電気学会論文誌 D（産業応用部門誌）
IEEJ Transactions on Industry Applications
Vol.140 No.4 pp.272–280　DOI: 10.1541/ieejias.140.272

論　文

大型超精密位置決めステージのモデルベースト制御技術

正　員　大西　亘*　上級会員　藤本　博志*　上級会員　坂田　晃一**

Model-based Control Techniques for Large-Scale High-Precision Stage

Wataru Ohnishi*, Member, Hiroshi Fujimoto*, Senior Member, Koichi Sakata**, Senior Member

（2019年7月12日受付）

High-precision positioning stages are an important apparatus in the semiconductor and flat panel industries. This paper reviews the model-based control techniques utilized in the feedback and feedforward control of the positioning control system. Multirate feedforward control with preactuation is an exact inversion of the discretized plant and it is effective for the reference tracking performance. Model-based feedback control using multiple sensors enhances the feedback bandwidth and improves the disturbance suppression performance. Additionally, this paper introduces new structures and control techniques achieving lightweight, high-thrust, and low disturbances.

キーワード：モデルベース制御，精密位置決め制御，フィードフォワード制御，フィードバック制御，粗微動ステージ
Keywords: model based control, precision motion control, feedforward control, feedback control, dual stage

1. はじめに

精密位置決めステージは，半導体集積回路や液晶パネルの製造に欠かせない装置である。半導体集積回路や液晶パネルは，精密位置決めステージに乗せられたシリコンウエハやガラス基板に対して，回路パターンを繰り返し焼き付けることにより生産される[(1)~(3)]。そのステージの駆動速度と位置決め精度が，生産される製品の価格と性能に直結する。そのため，位置決め精度の高精度化だけでなく，生産性向上のためのステージ大型化と駆動速度の高速化が同時に求められている。さらに，ムーアの法則[(4)]に代表される市場の要求により，この矛盾した要求を年々（指数関数的に）高いレベルで満たし続けていくことが求められている。

このような厳しい要求性能の達成のため，機械工学，電気工学，制御工学，光学[(5)]の各方面から弛まない努力がなされてきた。機構面においては，長ストロークと位置決め精度の両立のため，長ストロークの粗動ステージと，短ストロークで位置決め精度の高い微動ステージの双方を持つ，粗微動分割構造をとることが広く行われている[(6)(7)]。ステージの駆動法は，当初はボールねじ[(8)]が用いられていたが，現在は三相リニアモータ[(1)(9)]や Voice Coil Motor（VCM）[(10)(11)]の非接触電磁アクチュエータを用いることが一般的になっている。さらに，自重補償法（ガイド法）については，ボールベアリングによるリニアガイド[(8)]が従来行われていたが，高圧空気[(12)(13)]や磁気[(14)~(16)]により浮上することにより，摩擦や床振動を劇的に低減させることが一般的になっている[(17)]。そのため，必然的に微動ステージは剛体6自由度である x，y，z，θ_x，θ_y，θ_z を精密に制御する必要があり，軸間干渉の非干渉化が課題となっている[(18)(19)]。もう一つの機構面の課題は，ステージ大型化に伴う共振周波数の低下である。特に液晶製造装置は，装置の大型化が著しい[(20)(21)]ため，大きな課題となっている。軸間干渉および外乱の抑圧は，主にフィードバック（FB）制御器の役割であるが，低い周波数の共振により，FB 帯域の高帯域化は困難である。そのため，なるべく高い帯域を達成しつつ，ロバスト性の高い FB 制御器の設計法が課題である。さらに，低い帯域の FB 制御器のため，目標値追従性能は FB 制御器に頼ることはできず，高性能なフィードフォワード（FF）制御器の設計が極めて重要である。

以上整理するに，更なる高速高精度位置決めを達成するための課題は大きく5つに分けられる[(22)]。

（1）　高性能な FF 制御器による目標値追従[(23)~(25)]
（2）　高帯域な FB 制御器による外乱抑圧[(26)(27)]
（3）　6自由度ステージの非干渉化制御[(6)(28)(29)]

* 東京大学大学院工学系研究科
〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
** （株）ニコン
〒244-8533　神奈川県横浜市栄区長尾台町 471
Nikon Corporation
471, Nagaodai-cho, Sakae-ku, Yokohama, Kanagawa 244-8533, Japan

© 2020 The Institute of Electrical Engineers of Japan.

（4） 外乱モデルに基づく FF 制御 [30][31]

（5） 各ステージの同期制御 [32]~[35]

モデルベースの対になるアプローチとして，データベースの手法があり，繰り返し学習制御（Iterative learning control：ILC）[36]~[38]や繰り返しフィードバックチューニング（Iterative feedback tuning：IFT）[39][40]が盛んに研究されており，モデルベース・データベースの双方が重要である。

本論文では，特に課題 (1)，(2) について，著者らの最近のモデルに基づいた取り組みについてまとめる。さらに，著者らが提案した，軽量・大推力・低外乱を達成する新たなステージ構造である，カタパルトステージ，空気圧駆動ステージ，多軸ワイヤレス給電精密ステージについて紹介する。

2. マルチレートフィードフォワード制御による完全追従制御法

〈2·1〉 2 自由度制御系における FF 制御 精密位置決めステージにおいては，Point to point の動きだけでなく，Continuous path の軌道追従性能が重要である。そのため，2 自由度制御における FF 制御が重要な役割を果たす。

2 自由度制御のブロック図を Fig. 1 に示す。ただし，P は制御対象，C_{fb} は FB 制御器，C_{ff} は FF 制御器を示す。また，r は指令値，e は追従誤差，u_{ff} は FF 入力，u_{fb} は FB 入力，y は出力を表す。ここで，目標値追従性能は

$$y = \frac{P}{1+PC_{fb}}u_{ff} + \frac{PC_{fb}}{1+PC_{fb}}r = \frac{C_{ff}P + PC_{fb}}{1+PC_{fb}}r \cdots\cdots (1)$$

と表される。ただし，$u_{ff} = C_{ff}r$ を用いた。ここで，(1) 式において $C_{ff} = P^{-1}$ とすることができれば，$y = r$ が達成されることが分かる。ところが，もし P が不安定零点を持っていると，C_{ff} が不安定極を持つことになり実装できない†。

〈2·2〉 コロケーションと連続時間系の零点配置

Fig. 2(a) に，2 自由度の Cart model を示す。制御入力は並進力 f であり，重心点より L だけ下の点に印加する。計測点は重心点より l だけ上にある。並進系と回転系の運動方程式は

$$f = m_x\ddot{x},\ \ \tau = I_\phi\ddot{\phi} + c_\phi\dot{\phi} + k_\phi\phi \cdots\cdots (2)$$

で与えられる。ただし，x と ϕ はそれぞれ重心点の並進位置と回転角である。また，τ はトルクであり，並進力との関係は $\tau = Lf$ である。また，m_x，I_ϕ，c_ϕ，k_ϕ は質量，ϕ まわりの慣性モーメント，粘性，剛性である。$\phi \simeq 0$ として線形近似すると，重心点 x と測定点 y の関係は $y = x + L - l\phi$ で与えられる。以上から，(3) 式に示す伝達関数を得る。

$$\frac{y(s)}{f(s)} = \frac{x(s)}{f(s)} - l\frac{\phi(s)}{f(s)}$$

† C_{ff} は，ノンプロパーであっても，目標軌道 r の微分値が与えられれば実装可能である。

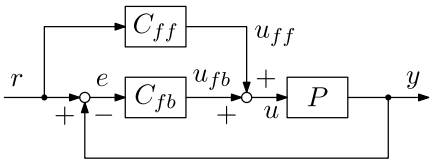
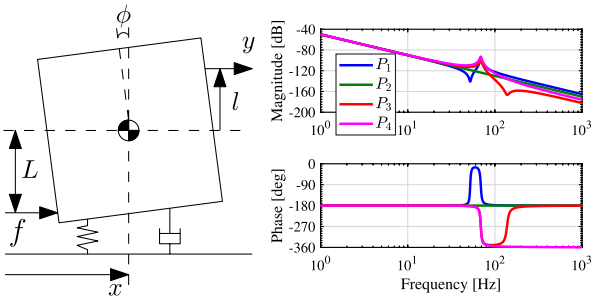


Fig. 1. Block diagram of a two degrees of freedom control.



(a) Cart model (b) Bode plot

Fig. 2. Cart model and its Bode plot.

$$= \frac{(I_\phi - Llm_x)s^2 + c_\phi s + k_\phi}{m_x s^2(I_\phi s^2 + c_\phi s + k_\phi)} \cdots\cdots (3)$$

(3) 式より，零点 (z_1, z_2) は $l \neq 0$ および $l \neq \frac{I_\phi}{Lm_x}$ のとき (4) 式で与えられ，センサ位置 l の関数となる。

$$(z_1, z_2) = \frac{-c_\phi \pm \sqrt{c_\phi^2 - 4(I_\phi - Llm_x)k_\phi}}{2(I_\phi - Llm_x)} \cdots\cdots (4)$$

Fig. 2(b) に，l を変化させた際の Bode 線図の例を示す。ただし，P_1 では $l = -0.5L$，P_2 では $l = 0$，P_3 では $l = 0.5L$，P_4 では $l = L$ とした。P_2 では，ピッチングのモードが不可観測となり，零点を持たない。P_3 では，センサ位置とアクチュエータ位置が重心点をはさんで反対側にあるノンコロケート系であるため，共振のあとに反共振があり，位相が −180 度より遅れていることが分かる。P_4 では連続時間の不安定零点を持つため，非最小位相系であることが分かる。たとえば，ステージ下部を駆動され，ステージ上部の加工対象物に対して位置決めする，液晶製造装置に使われるような精密位置決めステージは，P_2 や P_3 のような位相遅れがある場合がある。

次節では，連続時間系の零点配置と，離散時間系の零点配置の関係について述べる。

〈2·3〉 離散時間系における 2 種類の零点 制御対象そのものは連続時間系であっても，制御器がマイコンや DSP（Digital Signal Processor）により実装される場合，Fig. 3 のように制御対象を離散時間系として考える必要がある。離散時間系の制御対象が持つ不安定零点は，（1）連続時間系の零点に対応する零点である真性零点 [42]，（2）離散化により生じる離散化零点 [43]，の 2 種類に分けられる。連続時間系の零点が，Fig. 2(b) の P_4 のようにノンコロケーションにより不安定零点となった場合，真性零点は不安定となる。連続時間系に不安定零点を持つ制御対象は，精密位置決めステージ [1][24]，Hard disk drive（HDD）[44]，昇圧コンバータ [45]，

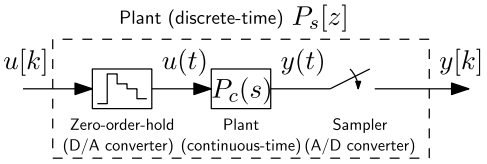
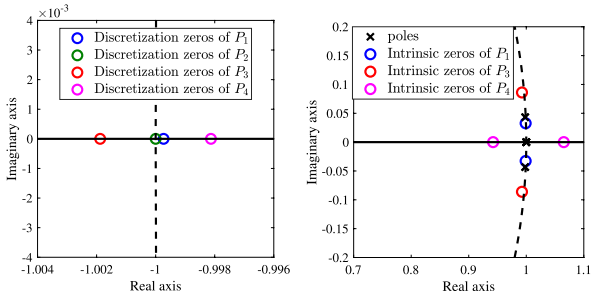


Fig. 3. Plant discretizaiton by zero-order hold.

Table 1. Zeros of Euler-Frobenius polynomial [41].

Relative order	Zeros
2	-1
3	$-2-\sqrt{3}$, $1/(-2-\sqrt{3})$
4	$-5-2\sqrt{6}$, -1, $1/(-5-2\sqrt{6})$
⋮	⋮



(a) Discretizaiton zeros (b) Poles and intrinsic zeros

Fig. 4. Pole-zero map of the cart model.

ワンパルス駆動時の永久磁石同期モータ [46] などが知られている。

連続時間系の伝達関数において不安定零点を持たない場合でも，相対次数が 2 次を超える場合は離散化零点が不安定零点になる [43]。これは Table 1 に示すように Euler-Frobenius polynomials に近似できることが知られている [41][47][48]。相対次数が 2 次の場合の離散化零点の安定性は，連続時間系における極と零点の値の合計について，以下の定理が知られている† [42]。

- 離散化零点は安定
  $\Sigma[\text{pole of } P(s)] < \Sigma[\text{zero of } P(s)]$
- 離散化零点は不安定
  $\Sigma[\text{pole of } P(s)] > \Sigma[\text{zero of } P(s)]$

すなわち，Fig. 2(a) のようにな系では，センサ位置により共振・反共振の周波数の順番が入れ替わるため，離散化零点の安定性もセンサ位置により変わることになる。Fig. 4 に，Fig. 2 の Cart model を 10 kHz のサンプリング周波数で離散化した極零点配置を示す。Fig. 4(a) から，P_3 の離散化零点は不安定，P_1，P_4 の離散化零点は安定となっている。ところが，離散化零点が安定になった場合であっても，$(-1, 0j)$ の安定限界に極めて近いところに離散化零点が生成されるため，FF 制御器としてこの逆系を取ると制御入力が極めて振動的になり，実用的には逆系を取ることが出来ない [49][50]。

次節では，不安定な真正零点，不安定な離散化零点，$(-1, 0j)$ に近い離散化零点に対して安定に逆系を取ることができる，マルチレートフィードフォワード制御法を紹介する。

〈2·4〉 マルチレートフィードフォワード制御法

マルチレートフィードフォワード制御のブロック図を Fig. 5 に示す。ただし，$\mathcal{S}$，$\mathcal{H}$，L はそれぞれサンプラ，ホールダ，リフティングオペレータ [51] をそれぞれ表す。

マルチレートフィードフォワード制御法 [52] は，連続時間系の零点と離散化零点に対し，独立に安定逆系を設計できる手法である [25]。

〈2·4·1〉 離散化零点に対する安定逆系 [52] 〈2·3〉節に述べたように，相対次数 2 次の系では $(-1, 0j)$ の付近に零点を持ち，逆系を取れない。また，3 次以上の系では，Euler-Frobenius polynomials に示されるように少なくとも一つの不安定な離散化零点を持つ。

そこでマルチレートフィードフォワード制御法では，離散時間状態方程式を n サンプル（n はプラントの次数）リフティング [51] することで安定逆系を取る。可制御な制御対象 $P_c(s)$ の伝達関数を (5) 式で定義する。$A(s)$ と $B(s)$ はそれぞれ既約の分母多項式と分子多項式である。

$$P_c(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \cdots\cdots (5)$$

$\boldsymbol{x}_d$ を追従したい状態変数軌道とすると，制御対象の離散時間状態方程式は (6) 式で与えられる。

$$\boldsymbol{x}_d[k+1] = \boldsymbol{A}_s\boldsymbol{x}_d[k] + \boldsymbol{b}_s u[k] \cdots\cdots (6)$$

ただし，T_u を制御周期とすると $\boldsymbol{x}_d[k] = \boldsymbol{x}_d(kT_u)$ である。n サンプルリフティングした系は (7) 式で与えられる。

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{x}_d[i+1] = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_d[i] + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_o[i] \\ &\boldsymbol{A} = \boldsymbol{A}_s^n,\ \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_s^{n-1}\boldsymbol{b}_s & \boldsymbol{A}_s^{n-2}\boldsymbol{b}_s & \cdots & \boldsymbol{A}_s\boldsymbol{b}_s & \boldsymbol{b}_s \end{bmatrix} \end{aligned} \cdots\cdots (7)$$

ただし，$\boldsymbol{x}_d[i] = \boldsymbol{x}_d(iT_u n)$ である。可制御であれば，$\boldsymbol{B}$ 行列は正則であるため，状態変数軌道 $\boldsymbol{x}_d$ に n サンプルごとに完全追従する制御入力 $\boldsymbol{u}_o[i]$ は (8) 式で与えられる。

$$\boldsymbol{u}_o[i] = \boldsymbol{B}^{-1}(\boldsymbol{I} - z^{-1}\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}_d[i+1] \cdots\cdots (8)$$

〈2·4·2〉 真性零点に対する安定逆系 [25][44] 指令値 r が出力 y に完全に追従するためには，状態変数軌道 $\boldsymbol{x}_d$ は，出力方程式より (9) 式を満たしている必要がある。

$$r(t) = \boldsymbol{c}_c\boldsymbol{x}_d(t) \cdots\cdots (9)$$

ただし，この出力方程式は (5) 式を可制御正準形で実現したものである。

可制御正準形の場合，状態変数が微分の関係にあるという性質を用いて，状態変数軌道 $\boldsymbol{x}_d$ は指令値 $\boldsymbol{r}$ と分子多項式の逆系 $1/B(s)$ の畳み込みにより与えられる [25][53]。そこで，連続時間系に安定零点のみを持っていれば，安定な畳み込み演算により $\boldsymbol{x}_d$ が求まり，(8) 式より安定な制御入力が計算される。本手法は Vibration suppression perfect tracking

† 絶対値でなく符号付きであることに注意。

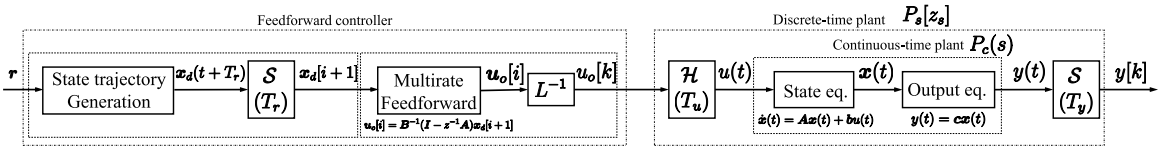


Fig. 5.　Simplified block diagram of the multirate feedforward (only feedforward path is shown).

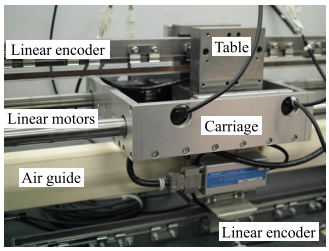


Fig. 6.　High-precision stage [25].

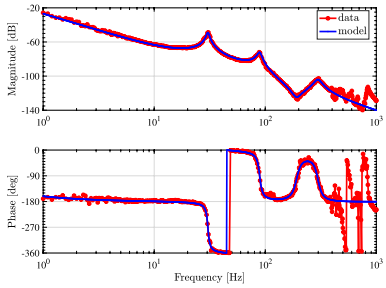
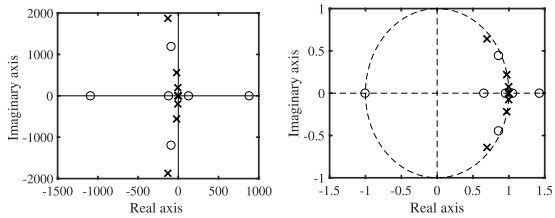


Fig. 7.　Measured frequency response and 8th order model [25].



(a) P_c　　(b) P_s

Fig. 8.　Pole-zero map of identified model. [25].

control と呼ばれ，HDD [44]や精密位置決めステージ [24]などに幅広く応用されている。

ところが，P_4 のように連続時間系に不安定な零点があると，$1/B(s)$ の畳み込み演算が不安定になり，状態変数軌道 $\boldsymbol{x}_d$ が発散する問題がある。そこで，文献 (25) で提案した Preactuated multirate feedforward control は，連続時間不安定零点（不安定な真性零点）があった場合であっても，安定な状態変数軌道を生成するように拡張した手法である。連続時間不安定零点がある場合，（1）$1/B(s)$ の安定不安定分解，（2）安定部は通常の畳み込み演算，（3）不安定部は虚軸反転し安定化されたフィルタに対して時間軸反転した目標軌道を畳み込み，再度時間軸反転，（4）安定部と不安定部の軌道を加算，することにより得られる [25]。(8) 式を適用して得られた制御入力は，時間軸反転の結果として指令値が印加される前に制御入力を印加する必要があり，これを Preactuation という。

Fig. 6 に示す実験装置は，Fig. 7 に示す周波数特性から分かる通り，不安定零点を持つ。連続時間系では，Fig. 8(a) に示すとおり実軸上に 2 つの不安定零点を持つ。さらに，離散化すると Fig. 8(b) のように $(-1, 0j)$ 付近に不安定な離散化零点を持つ。文献 (25) の手法で制御入力を印加した結果を Fig. 9 に示す。FB only は，位相余裕 37.2 度，ゲイン余裕 14.2 dB の FB 制御器のみを用いた結果である。ZPETC は Zero-phase-error tracking control [54]法，ZMETC は Zero-magnitude-error tracking control [55]を表し，離散時間系の 2 種類の不安定零点に対し同時に零位相誤差または零振幅誤差の近似を行う手法である。提案手法は，指令値が $t = 0$ に印加される前から制御入力を印加（Preactuation）をしており，結果として位置決め精度が飛躍的に向上していることが分かる。

〈2･4･3〉　関連するマルチレートフィードフォワード制御法　　文献 (25) の手法は，理論的には無限時間の Preactuation が必要であり，実用上は電流センサの分解能で打ち切っていた。有限時間の Preactuation 法として，負時間の状態変数軌道最適化を行った研究に文献 (56) がある。また，マルチレートフィードフォワード制御法は，適応制御 [57]や繰り返し制御 [58][59]へと拡張・適用されている。

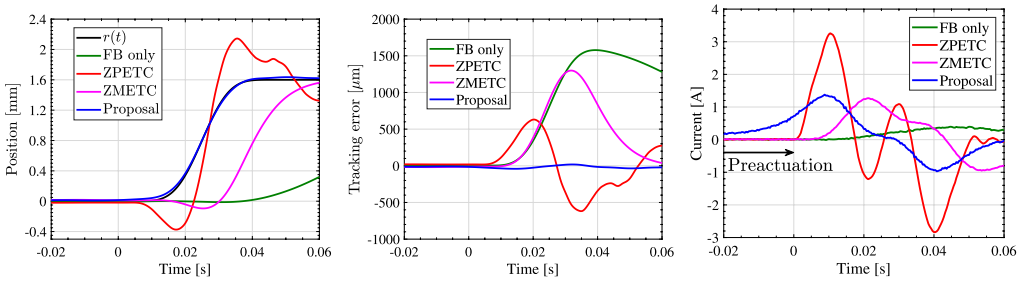
3.　高帯域な FB 制御系の構築

先に述べた通り，大型精密ステージの位置決め精度向上には，FF 制御が果たす役割は大きい。とは言え，駆動中の突発的な未知外乱に対しては FB 制御系の高帯域化は避けて通れない。本章では，FB 制御系に関する取り組みを紹介する。

〈3･1〉　モデルに基づく FB 制御系設計　　FB 制御器は他の多くの産業機器同様，PID 型の制御器を用いているが，著者らの大型超精密位置決めステージにおいては

$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{\tau_D s + 1} = \frac{b_{c2}s^2 + b_{c1}s + b_{c0}}{s^2 + a_{c1}s} \quad \cdots\cdots (10)$$

のように，微分器の時定数 τ_D も設計パラメータとして扱い，純積分器付の 2 次伝達関数に一般化した上で，剛体モデルに対して閉ループ系の極に基づき伝達関数の各係数を極配置設計している。このとき，閉ループ系の周波数特性と同時に，実制御対象と制御器からなる一巡伝達特性のベクトル軌跡（Nyquist 線図）を確認しながら，制御性能と安定性の両立を常に意識して設計を行っている。



(a) Position (b) Tracking error (c) FF+FB measured current

Fig. 9. Experiment with the stage shown in Fig. 6 [25]. 8th order nominal model is used for feedforward controller design.

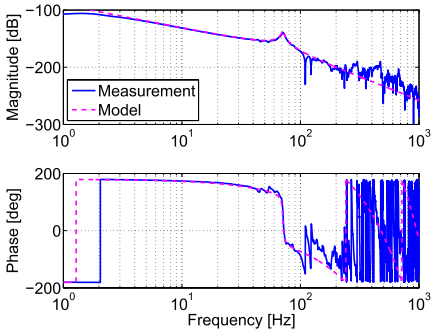


Fig. 10. Frequency responses of a large scale high precision stage.

Fig. 10 に，ある大型精密位置決めステージの周波数応答特性を示す。100 Hz 以上に存在する無数の高次共振モードを安定化させるためには，フィルタ設計は避けて通ることはできない。ロバスト安定性を考慮した上で，位相遅れがなるべく小さくなるように共振モードに対してタイトにフィルタ設計を行っている。ここで，70 Hz 付近に存在している主共振に対しては位相安定化設計 [60] を意識し，主にステージの複雑な変形モードに起因するの高次共振に対してはゲイン安定化設計を意識している。この理由は，高次共振モードは，ステージ位置により変動するなど位相の状態が一定でないためである。

〈3･2〉 複数センサを用いた FB 制御性能の向上 共振モードに対して設計されたフィルタの位相遅れが FB 制御系の高帯域化を妨げているが，その中で最も低域に存在している主共振モードに対するフィルタの位相遅れが最も影響が大きい。そこで，2 慣性（質点）系モデルで表現できる主共振モードに対して，駆動側および負荷側に配した位置センサを用いることで，位相遅れなく共振モードを位相安定化できる周波数分離自己共振相殺（Frequency Separation Self Resonance Cancellation：FS-SRC）制御技術 [26] を紹介する。

FS-SRC 制御系のブロック図を Fig. 11 に示す。$P_1(s)$ は駆動力 f から駆動側のセンサ位置 y_1 までの制御対象，$P_2(s)$ は駆動力 f から負荷側のセンサ位置 y_2 までの制御対象であり，α は定数，$F(s)$ はカットオフ周波数 f_{LPF} の 1 次ローパスフィルタ（LPF）である。

FS-SRC の特徴を説明するために，f_{LPF} を 0 にし，α を

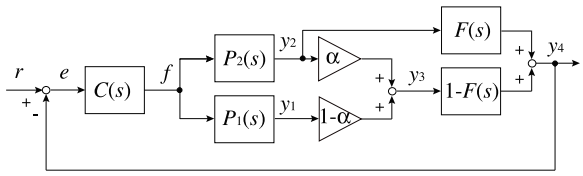


Fig. 11. Block diagram of the FS-SRC system.

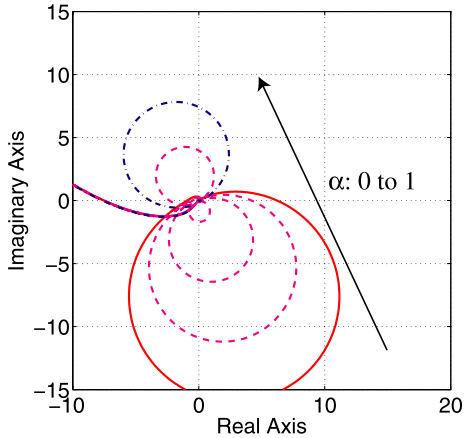


Fig. 12. Nyquist diagram of the FS-SRC system when α is variable in the range from 0 to 1 and f_{LPF} is 0.

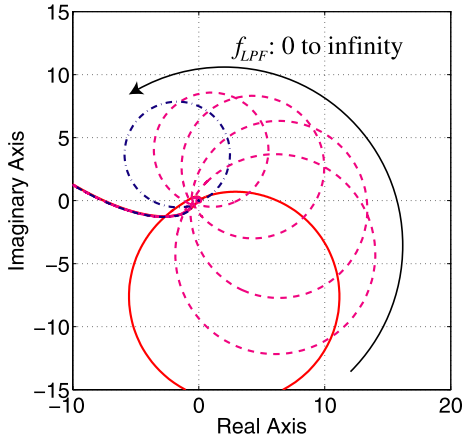


Fig. 13. Nyquist diagram of the FS-SRC system when f_{LPF} is variable in the range from 0 to infinity and α is 0.

0 から 1 まで変動させた時のナイキスト線図を，Fig. 12 に示す。また，α を 0 にし，f_{LPF} を 0 から ∞ まで変動させた時のナイキスト線図を，Fig. 13 に示す。

図から分かる通り，$P_1(s)$ および $P_2(s)$ 自身が持つ共振モード特性の間で，その共振モードの振幅と位相を自由に調節することができる。言い換えれば，制振性と位相安定化を 2 つの調整パラメータ α と f_{LPF} で同時に設計することができる。さらに，その調整は共振モードのみに対して行われ，低周波域の剛体モードの特性に影響を与えない。

SISO 系では，共振モードの位相安定化のためにはノッチ等のフィルタを用いる必要があるが，フィルタの位相遅れが低周波域の剛体モードの特性に影響を与えることは免れない。上記の特徴は，負荷側のみならず駆動側のセンサまで用いたことで得られる FS-SRC 制御系ならではの特徴と言える。

4. 新たな構造の精密位置決めステージの提案

本章では，著者らが提案した，軽量・大推力・低外乱を達成する新たなステージ構造およびモデルベース制御技術を紹介する。

〈4･1〉 カタパルトステージ　粗微動分割構造は，精密位置決め装置に広く用いられているが，以下の 2 種類が一般的である[63]。

（1） 粗微動間が機械的に接続している 2 段アクチュエータ

光ディスク[64]や HDD[65]，微動部がピエゾアクチュエータにより駆動されるステージ[66]など。粗微動間が機械的に接続している場合，長距離を移動するための推力を生み出すモータを粗動部が受け持つことになり，微動部を単純化，軽量化することができる。その結果，微動部の共振周波数が上がるため，FB ループを高帯域化させることができる[67]。しかし，機械的に接続されているため粗動部からの外乱が微動部に伝わりやすいという問題がある。

（2） 粗微動間が機械的に接続しておらず，粗微動間の接触を許さない 2 段アクチュエータ

粗微動間が機械的に接続されていない 2 段アクチュエータの例としては，微動部に磁気案内や静圧案内を用いる精密位置決めステージが挙げられ，広く用いられている[1][6]。機械的な接続がないため，粗動部からの外乱が微動部に伝わりにくいという利点がある。しかし，粗微動間を接触させないように駆動させるため，加速時において微動部にも粗動部と同等の加速度で駆動させるためのアクチュエータが必要であるため，微動部の軽量化に限界がある。

それに対し，本研究グループは Fig. 14 に示す，カタパルトステージと呼ばれる 3 種類目の分類を提案し，有用性を実証した。

（3） 粗微動間が機械的に接続しておらず，粗微動間の接触を許す 2 段アクチュエータ[68]

加速時には分類（1）の動作をし，微動部の必要推力を減少させる。さらに，精度が要求される等速運動をしている際には粗微動間が分離し，分類（2）の構成になるため，粗動部からの外乱を低減させる構成である。そのために，加速時に終端状態制御を用い整定時間を低減させる制御法[61]，リファレンスガバナを用いた突発外乱抑圧法[69]，減速時の衝突力緩和制御法[70]を提案した。

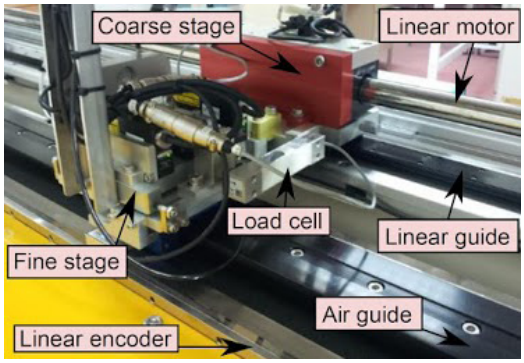


Fig. 14.　Catapult stage[61].

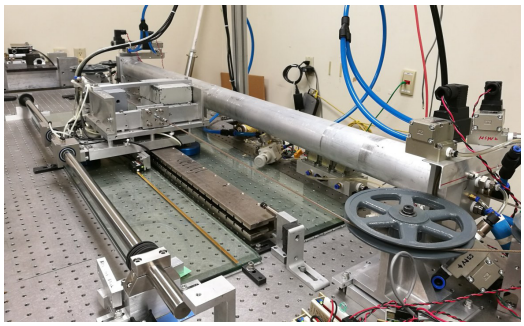


Fig. 15.　Pneumatically actuated stage[62].

〈4･2〉 空気圧アクチュエータの粗動ステージへの適用

大型化が進んでいる液晶製造装置のステージであるが，近年は大型化が頭打ちである。さらなる大型化のためには，粗動ステージの軽量化が必要であるが，通常使われるリニアモータを，軽量・大推力・低価格の空気圧アクチュエータに置き換えることを提案する。ところが，Fig. 15 に示すような空気圧アクチュエータは，バルブの非線形性，遅延，位置依存の共振の問題がある。著者らはこれらの問題に対し，高速流量計を用いた 2 自由度制御および適応同定[71]，修正スミス法[72]，ダンピングを考慮した波動相殺フィルタ[62]を提案し，高速高精度な流量制御・圧力制御・位置制御を達成した。

〈4･3〉 ワイヤレス給電多軸精密位置決めステージ

Moving coil リニアモータは軽量であるが，ケーブルが必要である一方で，Moving magnet リニアモータはケーブルが不要であるが大重量になるというトレードオフがある。これを抜本的に解決するステージ構造として，Wireless High Precision Stage を提案[74]した。さらに，Fig. 16 に示すように，粗動 X 軸・Y 軸，微動 X 軸を持つ多軸ステージであっても，多段階給電により実現可能なことを示し，ケーブル外乱も大幅に低減された[73]。

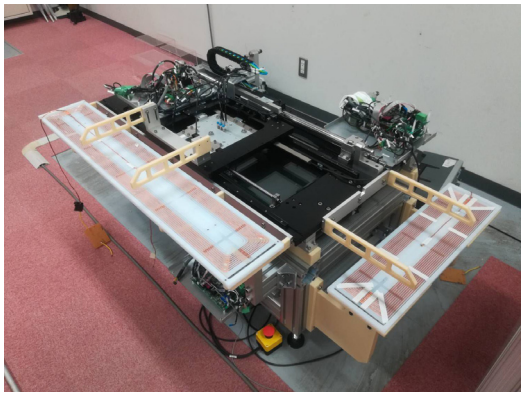


Fig. 16. Wireless high-precision stage [73].

5. まとめ

本稿では，大型超精密位置決めステージのモデルベースト制御技術について著者らの取り組みを中心として概説した。大型精密位置決めステージは，低周波の共振モードのために，通常の構成では FB 帯域の高帯域化は困難である。そのため，制御対象をモデル化し，その正確な逆系による FF 制御により目標値追従性能を確保することが重要である。センサ・アクチュエータのノンコロケーションにより，連続時間系に不安定零点を持つ場合であっても，マルチレートフィードフォワード制御と Preactuation を使えば追従性能が大幅に向上させられることを紹介した。

さらに，モデルベースの FB 制御系設計の重要性を述べた。単なるゲイン調整ではない，極配置による FB 制御器設計や位相余裕を意識したフィルタ設計，Nyquist 線図による制御性能と安定性のトレードオフ設計は，古典制御理論の基本であるが，精密位置決めステージの制御においてもいまだ威力を発揮することを強調しておきたい。

大型・大重量のステージの性能上限は，線形制御の原理的制約条件 [75] によりある水準以上の性能向上は困難となる。そのため，新たなステージ構造も野心的に研究されており，新たな粗微動ステージであるカタパルトステージ，空気圧アクチュエータによる精密制御技術，ワイヤレス給電技術を用いた軽量・低外乱のステージ構造の提案を紹介した。

文　献

（1） H. Butler: “Position Control in Lithographic Equipment”, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol.31, No.5, pp.28–47 (2011)

（2） S. Ozawa: “The Current Lithography Technologies of the LCD Exposure System”, *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. C*, Vol.J84-C, No.12, pp.1227–1231 (2001) (in Japanese)
小澤眞二：「液晶ディスプレイ用リソグラフィー技術の現状」, 信学論 C, Vol.J84-C, No.12, pp.1227–1231 (2001)

（3） A.J. Hazelton, S. Wakamoto, S. Hirukawa, M. McCallum, N. Magome, J. Ishikawa, C. Lapeyre, I. Guilmeau, S. Barnola, and S. Gaugiran: “Double-patterning requirements for optical lithography and prospects for optical extension without double patterning”, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, Vol.8, No.1 (2009)

（4） G. Moore: “Cramming more components onto integrated circuits”, *Electronics Magazine*, Vol., pp.114–117 (1965)

（5） K. Suwa, K. Kaise, H. Tateno, and N. Magome: “Optical displacement metrology using alternating direction Moire”, *Optical Engineering*, Vol.53, No.8, p.084101 (2014)

（6） K. Sakata, H. Fujimoto, A. Hara, T. Ohtomo, and K. Saiki: “Design Fabrication and Control of 4-DOF High-Precision Stage”, in *11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.366–370 (2010)

（7） M.F. Heertjes: “Variable Gains in Motion Control of Wafer Scanners”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.5, No.2, pp.90–100 (2016)

（8） S. Wakui: “Control Embedded in Semiconductor Exposure Apparatus”, *Journal of the Society of Mechanical Engineers*, Vol.103, No.977, pp.250–253 (2000) (in Japanese)
涌井伸二：「半導体露光装置の制御」, 日本機械学會誌, Vol.103, No.977, pp.250–253 (2000)

（9） K. Sakata, H. Fujimoto, A. Hara, and K. Saiki: “Design fabrication of high-precision stage and ultrahigh-speed nanoscale positioning”, in *American Control Conference*, pp.2254–2259 (2009)

（10） W. Ohnishi, H. Fujimoto, K. Sakata, K. Suzuki, and K. Saiki: “Design and Control of 6-DOF High-Precision Scan Stage with Gravity Canceller”, in *American Control Conference*, pp.997–1002 (2014)

（11） R.M. Schmidt, G. Schitter, A. Rankers, and J.V. Eijk: *The Design of High Performance Mechatronics: High-Tech Functionality by Multidisciplinary System Integration*. IOS Press (2014)

（12） 柴崎祐一：「半導体用露光装置における精密位置決め技術」, 機械設計, Vol.50, No.8, pp.36–41 (2006)

（13） W. Ohnishi, H. Fujimoto, K. Sakata, K. Suzuki, and K. Saiki: “Decoupling Control Method for High-Precision Stages using Multiple Actuators considering the Misalignment among the Actuation Point, Center of Gravity, and Center of Rotation”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.5, No.2, pp.141–147 (2016)

（14） M. Binnard: “Planar motor with linear coil arrays”, *United States Patent*, No.US6452292 (2002)

（15） J.M.M. Rovers, J.W. Jansen, J.C. Compter, and E.A. Lomonova: “Analysis method of the dynamic force and torque distribution in the magnet array of a commutated magnetically levitated planar actuator”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.59, No.5, pp.2157–2166 (2012)

（16） Y. Choi and D. Gweon: “A high-precision dual-servo stage using halbach linear active magnetic bearings”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.16, No.5, pp.925–931 (2011)

（17） A. Peijnenburg, J. Vermeulen, and J. van Eijk: “Magnetic levitation systems compared to conventional bearing systems”, *Microelectronic Engineering*, Vol.83, pp.1372–1375 (2006)

（18） W. Ohnishi, H. Fujimoto, Y. Hori, K. Sakata, K. Suzuki, and K. Saiki: “Attitude Control Method for High-Precision Stage by Compensating Nonlinearity and Coupling of Euler’s Equation and Rotational Kinematics”, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol.134, No.3, pp.293–300 (2014) (in Japanese)
大西　亘・藤本博志・堀　洋一・坂田晃一・鈴木一弘・佐伯和明：「超精密ステージにおけるオイラーの運動方程式と物体座標系の回転の非線形性と軸間干渉を補償した姿勢制御法」, 電学論 D, Vol.134, No.3, pp.293–300 (2014)

（19） Y. Yagisawa, M. Hirata, M. Suzuki, and S. Maruyama: “Control System Design of FPD Exposure Apparatus by Taking Account of Coupling between Axes”, in *The Proceedings of the Symposium on the Motion and Vibration Control*, No.15, pp.178–181 (2015) (in Japanese)
八木澤悠太・平田光男・鈴木雅康・圓山智史：「FPD 露光装置の軸間干渉を考慮した制御系設計」,「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, No.15, pp.178–181 (2015)

（20） K. Saiki: “Call me Mr. Control Guy!”, *SYSTEMS, CONTROL AND INFORMATION*, Vol.52, No.12, pp.463–466 (2008) (in Japanese)
佐伯和明：「制御屋と呼ばれたい」, システム/制御/情報：システム制御情報学会誌, Vol.52, No.12, pp.463–466 (2008)

（21） 御手洗冨士夫・市川潤二・磯端純二・鈴木章義・筒井慎二・河野道生：「高生産性大型液晶パネル露光装置」, 第 3 回新機械振興賞受賞者業績概要, pp.13–16 (2005)

（22） K. Sakata: “FPD Exposure System and Precision Servo Technology”, *The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol.137, No.1, pp.19–22 (2017) (in Japanese)
坂田晃一：「FPD 露光装置と精密サーボ技術」, 電学誌, Vol.137, No.1, pp.19–22 (2017)

（23） K. Sakata, H. Fujimoto, T. Shimoyama, and K. Saiki: “Improvement of fast and precise positioning of large-scale high-precision step-stage based on vibration suppression PTC”, in *33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.339–344 (2007)

（24） K. Saiki, A. Hara, K. Sakata, and H. Fujimoto: “A Study on High-Speed and High-Precision Tracking Control of Large-Scale Stage Using Perfect Tracking Control Method Based on Multirate Feedforward Control”, *IEEE*

Transactions on Industrial Electronics, Vol.57, No.4, pp.1393–1400 (2010)
(25) W. Ohnishi, T. Beauduin, and H. Fujimoto: "Preactuated Multirate Feedforward Control for Independent Stable Inversion of Unstable Intrinsic and Discretization Zeros", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.24, No.2, pp.863–871 (2019)
(26) K. Sakata, H. Asaumi, K. Hirachi, K. Saiki, and H. Fujimoto: "Self Resonance Cancellation Techniques for a Two-Mass System and Its Application to a Large-Scale Stage", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.3, No.6, pp.455–462 (2014)
(27) W. Ohnishi: "Data-based feedback controller tuning utilizing collocated and non-collocated sensors", in *Joint 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems and 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, pp.560–565 (2019)
(28) W. Ohnishi, H. Fujimoto, K. Sakata, K. Suzuki, and K. Saiki: "Integrated Design of Mechanism and Control for High-Precision Stages by the Interaction Index in the Direct Nyquist Array Method", in *American Control Conference*, pp.2825–2830 (2015)
(29) M. Heertjes and A. Van Engelen: "Minimizing cross-talk in high-precision motion systems using data-based dynamic decoupling", *Control Engineering Practice*, Vol.19, No.12, pp.1423–1432 (2011)
(30) K. Sakata, H. Fujimoto, T. Ohtomo, and K. Saiki: "Auto Focus and Leveling Control of Large-Scale High-Precision Scan-Stage Using Driving Force and Surface Shape of the Stage", *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol.129, No.6, pp.564–570 (2009) (in Japanese)
坂田晃一・藤本博志・大友　剛・佐伯和明：「ステージ駆動力と表面形状を用いた大型超精密スキャンステージのオートフォーカス/レベリング制御」, 電学論 D, Vol.129, No.6, pp.564–570 (2009)
(31) M. Beijen, B. Cong, and M. Heertjes: "Design and performance tradeoffs in MIMO disturbance feedforward control", in *5th International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.443–448 (2018)
(32) N. Hirayanagi, T. Fujiwara, K. Hada, T. Shimoda, and K. Suzuki: "Nikon EB stepper: its system design and preliminary performance", Vol.5037, pp.504–511 (2003)
(33) K. Sakata and H. Fujimoto: "Master-slave synchronous position control for precision stages based on multirate control and dead-time compensation", in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.263–268, IEEE (2009)
(34) P.-H. Yang, K. Hirano, and M. Yuasa: "Synchronization control devices and methods", *United States Patent*, No.US20120319637A1 (2011)
(35) M.F. Heertjes, B. Temizer, and M. Schneiders: "Self-tuning in master-slave synchronization of high-precision stage systems", *Control Engineering Practice*, Vol.21, No.12, pp.1706–1715 (2013)
(36) S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki: "Bettering Operation of Robots by Learning", *Journal of Robotic Systems*, Vol.1, No.2, pp.123–140 (1984)
(37) H. Hashimoto, P.-H. Yang, and K. Hirano: "Precision and Settling Time Improvement for the Wafer Stage of Lithography Scanners with Iterative Learning Control", in *1st International Conference on Positioning Technology*, pp.91–96 (2004)
(38) J. van Zundert and T. Oomen: "On inversion-based approaches for feedforward and ILC", *Mechatronics*, Vol.50, No.September, pp.282–291 (2018)
(39) P.-H. Yang and S.-L. Koo: "Control systems and methods applying iterative feedback tuning for feed-forward and synchronization control of microlithography stages and the like", *United States Patent*, No.US20100222898 (2013)
(40) M.F. Heertjes, B.V.D. Velden, and T. Oomen: "Constrained Iterative Feedback Tuning for Robust Control of a Wafer Stage System", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.24, No.1, pp.56–66 (2016)
(41) T. Sogo: "Inversion of sampled-data system approximates the continuous-time counterpart in a noncausal framework", *Automatica*, Vol.44, No.3, pp.823–829 (2008)
(42) T. Hagiwara, T. Yuasa, and M. Araki: "Stability of the limiting zeros of sampled-data systems with zero-and first-order holds", *International Journal of Control*, Vol.58, No.6, pp.1325–1346 (1993)
(43) K. Åström, P. Hagander, and J. Sternby: "Zeros of sampled systems", *Automatica*, Vol.20, No.1, pp.31–38 (1984)
(44) H. Fujimoto, K. Fukushima, and S. Nakagawa: "Vibration suppression short-span seeking of HDD with multirate feedforward control", in *American Control Conference*, pp.582–587 (2006)
(45) R.W. Erickson and D. Maksimovic: *Fundamentals of Power Electronics*, Springer (2011)
(46) T. Miyajima, H. Fujimoto, and M. Fujitsuna: "A Precise Model-Based Design of Voltage Phase Controller for IPMSM", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.28, No.12, pp.5655–5664 (2013)
(47) F. Dubeau and J. Savoie: "On the roots of orthogonal polynomials and Euler-Frobenius polynomials", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol.196, No.1, pp.84–98 (1995)
(48) S.R. Weller, W. Moran, B. Ninness, and A.D. Pollington: "Sampling zeros and the Euler-Frobenius polynomials", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.46, No.2, pp.340–343 (2001)
(49) K.L. Moore, S.P. Bhattacharyya, and M. Dahleh: "Capabilities and limitations of multirate control schemes", *Automatica*, Vol.29, No.4, pp.941–951 (1993)
(50) T. Sogo and M. Joo: "Design of Compensators to Relocate Sampling Zeros of Digital Control Systems for DC Motors", *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.5, No.5, pp.283–289 (2012)
(51) T. Chen and B.A. Francis: *Optimal Sampled-Data Control Systems*. Springer London (1995)
(52) H. Fujimoto, Y. Hori, and A. Kawamura: "Perfect tracking control based on multirate feedforward control with generalized sampling periods", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.48, No.3, pp.636–644 (2001)
(53) H. Fujimoto, Y. Hori, and A. Kawamura: "Perfect Tracking Control Method Based on Multirate Feedforward Control", *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.36, No.9, pp.766–772 (2000) (in Japanese)
藤本博志・堀　洋一・河村篤男：「マルチレートフィードフォワード制御を用いた完全追従制御法」, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.9, pp.766–772 (2000)
(54) M. Tomizuka: "Zero phase error tracking algorithm for digital control", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.109, pp.65–68 (1987)
(55) J. Wen and B. Potsaid: "An experimental study of a high performance motion control system", in *American Control Conference*, Vol.6, pp.5158–5163 (2004)
(56) W. Ohnishi, T. Beauduin, and H. Fujimoto: "Finite Time Optimal Preactuation for Non-Minimum Phase Systems Considering Control Input and Tracking Error Constraints", in *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, pp.1114–1119 (2018)
(57) H. Fujimoto and B. Yao: "Multirate adaptive robust control for discrete-time non-minimum phase systems and application to linear motors", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.10, No.4, pp.371–377 (2005)
(58) H. Fujimoto: "Robust Repetitive Perfect Tracking Control of HDDs Based on Re-learning Scheme", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.2, No.1, pp.40–47 (2013)
(59) H. Fujimoto and T. Takemura: "High-precision control of ball-screw-driven stage based on repetitive control using n-times learning filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.61, No.7, pp.3694–3703 (2014)
(60) T. Atsumi, T. Arisaka, T. Shimizu, and T. Yamaguchi: "Vibration Servo Control Design for Mechanical Resonant Modes of a Hard-Disk-Drive Actuator", *JSME International Journal Series C*, Vol.46, No.3, pp.819–827 (2003)
(61) Y. Yazaki, H. Fujimoto, Y. Hori, K. Sakata, A. Hara, and K. Saiki: "Method to Shorten Settling Time Using Final State Control for High-Precision Stage with Decouplable Structure of Fine and Coarse Parts", *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol.135, No.3, pp.227–236 (2015) (in Japanese)
矢崎雄馬・藤本博志・堀　洋一・坂田晃一・原　篤史・佐伯和明：「粗微動間連結分離機構を有する精密位置決めの終端状態制御法を用いた整定時間短縮法」, 電学論 D, Vol.135, No.3, pp.227–236 (2015)
(62) W. Ohnishi, H. Fujimoto, P.-H. Yang, P.-W. Chang, B. Yuan, K. Sakata, and A. Hara: "Acoustic Wave Equation Based Modeling and Collocated Side Vibration Cancellation for Pneumatic Cylinder", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.7, No.2, pp.109–116 (2018)
(63) 藤本博志・矢崎雄馬：「粗微動間連結分離機構を有する新たな精密位置決めステージの制御法」, 電学技報「ナノスケールサーボのための革新的な制御技術」, Vol.1347, pp.44–49 (2015)
(64) J. Yang and X. Pei: "Seek time and trajectories of time optimal control for a dual stage optical disk drive actuator", *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol.32, No.5, pp.3857–3859 (1996)
(65) K. Mori, T. Munemoto, H. Otsuki, Y. Yamaguchi, and K. Akagi: "A dual-stage magnetic disk drive actuator using a piezoelectric device for a high track density", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.27, No.6, pp.5298–5300 (1991)
(66) S.-W.K. Chang-Woo Lee: "An ultraprecision stage for alignment of wafers in advanced microlithography", *Precision Engineering*, Vol.21, No.2, pp.113–122 (1997)
(67) D. Verscheure, B. Paijmans, H. Van Brussel, and J. Swevers: "Vibration and motion control design and trade-off for high-performance mechatronic systems", in *IEEE International Conference on Control Applications*, pp.1115–1120 (2006)
(68) K. Tokuyama, H. Fujimoto, D. Yumiza, and K. Saiki: "Proposal of reducing impact force control system for scan stage with decouplable structure of coarse and fine parts", in *IEEE International Conference on Mechatronics*, pp.810–815, IEEE (2013)

（69） Y. Yazaki and H. Fujimoto: “Sudden Disturbance Suppression Control Considering Constraints for High-Precision Stage Using Reference Governor”, in *American Control Conference*, pp.6195–6200 (2016)

（70） Y. Yazaki, H. Fujimoto, K. Sakata, A. Hara, and K. Saiki: “Reduction of impact force by model prediction and final-state control for a high precision catapult stage”, in *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.5101–5106, IEEE (2016)

（71） Y. Shirato, W. Ohnishi, and T. Koseki: “Two-Degree-of-Freedom Control with Adaptive Dead Zone Compensation for Pneumatic Valves”, in *SAMCON2019*, pp.1–6 (2019)

（72） W. Ohnishi, H. Fujimoto, K. Sakata, A. Hara, and K. Saiki: “Trajectory Tracking Control for Pneumatic Actuated Scan Stage with Time Delay Compensation”, in *42nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, pp.5125–5130 (2016)

（73） Y. Yazaki, W. Ohnishi, T. Imura, H. Fujimoto, A.H. Koichi Sakata, Z. Chen, K. Yokoyama, and K. Suzuki: “Evaluation of Disturbance Caused by Cable Tension in Multi-axis High-Precision Stage using Wireless Power Transfer”, *SAMCON2019*, pp.1–6 (2019)

（74） Y. Yazaki, T. Nishimura, W. Ohnishi, T. Imura, and H. Fujimoto: “Moving Coil Type Wireless Linear Motor based on Magnetic Resonance Coupling”, in *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.7288–7293 (2017)

（75） S. Skogestad and I. Postlethwaite: *Multivariable feedback control: analysis and design*. Wiley (2005)

大　西　　亘

（正員） 2013 年 3 月東京大学工学部電気電子工学科卒業。2015 年 3 月同大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻修士課程修了。2018 年 3 月同大学大学院工学系研究科電気系工学専攻博士課程修了。同年 4 月より東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻の助教となり現在に至る。モーションコントロールに関する研究に従事。計測自動制御学会，IEEE 会員。

藤　本　博　志

（上級会員） 2001 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。博士（工学）。同年長岡技術科学大学工学部電気系助手。2002 年～2003 年，米国 Purdue 大学工学部機械工学科客員研究員。2004 年横浜国立大学大学院工学研究院講師。2005 年同助教授，2007 年同准教授。2010 年東京大学大学院准教授。制御工学，モーションコントロール，マルチレート制御，ナノスケールサーボ，電気自動車の運動制御，モータとインバータの高性能制御，ビジュアルサーボ，ワイヤレスモータに関する研究に従事。2001 年および 2013 年 IEEE Transactions on Industrial Electronics 最優秀論文賞，2010 年 Isao Takahashi Power Electronics Award, 2010 年計測自動制御学会著述賞，2016 年永守賞大賞などを受賞。電気学会および IEEE の上級会員。計測自動制御学会，日本ロボット学会，自動車技術会各会員。

坂　田　晃　一

（上級会員） 2006 年 横浜国立大学工学部電子情報工学科卒業。2008 年 同大学大学院工学府物理情報工学専攻博士課程前期（修士課程）修了。2009 年 4 月より 2 年間，日本学術振興会特別研究員（DC2）。2010 年 4 月より 1 年間，東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻特別研究学生。2011 年 横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻博士課程後期（博士課程）修了。同年 （株）ニコンに入社。博士（工学）。制御工学，精密位置決めステージの制御技術開発に従事。