

超精密高速ステージの開発

小坂光二^{1、2、12)}、岩淵哲也^{1、2)}、馬場哲朗^{1、2)}、奥寺智^{1、2)}、
宮田昇³⁾、渡辺雅幸³⁾、石井守³⁾、森山司郎⁴⁾、佐々木俊一⁴⁾、
荒尾淳⁵⁾、井上知行⁵⁾、高木宏司⁵⁾、江頭義也⁶⁾、遠藤泰史⁷⁾、橋口弘幸⁸⁾、
橋本誠司⁹⁾、大石潔¹⁰⁾、魚住清彦¹¹⁾、古川博之¹²⁾、中田明良¹²⁾、久保田弘¹²⁾、大見忠弘¹³⁾

- 1) (有)熊本テクノロジー、 2) (株)東京テクノロジー、 3) 太平洋セメント(株)、
4) (株)日本セラテック、 5) (株)アラオ、 6) ザイゴ(株)、
7) 済生会熊本病院、 8) (株)村田製作所、 9) 群馬大学 工学部、
10) 長岡技術科学大学 電気電子情報工学課程、 11) 青山学院大学 理工学部、
12) 熊本大学大学院 自然科学研究科、 13) 東北大学 未来科学技術共同研究センター

1. はじめに

半導体に対する市場要求が、多様化かつ高機能化してきていることを受け、半導体製造装置全般に対して急激な技術革新が要求されている。熊本県地域結集型共同研究事業は、ITRSから予想される技術的ハードルや半導体製造現場での問題点に対するソリューションを確立するために1999年9月にスタートした。

我々研究グループは、検査装置や製造装置における長寸法精度の基準である超精密高速ステージの開発をテーマとし、その研究中心は、圧電素子を応用した「非共振型超音波モータ：NRUSM」の開発を主軸とした。

ステージシステムとして達成すべき技術課題は、超高精度と高速度の両立、ワークサイズの移行に影響されない将来を見越した機構系の確立、精度とコストのトレードオフの克服、など多方面にわたる。

本稿では、この共同研究事業におけるこれまでの5年間の開発成果とともに、本最終年度の取り組みならびに進捗状況や、それ以降の事業化計画を報告する。

2. これまでの成果

プロジェクトにおける研究開発は、以下の数値目標を挙げて開始した。

・軸構成	X-Y 2軸
・有効駆動範囲	300mm × 300mm
・最高速度	300mm/s
・位置決め精度	±10nm

それに対して、この5年間の研究開発における成果を、12インチ対応XYステージにおける性能としてまとめる。(表1)

基本となるステージ部はアルミナセラミックス(Al_2O_3)製であり、ステージ幾何精度を決定するガイドレールもアルミナセラミックス製である。これは大型化するワークサイズに対応してステージが大型化した際の問題点である自重たわみや高加速度によるひずみに対する材料面での対策である。高精度加工と調整を施したこのステージは、12インチ全域で姿勢精度 $\pm 1\text{sec}$ 以内を達成している。そして、走りに対するZ変動も $\pm 3\mu\text{m}$ 以内である。上記ステージにおける動性能は、最高速度150mm/s、位置決め分解能0.6nmを達成している。また、駆動速度評価用4インチステージでは、最高速度360mm/s、平均加速度0.44Gなどの性能に達

している。つまり、姿勢などの静的精度と共に移動速度を除いた他の動性能における項目は全て満たした。

3. 今年度の取り組み

超精密高速ステージの開発は、大きく分けて3つの研究グループにより構成されている。これまでの取り組みで明らかになった問題点を個々のグループが専任的に取り組める体制とするためである。(図1)

・ ステージグループ

初年度から3年度までは、無垢のアルミナセラミックスによるステージ試作を行ってきた。4年度には、基本ステージの持つ剛性や精度特性を維持した上で、中抜き型セラミックス焼成技術により1/2の軽量化を達成した。本年度はハニカム構造型焼結技術により1/3の軽量に取り組んでいる。

この成果は、ワークサイズが12インチ以上に変遷した際にも駆動系に負担をかける事なく機構系を構成できる大型化傾向を支える中核技術となる。

・ 圧電素子グループ

12インチステージにおける加速度ならびに最高速度を0.5G、300mm/s以上に引き上げる為に、圧電アクチュエータの発生力と変位量をそれぞれ10倍以上、3倍以上引き出せるようにする。その際の技術的課題としては、電界強度増大のための素子薄板化、薄板素子の高積層化技術、共振現象までをも見込んだ動性能の共存などである。また、本年度以降の事業化を睨んだ製造工程の見直しも実施する。

・ 制御グループ

実用化での要となる高耐久性化と高精度専用制御系の開発を平行して行う。具体的には、摩擦駆動における摩耗レートの低減化を材料面と制御ソフトとの融合により実現するアプローチを取る。

また、その上位に位置する制御理論とし

て、動性能を極限まで向上させる為のロバスト制御系開発を行う。

次章からは制御グループとしてのこれまでの研究成果を報告する。

4. 耐久性

本研究により開発したステージシステムを製造装置に実用化するには、長期間の性能安定性が最も重要となる。NRUSMを含め、接触型アクチュエータは一般的には高精度型ではあるが、高速・高加速度駆動と融合させ実用化した製品は殆ど無い。これはアクチュエータの変位伝達に重要な役割を果たしている「摩擦力」を概念的に知る事で理解できる。

高速・高加速度駆動を得るためには、発生した変位を効率よく伝達することが必要であり、それには高い摩擦係数の材料を組合せて用いるのが有効である。しかしながら、このような材料の組合せでは摺動時に強烈な摩耗が発生する。つまり、接触型アクチュエータにおいては、高速・高加速度駆動と高耐久性の実現は、物理法則上では二律背反となる。

これらを乗り越える為に行ってきた研究成果を以下に報告する。

4-1. 大気中における連続走行試験

第1技術シンポジウムにおいて、(株)日立製作所 計測機器事業部(現:(株)日立ハイテクノロジーズ)所属の大高 正氏が開発を手がけているCD-SEMに関する基調講演をされた。その際に、我々が開発するステージシステムへの技術的課題として、摩耗に対する懸念と装置への導入観点から、走行耐久性の指針として200kmの連続安定性確保との数値目標を提示された。以下がその試算である。

- ・ 12インチウェハー上で3点計測時の1軸当たりの最大積算走行距離 = 600mm
- ・ 1時間当たりの処理枚数 = 40枚

$$\begin{aligned} \text{年間走行距離} &= 600 \times 40 \times 24 \times 365 \text{mm} \\ &= 210,240,000 \text{mm} \end{aligned}$$

$$= 210.24 \text{ km}$$

耐久試験の駆動速度プロファイルを図 2 に示す。制御には PID + 速度フィードフォワード構成の演算フィルターを使用し、軌道発生部においては、最高速度 50mm/s 、加速度 80mm/s^2 の速度パターンを生成させ、台形型速度プロファイルによりステージ駆動を行った。なお、アクチュエータの予圧力は 30N 、駆動周波数は 25kHz とした。

まず、アクチュエータに使用している圧電素子の特性劣化について評価した。評価方法としては、軌道発生部分が生成する速度要求に対する制御フィルター出力を比較パラメータとした。200km 連続走行の試験前後の制御フィルター出力を比較したところ、データには僅かな変化分はあるものの、全体としてはほぼ同等であり圧電アクチュエータの劣化の兆候は見られていない。つまり、素子の劣化は殆ど無いと見込まれる。新たに開発された誘電正接値が非常に小さな低損失圧電材料の効果が十分に確認された。

また、摩耗に関しては、接触部の摩耗量計測により評価した。ガイドプレートのアクチュエータ接触部分には図 3 に示すような摺動痕が確認されており、明らかな変化が見られた。図 4 は実験で使用したガイドプレート表面（測定ライン x-x'）における深さ方向の断面プロファイル（測定器：WYKO NT3300）と、制御フィルター出力を重ね合わせたグラフである。NRUSM の先端部分材料には（株）日本セラテック製ポアフリーアルミナセラミックスを、ガイドプレートには同社製アルミナセラミックス（99.5%）を使用している。等速度領域での摩耗深さが約 50nm であるのに対し、往復運動のために駆動方向が反転する起動/停止部分は最大 110nm の摩耗が確認された。伸縮素子の最大変位量が約 500nm であることを考慮し、それに対する摩耗許容量を 60% と仮定すると、現状の摩耗レートでは約 600km が走行限界と判断される。

大気中における 200km の連続走行試験から、NRUSM の実用化に最も影響を与えるのは、摺

動部分の摩耗であり、その摩耗レートを如何に抑えるかが長時間安定駆動を実現するための課題であると判明した。

4 -2 . 真空中における連続走行試験

LSIの製造プロセス、評価環境が次第に真空環境へと移行しており、本研究で開発しているステージシステムを真空環境に適合させることは、多分野での実用上重要である。

真空中での耐久試験では、ドライ系排気システム（構成：ロータリーポンプ、フォアライントラップ、ターボ分子ポンプ）を装備した評価用チャンバを用いて真空駆動試験（到達真空度： $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ ）を実施した。駆動評価条件としては予圧力 / 駆動周波数 / 速度プロファイルは大気中 200km 連続走行試験と同様とし、ガイドプレートにはポアフリーアルミナを用いた。

真空装置に应用する際に、最初に問題となるのが発熱である。熱輻射による温度拡散が無い真空内では、熱伝導はあるものの発熱により温度は上昇する一方である。図 5 は真空排気した際のアクチュエータ表面の発熱を計測（計測器：林電工 セラミック白金薄膜素子 Pt100Ω）したものであるが、減圧と共に温度上昇が確認され、到達真空度付近では 38°C に達している。より低損失な圧電材料の開発と放熱経路の確保が課題の一つである。

図 6 はワイパーの有無による制御フィルター出力の比較（ワイパー無し：0~1.5時間、ワイパー有り：0~400時間）をしたものである。ワイパー無しの場合は、特に負方向における等速度駆動領域の電圧が時間と共に上昇（駆動状態が悪化）し、約 1.5時間（概算走行距離 0.7km ）でステージ駆動が不可能となった。大気開放後、ガイドプレート表面の観察を行ったところ、大気中駆動で発生していた粉塵堆積とは異なり、粘性のある物質堆積が確認され、ワイパーによる状況改善が見込まれた。ワイパー装着時の制御フィルター出力は、等速度駆動領域では起こっておらず安定した駆動を実現することが出来た。一方で、長時間駆動に伴い停止部分においては制御フィルター出力の変動が確認され、

起動 / 停止部分の接触状態が変化していることが明らかとなり、結果として、真空中での駆動試験は連続走行距離 54.5km で駆動が全く不可能な状況に至った。

図7はガイドプレート表面にある4本の摺動痕のうち、1ラインの起動 / 停止部分近傍の3次元プロファイル(測定器: WYKO NT3300を示したものである。図中、中央の大きな窪みを境に、左半面はアクチュエータが走行していない領域、右半面が走行領域となる。この3次元プロファイルから駆動方向($x-x'$: 横方向)と、それに直交した走行領域($y-y'$: 縦方向)の断面プロファイルを図8に示す。 $x-x'$ ラインの断面プロファイルより起動 / 停止部分には約95nmの摩耗が発生しているが、この領域から僅かに離れた走行領域では断面プロファイルは正、すなわち摩耗ではなく、何らかのものが堆積していることを示している。このことは $y-y'$ ラインの断面プロファイルから、より正確に判断できるが、アクチュエータがガイドプレート表面に接触した部分が、そうでない部分に比べ、より高いことを示している。大気中の駆動では全領域において摩耗が発生していたのに対し、真空中での駆動では、起動 / 停止部分にのみ摩耗が発生、更にはアクチュエータが走行した領域は堆積物により周囲よりも高くなっており、全く異なる現象が起きていることが明らかとなった。

また、アクチュエータ先端チップにおいても大気中駆動とは異なる現象が発生している。図9は真空中での駆動試験前後の先端チップ表面の断面プロファイル(測定器: Keyence VK8510)を示したものであるが、54.5kmの真空内での駆動により、表面粗さが大きく増していることが分かる。駆動開始前は $Ra=0.4\mu\text{m}$ であったものが、駆動後は $Ra=3.3\sim 4.3\mu\text{m}$ となっている。なお、大気中での200km連続走行後の表面粗さは駆動開始時と殆ど変化していない。

以上より、真空内での耐久性を向上させるには、摺動材料の選定を含め、これらのメカニズムの解明が今後の大きな課題である。

5 . 摩耗低減技術

これまでの大気中ならびに真空中での耐久試験で、摩耗抑圧が耐久性の向上に直結する事が明らかとなった。また、摩耗現象は、定速度駆動部ではなく、速度変極点や停止 / 駆動開始部に顕著である事も明白化した。我々は、圧電素子の性能向上と共に、上記特異点での摩耗抑圧の鍵となる研究も進めている。これまでの成果を以下にまとめる。

非共振型超音波モータも含めて全ての接触式アクチュエータは、摩擦力を介して自身の発生変位(発生力)をステージ可動部に伝達することでステージを駆動する。その際の発生力と接触部における伝達係をモデル化した。(図10)移動量を座標系 x 、ステージ可動部質量を m とすると、このステージを加速するのに必要となる推力 F は次式となる。

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{--- (5.1)}$$

ここで、 F は圧電素子に要求される発生力と見なせる。一方、圧電素子側から見ると、発生力の伝達系には摩擦結合が介在しているので、ステージに伝達される推力の上限値は静止摩擦力の上限値となる。予圧機構からの予圧力を N 、摩擦係数を μ とすると、静止摩擦力上限値 F_{STATIC} は、

$$F_{\text{STATIC}} \leq \mu N \quad \text{--- (5.2)}$$

である。また、境界条件として、 $F = F_{\text{STATIC}}$ とすると、(5.1)、(5.2)式よりステージに伝達される推力上限値は、

$$\mu N \geq m \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{--- (5.3)}$$

で表される。つまり、上限値を超えた発生力を与えると、摩擦力は破綻し、その結果としてスリップを引き起こす。このスリップこそが摺動摩耗の主原因と考えられる。それ故に、摩擦力の上限値を超えない発生力制御が重要となる。

5 -1 . 従来型駆動回路における摩擦限界

これまでの駆動回路における伸縮 / 剪断素子への印加電圧は、伸縮素子に対しては正弦波

を、剪断素子に対しては余弦波 ($+\pi/2$ の位相差) をそれぞれ使用している。この場合、送りに寄与する剪断素子が発生する加速度 d^2x/dt^2 は $A\omega^2 \cos(\omega t)$ となり、(5.3)式より、

$$\mu N \geq m(A\omega^2 \cos\omega t) \quad \text{--- (5.4)}$$

となるので、 $\omega = 2\pi f$ から摩擦力を保てる駆動周波数の上限値 $f_{m,ax.}$ は、

$$f_{m,ax.} \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu N}{mA}} \quad \text{--- (5.5)}$$

で表される。また、周波数を固定とした際の振幅最大値 $A_{m,ax.}$ は、

$$A_{m,ax.} \leq \frac{\mu N}{m \cdot (2\pi f)^2} \quad \text{--- (5.6)}$$

となる。

図 11 には、印加電圧を固定として周波数を可変とした際の 1 サイクル分のステージ送り量を評価した実験結果を示す。駆動条件は、 $\mu=0.3, N=40 \text{ [N]}, m=1.2 \text{ [kg]}, A=8 \cdot 580 \text{ pm/V} \cdot V_{out}/2$ とした。 $V_{out}=90 \text{ V}_{p-p}, 180 \text{ V}_{p-p}, 270 \text{ V}_{p-p}$ のいずれの場合でも、(5.5)式より導かれる駆動周波数の上限値である $0.64 \text{ kHz}, 0.78 \text{ kHz}, 1.1 \text{ kHz}$ 近傍にて速度低下、つまりスリップが始まっており、理論式と良く一致する。

5 -2 . 可変周波数制御における摩擦限界

5-1 で明白化した摩擦力限界に対する改善は、発塵や摩耗により損なわれる耐久性改善には必須の技術である。しかし、それらを回避する事を最重要とするあまり、加速度を低下させた駆動パターンを選択する事は賢明ではない。耐久性が向上するかのように見えるが、装置としては総合性能の低下を招くので選択不可である。そこで、加速度が駆動周波数 f の関数であることと、非共振型超音波モータの最大特徴の一つである駆動周波数可変性を応用し、上記問題の解決に取り組む。

基本的な考えとしては、駆動回路の 1 サイクルにおける加速度変化分が摩擦力限界値を超えないように周波数を変化させることで、スリップを引き起こさない駆動周波数を選択しながら加速する。以下に適応する基本式を示す。

なお、正弦波駆動における 1 サイクル中の平均速度 (\bar{v}) および平均加速度 (\bar{a}) には、以下を適応する。

$$\bar{v} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \frac{dx}{dt} dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} A \omega \cos(\omega t - \frac{T}{4}) dt = \frac{4 Af}{T}$$

$$\bar{a} = \frac{4 Af}{T/2} = \frac{8 Af}{T} = \frac{8 Af^2}{m}$$

$$\mu N \geq m \frac{4A(f_{n+1} - f_n)}{\frac{1}{2f_{n+1}}} = \frac{m \cdot 8A f_{n+1} (f_{n+1} - f_n)}{1} \quad \text{--- (5.7)}$$

スリップ限界値の周波数は、(5.7)式を f_{n+1} に対する導関数とする事で次式となる。この際には、平均加速度と(5.4)式により導出される起動周波数を f_1 として、それ以降の周波数毎を f_{n+1} としている。

$$f_{n+1} = \frac{f_n + \sqrt{f_n^2 + 4 f_1}}{2} \quad \text{--- (5.8)}$$

図 12 に、(5.8)式より導かれた周波数可変パターンでステージを駆動した際の加速波形を示す。従来型駆動回路を用いて駆動周波数 20 kHz 固定、印加電圧 180 V_{p-p} 時の初加速度と可変周波数駆動法による、駆動開始から 2 ms までの平均初加速度を比較した。従来駆動法による初加速度は 0.008 G であったのに対し、可変周波数駆動法では 0.25 G となり、約 30 倍の改善となった。

非共振型超音波モータの特徴である可変周波数制御法は、先に述べた「二律背反」の最適点、つまり、高速・高加速度駆動と高耐久性の両立点を選択可能である事を示している。

6 . 制御

前章では、停止状態を開始時間として駆動する際のスリップ限界値に対する解決法を示した。しかし、ステージ駆動における摩耗は、その部分だけでなくステージガイドレール全域にわたって発生する。本章では、移動に際して通過する摺動面状態での摩擦係数およびその時系列変化の観点から制御系へと取り込み、かつ、それらに反映させる手法に関して報告する。

6 -1 . 摩擦特性の同定法と補償法

6 -1 -1 .スティック・スリップ現象

定常速度 \dot{x} で駆動されるステージに加わる摩擦力 F_{ss} は次式により定義される .

$$F_{ss} = (\alpha_0 + \alpha_1 e^{(-\dot{x}/v_0)^2}) \operatorname{sgn}(\dot{x}) + \alpha_2 \dot{x} \quad (6.1)$$

ここで v_0 はストライベック速度を表し、 α_0 、 $\alpha_0 + \alpha_1$ 、 α_2 はそれぞれ、クーロン摩擦、静止摩擦、粘性摩擦係数を示す . (6.1) 式の関係より、零速から極定速状態で最大静止摩擦が粘性摩擦より大きくなるため、サーボ系のような制御器に積分特性を有する制御系では、目標値近傍で応答が振動するというスティック・スリップ現象を生じてしまう . 一例として、図 13 に帯域幅 $50 \cdot 2\pi \text{ rad/s}$ の PI 制御系に対し、 0.01mm のステップ指令を印加したときの実験結果を示す . オーバershoot 後、摩擦の影響からステージが静止し、制御入力負の方向へ増大する . 制御入力最大静止摩擦を超えたとき、ステージは目標値方向へ移動するが、移動開始と同時に摩擦力が減少するため、目標値を超え再度静止してしまう . このスティック・スリップ現象防止に対し、摩擦特性を考慮した制御法が必要不可欠である .

6 -1 -2 . 摩擦同定法

本制御対象である NRUSM 駆動精密ステージは、摩擦駆動を利用したステージ送り機構であるため、その制御性能はガイドプレート摺動面の平面度や摩耗などの状態に強く依存する . 従って、ここでは摩擦特性を位置関数として同定する .

静止摩擦に対する同定手順は、1) ステージ端まで移動し静止、2) 印加する制御入力 u を徐々に増加、3) ステージが移動開始したときの u と位置 x を記録、4) 次の計測点まで移動、5) 2) へ戻り、順次 3)、4)、5) をステージ他端まで繰り返す .

本実験では、 5mm 地点から 1mm 間隔で 100mm 地点までを計測範囲とした . また、 u の増加量を 4mV/ms とし、ステージ移動判別条件をアクチュエータのばね特性を考慮し、 0.5m の移動と設定した . 図 14 (a)、(b) の 1 列目に正

方向及び負方向に対する同定結果を示す . 各位置での計測は 10 回とし、図にはその平均値を標準偏差と共に示している . 同図より、標準偏差が極めて小さく再現性あることが確認できる . この結果より、静止摩擦特性がストローク内で約 10V 程度 (最大印加電圧の 75% 相当) 変化することが確認できる .

粘性摩擦及びクーロン摩擦の同定法は、1) ステージ端から他端まで定速制御により駆動、2) 各位置での速度 v 及び u を記録、3) 1) を低速から高速まで繰り返し計測、4) 最小二乗法により、位置毎に v - u 特性を導出する . 実験にあたり計測位置はストローク内を 1mm 間隔で、速度は 5mm/s から 30mm/s まで 5mm/s 刻みとした . 静止摩擦同様に、各速度に対して 10 回計測し、その平均値を利用し摩擦特性を導出した . 図 14 (a)、(b) の 2 列目と 3 列目に、それぞれ正方向と負方向に対するクーロン摩擦及び粘性摩擦係数を示す . 静止摩擦特性も含め、 14mm 付近で摩擦特性の変化が確認でき、摺動面の状態変化が予測される . 12mm から 16mm までの速度 摩擦特性を図 15 示すが、クーロン摩擦は全て同程度であるのに対し、粘性摩擦は 14mm で大きく変化することが確認できる .

6 -2 . 摩擦モデルに基づく位置制御系構築

6 -2 -1 . PI 制御系

ここでは、前節で同定した位置関数の静止摩擦を用い、bang-bang 制御に基づく摩擦補償を行う . 図 16 に PI 制御系に対する摩擦補償のブロック図を示す . システム同定実験により導出した NRUSM モデルは

$$\frac{\text{pos}}{u} [\text{mm/V}] = \frac{k_1}{s(s+p_1)} \quad (6.2)$$

ここで、 $k_1=251.8$ 、 $p_1=720.4$ である . ここで用いる bang-bang 制御に基づいた静止摩擦補償法は、ステージが静止したときに目標値への偏差情報 e と位置情報 x 、速度情報 \dot{x} を利用し、フィードフォワード的に制御入力に静止摩擦相当の電圧を印加する摩擦モデルベースの手法で、次式により記述される .

$$u = \begin{cases} u_{pi} + u_{sp}(x) & \text{if } (e > 0) \ \& \ (\dot{x} = 0) \\ u_{pi} + u_{sn}(x) & \text{if } (e < 0) \ \& \ (\dot{x} = 0) \\ u_{pi} + u_{sp}(x) & \text{if } (e = 0) \ \& \ (\dot{x} = 0) \end{cases}$$

—(6.3)

PI 制御器は位置制御系の帯域幅が $100 \cdot 2\pi$ rad/s、ステップ指令に対するオーバーシュートが 20% 程度となるよう次式とした。

$$\frac{u_{pi}}{e} [V/mm] = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (6.4)$$

ここで、 $k_p = 1.59 \times 10^3$ 、 $k_i = 1.00 \times 10^5$ である。この静止摩擦補償付き制御系に対して、位置決め実験を行った。実験条件は、ステージ端 5mm 地点より、1mm 間隔で 105mm 地点まで 100 回の位置決めを行い、各位置でのインポジション条件は目標値に対して分解能誤差の範囲で 5 サンプル連続一致とした。

また、インポジション完了後、次の位置指令 (+1mm) をステップ状に印加した。サンプリング時間は、0.1ms とした。摩擦補償に対しては、過補償を防ぐため全ての静止摩擦同定値に対して 0.82 倍の乗算を行っている。

位置に対する実験結果を図 17 に示す。比較のため補償電圧に一定値 (摩擦モデルの平均値) を用いた結果も同時に示す。一定値を用いた場合には、インポジションに時間を要する地点がいくつか見られるが、モデルベースの手法ではその部分が改善され、位置決め完了時間が 44.3% 短縮される結果となった。

6 -2 -2 . 連続軌跡追従制御系

本節では、まず、連続軌跡駆動を考慮し連続軌跡追従制御系を構築する。この連続軌跡追従制御系に対して、摩擦補償を行う。

図 18 に構築した連続軌跡追従制御系のブロック図を示す。外乱および速度擾乱に対するロバスト性向上を主たる目的に、状態推定オブザーバベースの外乱補償および速度フィードバックを施している。状態オブザーバには、その極が $-1.000 \cdot 2\pi$ rad/s の 3 重根となる 同次元オブザーバを用い、状態量を位置、速度、外乱とした。ここで、外乱は制御入力部へのステップ外乱を仮定している。この速度フィードバック

により、(6.2)式の制御対象を次式のように改善している。

$$\frac{\text{pos}}{u} [mm/V] = \frac{k_1}{s(s+p_m)} \quad (6.5)$$

ここで、 $p_m = 400 \cdot 2\pi$ である。速度フィードバックゲイン k_v は 7.12 で、定常ゲインを一致させるため位置 PI 制御器の出力に $k_f = 3.49$ を乗算している。PI 制御器は位置制御帯域幅が $100 \cdot 2\pi$ rad/s となるよう、(6.6)式とした。また、目標値追従を目的に連続軌跡追従制御器を次式とした。

$$\frac{u_{ff}}{\text{pos}^{ref}} [V/mm] = (k_v + \frac{p_1}{k_1})s \quad (6.6)$$

PI 制御系、ロバスト制御系及び連続軌跡追従制御系の周波数特性を図 19 に示す。ロバスト制御系の構築により、オーバーシュートの改善が確認でき、また、連続軌跡追従制御系により広帯域化の達成が確認できる。ここで、制御帯域の広帯域化に伴う制御入力飽和に対しては、アンチ・windup 補償を施している。

この連続軌跡追従制御系に対して、前節同様の位置決め実験を行った。過補償を防ぐ静止摩擦補償ゲインは 0.7 とした。図 20 に位置に対する時間応答波形を示す。位置決め時間の短縮率は 5.8% であった。また、図 21 に 100 回中第 1 回目の位置決め部分を拡大して示す。図 21 において、特に静止摩擦の影響する目標値 (6mm) 近傍に注目すると、ステージ位置に適した摩擦モデルを用いることで、より素早い位置決めが達成できていることが確認できる。図 22 には 0.5s から 1.0s に対する制御入力 u と摩擦補償電圧 u_s を示す。図 22 の u を見ると、制御入力飽和が確認でき、この時間の短縮が不可能であること考慮し、飽和時間を除いた時間で位置決め短縮率を導出すると 13.8% となった。

6 -3 . 静止摩擦特性の時間変化と補償法

6 -3 -1 . 静止摩擦の時間変化特性

これまでに示した摩擦特性は時不変であることを前提としていたが、ここでは特に静止摩擦の時間依存性について調べ、そのオンライン同定法を提案する。

アクチュエータ摺動面洗浄後の静止摩擦特性に対する時間変化の測定実験を行った。実験は前述の方法を用い、温度 20 °、湿度 50%、クラス 1000 のクリーンルームで 1 時間経過毎に行った。正方向および負方向に対する静止摩擦の時間変化特性を図 23 に示す。各曲線は、5 計測の平均値を示している。同図より、時間経過に伴い摩擦力が増加する傾向にあることが確認できる。また、2 時間経過時の 5 回計測の結果をその標準偏差とともに図 24 に示す。正方向および負方向に対する標準偏差の最大値はそれぞれ 0.625V と 1.02V であり、短時間での静止摩擦値には再現性があることが確認できる。

静止摩擦の時間変化が電圧軸に対し増加すると仮定すると、静止摩擦 u_s は x 、時間 t の関数として、次式のように記述することができる。

$$u_s(s,t) = u_{s0}(x) \times k_{tv}(t) \quad (6.7)$$

ここで、 u_{s0} はある時刻において同定された位置関数としての静止摩擦であり、 k_{tv} が時間変化を表すスケジューリングパラメータとなる。

提案する同定法は、 $u_{s0}(x)$ をオフラインで同定し、 u_s の時間変化に関する k_{tv} をステージ駆動中にオンライン同定する。すなわち、静止摩擦に対する位置関数の情報 $u_{s0}(x_i)$ さえ事前に取得しておけば、ステージ駆動中に任意の一点の静止摩擦 $u_{sm}(x_i)$ を同定することで、静止摩擦の時間変化特性 $k_{tv}(t)$ を次式から導出できる。

$$K_{tv}(t) = \frac{u_{sm}(x_i)}{u_{s0}(x_i)} \quad (6.8)$$

ステージ駆動中にその情報を取得する手法を以下に示す。摩擦補償付き制御系に対するステップ応答実験の一例を図 25 (a) に示す。制御入力の拡大図を図 25 (b) に示す。目標値に対して偏差がある状態でステージが静止した時のみ摩擦補償電圧が加わるが、目標値近傍で静止すると、制御器側の出力が少ないため、一定時間ステージが静止してしまう場合がある。この時、制御器の偏差積分効果により制御入力が次第に増加し、最大静止摩擦を超えたところでス

テージが目標値へ移動し始める。この状態(図 25 (b) の丸印部分) の位置と電圧から、一地点 x_i での $u_{sm}(x_i)$ が計測でき、(6.8) 式より k_{tv} を導出できる。図では 50mm 地点での 1 回の位置決めより 7 回静止摩擦が計測でき、その平均値は 14.7V であった。参考までに、この位置決め実験時の 50mm 地点での静止摩擦計測値は 14.4V であり、良い一致が確認できる。

6 -3 -2 . 時間変化に対する補償

提案する静止摩擦時間変化特性同定法の有効性を検証するために、7 時間経過後にクリーンルーム内にて前述同様の 100 回の位置決め実験を行った。実験方法は、7 時間経過後の 1 回目の位置決め (1mm 地点) により 1 時間経過時の摩擦モデル (1 時間計測モデルとする) に対するスケジューリングパラメータを導出する。そのスケジューリングパラメータを (6.7) 式に従い 1 時間モデルに乗算することで 7 時間モデルの推定値 (7 時間推定モデルとする) を導出する。2 回目以降の位置決めでは、推定した 7 時間推定モデルを用い実験を行った。

図 26 に 1 時間計測モデル (青線)、7 時間推定モデル (緑線) および 7 時間計測モデル (赤線) を示す。スケジューリングパラメータは正方向、負方向それぞれ 1.437、2.420 となった。7 時間計測モデルと 7 時間推定モデルを比較すると、正方向で特に良い一致が確認できた。各摩擦モデルを用い 7 時間経過時に行った位置決め実験結果を図 27 に示す。7 時間経過時に 1 時間モデルそのまま用いた場合には、特に最初の部分で位置決め性能が劣化していることが確認できる。また、その傾きも若干緩やかとなっており、静止摩擦の時間変化を考慮する必要性が確認できる。これに対し、7 時間計測モデルおよび 7 時間推定モデルを用いた場合にはほぼ同等の位置決め性能時間となっており、特に、1 時間計測モデルでの位置決め時間に対して、7 時間推定モデルを用いた場合には 22.2% の位置決め時間の短縮が達成された。

7 . まとめ

この 5 年間の研究成果により、非共振型超音

波モータを実用化するために必要となる要素技術と評価用基本体がほぼ完成した。また、研究活動と共に行ってきた外部成果発表や営業活動により Phase3 における事業化への展望も開けてきた。それらは、位置決め分解能 0.6nm、最高速度 150mm/s などの基本性能、非磁性、真空対応、低発熱などの対環境性、そして、実用化の試金石となる 200km 以上の走行耐久性試験などを研究の中心に据えて、実用化を睨んだ総合的な研究開発を、強力な産学連携を通して実施してきた成果である。

今後は、最後の技術課題となっている真空環境での耐久性向上に全力であたる。また、本シンポジウムにて報告した、摩耗抑圧と加速度向上の両立技術や、摩擦特性の位置依存性と時間変化に対応した同定法に基づく連続軌跡追従制御法をシステムに取り込み、ロバスト制御系としての完成度を高める。

最後に、本共同研究における開発成果は、(株)中央精機と(株)日本セラテックを営業窓口として販売開始の準備に入ったことを報告して結びとする。

【参考文献】

- International Technology Roadmap for Semiconductors: Lithography (2002).
- K. Uchino: Ferroelectric Devices (2000) 197-200.
- Japan patent: No.1716656 (1992)
- K. Uozumi et al., : Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) L123-L126.
- Yoshiya Egashira et al., : Jpn. J. Appl. Phys. (2002) Part 1, Vol. 41, No. 9, September 2002, 5858-5863.
- A. Nakada et al., : Proceedings of the 2003 IEICE general conference, Electronics 2 (2003) S67-S68 [in Japanese]
- 小坂ほか:「超精密高速ステージ開発」, 超精密半導体計測技術開発 第3回技術シンポジウム資料, pp.5-13, 2002
- 橋本ほか:「次世代超精密ステージ機構用アクチュエータの位置制御系の開発」, 電気学会研究会資料, IIC-03-47, pp.13-17, 2003
- 岩崎ほか:「テーブル駆動系における GMDH による非線形摩擦の自律モデリングと補償」, 電学論-C, Vol.120-C, No.1, pp.20-26, 2000
- C. Canudas de Wit et al., : "A new model for control

of systems with friction," IEEE Trans. on AC, vol.40, Issue 3, 1995, pp.419-425

- K. Ohishi et al., : "Design Method of Digital Robust Speed Servo System Considering Output Saturation," The Trans. of IEE Japan (in Japanese), vol.119-D, no.1, 1999, pp.88-96
- L. Ljung et al., : Modeling of Dynamic Systems, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ:1994
- G. C. Goodwin et al., : Control System Design, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ:2001
- L. Ljung et al., : Theory for the User (2nd edition), Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ:1999
- J. C. Doyle et al., : Feedback Control Theory, Macmillan, New York:1992
- 須田:「PI制御」, システム制御情報学会編, 朝倉書店, 1992
- 大石, 宮崎, 藤田:「力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, pp.468-476, 1993
- 是田, 沖友, 津村, 竹内, 江川:「バンバン制御による工作機械送りの高精度化に関する研究」, 精密工学会誌, Vol.60, No.3, pp.427-431, 1994
- L. Ljung, "System Identification -Theory for the User (2nd edition)," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ:1999
- S. Hashimoto, K. Ohishi, T. Ohishi, T. Ishikawa, K. Kosaka, Y. Egashira, H. Kubota and T. Ohmi, "Development of an Ultra-Precision Stage Control System Using Nonresonant Ultrasonic Motor," Proc. of IEEE/IES IECON 03, pp.1331-1336, 2003
- S. Hashimoto, K. Ohishi, T. Ohishi, T. Ishikawa, K. Kosaka, Y. Egashira, H. Kubota and T. Ohmi, "Ultra-Precision Stage Control Based on Friction Model of Non-Resonant Ultrasonic Motor," Proc. of the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'04), pp.559-564, 2004.2004

年度	駆動速度 mm/s	位置決め 精度 nm	研究開発内容
1999	3	-----	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクトでの計画立案 / 評価環境立ち上げ 非共振型超音波モータ試作と評価 駆動回路の試作と評価
2000	120	±10	<ul style="list-style-type: none"> 駆動回路の改良 PIDサーボシステムによる評価
2001	140 (12インチ)	±0.6	<ul style="list-style-type: none"> 高速度型駆動回路開発と評価 1軸セラミックスステージによる評価 位置 / 速度面での超高分解能制御性の評価 高耐久性評価開始
	327 (4インチ)		
2002	150 (12インチ)	"	<ul style="list-style-type: none"> 12インチ対応の2軸セラミックスステージによる評価 姿勢精度 ±1ARC-sec. Z変動 ±3 μm以下 走行耐久性200km達成 真空対応低発熱型圧電素子開発
	360 (4インチ)		
2003	"	"	<ul style="list-style-type: none"> 状態変数を使用したロバスト制御系開発 高電界型圧電アクチュエータ開発 中空構造型セラミックス焼成技術
2004	"	"	<ul style="list-style-type: none"> 制御における摩擦低減手法の開発 軌跡追従型制御システム開発 ハニカム構造型セラミックス焼成技術

表1 プロジェクトにおける年度進捗

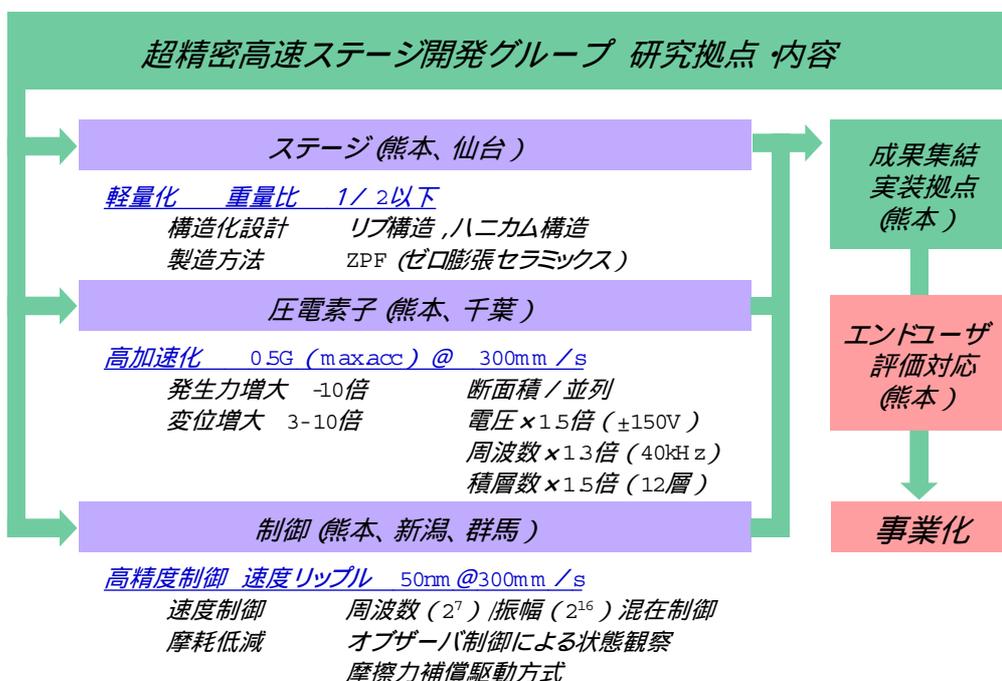


図1 グループ構成と研究開発課題

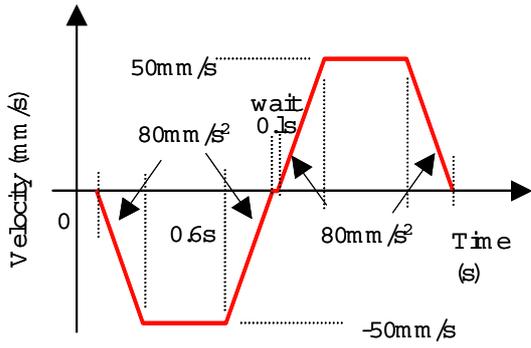


図2 連続走行試験の駆動速度プロフィール

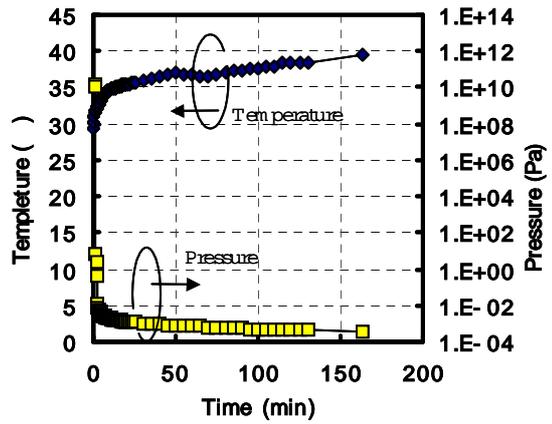


図5 真空駆動中のアクチュエータ表面温度

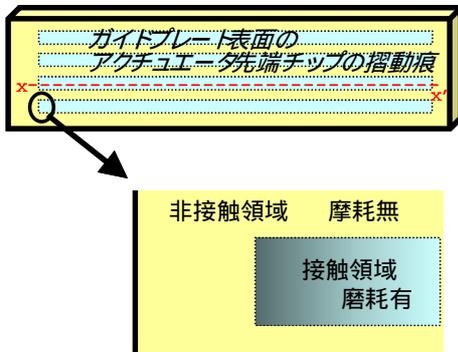


図3 ガイドプレート摩耗のイメージ図

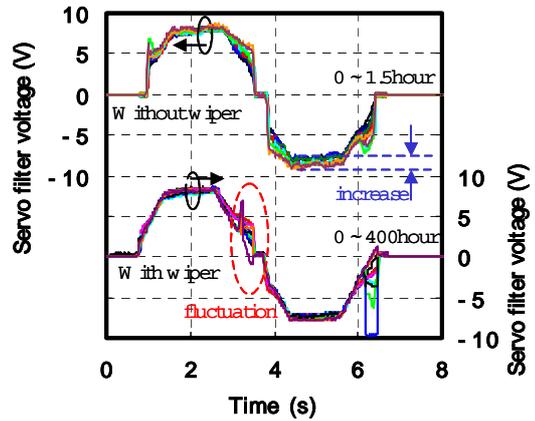


図6 真空駆動時の制御フィルター出力 (ワイパーの効果)

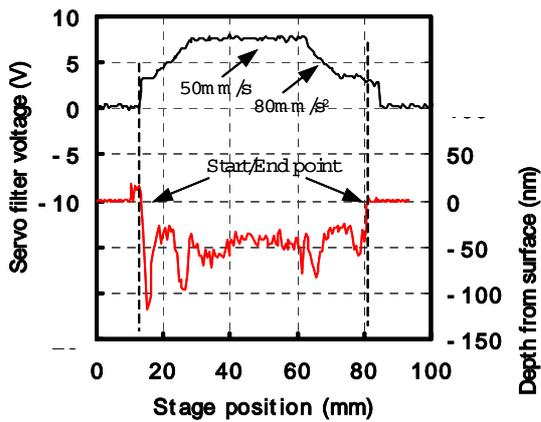


図4 200km 走行後のガイドプレート表面の断面プロフィール

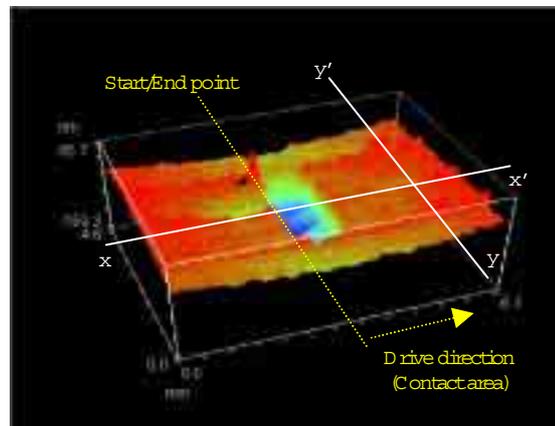


図7 真空内 54.5km 駆動後のポアフリーガイドプレート表面3次元プロフィール(右半面:アクチュエータ走行領域)

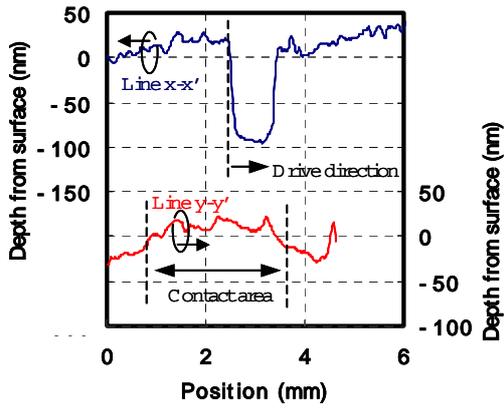


図8 真空内 54.5km 駆動後のポアフリーガイドプレート断面プロファイル

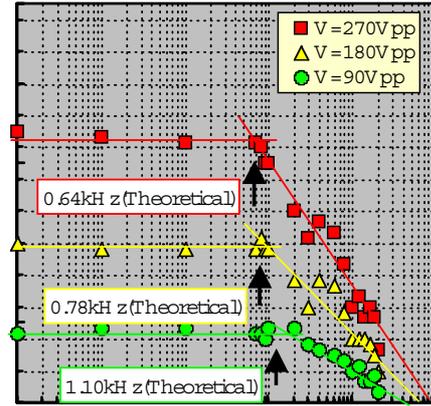


図11 駆動周波数による1サイクル駆動におけるスリップ限界加速度の評価結果

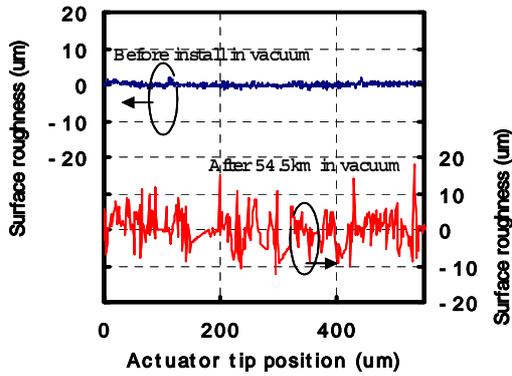


図9 真空駆動前後の先端チップ表面粗さ

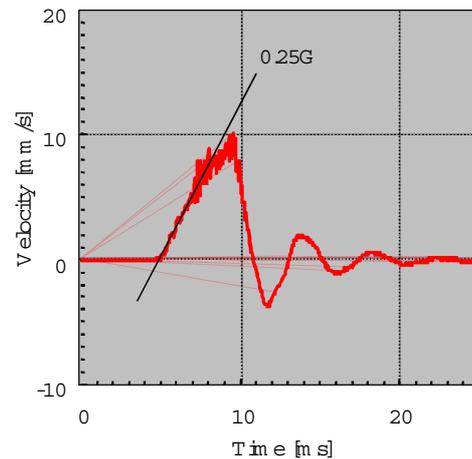


図12 周波数可変パターンによるステージ駆動時の加速波形

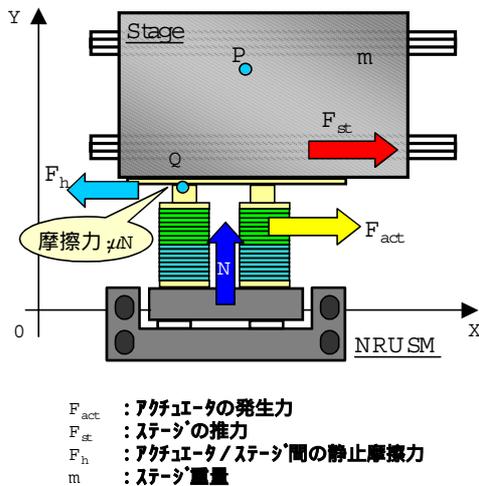


図10 ステージとNRUSMの摩擦モデル

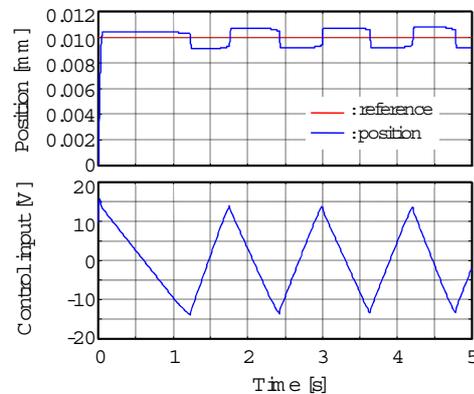


図13 精密位置決め時のスティック・スリップ現象

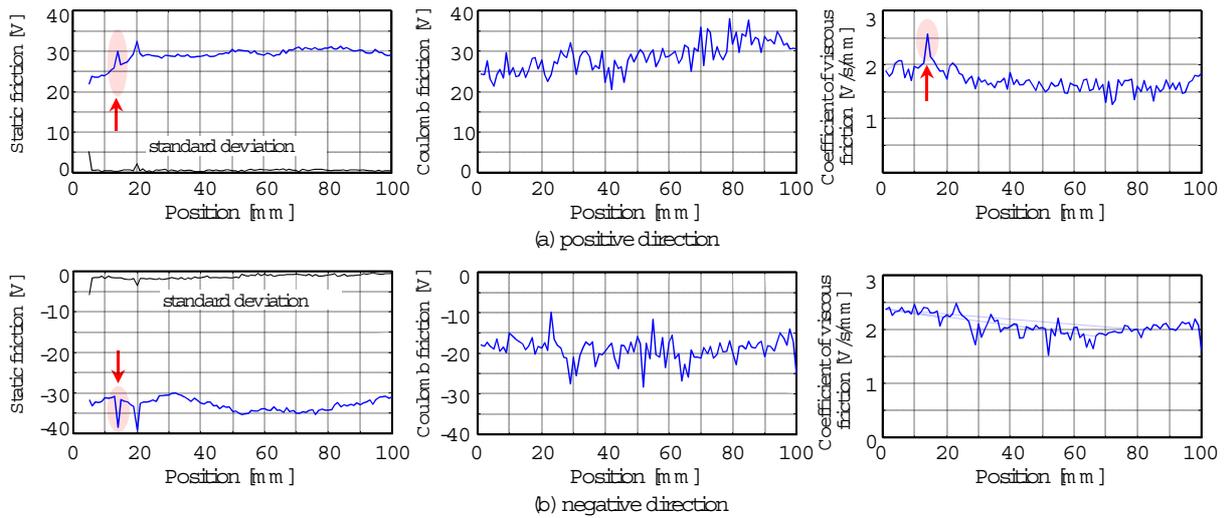


図 14 位置-摩擦特性図

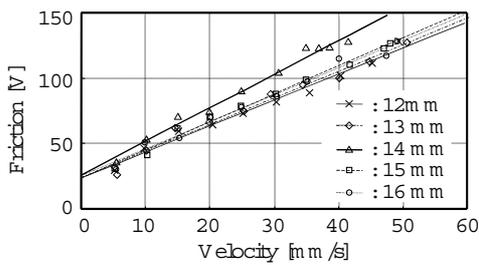


図 15 14 mm 地点の摩擦特性変化

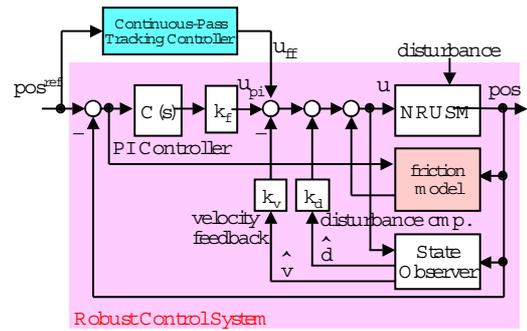


図 18 摩擦モデルに基づく連続軌跡追従制御系のブロック図

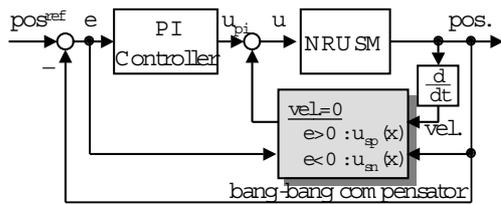


図 16 摩擦モデルに基づく PI 制御系のブロック図

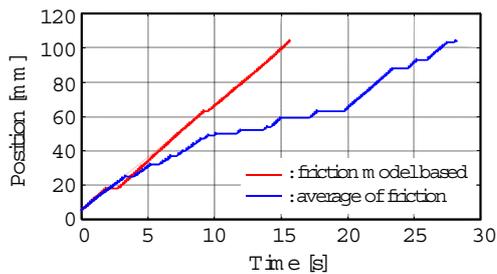


図 17 位置決め実験結果 (PI 制御系)

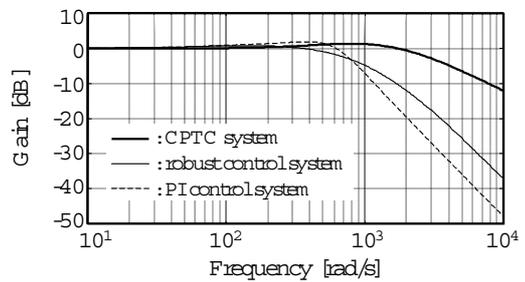


図 19 位置制御系帯域幅の比較

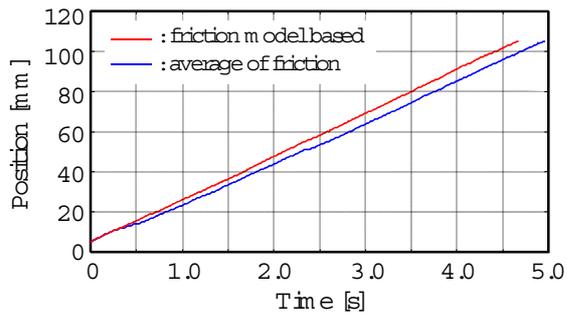


図 20 位置決め実験結果（連続軌跡追従制御系）

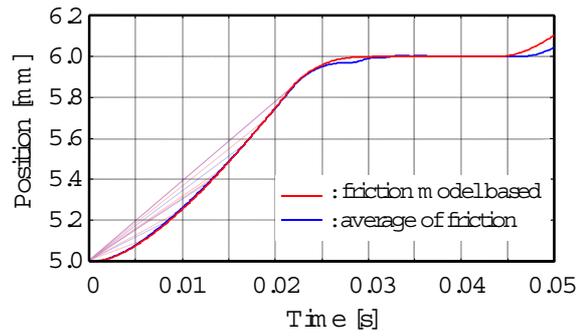


図 21 一回目の位置決め拡大図

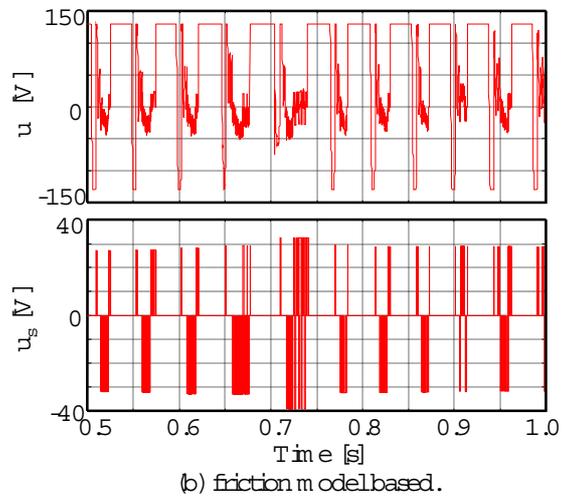
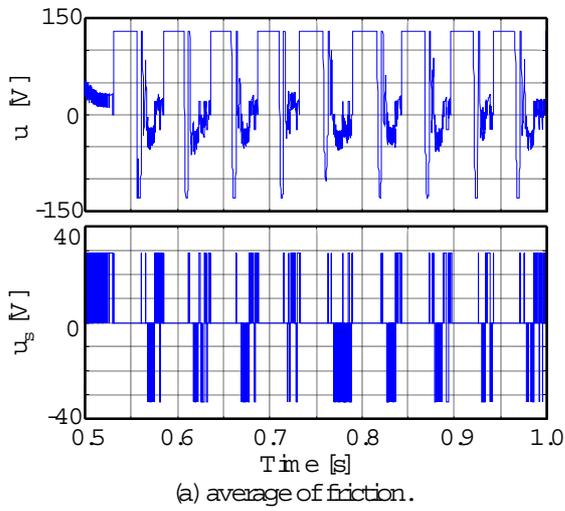


図 22 制御入力と摩擦補償電圧

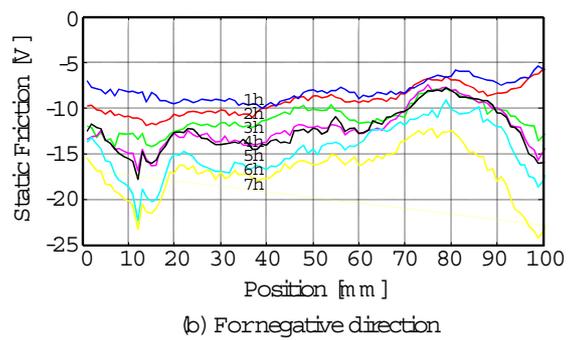
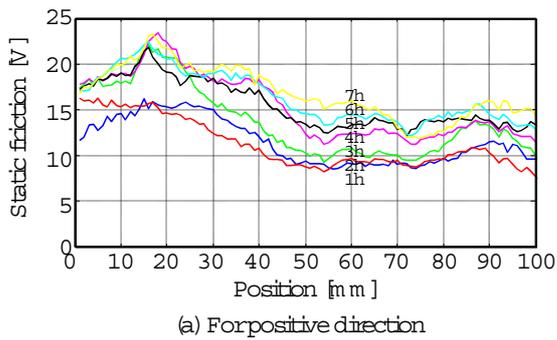


図 23 静止摩擦の時間変化特性

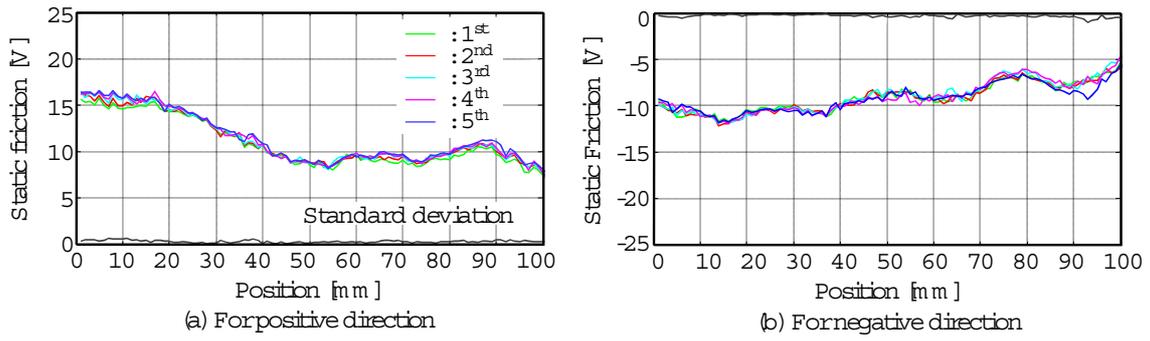


図 24 2 時間経過時の静止摩擦 (5 回計測とその標準偏差)

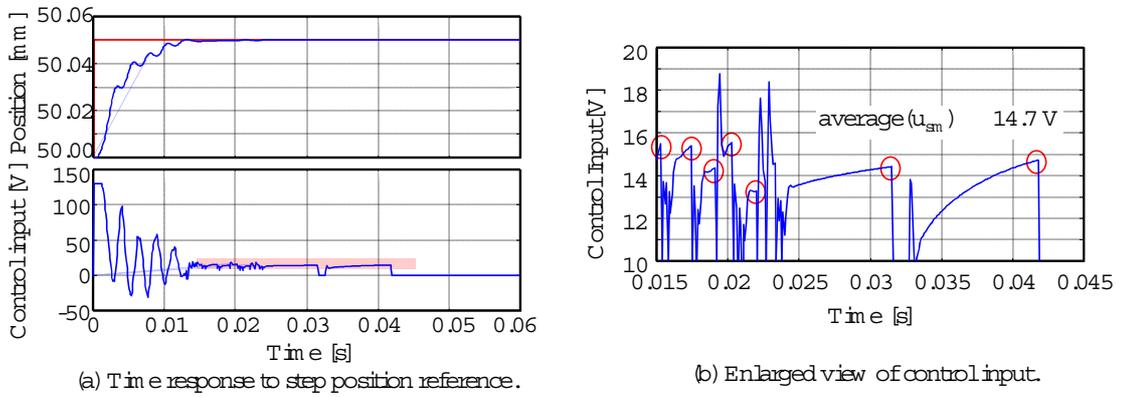


図 25 ステップ応答によるスケジューリングパラメータの同定

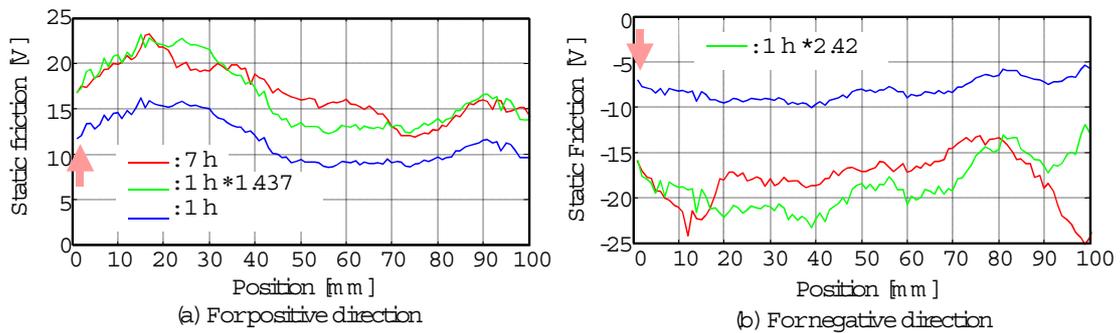


図 26 1 時間経過時の摩擦モデルを用いた 7 時間モデルの推定

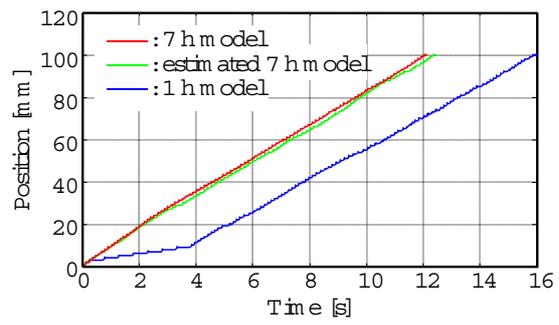


図 27 位置決め実験結果（静止摩擦の時間変化補償）