

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249024

研究課題名(和文) マイクロハイドロリックスの基盤構築

研究課題名(英文) Development of fundamental technologies for microhydraulics

研究代表者

藤井 輝夫 (Fujii, Teruo)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：30251474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,000,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロハイドロリックアクチュエータの開発と実証を行った。マイクロハイドロリックアクチュエータの基本動作機構や、圧力発生源となる埋め込み型電気浸透流ポンプの作製と性能評価、およびその埋め込み型電気浸透流ポンプを小型バッテリーで駆動するための電源制御回路等の基盤技術を構築し、すべての構成要素を集積化させることで、自立的に動作するマイクロハイドロリックアクチュエータの実証ソフトロボットモデルの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：This study succeeded in the development of fundamental technologies required for the microhydraulic actuator and the demonstration of a totally-integrated microhydraulic system. First, the most basic motion of microhydraulic actuator was designed and performed using a simplified strip-shaped soft actuator. Then, the other core components necessary for microhydraulic actuator, such as a miniaturized hydraulic pressure generator mountable on microhydraulic actuator and a compact control unit including a battery, were developed and integrated into a basic actuator. Finally, a totally-integrated microhydraulic actuator was fabricated and operated in stand-alone mode to show its usefulness in robotics. The developed microhydraulic actuator worked autonomously in response to external light stimulus.

研究分野：応用マイクロ流体システム

キーワード：マイクロハイドロリックス ソフトアクチュエータ マイクロ流体デバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) ロボティクス分野においてアクチュエータは重要な基本構成要素の一つであり、これまでもステッピングモーターや圧電素子、形状記憶合金、空気圧など様々な駆動原理に基づいたアクチュエータが提案されてきた。しかし近年ではその応用分野の拡大によって、壊れやすい物体の把持動作や水中での遊泳など、従来のロボットによく見られる剛体メカニズムでは再現が難しい柔軟な動きが求められる場面が増えてきている。「柔軟性」だけでなく、「小型集積化」も重要なキーワードである。例えば、複雑な機械の内部や体内など人の手が届かない狭い箇所で作業するマニピュレータや、深海、宇宙、災害現場といった極限環境へ送り込めるロボットへのニーズも高まっており、装置としての小型化が求められるようになった。そのためには機能の高度集積化が必要不可欠である。極限環境における作業ではスタンドアロンでの動作が必須であり、動力(電力)源を始め、制御系や通信機能も本体に内蔵されているのが望ましい。しかし、ステッピングモーターなどの電磁力方式アクチュエータは駆動時に高電流や高電圧が必要になるため、小型化や集積化は容易ではなく、消費電力や搭載するバッテリーが大きな問題となる。つまり、複数のアクチュエータを複雑に操作しなければならないロボットを動作させるには、より低電圧・低電流・低消費電力の駆動機構が望まれる。このような要求を満足させるソフトアクチュエーション機構が「マイクロハイドロリクス」である。

(2) これまで、マイクロ流体デバイスと呼ばれるチップサイズのデバイスを核にした、小型集積型分析装置の開発が行われてきた。マイクロ流体デバイスの素材として柔軟なシリコーンゴムが用いられることが多く、例えば膜状にすると微小スケールでも比較的容易に大変形をする。マイクロ流体デバイス分野ではこの膜の変形はよく利用されており、マイクロバルブ(引用文献①)や流量制御(引用文献②)、ダイヤフラム式ポンプなどに応用されている。マイクロハイドロリクスではこの変形をアクチュエータ機構へ応用する。微小流路に圧力を加えて制御することによって、平面的なゴムシートから3次元的な変形や動きを作り出すことができる。

(3) 一方、電気浸透流ポンプ(Electro-Osmotic Pump、以下 EOP)という小型圧力発生装置の開発も進んでいる。EOPはその小型軽量という特性に加えて、数ボルトから数10ボルトの直流電圧を印加するだけで100kPa以上という高い水圧を吐出できる。加えて、電流値が極めて低く(1mA以下)、消費電力が極めて小さい(1mW以下)。EOPはシリコーンゴムシート内部に埋め込めるため、マイクロハイドロリックアクチュエータの駆動

源として有効である。EOPは制御も単純であり、小型の制御回路やバッテリーの小型化も可能で、電力源や制御装置も含めた高度集積化も可能である。

2. 研究の目的

本研究では、微細な流路構造をパターンニングした柔軟素材の2次元平面デバイスからフレキシブルで3次元的な動きを作り出す「マイクロハイドロリクス」という新しいアクチュエーション概念を提案し、その実証を行うことを目的とする。マイクロハイドロリクスでは、駆動力となる水圧を発生させる装置やその制御機構までも平面デバイス内部に埋め込むことにより、小型化と高度集積化を同時に実現する。まず、マイクロハイドロリックアクチュエータの動作原理を実証し、変形・動作メカニズムを明らかにする。次に、本研究課題の最後に提案する実証ロボットの開発に必要な、アクチュエータ以外の構成要素、すなわち、駆動圧力源としてのEOPや、周囲環境を知るための何らかのセンサ類、それらをリモートコントロールする制御・通信回路なども構築する。さらにそれらを統合して基本アクチュエータシステムを構築し、実証する。そして最終的に、具体的な実証モデルロボットを開発・作製し、デモンストレーションを行い、マイクロハイドロリクスの技術基盤を確立する。

3. 研究の方法

(1) 提案するマイクロハイドロリクスの基本概念を図1に示す。2次元平面にパターンニングした微小流路に圧力を加えることにより、柔軟素材で構成される2次元平面形状からフレキシブルで3次元的な変形および動作を作り出す。各流路の一端には圧力源となる小型ポンプが埋め込まれており、そのポンプから吐出される圧力で微小流路を膨張させて柔軟なシート状デバイスを変形させる。微小流路を適切に配置し、複数のポンプを独立に駆動することで各流路に加わる圧力を制御し、シート状デバイスを特定の形状に変形させたり、機能的な動きをさせたりする。特長の一つは、2次元平面にパターンニングした微小流路に圧力をかけて3次元的な変形を作り出す点である。マイクロハイドロリクスは複雑な立体構造を必要とせず、単純な2次元的な微細流路構造を配置するだけで十分である。つまり、微細流路パターンの設計次第で、より自由度の高い動きを表現できると期待される。もう一つの特長は、圧力発生源をアクチュエータ本体に集積化する点である。一般に空気圧や油圧を使った機構では、コンプレッサーや圧力ポンプといった大型の圧力発生装置が外部に配置され、そこから可動部へチューブや管で圧力を伝達することが多い。そのため高自由度の動きをさせるには大量の管や弁を複雑に配置、接続しなければならない、小型化を阻む要因となってい

た。これに対してマイクロハイドロリックアクチュエータでは、小型の埋め込み型 EOP を圧力発生装置として用いる。圧力発生源となるポンプをアクチュエータ本体に内蔵することで、アクチュエータ全体の小型集積化を図ると同時に、可動部 1 箇所に対して圧力源 1 個を配置することで、単純なシステム構成で自由度の高い動作が実現可能になる。同時にアクチュエータ制御系も単純化され、なおかつ必要な制御通信回路やバッテリーも本体に搭載できる程度にまで小型化できる。

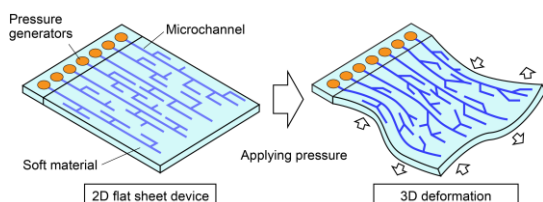


図 1 マイクロハイドロリックス

(2) 最初に、マイクロハイドロリックアクチュエータの基本型とその動作原理を実証した。基本的なマイクロハイドロリックアクチュエータ (図 2) は、矩形断面直線流路を一本内蔵した短冊状アクチュエータ部分と内蔵圧力源 (ここでは埋め込み型 EOP) で構成される。まず、圧力源から圧力を発生させると、流路内の圧力が徐々に上昇し、それに伴って流路壁面が膨らみ、全体的に伸長する。そのとき、流路壁面の厚みの違いによって流路長手方向への流路上下壁面の伸長の程度に差が生じる。つまり、薄い方がよく伸長し、厚い方があまり伸長しない状態になる。その伸長の違いによって、アクチュエータが一定方向 (ここでは流路壁面が厚い下側) へたわむことになる。

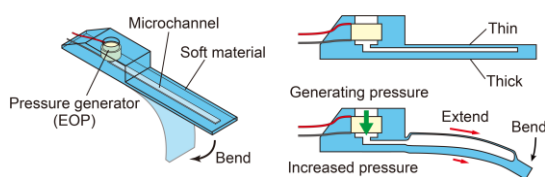


図 2 基本動作原理

(3) 基本動作に関しては、実証実験に加えて、有限要素法をベースにした構造解析シミュレーションも行った。構造解析シミュレータ ANSYS を用いて、図 2 に示した基本型アクチュエータの変形の様子を再現する数値計算を実施した。構造解析シミュレーションによって、アクチュエータ形状、とくにアクチュエータ表面溝構造がアクチュエータの動作に及ぼす影響を調べることで、より低い圧力で大きな動作をする構造を探り、動作スピードを向上させる方法を検討した。

(4) 次に、マイクロハイドロリックアクチュエータの内蔵圧力源として用いる EOP を

開発した。EOP とは、微小流路内に発生する電気浸透流 (Electroosmotic flow, EOF) を利用して圧力を発生させるポンプのことで、その中でも、比表面積が大きい多孔質体の中に発生する電気浸透流を利用するタイプは、その構造の単純さに加えて、低電圧・低電流にもかかわらず高圧力を吐出できるという利点があり、小型化や集積化、省電力化に適している。EOP の吐出圧力は、EOP に印可される直流電圧を調整することで制御されるため、流路に加わる圧力によって動きが決まるマイクロハイドロリックスでは、EOP に印可する電圧を制御することによってその動きを制御できる。

(5) 続いて、アクチュエータを動作させる電源制御回路を開発した。基本動作実験の結果、マイクロハイドロリックアクチュエータを動作させるには最大で 150 kPa 程度の圧力が必要であることがわかっている。また、埋め込み型 EOP は、直流電圧 55 V を印加することで 200 kPa 程度の吐出圧力を得られることもわかっている。そこで、EOP 駆動用の電源電圧を 55 V と設定し、その電源電圧を PWM 方式で EOP に供給することとした。また、自立動作を実現するため、内蔵された小型バッテリーから供給される電力のみを利用して動作するようにする。さらに、光センサとマイコンボードを搭載することで、外部からの光刺激に反応して動作する簡易的な自律制御を行えるような機能も追加することにした。

(6) 最後に、開発した基本アクチュエータ、埋め込み型 EOP、電源制御回路の 3 つの構成要素をすべて集積化することにより、マイクロハイドロリックアクチュエータ実証ソフトウェアモデルを試作し、その動作実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 設計、試作した基本アクチュエータの構造を図 3 に示す。アクチュエータの短冊状動作部分の外形は長さ 35 mm、幅 10 mm、厚み 1.2 mm で、底面から高さ 0.7 mm の位置に、長さ 30 mm、幅 2 mm、高さ 0.3 mm の矩形断面直線流路が 1 本配置されている。構造解析シミュレータ ANSYS を用いて基本アクチュエータの構造解析シミュレーションを行ったところ、変形を大きくするためには、流路の深さやシートの厚み等の寸法を変化させても効果が小さく、アクチュエータ表面に微細な連続溝構造を設けることが効果的であった。溝構造を設けることで、同じ圧力に対する変位は約 2 倍になり、約 70% の圧力で同じ変位を得られたことから、アクチュエータ動作スピードが上がることが予想される。そこで、流路上側には幅 2 mm、深さ 0.1 mm の溝構造を 2 mm 間隔で配置した。

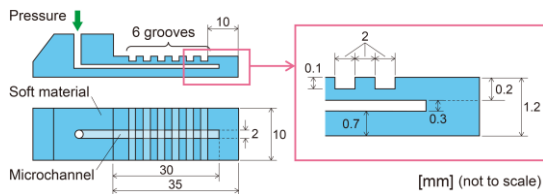


図3 基本アクチュエータ構造

(2) 製作した基本アクチュエータの動作確認実験の様子を以下に示す。アクチュエータ流路入口に一定圧力を印可することでアクチュエータを変形させ、その様子を観察するとともに、アクチュエータ先端の変位量を測定した。なお本実験では EOP ではなく空気圧制御装置を用いて、外部から圧力を供給している。流路に加える圧力を 10 kPa から 120 kPa まで段階的に圧力を上昇させながら、アクチュエータが変形する様子を観察し、アクチュエータ先端部の変位量を測定した。代表的な圧力値における変形の様子を図 4 に、印可圧力に対するアクチュエータ先端部の変位量を測定した結果を図 5 に示す。印可圧力の上昇に伴って、アクチュエータが流路壁面の厚い側にたわみ、90 kPa を印加した時にアクチュエータ先端変位量が最大になった。以上より、製作した基本アクチュエータでは数十 kPa 程度の圧力で十分な変位量が得られ、印可圧力の大きさを調整することでその動作を制御することがわかった。

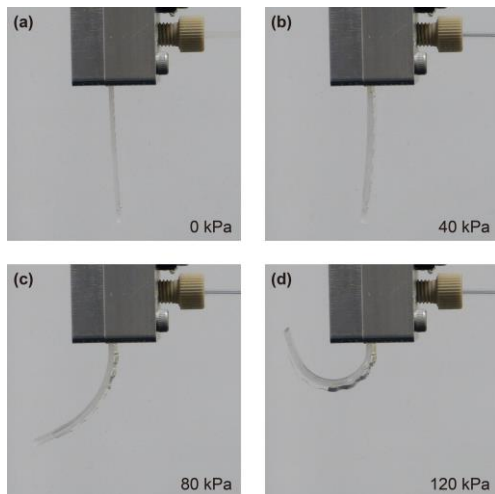


図4 基本動作の様子

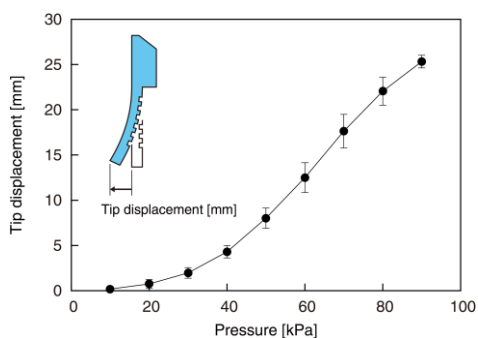


図5 アクチュエータ先端部の変位量

(3) マイクロハイドロリックアクチュエータに搭載するために開発した EOP ユニートを図 6 に示す。直径 5 mm、高さ 2.6 mm の円柱状の多孔質セラミック片を、直径 0.1 mm の白金ワイヤで挟み、金型を用いてアクチュエータ本体と同素材のシリコンゴムで周囲を固めることにより製作した。アクチュエータ本体と同じシリコンゴム材料で作られているため、アクチュエータの任意の場所へ接合することができる。製作した EOP ユニートの性能を以下に示す。EOP の多孔質体内部に電気浸透流を発生させるための作動流体はメタノールである。評価用 EOP を複数個作製し、それぞれに対して 55 V を様々な Duty 比で印加したときの吐出圧力を測定したところ、最大で 200 kPa まで出力できることがわかった。これにより、埋め込み型 EOP は比較的低電圧で高圧力を吐出できる非常に高性能の小型圧力源であり、マイクロハイドロリックアクチュエータの圧力源として十分な性能を備えていることがわかった。

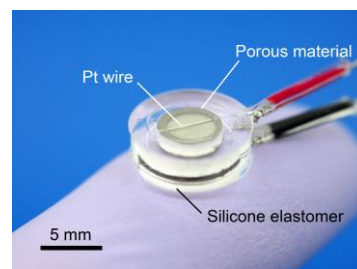


図6 EOP ユニート

(4) 開発した EOP 駆動用の電源制御回路を図 7 に示す。フットプリントが 42 mm × 42 mm で、電源回路基板と制御回路基板の二段構成になっている。電力供給源であるバッテリーについては、安定して電圧を供給でき、かつ小型である 3.7 V のリチウムイオンポリマー電池を採用し、まず DC/DC コントローラを搭載した電源回路基板でリチウムイオンポリマー電池の出力電圧 3.7 V を 55 V に昇圧している。一方、制御回路基板にはマイコンポート、モータードライバ、光センサである CdS セルが搭載され、電源回路基板で生成された 55 V 電圧が 2 つの出力コネクタからあらかじめマイコンにプログラミングされたとおりに PWM 方式で出力される。モータードライバを用いることで極性の切り替えが可能となっているため、EOP に正電圧 (+55 V) を印可して吐出圧力を上昇させるだけでなく、負電圧 (-55 V) を印可して陰圧を作り出すこともできる。マイコンには 2 個の光センサ CdS セルからの信号に応じて電圧の PWM 出力を制御するプログラムが書き込まれ、電源が入ると自動的に動作を開始する。

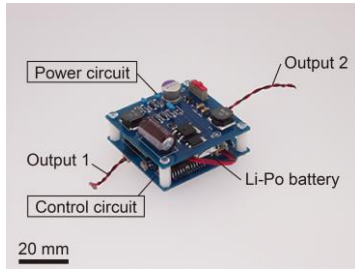


図 7 電源制御回路

(5) 基本アクチュエータの流路入口に EOP ユニートを接合し、駆動圧力源と一体になった基本アクチュエータを試作し、その実証を行った (図 8) アクチュエータ動作部分は基本動作の実証で用いたアクチュエータと同一となっている。以下の実験は EOP の作動流体であるメタノールを満たした水槽の中で実施している。電源装置としては、前述の小型電源制御回路ではなく、汎用の定格電源装置を用いている。定格電源装置から 55 V を EOP に供給したときのアクチュエータ動作の様子を観察し、さらにアクチュエータ先端部分の変位量と、最大変位に至るまでに要した時間を測定した。また、アクチュエータの流路上面に設けた溝構造の効果を確認するため、流路上面に溝構造を持たないアクチュエータも作製し、比較を行った。

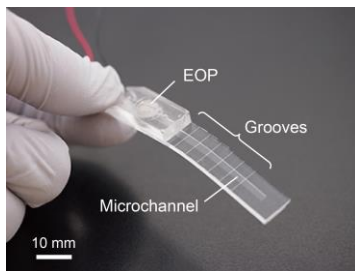


図 8 圧力源一体型アクチュエータ

(6) EOP に 55 V を印可したときのアクチュエータの動作の様子を図 9 に示す。メタノール水槽内でアクチュエータを垂直に配置している。電圧を印可すると EOP から吐出される圧力の上昇に伴い、流路部分が徐々に膨らんでいき、アクチュエータが変形した。電圧を印可してから 45 秒後にほぼ 90 度まで曲がることを確認された。電圧印加後の経過時間と先端部の変位量の関係を図 10 に示す。比較のため、流路上面に溝構造がないアクチュエータを用いた場合の結果もプロットした。溝構造がない場合、25 mm の変位量を得るために 90 秒かかっていたが、溝構造を設けることで、同程度の変位量を得るための時間は 50 秒に短縮され、約 2 倍の動作スピードになった。この結果から、構造解析シミュレーションから予想されたとおり、溝構造はアクチュエータの動作スピードの向上に効果的であることが実験的にも実証された。

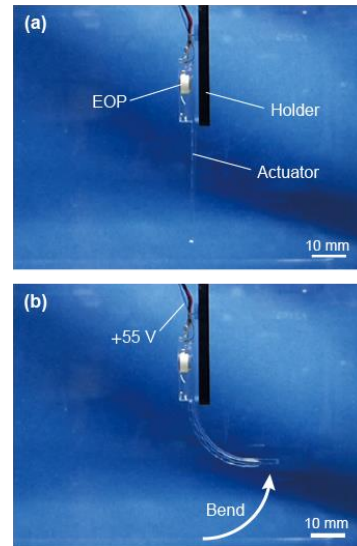


図 9 圧力源一体型アクチュエータの動作実験 (55 V 印加時). (a) 初期状態 (b) 45 秒後

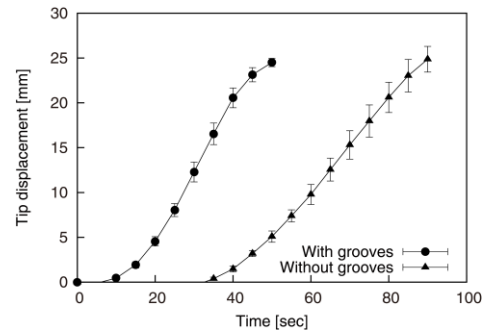


図 10 先端部変位量の時間変化

(7) 最後に、マイクロハイドロリックアクチュエータ実証ソフトロボットモデルを試作し、自律動作実験を実施した。実証モデルは、2本の流路と2個の埋め込み型 EOP を内蔵した幅 48 mm、長さ 37 mm のシート状アクチュエータになっている。EOP の作動流体であるメタノール中で動作させるため、制御回路およびバッテリー等の電気系統をすべて、アクチュエータ本体と同一素材であるシリコンゴムで封入し、周囲から電氣的に絶縁している。制御回路のマイコンに書き込んだ実証用制御プログラムは以下のとおりである。右側 CdS セルに光刺激を与えると、2個の EOP に +55 V が印可されて圧力が発生し、シート状アクチュエータを屈曲させる。一方、左側 CdS セルに光刺激を与えると、2個の EOP に -55 V が印可されて圧力が低下し、シート状アクチュエータが初期の平面形状に戻る。光刺激がない場合、EOP に電圧は印加されずアクチュエータは動作しない。

(8) 実験に用いた実証モデル、および実験の様子を図 11 に示す。実証モデルの電源スイッチを入れ、メタノール水槽に投入する。LED ライトで右側 CdS セルに光を照射すると、シート状アクチュエータが徐々に上方に屈曲し、50 秒後に約 15 mm 上方へ変位し

た。左側 CdS セルに光を照射すると、徐々にたわみが小さくなり、約 30 秒後にもとの状態に戻った。以上より、すべての構成要素を集積して一体化したマイクロハイドロリックアクチュエータモデルが、スタンドアローンで動作することが実証され、さらに、明るさという外部環境をセンシングして、それに応じた動作をする自律動作も可能であることが示された。

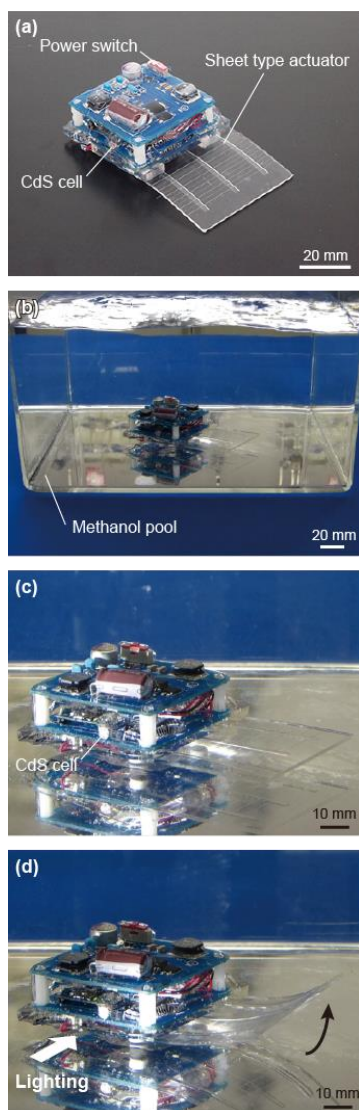


図 11 自立動作と自律動作の実証。(a) 実証モデル (b) メタノール水槽内で実験 (c) 初期状態 (d) 光刺激に応じた自律動作

<引用文献>

- ① M. A. Unger, *et al.*, Science, 288, 2000, 113–116.
- ② I. Doh and Y.-H. Cho, Lab on a Chip, 9, 2009, 2070–2075.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 7 件)

- ① T. Odera, H. Kinoshita, M. Oshima, and T. Fujii, Development of a

fundamental soft actuator based on microhydraulics, the 7th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio (BAMN2013), 2013 年 8 月 27 日, Jeju (Korea)

- ② 大寺 貴裕, 木下 晴之, 大島 まり, 藤井 輝夫, マイクロハイドロリックに基づくソフトアクチュエータの開発, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), 2013 年 12 月 19 日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)
- ③ 大寺 貴裕, 木下 晴之, 榊原 隆, 大島 まり, 藤井 輝夫, マイクロハイドロリックアクチュエータの開発と実証, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014 年 3 月 20 日, 東京大学 (東京都文京区)
- ④ 榊原 隆, 大寺 貴裕, 木下 晴之, 大島 まり, 藤井 輝夫, マイクロハイドロリックアクチュエータの構造解析シミュレーション, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014 年 3 月 20 日, 東京大学 (東京都文京区)
- ⑤ 榊原 隆, 木下 晴之, 大島 まり, 藤井 輝夫, 微細流路の複合化による多自由度マイクロハイドロリックアクチュエータの開発, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014 年 9 月 16 日, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市)
- ⑥ 榊原 隆, 木下 晴之, 大島 まり, 藤井 輝夫, マイクロハイドロリックアクチュエータの自立駆動化, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 17 日, 東洋大学 (東京都文京区)
- ⑦ 木下 晴之, 榊原 隆, 大島 まり, 藤井 輝夫, マイクロハイドロリックソフトアクチュエータの基盤技術の構築, 第 16 回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2015), 2015 年 12 月 15 日, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)

[図書] (計 1 件)

- ① 木下 晴之, 藤井 輝夫 他, S & T 出版, ソフトアクチュエータの材料・構成・応用技術, 2016, 312–318.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 輝夫 (FUJII, Teruo)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号: 30251474