

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26280069

研究課題名（和文）テーブルトップディスプレイにおける視触覚インタラクション技術の研究

研究課題名（英文）Study on visuo-haptic interaction technologies on tabletop displays

研究代表者

山本 晃生（Yamamoto, Akio）

東京大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40313035

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,300,000円

研究成果の概要（和文）：テーブルトップディスプレイ上での視触覚インタラクションを実現する技術である画面上力覚提示と画面上物体駆動について、その特性改善と統合に関する研究を実施した。振動を活用して力覚提示と物体搬送を統合する手法を2種類提案し、解析・実験を通じて、提案原理の妥当性を検証した。具体的には、静電吸着を利用する従来の力覚提示技術において、吸着面を水平面内で振動させ、それに同期して静電吸着を行うことで物体駆動が行えることを示した。一方、静電アクチュエータ技術による物体駆動において、固定子平面のたわみ振動によるスクイーズ効果で駆動対象物との間の摩擦力を変調し、駆動と吸着を両立できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：This project has aimed to realize novel technologies for visuo-haptic interactions on large-size tabletop displays. The project has focused on "passive surface haptics", "on-screen object actuation", and their integrations. To integrate passive haptics and active actuation, two different methods, both utilizing vibrations, have been proposed. One method is to add actuation functions to passive haptics. The passive haptics is realized by electroadhesion. In the proposed method, the stator surface electrode for electroadhesion is vibrated horizontally, and electroadhesion is activated in synchronous with the vibration, which creates motion of the adhesion pad. The other method is for object actuation using a surface electrostatic actuator. The stator of the actuator is vibrated in a bending mode. Resulting squeeze effect can modulate the friction between the stator and the slider, which would allow the system to realize both actuation and adhesion in one system.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：ヒューマンインタフェース ハプティクス アクチュエータ 静電気力 振動応用

1. 研究開始当初の背景

近年、大画面液晶ディスプレイが広く普及し、テーブルトップのように平置きした形態での活用も進んでいる。そうした大画面テーブルトップディスプレイ上では、その広大な画面ゆえに、従来のスマートフォンなどの小画面とは異なる新しいインタラクションの実現が期待されるが、ディスプレイ上での既存のインタラクションは、タッチパネルやタッチペン等を用いてユーザが情報入力を行う程度にとどまっている。

特に、そうしたインタラクションを情報の「入力」と「出力」という観点から分類して考えると、「入力」ではタッチパネル等の活用がなされている反面、「出力」では単に映像を表示する以上のことは行われていない場合がほとんどである。「出力」の面においても、単なる映像表現を超えた情報提示が行えれば、大画面テーブルトップディスプレイ上でのインタラクションを変革できるものと期待できる。

以上のことから、研究代表者は従来研究において、透明電極を用いて発生させる静電気力を活用して、画面上に機械的な出力を生成する手法を提案してきた。一つは、透明静電アクチュエータを用いた画面上での物体駆動（搬送）であり、もう一つは、静電吸着を活用したマルチタッチ力覚提示技術である。いずれの技術も、透明電極を用いてシステムが透明に構成されていることから、映像情報を阻害することなく液晶ディスプレイ表面に容易に設置することができ、映像表現と合わせた物体駆動や力覚提示を行うことができる。

これらの提案に関して従来研究で試作されたプロトタイプシステムは、新しいインタラクションの可能性を感じさせたが、表現力や安定性等の面で技術的な課題を残していた。さらには、両者の機能である力覚提示と物体駆動を同時に実現することで、より多様なインタラクションが可能になると考えられ、両者を統合する手法の開発が望まれた。

2. 研究の目的

上記の背景をもとに、本研究課題においては、「静電アクチュエータによる物体駆動技術」、「マルチタッチ力覚提示」のそれぞれにおいて、安定性やシステム構成の煩雑さを改善する新手法を提案・検証すること、ならびに、両者の機能を統合するための方策を検討することを研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、具体的に以下の個別項目について研究を実施した。

(1) 静電アクチュエータによる物体駆動

①平面2自由度駆動のための電極構造検討

物体駆動に用いている静電アクチュエータ技術は、もともと1自由度駆動を念頭に開発されたものであるが、液晶ディスプレイ上

のような平面上での物体駆動には、2自由度で動作する能力が必要である。従来研究では、X軸とY軸の動作を実現する電極を市松模様に配置することで2自由度駆動を実現してきたが、それ以外の方法についても検討を行うことが望ましい。そこで、従来、検討対象外とされてきたX軸駆動用電極とY軸駆動用電極の積層構造について検討を行った。

②LC共振形誘導方式のシンプル化

静電アクチュエータには、従来より複数の構成方法（駆動原理）が提案されている。液晶ディスプレイ側に貼り付ける固定子の構造はいずれにおいても共通であるが、移動子の構造と、動作特性に違いがある。移動子に電極を有するタイプ（以下、両電極同期式）は同期モータとして機能し、かつ、移動子電極にも電圧を印加することで比較的大きな発生力を得られる。しかし、同期モータであるため外力が加わった場合に脱調することから、ユーザとの直接的なインタラクションには不向きであった。また、移動子に電圧印加のための配線を必要とする点もシステム構成上は課題であった。

一方、移動子を誘電体のみで構成するタイプ（以下、誘電体誘導式）は、誘導モータとして機能することから脱調の無い滑らかな動作が可能であり、ユーザが直接触れて操作する用途にも適している。また、移動子への配線も不要であり、システムをよりシンプルに構成できる利点がある。反面、上記の両電極同期式と比較すると発生力が大きく劣るという問題があった。

これに対し、近年、移動子に電極を有し、それにコイルを接続することによって無配線が高電圧を誘導する「LC共振形誘導方式」が提案されている。この方式は、移動子への配線が不要でありながら前述の両電極同期式と同等の推力が期待でき、さらに、誘導モータとしての滑らかな動作が得られることから、インタラクション用の動作原理として期待が持てる。しかし、従来提案の方式では、移動子に3個のコイルを互いに磁気干渉しないよう接続する必要があるため、装置構成上、課題となっていた。そこで、これを大幅に簡略化する構成方法について検討を行った。

(2) マルチタッチ力覚提示技術の高度化

従来の研究でマルチタッチ力覚提示技術の基本構成は確立されているが、映像と同期した力覚提示を行うために不可欠な位置検出に従来研究では外部センサを用いており、システムの簡素化のために、よりコンパクトなセンシング手法が求められてきた。そこで、本研究では、システムに内蔵可能なビルトインセンサを検討した。また、従来システムでは、ユーザが画面上に配置されたパッドを動かした際に抵抗力を感じるだけであったが、より多様な表現をめざして、パッド押し込みの動作に対して触感を提示することを検討した。

(3) 物体駆動と力覚提示の統合手法検討

上記の物体駆動技術と力覚提示技術はいずれも透明電極による静電気力を用いて実現されており、共通点も多い。そのため、両者の統合が以前より期待されてきた。しかし一方で、この二つの技術は、「摩擦」に関して、互いに相反する要求を持っている。静電アクチュエータによる物体駆動では、駆動対象物(=アクチュエータ移動子)と画面(=アクチュエータ固定子)の間の摩擦は動作の妨げとなることから、摩擦係数が出来る限り低いことが望ましい。一方、静電吸着による力覚提示は、パッドと画面との間の吸着力を垂直抗力とする摩擦力を力覚提示に利用するため、ある程度大きな摩擦係数が必要とされる。この相反する摩擦への要求が、両者の統合を困難なものとしてきた。

そこで、本研究では、この解決のために「振動」を利用することを新たに提案し、具体的に次の2種の振動活用法を検討した。

- ①たわみ振動によるスクイーズ効果を用いた摩擦力変調
- ②水平面振動と静電吸着を併用した摩擦による物体駆動

4. 研究成果

上記の各項目で得られた成果を述べる。

(1) 静電アクチュエータによる物体駆動

①平面2自由度駆動のための電極構造検討

静電アクチュエータの1自由度駆動用電極は、駆動方向と直交する向きの電極を駆動方向へ多数配列することで実現される。今回、X軸用電極とY軸用電極を、異なるレイヤーに形成した積層電極について2自由度動作の可否を検討した。図1にその電極の外観を示す。静電アクチュエータでは、移動子・固定子間のギャップ範囲について制限があることと、電極を積層すると上層電極が下層電極の電場を遮蔽する可能性があることから、従来、こうした構造では下層電極による動作が困難であると考えられてきた。そのため、図1の電極製作に当たっては、上下層のギャップをできるだけ小さくすることと、上層に位置する電極の幅を細くして開口部を広くするように留意した。

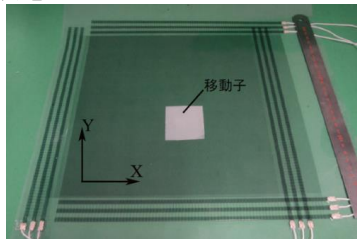


図1: X軸・Y軸を積層した電極シート(本例では、中央部に誘電体シートを配置)[1]

実際に図1の電極構造を形成し実験を行った結果、主要な2種類の静電アクチュエータ構成(両電極同期式と誘電体誘導式)の両者において、平面2自由度での動作が可能であることを確認した。両電極同期式としての実

験には、図1のシートを2枚重ねて、それぞれを固定子・移動子として用いた。両電極同期式での2自由度動作の一例を図2に示す。

上記のように、従来、動作が困難と考えられてきた積層電極構成においても2自由度動作が可能であることが本研究において確認された。一方で、従来想定されてきた通り、いずれの動作方式においても、上下層の電極の間に干渉が生じており、X軸、Y軸互いの動作性能を低下させている様子が観測された。

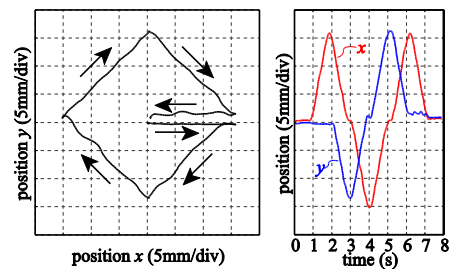


図2: 両電極同期式の2自由度動作[2]

②LC共振形誘導方式のシンプル化

LC共振形誘導方式では、移動子電極にコイルを接続し、アクチュエータ内部のキャパシタンスと共振させることで、移動子に高電圧を無配線で誘導する。従来方式では、移動子に3相電極を用いていることから、移動子に3個のコイルを接続する必要があった。コイル数を減らすためには、移動子相数を減らすことが有効と考え、本研究では移動子に2相電極を用いる図3の構成を新たに提案した。

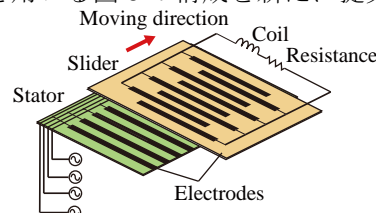


図3: 2相移動子によるLC共振形誘導方式[3]

提案方式においては、移動子が2相であることから、相間を接続するコイルが1個で良く、構成を大幅に簡略化できる。また、3相電極は電極の立体交差を必要とするため製造コストが高いが、2相電極は平面的な構造のみで製作できるため、より安価に製作できるメリットもある。

この2相アクチュエータについて、アクチュエータ電極間の静電容量に基づく動作モデルを構築し、印加電圧周波数に対する挙動の変化を理論的に導いた。また、実際に図4に示す1自由度プロトタイプを試作し、ほぼ理論通りの印加電圧周波数で動作を確認することができた。

現時点では、1自由度のプロトタイプでの動作が検証されたのみであり、今後、テーブルトップインタフェースに応用するには、まだ課題が残されている。具体的には、2自由度でのX電極とY電極が互いのLC共振に干渉する可能性があり、今後の検討を必要とす

る。また、図4では、コイルのサイズが大きく、ディスプレイ上に配置するには不適切である。これについては1cm³オーダの小型コイルでの動作にも、条件付きながら成功しており、今後の小型化に期待が持てる。

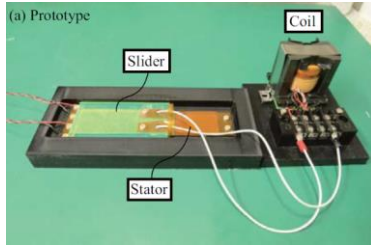


図4：2相移動子によるプロトタイプ[4]

(2) マルチタッチ力覚提示技術の高度化

従来研究では、画面上に配置された力覚提示パッドの位置検出を行うために、外付けカメラなどが用いられてきた。この力覚提示技術では、静電吸着用の電圧を印加するためにパッドに配線がされていることから、この配線にセンシング用の信号を印加することで、ビルトイン方式での位置検出を実現した。具体的には、静電吸着のための高電圧・低周波数の信号に、位置検出のための低電圧・高周波数の信号をトランスを介して重畳して、画面上に配置したパッドに印加する。一方、画面上にはITO (Indium-Tin-Oxide) による透明電極が配置されており、パッドに印加した高周波数信号は、パッドとITO電極との間の容量結合を介してITO電極に流れ込む。これを画面の四隅に設置した電極で検出すると、ITOが有する電気抵抗のために、パッドの位置に応じて四隅での検出量に変化する。よって、そこからパッド位置を推定することが可能となる。

この原理は、旧来のタッチパネルに良く用いられてきた表面型静電容量式タッチパネルの検出原理において、パッド(=タッチパネルにおいては指)と画面電極の関係を反転させたものと等価である。しかしながら、静電吸着用の高電圧と重畳することで、吸着とセンシングを同時に実現した点が本研究のユニークな成果といえる。

一方、静電吸着を用いた力覚提示技術では、これまで、ユーザの水平面内動作に対して摩擦による抵抗力を提示するだけであった。より高度な提示をめざして、ユーザの面法線方向の押し込み動作に対して硬軟感を提示する手法を提案した。提案手法では、パッドを中央であらかじめ分割しておき、ユーザの押し込みに応じてパッド中央部を沈み込ませることで、擬似的な硬軟感を提示することに成功した。

(3) 物体駆動と力覚提示の統合手法検討

① たわみ振動によるスクイーズ効果を用いた摩擦力変調

静電アクチュエータの固定子電極をガラス基板上に形成し、ガラス基板の両端に設置した圧電振動子によってガラス基板にたわ

み振動を発生させることで、ガラス基板と、その直上におかれた誘電体移動子との間の摩擦をスクイーズ効果により低減することを實現した。図5に試作機の外観を示す。ガラス基板上に透明電極を設けており、一部の給電用配線を除いてアクチュエータは透明化されている。電極としては、X軸用の電極群とY軸用の電極群が4×4の区画の中に市松模様状に並べられている。

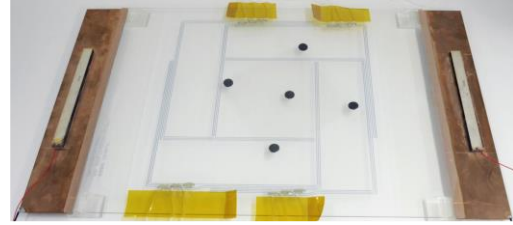


図5：スクイーズ効果のための試作機[5]

図5では、基板上に透明な誘電体移動子(4隅と中央部にモーショントラッキングのための黒いマーカーが着いている)が置かれている。ガラス基板の両端には圧電素子を貼り付けた、りん青銅板が設置されており、圧電素子を励振することで、ガラス基板上にたわみ振動を発生させる。

振動の無い状態では、ガラス基板と移動子との間の摩擦は大きく、静電アクチュエータとしての動作は得られなかったが、たわみ振動を起こすことで摩擦が大幅に低減され、静電アクチュエータとしての動作が可能となることが確認できた。

静電アクチュエータによる駆動と、静電吸着による力覚提示では、摩擦係数に対する要求が相反するものであったことから、この両者の統合に困難があったが、本試作機での実験結果から、両者を同一デバイス上で統合できる可能性が確認できた。

② 水平面振動と静電吸着を併用した摩擦による物体駆動

力覚提示と物体駆動を両立するための新たな手段として、静電アクチュエータによる物体駆動ではなく、水平面振動を用いた駆動方法を考案した。本提案では、電極のついた画面を水平方向に振動させ、振動に同期して画面上のパッドの静電吸着をON/OFFさせる。すると、ON/OFFと振動の位相差に応じてパッドはどちらか一方に力を受ける。これにより、パッドを面上で駆動することができる。また、複数のパッドが配置されている場合、それぞれのパッドにおける静電吸着ON/OFFの位相を独立に調整することで、複数のパッドを異なる速度で駆動することができる。試作機を図6に示す。本試作機では、透明なプラスチック板の上に透明電極を設置し、その上に力覚提示用パッドを2個配置している。プラスチック板をボイスコイルモータで図の横方向に振動させることで、左右にパッドを駆動することができる。

試作機の動作特性を図7に示す。横軸の位

相差は、静電吸着 ON/OFF と振動との位相差を表している。位相差を変化させることで、スライダ速度が制御可能であることが、この結果から確認できる。

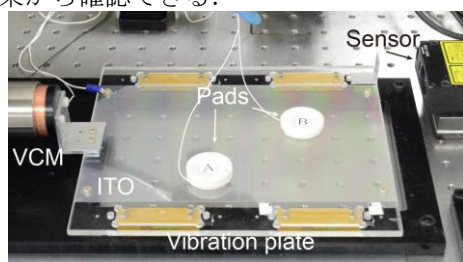


図 6：力覚提示パッドの振動駆動

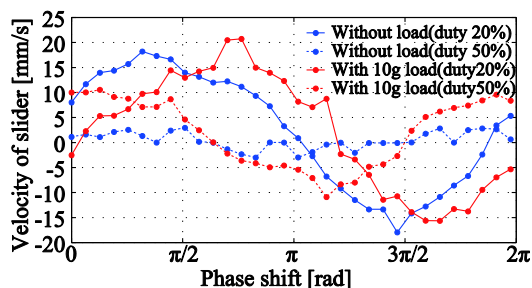


図 7：位相差と駆動速度の関係[6]

図 6 の装置では、ボイスコイルモータによりプラスチック板を加振しており、振動数は 120Hz と低い。振動数は、スライダの動作速度や、パッド静止保持時のパッド振動に影響する。特に静止保持時のパッド振動は、力覚提示に用いた際にはユーザに余計な振動感を与えることとなり望ましくない。これらのことから、本装置では、できるだけ高い振動数を用いることが望まれる。そこで、より高い振動数での駆動可能性を検討するため、プラスチック板の代わりに導電体レールを用い、レールを圧電素子で振動させるアクチュエータを試作し、その特性を検証した。その結果、最大で 2.5kHz の振動まではアクチュエータの駆動が確認できたが、それ以上の振動では意図したアクチュエータ動作が得られなかった。原因としては、高周波数領域では、静電吸着の機械的な応答が追いついていなかった可能性が考えられる。今後、静電吸着の高速 ON/OFF 時の応答について、より詳しく検証する必要がある。

(4) 総括

以上述べたように、本研究においては、テーブルトップインタラクションのための、力覚提示や物体駆動の技術に関して、その性能向上に向けた新しい提案を複数行い、実験や解析を通じて、その特性を明らかにした。特に、本研究で提唱した「振動」の併用は、力覚提示と物体駆動を両立する上で、非常に有効な手段であることが確認できた。本研究においては、振動を活用したプロトタイプを複数試作したものの、実際に大画面テーブルトップディスプレイへの実装には至っていない。今後、実際に大画面テーブルトップデ

ィスプレイ上に実装し、そのインタラクションに与える効果を検証していくことが望まれる。

<引用文献>

- [1]井口, 山本, 「直交電極を積層印刷した静電アクチュエータの下層電極の駆動性能」, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 567-568, 2015.
- [2]Iguchi, Yamamoto, “Planar 2-DOF Electrostatic Actuator with Layered Orthogonal Electrodes”, Proc. 6th Int’l Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology, pp. 254-255, 2015.
- [3]竹井, 山本, 「移動子に 2 相電極を有する LC 共振駆動型静電誘導モータ」, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 409-410, 2016.
- [4]竹井, 山本, 「2 相移動子を用いた LC 共振静電誘導モータにおけるヒステリシス特性の改善」, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 165-166, 2017.
- [5]Zsurzan, Yamamoto, et al., “Using squeeze-film effect to reduce surface friction in electrostatic actuators”, Proc. 6th International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 331-332, 2015.
- [6]徐, 中村, 山本, 「静電力覚提示システムにおける複数提示子の振動搬送に関する検討」, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会講演会論文集, pp. 902-903, 2015.

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 3 件)

- ① Taku Nakamura, Akio Yamamoto, “A Multi-user Surface Visuo-Haptic Display Using Electrostatic Friction Modulation and Capacitive-type Position Sensing”, IEEE Transactions on Haptics, 査読有, Vol. 9, 2016, 311-322

DOI:10.1109/TOH.2016.2556660

- ②Taku Nakamura, Akio Yamamoto, “Interaction force estimation on a built-in position sensor for an electrostatic visuo-haptic display”, ROBOMECH Journal, 査読有, 2016

DOI:10.1186/s40648-016-0050-6

- ③Toshiki Kitazawa, Fuminobu Kimura, Akio Yamamoto, “Multi-Digit Softness of a Tactile Display to Render Softness Feeling on Multiple Fingers”, Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications, 査読有, Vol. 2, 2014, 215-222

DOI:10.1007/978-3-662-44196-1_27

[学会発表] (計 29 件)

①竹井一真, 山本晃生, 「2 相移動子を用いた LC 共振静電誘導モータにおけるヒステリシス特性の改善」, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017 年 3 月 13 日~3 月 15 日, 慶應義塾大学矢上キャンパス (神奈川県・横浜市)

② Akio Yamamoto, “Surface Electrostatic Actuators for Computer-Human Interactions on Tabletops”, 2017 IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (招待講演), 2017 年 3 月 6 日~3 月 8 日, 長岡技術科学大学 (新潟県・長岡市)

③Kazuma Takei, Akio Yamamoto, “Modeling of voltage induction of a resonant electrostatic induction motor using 2-phase slider and a single coil”, 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2016 年 12 月 13 日~12 月 16 日, 札幌コンベンションセンター (北海道・札幌市)

④Li Xu, Akio Yamamoto, “A multi-slider linear actuator using modulated electrostatic attraction and inertia effect”, MECATRONICS-REM 2016, 2016 年 6 月 15 日~6 月 17 日, Compiègne (France)

⑤Taku Nakamura, Akio Yamamoto, “Extension of an Electrostatic Visuo-Haptic Display to Provide Softness Sensation”, IEEE Haptics Symposium 2016, 2016 年 4 月 8 日~4 月 11 日, Philadelphia (USA)

⑥竹井一真, 山本晃生, 「移動子に 2 相電極を有する LC 共振駆動型静電誘導モータ」, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 15 日~3 月 17 日, 東京理科大学野田キャンパス (千葉県・野田市)

⑦徐力, 山本晃生, 「振動と静電吸着によるマルチスライダ式リニアアクチュエータの検討」, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 15 日~3 月 17 日, 東京理科大学野田キャンパス (千葉県・野田市)

⑧徐力, 中村琢, 山本晃生, 「静電力覚提示システムにおける複数提示子の振動搬送に関する検討」, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会, 2015 年 12 月 14 日~16 日, 名古屋国際会議場 (愛知県・名古屋市)

⑨Gabriel Zsurzan, Akio Yamamoto, Zhe Zhang, Nils Andersen, Michael Andersen, “Using squeeze-film effect to reduce surface friction in electrostatic actuators”, 6th International Conference on Advanced Mechatronics, 2015 年 12 月 5 日~12 月 8 日, 早稲田大学西早稲田

キャンパス (東京都・新宿区)

⑩山本晃生, 「静電アクチュエーション技術のインタラクション応用」, 日本機械学会 2015 年度年次大会 (招待講演), 2015 年 9 月 13 日~9 月 16 日
北海道大学札幌キャンパス (北海道・札幌市)

⑪Ryuta Iguchi, Akio Yamamoto, “Planar 2-DOF Electrostatic Actuator with Layered Orthogonal Electrodes”, 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2015 年 4 月 22 日~4 月 25 日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県・宜野湾市)

⑫井口龍太, 山本晃生, 「直交電極を積層印刷した静電アクチュエータの下層電極の駆動性能」, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 17 日~3 月 19 日, 東洋大学白山キャンパス (東京都・文京区)

⑬Taku Nakamura, Akio Yamamoto, “Built-in Capacitive Position Sensing for Multi-user Electrostatic Visuo-Haptic Display”, AsiaHaptics 2014, 2014 年 11 月 18 日~11 月 20 日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

⑭井口龍太, 山本晃生, 「積層印刷された直交電極群を有する静電アクチュエータの下層電極の影響評価」, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014 年 9 月 16 日~9 月 18 日, 鳥取大学 (鳥取県・鳥取市)

[その他]

ホームページ等

①

<http://am.t.u-tokyo.ac.jp/research.html>

②

<https://www.youtube.com/user/YlabUTokyo>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 晃生 (YAMAMOTO, Akio)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 40313035