様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２３年６月１０日現在

機関番号：13601
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2008～2010
課題番号：20560103
研究課題名（和文）　弾性案内と電磁力駆動によるミリストローク超精密位置決め機構の構成と制御
研究課題名（英文）　Fabrication and control of ultra-precision positioning mechanism over one-millimeter stroke by using flexure guide and electromagnetic actuator
研究代表者
深田　茂生（FUKADA SHIGEO）
信州大学・工学部・教授
研究者番号：70156743

研究成果の概要（和文）：　本研究では，一体型複合ヒンジ機構による弾性案内と電磁力アクチュエータを用いて，最大 1×1 mm （X×Y ）程度のストローク（ミリストローク）を持つ超精密位置決め機構を構成し，その制御システムを構築した．その結果，2nm の PTP 位置決め分解能と，直径 1 mm の円運動（CP 位置決め動作）における真円度誤差 10.5 nm，半径誤差の RMS 値 2 nm 以下を達成し，ミリストロークにわたってナノメートルレベルの位置決め分解能と精度を持つ超精密位置決めシステムを実現することができた．

研究成果の概要（英文）： In this study, an ultra-precision positioning mechanism with one-millimeter stroke, i.e. maximum stroke of 1×1 mm in X×Y, was fabricated by using an integrated monolithic flexure guide mechanism and electromagnetic linear motors, and its control system was constructed. Consequently, fine positioning resolution of 2 nm in PTP positioning motion and superior CP positioning performance with roundness error less than 10.5 nm and radial error of 2 nm (RMS value) in continuous circular motion with 1 mm diameter was achieved. Therefore, an ultra-precision positioning system with nanometer-level resolution and accuracy over one-millimeter stroke was realized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００８年度	1,300,000	390,000	1,690,000
２００９年度	1,200,000	360,000	1,560,000
２０１０年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総　計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学
キーワード：精密位置決め，精密機構，運動制御，弾性案内，精密計測

１．研究開始当初の背景

精密位置決め技術は，半導体製造装置や超精密工作機械および精密測定機などの基幹性能を支配する最も重要な基盤技術の一つであり，今後の着実な進展が期待されている．現在までに実用的に使用されている精密位置決め機構は，①工作機械や半導体製造装置のように数十 mm～数 m の比較的長ストロークの位置決め機構と，②SPM（走査探針顕微鏡）の走査機構等のようにストロークが数十μm 以下の微動位置決め機構に分化している．そのため，それら両者の中間的な領域にあたる，ストロークが 1～数 mm に対してナノメートルレベルの分解能を持つ位置決め装置の実用例が現状では稀少であり，位置決め機構の空白領域となっている．

このような空白状況は，精密機器の設計技術者や生産技術者によって強く認識されるようになってきており，微細加工装置や微細形状測定機の設計上で問題となっている．今後，マイクロマシン要素やマイクロ光学部品の加工・測定装置の分野でこの領域の位置決め装置の需要が拡大することは確実であり，新たな機構の確立が急務である．そこで本研究では，最大 1 mm程度のストローク（“ミリストローク”）に対してナノメートルレベルの分解能を持つ位置決め機構を，弾性案内と電磁力駆動により実現することをめざした．

２．研究の目的

本研究では，最大 1×1 mm （X×Y ）程度のストローク（ミリストローク）に対してナノメートルレベルの分解能を持つ平面位置決め機構を，弾性案内と電磁力駆動により実現する．具体的なアプリケーションとしては，放電加工等の非力学的原理による加工装置や微細形状測定装置を想定している．一体型複合ヒンジ機構による弾性案内と，電磁力アクチュエータとして VCM を用いた位置決め機構を新たな検討対象として設定し，構造系と制御系の統合的な構成法を探求するとともに，動的性能を確保したミリストローク超精密位置決め機構を実現することを目的とした．

３．研究の方法

図 1 は，種々の精密機械システムを構成する位置決め機構および関連する精密機器のストロークに対する精度・分解能を，研究代表者が整理してマップとして示したものである．図中の①が工作機械や半導体製造装置のように数十 mm～数 m の比較的長ストロークの位置決め機構の領域を示し，②が SPM（走査探針顕微鏡）の走査機構等のようにストロークが数十μm 以下の微動位置決め機構の領域を示す．

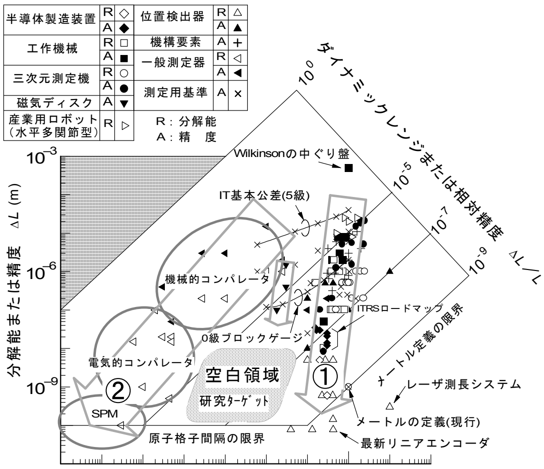


図１ 種々の位置決め機構および関連機器の精度・分解能 対 ストロークのマップ

ここで②SPM の探針駆動機構の場合は，駆動要素として圧電素子を用いるのが一般的であり，ナノメートルレベルの位置決め分解能を容易に得ることができるが，ストロークは数十μm 程度に制限される．一方，上述の①工作機械や半導体製造装置のような比較的長ストロークの位置決め機構の場合は，転がり直動案内や静圧案内で支持された位置決めテーブルを，ボールねじやリニアモータで駆動する方式が一般的である．この場合，ストロークに原理的な制限はないが，数 mm 程度以下のストロークに限定して往復運動をさせる場合には機構的に多くの問題が発生する．特に，転がり案内やボールねじのように転動要素を介した相対運動を伴う場合は，転動体が 1 回転するのに要するストローク以下で揺動運動させると，局所的な偏摩耗など潤滑上のトラブルが多発することが知られており，このことが図 1 の空白領域を生む大きな原因であると考えられる．研究代表者は，ミリストロークを実現する機構として，ボールねじを差動化した“差動ボールねじ”を用いた機構についても検討を行っている．差動ボールねじは変位縮小倍率を極めて高く設定することが可能であり，回転型アクチュエータとロータリエンコーダを用いた半閉ループ制御系によりナノメートルレベルの位置決め分解能を実現することも可能であるが，位置決め精度はねじのリード誤差などの幾何学的誤差に支配され，制御性能はボール接触部の非線形摩擦特性によって悪化することになる．そこで本研究では，ボールねじなどのような機構的方式ではなく，弾性支持された位置決め対象を電磁力により非接触駆動する単純な機構によってミリストロークを実現する方法を追求した．

これまでに研究代表者は，複合平行板ばね機構により弾性支持された位置決めテーブルをボイスコイルモータ（VCM）で駆動する位置決め機構のプロトタイプを構成し，基礎的な実験を行ってきた．ミリストロークを確保する弾性案内の剛性と VCM の所要推力を適切に配分し，1 mm のストロークにわたって 5 nm 程度の位置決め分解能を静的には実現できたが，動的な性能については十分に検討するまでに至っていない．本機構は，位置決めテーブルや案内板等の複数の質量要素とばね要素による多自由度振動系となるため，輪郭軌跡動作のような動的位置決め性能を確保するためには，機構全体の振動特性を十分に把握し，構造系と制御系の統合的な最適化を図ることが不可欠である．

そこで本研究では，一体型複合ヒンジ機構による弾性案内と，電磁力アクチュエータとして VCM を用いた位置決め機構を新たな検討対象として設定し，以下のステップで研究を行った．

・位置決め機構の設計・製作
・位置決め機構の特性評価
・駆動系と制御系の設計
・位置決め特性の実験的検証

４．研究成果
(1) 位置決め機構の設計と製作

X-Y 方向の直動 2 軸とヨーイングθの 3 自由度を持つ平面位置決め機構を設計・製作した．図 2 に機構部の構造の概略を示し，表 1 に設計仕様を示す．機構の基本原理は従来の機構と同様であり，直方体状の位置決めステージを複合型平行ヒンジ機構で弾性案内する．ベースに固定された支持柱から左右対称に配置した計 32 個の矩形ヒンジを形成し，ステージを弾性支持する．X 軸と Y 軸の固有振動数がほぼ等しくなるように各要素の重量配分とヒンジ剛性を設計した．

図 3 は，(a)製作したヒンジ機構の構造と，(b)アクチュエータおよび計測系の配置を示す．本機構は図 3 に示すように上面と下面が対称な構造であり，ワイヤカット放電加工により成形した上下２枚を位置決めピンとボルトで締結しており，完全一体化には至っていない．電磁力アクチュエータにはボイスコイルモータ(VCM)を自作して用いた．ステージ上に棒状平面鏡を直角に配置し，分解能 0.6 nm のレーザ測長システムを 3 軸用いてステージの X-Y 方向の変位とヨーイングθ を検出する．なお，機構の振動減衰性をパッシブに与えるため，機構部は粘度 1000 cSt のシリコーンオイルを満たしたシンク中に浸される構造となっており，空気圧除振台上に設置されている．図 4 は位置決め実験装置の構成を示し，図 5 は装置の外観である．

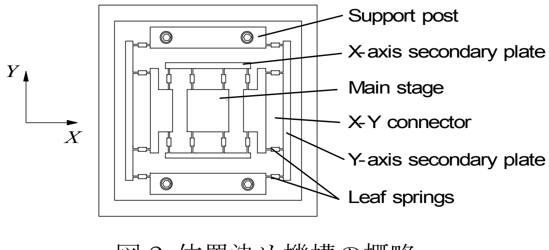
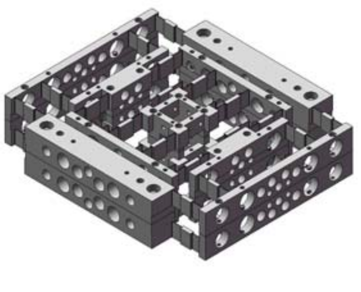


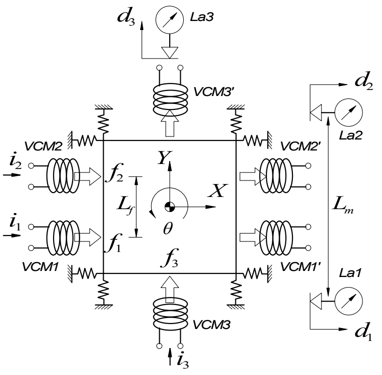
図 2 位置決め機構の概略

表 1 機構の設計仕様

Stage size mm	60×60×67
Stage weight kg	2.3
Number of springs	32
Stiffness N/mm	X: 9.85 Y: 13.2
Characteristic frequency Hz	X: 10.6 Y: 8.9
VCM force factor N/A	X: 3.1 Y: 3.7
Sink-oil viscosity cSt	1000



(a) 一体型弾性ヒンジ機構



(b) アクチュエータとセンサの配置

図 3 位置決め機構の構造

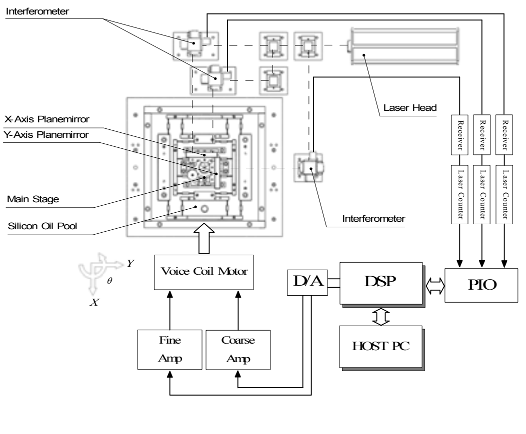


図 4 位置決め実験装置の構成

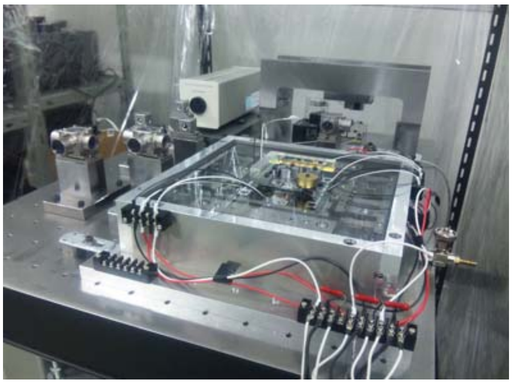
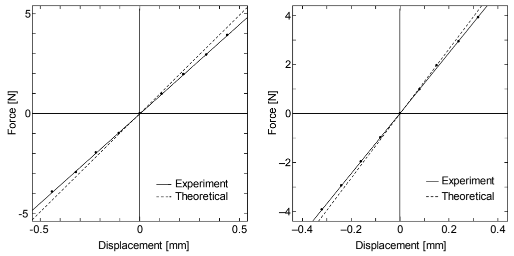


図 5 製作した位置決め機構の外観

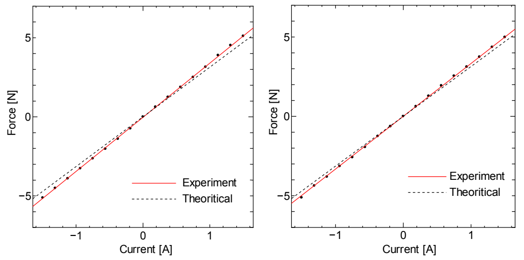
(2) 位置決め機構の特性評価

製作した弾性ヒンジ案内機構の直動方向の剛性を測定した．ステージに力 F を加えたときのステージの変位を電気マイクロメータにより測定した．測定結果を図 6(a)に示す．実験結果より弾性案内機構の X 軸方向の剛性は 8.94N/mm，Y 軸方向の剛性は 12.3N/mm となっていることが分かった．なお，設計値に対して実測値はそれぞれ X 軸方向の剛性は約 91%，Y 軸方向の剛性は約 93%となっている．

製作したリニアモータの静特性の評価実験を行った．その結果を図 6(b)に示す．リニアモータにステップ状の入力電流を与え，その時の出力を推力に換算した．図より 1 A で X 軸方向 3.42 N，Y 軸方向 5.19 N の推力を得られていることが分かる．±1.5 A においては，シリコーンオイル中においても線形性の高い結果を得ることができた．これらの結果より製作したリニアモータの推力定数を X 軸方向 3.42 N/A，Y 軸方向 5.19 N/A とした．



(a) 弾性案内の剛性



(b) アクチュエータの出力特性

図 6 単軸での機械的特性

本機構は，X-Y-θ の 3 自由度を持ち，制御対象としては多入力－多出力系（MIMO システム）となる．そこで，MIMO システムとしての静的および動的な入出力特性を測定した．図 7 は，0.5 V のランプ入力を準静的に各軸に入力した際の各軸の応答を示す．一つの軸に与えられた入力によって，対応する軸出力だけでなく他の軸にも応答が現れており，軸間の干渉がわずかに存在することが分かる．しかし，一体化弾性ヒンジ機構とすることで，従来の板ばね組立構造の機構に比べて干渉を 10%程度まで低減できた．

図 8 は，MIMO 周波数応答の測定結果を示す．いずれの軸についても，10～20 Hz に一次共振点があり，設計仕様に対応した結果が得られている．また，各軸間には動的にも干渉が存在するが，それらのゲインは従来モデルよりも大幅に低減されていることが分かる．

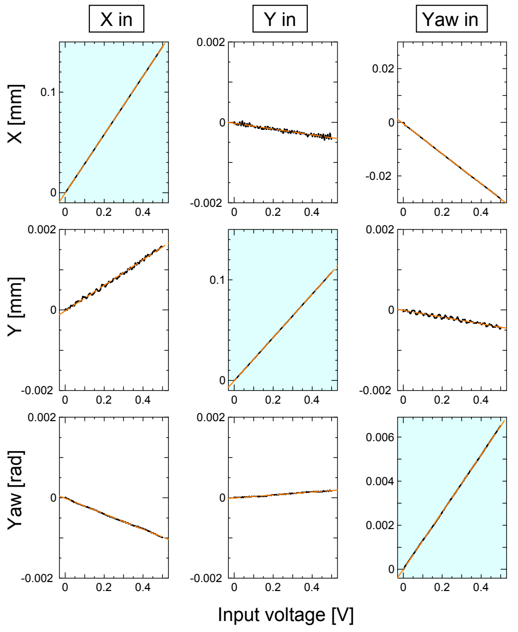


図 7 静的 MIMO 特性

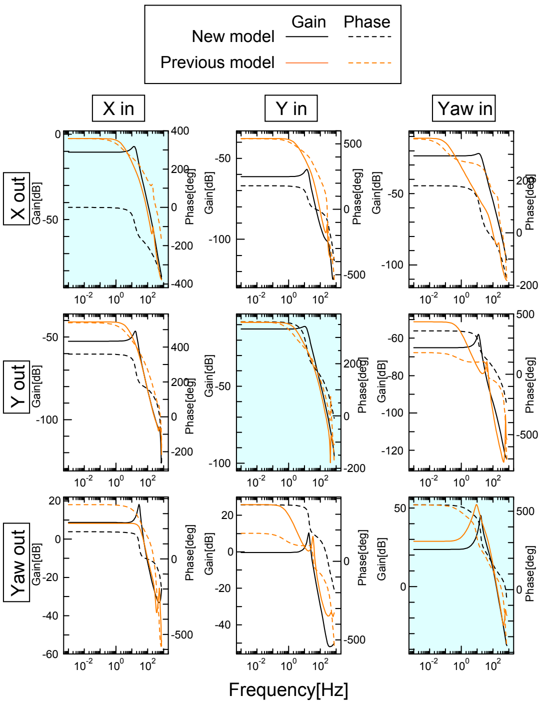


図 8 動的 MIMO 特性

(3) 駆動系と制御系の設計

図 9 に駆動方法の概略を示す．本機構の単軸動作機構は同図に示すように 3 慣性のばね-質量系であり，1 mm のストロークにわたって 1 nm の分解能を静的に実現するためには，10^6＝2^{20} の力制御分解能（電流制御分解能）

が必要である．そこで VCM の各対には，粗動用電流源と微動用電圧源を並列に接続しており，各電源を独立に操作することにより粗微動駆動が可能となっている．各電源はそれぞれ 12 bit の DA 変換器で操作されるため，抵抗 R により定まる微動範囲を適切に配分することにより，理論上は 2^{24} の駆動分解能が静的に得られることになる．

図 10 に制御システムの構成を示す．前項で示したように，本機構は X-Y-θ の 3 自由度 MIMO システムであり，各軸間にはわずかな干渉が存在する．そこで，それらの干渉を非干渉化するために制御対象の逆行列モデルと軸間干渉のない対角化理想モデルを直列に挿入し，さらにその理想モデルの逆モデルをフィードフォワード要素としている．また，目標入力とレーザ測長システムにより検出された実出力との偏差に対して PID 制御器による制御動作を印加している．制御対象の逆モデルは，MIMO 応答をそれぞれ一次遅れ要素に近似して導出した．

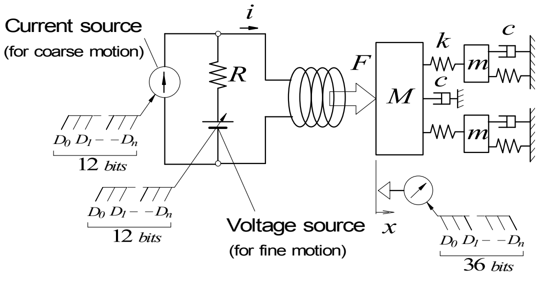


図 9　粗微動駆動方法

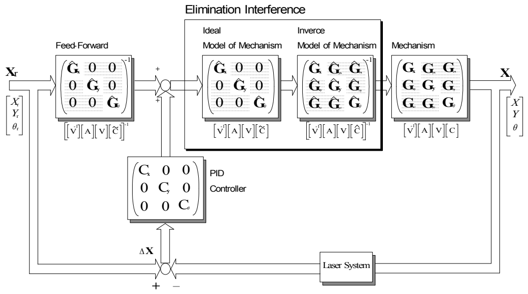
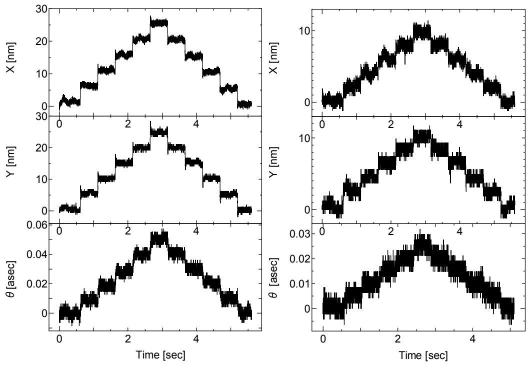


図 10 制御システムの構成

(4) 位置決め特性の実験的検証

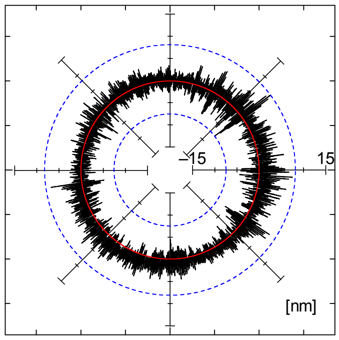
本位置決めシステムの性能を実験により検証した．図 11 は，(a) 目標ステップ幅 5 nm（X，Y）と 0.01 asec （θ），および(b) 目標ステップ幅 2 nm（X，Y）と 0.005 asec （θ ）の階段状位置決め結果を示す．X 軸および Y 軸の並進 PTP 位置決めで動作においては 2 nm の，θ 軸の回転位置決め動作では 0.005 asec の位置決め分解能が達成されている．

図 12 は直径 1mm の円運動における真円度誤差を示す．真円度誤差 10.5 nm，半径誤差の RMS 値 2 nm 以下を達成した．また，図 13 は，研究代表者が検討してきた板ばね組立構造の従来モデルとの真円度の比較を示す．真円度誤差が約 1／6 に低減されていることがわかる．

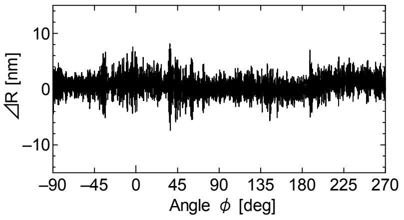


(a)　　　　(b)

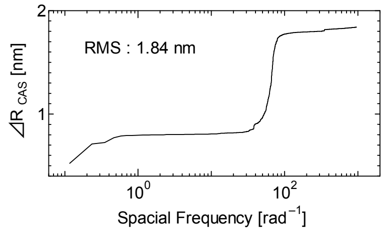
図 11　階段状ステップ位置決め
（目標ステップ幅：(a) 5 nm，0.01 asec,
(b) 2 nm，0.005 asec）



(a) 真円度図



(b) 半径誤差ΔR



(c) 半径誤差の CAS

図 12　円運動（直径 1 mm）の真円度誤差

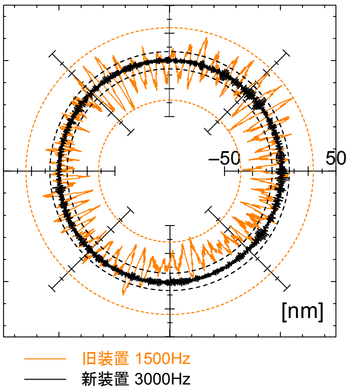


図 13　従来モデルとの比較

(5) まとめ

本研究により，2 nm の PTP 位置決め分解能と，直径 1 mm の円運動における真円度誤差 10.5 nm，半径誤差の RMS 値 2 nm 以下を達成し，ミリストロークにわたってナノメートルレベルの位置決め分解能と精度を持つ超精密位置決めシステムを実現することができた．本機構は，図 1 で示した空白領域を充足するものとして位置づけることができ，弾性案内－電磁力駆動方式による新たな可能性を示すものとして重要な意義を持っている．さらに本研究は，機構の設計からモデル化および制御系設計までのプロセスを系統的に実施したものであり，弾性案内と電磁力駆動によるミリストローク超精密位置決め機構の統合的設計手法に対する基礎的知見を示す試みとしての意義を有している．

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6 件）

① 深田茂生，松田智明，青山幸弘：弾性案内-電磁力駆動によるミリストローク超精密位置決め機構（第 4 報，一体化ヒンジ機構の構成），2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，査読無，(2011-3) p. 475-476.

② Shigeo FUKADA, Kentaro NISHIMURA, Tomoaki MATSUDA: Ultra-precise circular motion control over a one-millimeter stroke by means of flexure guide and electromagnetic linear motor, Proceedings of the 4th International Conference on Positioning technology, 査読有，(2010)　p. 217-222.

③ Shigeo Fukada, Kentaro Nishimura, Tomoaki Matsuda: Ultra-precise continuous path control over a one-millimeter stroke by means of flexure guide and electromagnetic linear motor, Proceedings of the 9th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 査読有，Volume 1, (2009)　p. 341-344.

④ 松田智明，深田茂生：弾性案内－電磁力駆動によるミリストローク超精密平面位置決め機構（量子化を考慮した電流駆動方法の改善），2009 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集，査読無，(2009-11) p. 53-54.

⑤ 松田 智明，深田 茂生，西村 建太郎：弾性案内を用いた超精密平面位置決め機構の動特性と制御，2008 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集，査読無，(2008-11) p. 99-100.

⑥ 深田 茂生，西村建太朗，松田智明：弾性案内-電磁力駆動によるミリストローク超精密位置決め機構（第３報，３自由度平面位置決め機構による連続軌跡制御），2008 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，査読無，(2008-9) p. 563-564.

6．研究組織

(1)研究代表者

深田　茂生（FUKADA SHIGEO）
信州大学・工学部・教授
研究者番号：70156743

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし