位置の，Table 2 に K (対角要素) の推定結果の一例を示す．これらより，ノミナル値を基準として誤差 10% 程度の範囲で各パラメータが推定できていることがわかる．そして，Tables 1, 2 の推定結果を用いてモデルを再構築したときの周波数特性の一例を Fig. 3 に示す．実線が再構築したモデルの，破線が対象の周波数特性である．Fig. 3 より，共振周波数，

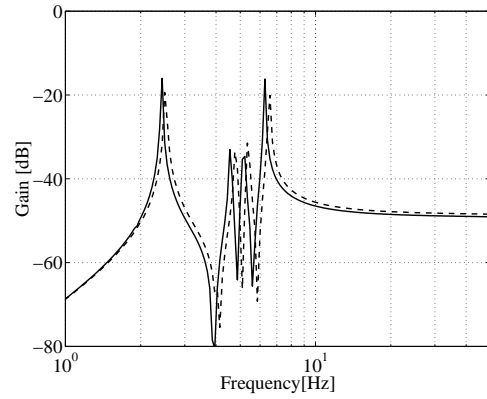


Fig. 3 Gain characteristics of reconstructed model (solid line : reconstructed model, dashed line : nominal model)

共振倍率は対象の周波数特性とよく一致しており，各パラメータの推定精度は実用上十分であると考えられる．ただし，再構築したモデルの C_D はノミナル値とした．

数値シミュレーションにおいて，推定した M , K の構造は厳密には定義式と異なるが， D は対角優勢な構造を有し，ほとんどの非対角要素が近似的に零となった．よって， D^{-1} において定義式中の零要素に対応する十分小さな非対角要素は零とみなし，さらに (1,1) ~ (3,3) 要素の平均値を推定質量とした．

本論文で提案した手法の利点は以下のとおりである．

- 同定モデルのモデル次数に依存しない．
- 部分空間法によって得られた多変数離散時間同定モデルを直接利用できる．
- 行列の要素比較によってパラメータ推定ができる．

なお，提案法は，伝達関数の極限値を利用することからもわかるように，伝達関数モデルに対しても適用可能である．しかし，状態空間モデルに基づく同定法とパラメータ推定法が確立でき，同一のモデルに基づく制御系設計法を適用することで，それら一連の解析を同一のモデルで行えることが本論文の利点である．

5. おわりに

本論文では，多変数システム同定によって得られた状態空間モデルに基づき，半導体露光装置の質量や慣性モーメント，除振マウントのばね定数などの物理パラメータを推定する一方法を提案した．本論文ではシミュレーションによって有効性を検証した段階であるが，今後は実データを用いての検証を検討している．

参考文献

- [1] 高梨，加藤，東海林，間山，涌井，足立：部分空間法による除振マウント支持の半導体露光装置に対する多変数システム同定実験；システム制御情報学会論文誌，Vol.14，No.7 (2001年 掲載予定)
- [2] 伊藤，井上，涌井，武石：KrF エキシマレーザスキャニングステッパ；電子材料，Vol.36，No.3，pp. 67-72 (1997)