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*

高梨 宏之[†]・加藤 宏昭[‡]・東海林 敦[†]・間山 武彦[‡]・
涌井 伸二[‡]・足立 修一[†]

Multivariable System Identification Experiments for Semiconductor Exposure Apparatus Supported by Anti-Vibration Units Using Subspace Method*

Hiroyuki TAKANASHI[†], Hiroaki KATO[‡], Atsushi TOUKAIRIN[†], Takehiko MAYAMA[‡],
Shinji WAKUI[‡] and Shuichi ADACHI[†]

In this paper, multi-degrees-of-freedom (multi-DOF) system identification of semiconductor exposure apparatus supported by anti-vibration units is discussed. To meet nanometer order semiconductor lithography demands for alignment accuracy, vibration control is one of the most important technologies in the semiconductor exposure apparatus supported by anti-vibration units. A dynamical model of the plant is necessary in order to design the microvibration controller and to evaluate the performance of the control systems. The controlled object is essentially a multivariable system, because the plant has 6-DOF motional modes. All the DOF of the plant are simultaneously excited and the multi-DOF dynamical model is identified from the exciting signals and the vibration output signals. The model is practically constructed in a short time using subspace method in system identification theory. Identification results are evaluated through experimental data in comparison with a conventional frequency response method.

1. はじめに

近年, システム同定の分野において, 部分空間法への関心が高まり, 数々の理論研究がなされてきた [1]. 部分空間法は, (1) SVD (特異値分解), RQ 分解などを用いているため, 数値的に安定である, (2) 予測誤差法 [2] のように最適化演算を利用しないため, 局所的最適点に陥る心配がない, (3) 状態空間モデルに基づいているため, 多変数システム同定問題へ容易に拡張できる, などさまざまな利点をもっている. その中でも (3) は, 予測誤差法などの他のシステム同定法にない重要な利点であろう.

一方, 部分空間法の応用研究に目を向けると, 単一入出力システム同定へ部分空間法を適用した例は報告されているが [3], 部分空間法を多変数システム同定問題へ適

用した例はほとんど報告されていない. そこで, 本論文では部分空間法を除振マウントによって支持された半導体露光装置 (以下, これを同定対象と呼ぶ) の多変数システム同定問題に適用し, 同定実験を通して部分空間法が多変数システム同定問題への適用可能性について調べることが目的とする.

半導体露光装置ではナノメートルオーダーの露光精度が要求されるため, 装置に伝播する外乱振動をできるだけ除去する必要がある. そのため, 振動制御は半導体露光装置において重要な要素技術の一つになっている. 半導体露光装置を複数台の除振マウントで支持することにより, 露光装置への外乱振動の伝達を防止しているが, 従来のパッシブな除振方式に代わって, 近年ではアクティブ制御方式が実用化され, 装置稼動状況と外界振動に応じてアクチュエータを駆動することにより効果的な振動制御が可能になってきた.

振動をアクティブ制御するためには, 対象の動特性を記述する数学モデルが必要になる. 一般に, 運動の自由度が増えるほど数学モデルは複雑になり, また各軸間の連成も無視できなくなる. したがって, 1 自由度系と比べて多自由度系のモデリングは一般に困難になる.

物理法則から数学モデルを構築する, いわゆる物理モデリングでは, 対象の正確な物理パラメータが既知, あ

* 原稿受付 2000 年 3 月 24 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: system identification, vibration control, modeling, semiconductor exposure apparatus, anti-vibration unit.

るいは測定可能でなければならない。しかしながら、通常、本研究で対象とするような大型で構造が複雑な装置の物理パラメータは事前に未知であり、またそれらを実験的に計測することも困難である。

一方、物理モデリングとは対極の立場をとる実験的なシステム同定法として、正弦波掃引法が機械振動系のモデリングではしばしば利用される。しかしながら、特に低周波帯域を精度よく同定しようとする、同定時間が極端に長くなるという問題点を有していた。このため、制御対象の厳密な事前情報に依存せず、実験的に多変数システムのモデリングを行う方法が望まれていた。

2. 除振マウント支持の半導体露光装置

本章では、モデリングの対象である半導体露光装置と除振マウントの構造について簡単に説明する。半導体露光装置はレチクルと呼ばれるチップパターン原図を半導体ウェーハへ焼き付けるためのリソグラフィ・システムであり、i 線、KrF (Krypton Fluoride) エキシマレーザを光源とする露光技術が利用されている [4]。

Fig. 1 に除振マウント支持による半導体露光装置の正面概観図を示す。半導体ウェーハは精密位置決め XY ステージに吸着されており、このステージを投影レンズを通る光軸に対して直交するように水平移動させることにより、半導体ウェーハへ連続的に複数回の露光を行う。このとき、床からの振動が露光装置に伝達しないように、露光装置は複数台の除振マウントによって装置設置基礎から振動絶縁されている。Fig. 1 では正面 2 台の除振マウントのみを示しているが、実際には背面の 2 台を含め合計 4 台によって露光装置は支持されている。ここで、除振マウントは露光装置の支持脚であると同時に、露光装置へ制振力を付与するアクチュエータの役割も果たしている。

Fig. 1 Overview of semiconductor exposure apparatus

システム同定実験で使用した除振マウントでは、露光装置を支持する機構として空気ばねを採用している。空気ばねは、数千 kg にもおよぶ大重量物である露光装置を浮上支持するだけの推力を容易に発生できるからであ

る。また、電空変換器である空気弁によってその内圧を操作することにより、アクティブ制御のためのアクチュエータとして利用している。

Fig. 2 に除振マウントの構造を示す。図では鉛直方向へ作用する構成要素のみを示した。また、露光装置へ制振力を作用させるアクチュエータとして、リニアモータも装備している。そして、露光装置の振動を変位センサと加速度センサによって検出する。除振マウントによるアクティブ振動制御の基本的な考え方は、空気ばねで露光装置を浮上させて装置設置基礎から振動絶縁し、さらに加速度センサの信号をリニアモータあるいは空気ばねへフィードバックして露光装置に発生する振動を速やかに減衰させるというものである。なお、Fig. 2 には示していないが、除振マウントは水平方向に対しても、同様のアクチュエータとセンサを装備している。

Fig. 2 Vertical element of anti-vibration unit

3. 同定対象の物理モデル

本論文では、除振マウント支持による半導体露光装置の非制御時における動特性をモデリングの対象とする。システム同定実験を行う前に、物理モデリングによって同定対象の数学モデルを導出しておこう。対象の物理モデルの構造を明確にすることにより、システム同定の際に物理的な意味をもつモデル次数を選択することができる。

露光装置の支持脚である除振マウントの特性は、非制御時には空気ばねの特性が支配的であるので、動力学的には、除振マウントは剛性要素と粘性要素から構成されることが考えられる。除振マウントが支持する露光装置を一つの剛体とみなすと、同定対象の物理モデルは剛体、剛性要素、そして粘性要素を用いて Fig. 3 のように表わされる。剛体の運動は並進方向と回転方向にそれぞれ 3 自由度ずつ存在するので、対象は四隅を剛性要素と粘性要素に支持された 6 自由度の運動機構となる。なお、Fig. 3 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。

さて、時刻 t において剛体に作用する 6 モードの外

Fig. 3 Dynamical model of the semiconductor exposure apparatus supported by anti-vibration units

力 $\mathbf{F}(t)$ と剛体の変位 $\mathbf{X}(t)$ を, x, y, z 軸の並進方向成分と各軸まわりの回転方向成分を要素としてそれぞれ次式のように定義する.

$$\mathbf{F}(t) = [F_x(t) \ F_y(t) \ F_z(t) \ M_x(t) \ M_y(t) \ M_z(t)]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{X}(t) = [s_x(t) \ s_y(t) \ s_z(t) \ s_{\theta x}(t) \ s_{\theta y}(t) \ s_{\theta z}(t)]^T \quad (2)$$

剛体の変位と速度 $d\mathbf{X}(t)/dt$ は微小であり, x, y, z 軸は剛体の慣性主軸に一致すると仮定すると, 運動方程式

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{X}(t)}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{X}(t)}{dt} + \mathbf{K} \mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

が得られる. これが同定対象の数学モデルである. ここで, $\mathbf{M}$ は

$$\mathbf{M} = \text{diag} [m \ m \ m \ I_x \ I_y \ I_z] \quad (4)$$

で定義される慣性行列であり, m は剛体の質量, I_x, I_y, I_z は各軸まわりの慣性モーメントである. また, $\mathbf{C}$ は

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & c_{15} & c_{16} \\ 0 & c_{22} & 0 & c_{24} & 0 & c_{26} \\ 0 & 0 & c_{33} & c_{34} & c_{35} & 0 \\ 0 & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & 0 & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & 0 & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

で定義される粘性行列である. ここで, $\mathbf{C}$ の各要素 c_{ij} は Fig. 3 の c_{xi}, c_{yi}, c_{zi} , ($i=1, 2, 3, 4$) によって決定される. さらに, $\mathbf{K}$ は (5) 式と同様に定義される剛性行列である.

一般に行列 $\mathbf{C}, \mathbf{K}$ の非対角要素は非零なので, 対象

は運動モード間に干渉をもった連成振動系になる. ここで, 非対角要素が零となるのは, 支持点が鉛直方向重心の高さに一致する場合, あるいは慣性主軸をはさんで支持点に対称である場合などの幾何学的条件を満たしたときに限られる.

以上で述べたように, 同定対象の物理モデルの構造は (3) 式で与えられるが, それに含まれる質量などの物理パラメータ値は未知であり, また正確に測定することも困難である. つまり, 物理モデリングによって対象を正確にモデリングすることは非常に難しい. そこで, 本論文ではシステム同定の方法によってモデリングを行うことを提案する. 本論文でのシステム同定とは, 同定対象の慣性行列 $\mathbf{M}$ と, 除振マウントでの支持部位における粘性行列 $\mathbf{C}$ と剛性行列 $\mathbf{K}$ を同定することである.

4. 多変数システム同定実験

本章では, まず同定対象に対する多変数システム同定実験方法を示し, つぎに部分空間法によって同定を行う. そして, 得られた状態空間モデルの妥当性と手法の有用性について, 正弦波掃引法による周波数伝達関数との比較を通して考察する.

4.1 同定実験方法

Fig. 4 に 1 自由度の場合のシステム同定実験のブロック線図を示す. 同定実験は図中の加速度フィードバックループを切った状態でを行った. 一方, 装置の安全性のため, 位置フィードバックループは閉じた状態とした. その際, 同定対象の共振周波数が存在する帯域と比べ非常に帯域幅の低い位置フィードバック制御を施した. 本論文で扱う同定対象では完全な開ループで測定を行うことは不可能である. なぜなら, 位置制御ループを開ループにすることは位置制御の復元作用をなくすことであり, それが機械衝突の原因となり得るからである.

Fig. 4 Block diagram of system identification experiment (1-DOF)

Fig. 4 では 1 自由度のみ示したが, 実際には互いに無相関な M 系列信号 [5] をリニアモータによって 6 自由度の同定対象に入力信号として印加した. 入力信号の無相関性は, 各信号の初期値をすべて異なる値とすることによって実現した. しかし, 初期値同士が 2 倍の関係にな

るよう(たとえば, 2, 4, 8 など)に選択してしまうと非常に大きな相関をもってしまう. そのため, 実際には試行錯誤によってすべての初期値を決定し, 信号同士の相互相関関数が十分に小さいことから無相関性を確認した. M 系列信号の周期は 1023, クロック周波数は 25 Hz とした. 同定対象の共振周波数は 1 ~ 10 Hz の間の帯域にあることが既知であったので, これよりクロック周波数を決定した. M 系列信号の 1 周期分を入力信号としたので, 信号の印加時間は約 40 秒であった. M 系列信号のクロック周波数に比べて, リニアモータの周波数特性は十分高域まで平坦であるので, リニアモータへ与える入力信号と実際に発生する外力とは特に区別しなかった. リニアモータへ与える入力信号は, 発生する外力 $F(t)$ を装置本体の重心とリニアモータの位置関係で定まる幾何学的演算によって変換したものをを用いた.

また, 同定対象の出力信号は, 装置本体に生ずる 6 モードの加速度

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(t) &= \frac{d^2 \mathbf{X}(t)}{dt^2} \\ &= [A_x(t) \ A_y(t) \ A_z(t) \ A_{\theta x}(t) \ A_{\theta y}(t) \ A_{\theta z}(t)]^T \end{aligned}$$

とした. ここで, $A_x(t)$, $A_y(t)$, $A_z(t)$ はそれぞれ x , y , z 軸方向加速度, $A_{\theta x}(t)$, $A_{\theta y}(t)$, $A_{\theta z}(t)$ はそれぞれ x , y , z 軸まわり角加速度である. 入力信号と同様に, 加速度 $\mathbf{A}(t)$ もそれぞれの除振マウントに内蔵された加速度センサの信号を幾何学的演算により変換したものとした.

これらの入出力信号をサンプリング周波数 1000 Hz で収集した. 得られた入出力信号に対して 10 次のデシメーション [6] を施し, サンプリング周波数を 100 Hz ヘダウンサンプリングした. デシメーションの次数は, 同定対象のもつ共振周波数が 1 ~ 10 Hz であるという物理的な事前情報から決定した. 最終的に得られた 6 入力 6 出力の入出力信号の一部をそれぞれ Figs. 5, 6 に示す. このとき, データ数は 4093 個であった.

これらの 6 入力 6 出力信号から, 状態空間モデルのシステム行列 $\bar{\mathbf{A}}$, $\bar{\mathbf{B}}$, $\bar{\mathbf{C}}$, $\bar{\mathbf{D}}$ を同定し,

$$\mathbf{G}(s) = \bar{\mathbf{C}}(s\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^{-1}\bar{\mathbf{B}} + \bar{\mathbf{D}}$$

の関係から次式の伝達関数行列 $\mathbf{G}(s)$ を同定することが, ここで考えている同定問題である.

$$\begin{aligned} [A_x \ A_y \ A_z \ A_{\theta x} \ A_{\theta y} \ A_{\theta z}]^T \\ = \mathbf{G}(s)[F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, $\mathbf{G}(s)$ は $G_{ij}(s)$ ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) を要素とする 6×6 行列である.

以上より, 今回のシステム同定実験のポイントをまとめるとつぎのようになる.

- M 系列信号の初期値をすべて異なる値にすることにより無相関性を実現した.
- 同定対象の共振周波数帯域などの事前情報を利用し

Fig. 5 Input signals

てクロック周波数とサンプリング周波数を決定した.

- 同定対象とセンサ・アクチュエータの特性に合わせて入力信号の振幅レベルを決定した.

一つめのポイントは, 前述のように経験的ではあるが, 信号の初期値の設定によっては無相関性が実現できない場合があるため, 実際には六つの信号がすべて無相関になるように試行錯誤によって適切な初期値を選択した. 二つめのポイントは, システム同定実験においては重要なポイントであり, 同定対象に関する事前情報を用いて決定した. 最後のポイントは, 装置の動特性が十分励起でき, かつ, 入力信号の飽和などの不都合が生じないよ

Fig. 6 Output signals

うなレベルの入力信号を用いたことである。特に二、三つのポイントは、産業現場での経験に大きく依存して決定されたものである。

4.2 実験結果と考察

本論文ではシステム同定法として、部分空間法の一つである N4SID 法 [7] (Numerical algorithm for Subspace-based State-Space System Identification method) を用いた。3. の議論より、同定対象は六つの共振点を有する連成振動系であるので、システム同定モデルの次数は最低でも 12 次になければならない。この場合のモデル次数は、運動自由度 6 の倍数が妥当な次数である。

Fig. 7 System identification results of G_{11}

まず、モデル次数 12 次で同定を行った場合の $G_{11} = A_x/F_x$ のゲイン特性の同定結果を Fig. 7 に示した。図には、従来法である正弦波掃引法（破線）による同定結果も示した。図より、各共振周波数は比較的よく同定できるものの、低域、高域において正弦波掃引法との差が顕著に現れている。そこで、モデル次数を 18 次として同定を行った結果、12 次の場合と比較して低域、高域で正弦波掃引法との差が小さくなっていることを確認した。さらにモデル次数を 24 次と高次にした場合には、Fig. 7 に示すように、本論文で着目している帯域においては正弦波掃引法とほぼ一致することが確認できた。減衰係数の小さい振動系の場合、同定モデルの次数を高次にした方が周波数特性を精度よく同定できることが知られており [8]、本実験結果はその事実を裏付けている。そこで、以下では同定モデル次数を 24 次を設定する。

Fig. 7 より、2～6 Hz に存在する共振周波数近傍では、部分空間法と正弦波掃引法による共振周波数や共振倍率などの同定結果はほぼ一致している。振動制御の基本は共振ピークの抑制なので、共振周波数付近の同定精度は特に重要である。この観点から、部分空間法によって多変数系の振動モードは十分な精度で同定できていると考えられる。

一方、高域においては部分空間法と正弦波掃引法の周波数特性がずれているが、これは 100 Hz より高い帯域に存在する振動モードの影響であり、この振動は露光装置と露光レンズとの結合部分などの影響であるため、本論文では同定対象としていない。正弦波掃引法ではこの振動モードの反共振点が同定されているが、部分空間法ではデシメーションによって 100 Hz 以上の帯域の影響を無視しているため、反共振点が同定されておらず、そのため両者の同定結果は一致していない。さらに、ナイキスト周波数に近い範囲の同定誤差は大きく、サンプリング周波数を f_s とした場合、最小 2 乗法では経験的に $0.01f_s \sim 0.2f_s$ の帯域において十分な精度で同定が行えるという報告もされている [8,9]。そのような背景から、今回のようにサンプリング周波数を 100 Hz とした場合

Fig. 8 System identification results of G_{11}, G_{22} and G_{33} (solid line : N4SID, dashed line : sine sweep)

でも、十分な同定精度の上限は 20 ~ 30 Hz までの帯域であると考えられる。

Figs. 8, 9 に対角要素 $G_{ii} (i=1, 2, \dots, 6)$ の同定結果を示す。部分空間法による同定結果を実線で、比較のために正弦波掃引法による結果を破線で示した。どの結果においても前述の理由で 1 ~ 30 Hz の帯域においてはよい一致を示していることがわかる。

また、Fig. 10 に非対角要素、すなわちモード間の連成振動の同定結果の一部 (G_{13}, G_{14}, G_{15}) を示す。対角要素のようなきれいな一致は示していないが、1 ~ 20 Hz の帯域では両者のゲイン特性はほぼ一致していることがわかる。これは非対角要素は対角要素と比べてゲインが小さいため、SN 比が悪くなり、特に正弦波掃引法の同定精度が劣化したためであると考えられる。図より、ゲインが小さい帯域においては正弦波掃引法では滑らかな

Fig. 9 System identification results of G_{44}, G_{55} and G_{66} (solid line : N4SID, dashed line : sine sweep)

ゲイン特性が同定されておらず、同定結果の信頼性は低い。なお、紙面の都合ですべての同定結果を図示できないが、他の非対角要素についてもほぼ同様の同定結果が得られた。

以上に示したように、部分空間法による多変数システム同定によって従来の正弦波掃引法と同等の同定精度をもつ多自由度振動系のモデルを得ることができた。

5. 部分空間法の適用による利点

本章では、除振マウント支持による半導体露光装置に対して部分空間法を用いてモデリングすることの利点をまとめる。

第一の利点は、システム同定実験を非常に短時間で実行できる点である。本論文で行った同定実験では、わずか 40 秒間の入出力データを計測することにより、そのデータから 6 入力 6 出力のすべての入出力関係を同定するこ

Fig. 10 System identification results of G_{13} , G_{14} and G_{15} (solid line : N4SID, dashed line : sine sweep)

とができた。使用する計算機的能力にも依存するが、部分空間法のアルゴリズムの実行時間を含めても、10分以内で同定対象の数学モデルを得ることが可能になった。

産業的な立場から見ると、本論文での結果は非常に大きな利点である。これまでの現場におけるモデリングは、前述のように正弦波掃引法が主流であり、市販のFFTアナライザを利用していた。しかし、FFTアナライザによる測定では1軸あたり約20分の同定時間を要しており、 $6 \times 6 = 36$ 軸すべてを同定するためには約12時間かかっていた。この測定時間については、周波数分解能の設定の変更や多軸同時加振が行えるFFTアナライザの使用によって同定時間を短縮することは可能であるが、それでも数時間かかる作業であった。

とくに、装置完成後には周波数特性の測定とチューニングの繰り返し作業が必要であり、装置設置床が変化し

た場合（製品納入時）にも同様の作業が必要である。高精度にパラメータのチューニングを行うためには、周波数特性の測定精度を高くしなければならず、必然的に測定時間が長くなるという問題点があった。しかしながら、システム同定によって正弦波掃引法と同程度の精度でモデリングができれば、周波数特性の測定とチューニングの繰り返し作業が比較的容易に行えるようになる。

また、経年変化や異常診断のために、定期的に対象の動特性をモデリングする必要もある。そのような場合、本論文で提案した部分空間法による多変数システム同定を実行することにより、モデリング時間を大幅に短縮することが可能になった。異常診断において故障箇所の特定制を行う場合にも周波数特性の利用が有効である。具体的には、センサやアクチュエータの故障検出、機械接触の検出そして機械振動の発生原因の特定などにおいて有効である。つまり、このような故障検出のたびに周波数特性を測定し、短時間で高精度な測定を行う必要があるためである。

提案法の第二の利点は、パラメトリックな数学モデルが得られることである。正弦波掃引法は広く使用されている同定法であるが、結果として得られるモデルが周波数伝達関数であるため、連成が強い多自由度の振動制御系に対しては、特定の1入力と1出力のみに着目した周波数伝達関数では制御系設計が困難であった。それに対して、部分空間法を用いると多変数系の状態空間モデルのシステム行列が同定できるため、伝達関数行列などに変換することにより多変数制御系を設計することが可能になる。ただし、本論文では実際の制御対象の次数よりも高次の同定モデルを利用したため、同定結果を制御系設計に利用する際には、モデル低次元化が必要になる。

さらに、第三の利点として、部分空間法は予測誤差法のようにユーザが設定する初期値がほとんどなく、初期値によって同定結果が大きく異なる心配がないことがあげられる。

最後に、システム同定を行う際に注意すべき点を以下にまとめておく。

- デシメーションという信号処理を利用することにより、対象の共振周波数に焦点をあわせたサンプリング周波数に変換する。
- 部分空間法においてユーザが設定すべき数少ないパラメータの一つにモデル次数があるが、これは本論文で行ったように、対象の物理的な事前情報を考慮し、それよりも高次に設定する。

6. おわりに

本論文では、除振マウントによって支持された半導体露光装置に対して多変数システム同定実験を行い、収集された入出力データに対して部分空間法というシステム同定法を適用し、短時間で従来の正弦波掃引法と同等の同定精度をもつ多変数数学モデルを構築した。これによ

り、部分空間法の多変数システム同定問題への適用可能性を実データを用いて示すことができた。

今後の課題としては、本論文で同定した多変数モデルから同定対象の物理パラメータを算出する方法の開発、同定モデルに基づく多変数振動制御系の設計などがあげられる。

最後に、本論文に対して大変貴重なご意見をいただいた査読者の方々に謝意を表す。

参考文献

- [1] M. Viberg: Subspace-based methods for the identification of linear time-invariant systems; *Automatica*, Vol. 31, No. 12, pp. 1835–1851 (1995)
- [2] L. Ljung: *System Identification – Theory for the User* (2nd Edition), Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall PTR (1999)
- [3] S. Adachi, I. Yamaguchi, T. Kida, K. Yamada and Y. Chida: On-orbit system identification experiments on Engineering Test Satellite-VI; *Control Engineering Practice*, Vol. 7, No. 7, pp. 831–841 (1999)
- [4] 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, pp. 67–72 (1997)
- [5] 足立: MATLAB による制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局 (1996)
- [6] 足立: ユーザのためのシステム同定理論, 計測自動制御学会, pp. 90–94 (1993)
- [7] P. Van Overschee and B. De Moor: N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic system; *Automatica*, Vol. 30, No. 1, pp. 75–93 (1994)
- [8] 足立, 大明, 重政: デシメーションを複数個用いたシステム同定法— ロボットアームの同定実験への適用; 計測自動制御学会論文誌, Vol. 26, No. 9, pp. 1029–1035 (1990)
- [9] C. G. Goodwin, M. E. Salgado and R. H. Middleton: Indirect adaptive control — An integrated approach; *Proc. of ACC*, pp. 2440–2445 (1988)