

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246028

研究課題名（和文） 電界共役流体のコモンラインを利用した  
マイクロアーム / 多指ハンドシステムの研究研究課題名（英文） Micro arms / multifingered hands system  
by using the common line of an electro-conjugate fluid (ECF)

研究代表者

横田 眞一 (YOKOTA SHINICHI)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：10092579

研究成果の概要(和文): 直流高電圧を印加すると電極間に活発な流動が発生する電界共役流体 (ECF) を用いた高出力パワー密度のマイクロ液圧源を開発し、これを内蔵した mm オーダでヒト腕 / 手指のような多自由度マイクロアーム / 多指ハンドシステムを開発した。開発したマイクロアームとマイクロ多指ハンドを統合し微小対象物のハンドリングを実現した。

研究成果の概要(英文): An electro-conjugate fluid (ECF) is a kind of functional fluid. A strong and active jet flow of ECF can be generated between electrodes surrounded by ECF, when high DC voltage is applied to the electrodes. By using this phenomenon and MEMS fabrication technology, we realized a novel micro hydraulic power source of high output power density. We developed advanced micro arm and hand systems including ECF micro hydraulic power sources inside.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	18,800,000	5,640,000	24,440,000
2010 年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2011 年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
年度			
年度			
総計	35,800,000	10,740,000	46,540,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機能要素

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 初期のロボットはおもに産業用ロボットであり、複数自由度を有するアームの先端に特定の作業を実現するためのエンドエフェクタが搭載されているものであった。1980年代には Utah/MIT dexterous hand のような多指ロボットハンドが登場し、エンドエフェクタの自由度が飛躍的に向上した。ただし、これらはヒト腕 / 手指と同程度あるいはそれ以上の規模のシステムであった。

(2) 現在、微小な対象物のハンドリングの

必要性が高まっている。すなわち、ロボットハンド / アームにおいても Micro dexterous hand の具現化が期待されている。我が国においても指幅 1mm 程度の空気圧駆動マイクロハンドが開発されている。しかし、多くのマイクロハンド研究は、エンドエフェクタは十分に小形であるもののハンドとは別に大規模な駆動源、たとえば空気圧源を必要としており、真にマイクロハンドとは言えないのが現状である。

(3) 申請者らの研究グループで研究を行っ

てきた電界共役流体は、直流高電圧を印加すると活発な流動（ECF ジェット）を発生する機能性流体である。すなわち、従来の液圧駆動システムに不可欠であった大規模な圧力源に代わり、微小な電極対のみによって流体パワーを発生できるため、特にマイクロアクチュエーションに適したフルードパワーソースとなり得る。申請者らは mm オーダの対象物をハンドリングするマイクロハンドの必要性を確信し、電界共役流体を駆動源とした新たな Micro dexterous hand/arm の可能性を見出すとともに、その第一歩として電界共役流体を用いた多自由度マイクロフィンガを開発した。このフィンガは断面に中心角 120 度の 3 つの扇形チャンバを有し、電界共役流体で満たされたフィンガチューブと、各チャンバの内圧を制御するための 3 つの電極対から構成されており、適当な内圧制御によって先端に多自由度運動を発生させるものであった。

（４）上記のような背景に鑑み、申請者らは上記の多自由度マイクロフィンガを発展させた本研究課題を着想した。

## 2. 研究の目的

mm オーダでヒト腕／手指のような多自由度系の実現を目指して、電界共役流体のラインをコモンラインとして、自由度ごとに微小な電極対と駆動部を配置した新たなマイクロロボットハンド／アームの構成を提案し、これを具現化することを目的としている。

（１）電界共役流体のコモンラインに対して必要な個所に電極対と駆動部を設ける新たなロボットハンドおよびアームの構成を提案し、ラージモデルを用いて駆動を確認する。

（２）電界共役流体のコモンラインを利用してヒト腕と同様の自由度を持つマイクロロボットアームを開発し、アーム先端の位置および姿勢制御を実現する。

（３）コモンラインを用いたマイクロ多指ハンドを開発し、物体の把持および操りを試みる。

（４）開発したマイクロアームとマイクロ多指ハンドを統合し、新規なマイクロハンド／アームシステムを具現化し、微小対象物のハンドリングを実現する。

## 3. 研究の方法

（１）電界共役流体のコモンラインを利用したマイクロアーム／多指ハンドの提案

mm オーダのマイクロ多自由度システム全体の構成を鑑みたトータルシステムの一部として電界共役流体によるアクチュエーションを提案し、構造体とアクチュエータを同時に設計する手法を提案する。たとえば、流路やタンクの一部を構造体と一体化させ、電界共役流体のコモンラインを内蔵した新た

なマイクロアームやハンドを提案する予定である。

（２）電界共役流体のコモンラインによる複数アクチュエータの駆動に関する検討

電界共役流体のコモンラインに複数のアクチュエータを接続した場合の駆動について検討する。電界共役流体を蓄えた 1 つのフレキシブルタンクから延びるチューブに、ECF マイクロ人工筋アクチュエータを複数個接続し、各アクチュエータの駆動特性を測定する。これをアクチュエータ単体で駆動した際の特性と比較し、電界共役流体のコモンラインを用いた複数アクチュエータの駆動の有効性を検証する。

（３）MEMS 技術を用いたマイクロジェット発生部の開発と最適化

MEMS 加工と高吐出圧力を両立するために、針・リング状に近い形状で、高アスペクト比をもつ三角柱・スリット形電極対を開発する。この三角柱・スリット形電極を最適化するため、スリット幅、電極間隔、三角柱電極の先端角度の三つの主要パラメータについて検討する。

（４）マイクロアームの開発

ヒト腕の自由度を参考に肩 3 自由度、肘 1 自由度、手首 3 自由度の合計 7 自由度を有するアームを設計する。電界共役流体の流路やタンクを構造体と一体化する。MEMS 技術で開発するマイクロジェット発生部を使用する。

（５）マイクロ多指ハンドの開発

マイクロアームの開発において得られたノウハウを基に、MP 関節、PIP 関節、DIP 関節を有するマイクロフィンガを開発する。

（６）マイクロアームおよびマイクロ多指ハンドの制御

マイクロアームおよび多指ハンドは電界共役流体に発生するジェット流に起因する圧力変化により駆動される予定である。電界共役流体の印加電圧・発生圧力特性が非線形であることから、上記アームおよび多指ハンドの制御のために、非線形特性を有する対象のモデリングに有効なニューラルネットワークを用いることを提案する。

## 4. 研究成果

（１）ECF を駆動源とした、断面に 2 室または 3 室を有する、屈曲動作を行う外径 5mm 以下の拮抗形 ECF マイクロフィンガの提案およびプロトタイプの試作と、2 室の ECF マイクロフィンガを 3 個並べて構成した、物体把持可能な ECF マイクロハンドの提案、試作、その制御、および物体の把持を行った。

印加電圧 5.0kV で発生圧力 18.1kPa、発生流量 254mm<sup>3</sup>/s（作動流体：FF-1EHA2）の ECF ジェット発生部の性能を確認した。このジェット発生部を用いた ECF マイクロフィンガの特性実験の結果、印加電圧 4.5kV 時に最大無負

荷屈曲変位 9.2mm, 最大発生力 8.7mN が得られた。無負荷時の屈曲変位ステップ応答は, 立ち上がり時間 0.8s, 立ち下り時間 0.9s であった。またフィンガが開閉するような制御電圧 4.5kV ステップ入力において, 変位応答時間 1.4s であった。断面に 3 室を有する ECF マイクロフィンガの場合, ECF として FF-101EHA2 を用いて, 印加電圧 4.0kV 時に最大無負荷屈曲変位 1.3mm が得られた。無負荷時の屈曲変位ステップ応答は, 立ち上がり時間 0.4s, 立ち下り時間 0.4s であった。最後に断面に 2 室を有する ECF マイクロフィンガ 3 本より ECF マイクロハンドを試作し, 印加電圧 4.0kV においてハンドの開閉動作を確認し, 5.5mN のダルマ型画鋸, タイゴンチューブなどの把持実験を行い, 把持動作を確認した。

(2) ECF ジェットを駆動源とした, ECF 人工筋拮抗駆動マイクロアクチュエータ (Micro Flexible Hydraulic Actuator: ECF-MFHA) を提案, 試作し, 実験とシミュレーションによる特性評価を行った。また, ECF-MFHA の応用として ECF マニピュレータアームの試作を行い, 実験により駆動特性を明らかにした。まず, ECF-MFHA の構成要素である ECF ジェットを用いた McKibben 形人工筋のモデルを繊維コードの弾性変形, 繊維コードとゴムチューブ間の摩擦, ヒステリシスが無視できる仮定の下に導出を行った。ECF 人工筋の試作, 実験を通して, 印加電圧 5kV 時に収縮率 18%, 発生力 1.2N の結果を得て, この実験結果とモデルによるシミュレーション結果の傾向がよく一致することを確認した。次に, ECF-MFHA を構成する 2 本の ECF 人工筋の一方が収縮したときに対向する方は同じだけ伸長し, 人工筋の差圧はジェット発生器の圧力差に等しいとする仮定の下で, ECF-MFHA のモデル式を導出した。試作した ECF-MFHA の実験結果より, 5kV から 1kV までのステップ電圧の印加時に, 有効径 19.5mm の関節において回転角度 8.2°を得て, この結果はシミュレーション結果と傾向が一致し, 構築したモデルが有効であることを証明した。最後に, ECF-MFHA を 2 つ用いた 2 軸マニピュレータの試作, 実験を行い, 5kV から 1kV までのステップ電圧の印加時に, 第 1, 第 2 リンクの関節において 6.5°, 11.1°を得て, ECF マイクロマニピュレータ実現の可能性を確認した。

(3) ECF ジェットを駆動源とした, 小形, 軽量, 柔軟の特長をもつロボットハンドを提案, 試作し, 実験による特性評価を行った。まず, ロボットハンドは, 人間の手と同じように 5 個の柔軟なフィンガと ECF タンクで構成されている。各ロボットフィンガは湾曲アクチュエータと ECF ジェット発生部からなり, ECF タンクをコモンラインとして, ECF ロボ

ットハンドを構成して把持動作を行う。本研究のフィンガでは, 低い圧力で大きい変位が得られるように, ゴムチューブの軸方向に 1 本の強化繊維が, 周方向に等間隔の強化繊維が配置された。ECF ロボットフィンガの試作, 実験を通して, X 方向への最大変位は印加電圧 6kV 時に約 30mm であった。Y 方向の変位は, 印加電圧 5.3kV 時に 27mm をピークとして, 内側に回り込み, 印加電圧 6kV で約 23mm になった。このフィンガを 5 本用いて ECF ロボットハンドを試作し, コップ, テープなどの把持実験を行い, この有効性を確認した。

(4) ロボットアーム駆動のための液圧サーボシステムのマイクロ領域での実現可能性を探るため, ローリングダイアフラムおよび ECF を用いて両方向駆動マイクロシリンダを提案, 試作して, 特性解明実験を行なった。ECF の外部漏れを防ぎ, 摺動の問題を解決することができるローリングダイアフラムを用いて, ECF ジェット駆動マイクロシリンダの試作を行なった。試作したマイクロシリンダの寸法は, ボディ部が  $16 \times 16 \times 18.5 \text{ mm}^3$ , ピストン部を含めた全長は 25.0 mm である。また, 試作したマイクロシリンダの, 印加電圧に対する発生力や出力変位についての特性実験を通して, マイクロシリンダの有効ストロークは, 約 1.5 mm であること, さらに, ボディ部に対するピストン部の相対位置により異なるものの, 印加電圧 3.0 kV 時に, 110~160 mN の発生力を得られることを明らかにした。

## 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 10 件)

Joon-wan Kim, Toshiya Suzuki, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Tube-type micropump by using electro-conjugated fluid (ECF), Sensors and Actuators:A, 査読有り, Vol.174, 2012, pp.155-161

Akihiro Yamaguchi, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, A Robot Finger Using Electro-conjugate Fluid, Advanced Robotics, 査読有り, Vol.26, 2012, pp.861-876

Kento Mori, Hideki Yamamoto, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Dominant Factors Inducing Electro-conjugate Fluid Flow, Sensors and Actuators: A, 査読有り, Vol.167, 2011, pp. 84-90,

Kenichiro Tokida, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Robotic earthworm using

electro-conjugate fluid, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有り, Vol.33, No.4, 2011, pp.1643-1651

Akihiro Yamaguchi, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, A Robot Hand Using Electro-conjugate Fluid, Sensors & Actuators:A, 査読有り, Vol.170, 2011, pp.139-146

Akihiro Yamaguchi, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, An In-pipe Mobile Robot Using Electro-Conjugate Fluid, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and manufacturing, 査読有り, Vol.5, No.3, 2011, pp.214-226

Shinichi Yokota, Fumiya YAJIMA, Kenjiro Takemura, Kazuya Edamura, ECF-jet driven Micro artificial antagonistic muscle actuators and its integration, Advanced Robotics, 査読有り, Vol.24, No.14, 2010, pp.1929-1943

Hideki Yamamoto, Kento Mori, Kenjiro Takemura, Leslie Yeo, James Friend, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Numerical Modeling of Electro-Conjugate Fluid Flows, Sensors and actuators:A, 査読有り, Vol.161, No.1-2, 2010, pp.152-157

山口彰浩,竹村研治郎,横田真一,枝村一弥,電界共役流体を用いたポンプ・タンク一体型液圧駆動ロボットフィンガ,日本機械学会論文集C, 査読有り, Vol.76, No.772, 2010, pp.3689-3696

R.V.Raghavan, J.Qin, L.Y.Yeo, J.R.Friend, K.Takemura, S.Yokota, K.Edamura, Electro-kinetic actuation of low conductivity dielectric liquids, Sensors and Actuators:B, 査読有り, Vol.140, 2009, pp. 287-294

[学会発表](計 65 件)

J.Kim, S.Yokota, 他 2 名, Flexible Hydraulic Micro Actuator Based on McKibben-type ECF Artificial Muscles, 11th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization, 2011/12/9, Keelung

J.Kim, S.Yokota, 他 2 名, High Performance ECF (Electro-Conjugate Fluid) Micropump by the In-plane Integration of MEMS-fabricated electrodes, ICMT2011, 2011/12/1, Melbourne

S.Yokota, 他 4 名, A Bio-inspired Robot Using Electro-conjugate Fluid, ICMT2011, 2011/12/1, Melbourne

J.Kim,S.Yokota, 他 2 名, Parameter Optimization on Power Density of MEMS-based Micro Triangular-prism-slit Electrode Array as an ECF-jet Generator, ICMT2011, 2011/11/30, Melbourne

S.Yokota, K.Yoshida, 他 3 名, Study on micro cylinder with bidirectional rolling diaphragms using ECF jet, ICMT2011, 2011/11/30, Melbourne

S.Yokota, 他 3 名, A Flexible Pump Using Electro-Conjugate Fluid for Liquid Cooling of Electronic Chips, ICMT2011, 2011/11/30, Melbourne

J.Kim,S.Yokota, 他 2 名, Performance Evaluation of a Triangular-Prism-Slit Electrode Pair As an Electro-Conjugate Fluid Jet Generator, 2011 ASME Dynamic Systems and Control Conference, and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control, 2011/11/1, Arlington, VA

S.Yokota, 他 4 名, The control of a bellows actuator using electro-conjugate fluid, JFPS international Symposium on Fluid Power 2011, 2011/10/27, OKINAWA

J.Kim, S.Yokota, 他 1 名, Needle-ring electrode pair as an ECF-jet generator by using MEMS technology, JFPS international Symposium on Fluid Power 2011, 2011/10/27, OKINAWA

J.Kim, S.Yokota, 他 2 名, Parameter optimization of MEMS-based micro triangular-prism-slit electrode pair as an electro-conjugate fluid jet generator, JFPS international Symposium on Fluid Power 2011, 2011/10/27, OKINAWA

横田真一,吉田和弘, 他 3 名, ECF ジェット圧力駆動マイクロシリンダの試作および特性解明, 山梨講演会 2011, 2011/10/22, 山梨

横田真一,吉田和弘, 他 3 名, ECF ジェットを用いた両方向ローリングダイアフラムマイクロアクチュエータに関する研究, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011/9/14, 東京

J.Kim, S.Yokota, 他 2 名, A flexible electro-conjugate fluid micropump with 3D triangular-prism-slit electrode pair, 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 2011/8/19, Beijing

金俊完,横田眞一, 他 2 名, 三角柱 - スリット形電極の直列・並列化による ECF マイクロポンプの性能評価, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011/5/27, 岡山

横田眞一, 他 4 名, 電界共役流体を用いたペローズアクチュエータの制御, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011/5/27, 岡山

横田眞一, 他 3 名, 電界共役流体を用いたロボットハンド, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011/5/27, 岡山

金俊完,横田眞一, 他 2 名, McKibben 形 ECF 人工筋を有する拮抗駆動マイクロアクチュエータ, 平成 23 年春季フルードパワーシステム講演会, 2011/5/27, 東京

横田眞一, 基調講演「マイクロ液圧」, 平成 22 年度秋季フルードパワーシステム学術講演会講演論文集, 別府, 2010/12/03, 別府

J.Kim, S.Yokota, 他 2 名, A high performance ECF-jet generator using improved three-dimensional electrode structures, ICMT2010, 2010/11/24, Osaka, **The Best Paper Award**

S.YOKOTA, 他 3 名, ECF-jet driven micro artificial muscle actuators and its application to an ECF micro hand, ICFP2009, 2009/04/09, Hangzhou, China, **Invited Speech**

その他 45 件の学会発表は省略する。

〔図書〕(計 5 件)

横田眞一, 吉田和弘, エヌティーエス, アクチュエータ研究開発の最前線 (1 編 5 章, 2 編 2 章, 機能性流体アクチュエータ), 2011, pp.61-70, 165-173

横田眞一, 竹村研治郎, 日本フルードパワーシステム学会, JFPS 機能性流体研究委員会報告書, 電界共役流体 (ECF) ジェットを用いたマイクロアクチュエータとセンサ, 2010, pp.127/131

Shinichi Yokota, Kazuhiro Yoshida, Kenjiro Takemura, Joon-wan Kim, Springer, London, Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, Part III Micro Actuators, New Microactuators Using Functional Fluids, 2010, pp. 91-101

Yutaka Tanaka, Shinichi Yokota, Springer, London, Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, Part III Micro Actuators, Design and

Fabrication of Micro Pump for Functional Fluid Power Actuation System, 2010, pp. 153-164

横田眞一, 日本フルードパワー工業界, フルードパワーの世界, 15. マイクロ液圧の分野, 2009, pp. 34-36

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横田 眞一 (YOKOTA SHINICHI)  
東京工業大学・精密工学研究所・教授  
研究者番号 : 10092579

### (2) 研究分担者

吉田 和弘 (YOSHIDA KAZUHIRO)  
東京工業大学・精密工学研究所・准教授  
研究者番号 : 00220632  
金 俊完 (KIM Joon-wan)  
東京工業大学・精密工学研究所・助教  
研究者番号 : 40401517

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :