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*山口 彰 浩^{*1}, 竹村 研治郎^{*2}
横田 真 一^{*3}, 枝村 一 弥^{*4}A Robot Finger with Integrated Pump/Tank
Using Electro-Conjugate FluidAkihiro YAMAGUCHI^{*5}, Kenjiro TAKEMURA,
Shinichi YOKOTA and Kazuya EDAMURA^{*5} Department of Mechanical Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Electro-conjugate fluid (ECF) is a kind of functional fluid, which produces a jet flow (ECF jet) when subjected to high DC voltage. It is known that a strong ECF jet is generated under nonuniform electric field, for example, the field with a pair of needle and ring electrode. This study introduces the ECF jet to develop a novel robot finger. First, we propose a concept of the robot finger which mainly consists of an ECF jet generator, a bending actuator and an ECF tank. The robot finger is driven by ECF jet, and integrated with a pump and a tank. Next, we characterize the ECF jet generator and confirm the effect of the variation of electrode gap and number of electrode pair on its performance. Finally, we investigate the characteristics of the robot finger. The length, the diameter, and the mass of the robot finger are 25 mm, 5 mm, and 3.8 g, respectively. The robot finger can move 27.8 mm in x direction and 26.7 mm in y direction at 3.1 s when ECF jet generator is applied at 6.0 kV.

Key Words: Functional Fluid, Robot Hand, Actuator, Micro-Mechanism, Electro-Conjugate Fluid, Soft Actuator, Robot Finger

1. 結 言

近年のロボット技術の進歩により、ロボットの活躍の場は従来の規格化された工場内から街や家庭といった人の生活空間へと拡大しつつあり、人との接触を前提としたロボットハンドの開発が数多く行われている⁽¹⁾⁽²⁾。これらのロボットハンドは、小型化、軽量化および柔軟化が安全性向上といった観点から重要な課題となる。しかし、従来研究において開発されてきたロボットハンドの多くは、小型化、軽量化および柔軟化という点に関しては十分であるといえない。この原因として、多くのロボットハンドは駆動源にサーボモータを用いていることが挙げられる⁽³⁾。サーボモータは、高度な位置決め制御が可能であり、応答性および

安定性に優れているが、自由度の増加に伴いアクチュエータが増加するため、小型化および軽量化が困難である⁽⁴⁾。近年では、サーボモータと比較して小型化および軽量化に有利であるとされている超音波モータを用いたロボットハンドも開発されている⁽⁵⁾。しかし、超音波モータ自体に柔軟性が無いため、超音波モータを用いてロボットハンドの柔軟化を行うには複雑な制御が必要となる。これらの問題への解決策として、空気圧ソフトアクチュエータに代表されるような流体圧駆動のアクチュエータに関する研究が盛んに行われている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。流体圧駆動アクチュエータは、ゴムなどの柔軟材を用いてアクチュエータを構成することにより、アクチュエータ自体の柔軟化が可能である。しかし、流体圧駆動アクチュエータの多くは、ポンプ、タンクおよびバルブなどといった周辺機器が必要となる。このため、装置全体としては大型化する。

このような背景から、本研究では電界共役流体 (Electro-conjugate fluid, ECF) に着目した。ECF とは、液中に挿入された電極対に直流高電圧を印加することにより活発な流動 (ECF ジェット) を発生する機能性流体である。ECF は、微小化特性に優れ、ECF

* 原稿受付 2010 年 6 月 10 日。

^{*1} 学生員, 慶應義塾大学大学院理工学部研究科総合デザイン工学専攻 (☎ 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。^{*2} 正員, 慶應義塾大学機械工学科。^{*3} 正員, フェロー, 東京工業大学精密工学研究科 (☎ 226-8503 横浜市緑区長津田町 4529-R2-41)。^{*4} 正員, (有)新技術マネージメント (☎ 124-0023 東京都葛飾区東新小岩 2-9-1-306)。

E-mail: b_l_h_1987@yahoo.co.jp

ジェット発生に必要な電極対の構造が単純であることから小型化および軽量化に適した液圧駆動源であると言える⁽⁸⁾。また、電圧の印加のみによって流動の発生を制御できるため、ポンプおよびタンクといった周辺機器を外部に必要としない⁽⁹⁾。このため、ECF を駆動源として用いることにより、ポンプおよびタンクを一体化した液圧駆動アクチュエータの実現が可能であると考えられる。

以上の背景を鑑み、本研究では、小型軽量かつ柔軟なロボットハンドの実現を目指し、アクチュエータ、ポンプおよびタンクが一体となったロボットフィンガの開発を目的とする。

2. 電界共役流体

ECF とは、ある種の誘電性液体であり、液中に挿入した電極対に直流高電圧を印加することによって、活発な流動(ECF ジェット)を発生する機能性流体である。ECF 内に不均一な電界が生じた際に流動が発生し、この流動効果は ECF 効果と呼ばれている。流動を発生させるためには、たとえば、図 1 に示すような 1 組の針状-リング状電極対が必要である。図 1 に示したように 1 組の電極対によって一方向に流動が発生し、流動の方向は、針状電極からリング状電極に向かう方向である⁽⁸⁾。

3. ポンプ・タンク一体型液圧駆動 ロボットフィンガの提案

提案するロボットフィンガを図 2(a) に示す。ロボットフィンガは、湾曲アクチュエータ、ECF ジェット

発生部および ECF タンクによって構成され、内部は ECF により満たされている。ECF タンクはシリコンゴム製であり、アクチュエータは、図 3 に示すように円筒状のシリコンゴムチューブと周囲に配置された強化繊維によって構成される。ゴムチューブの周方向に複数の強化繊維が等間隔に配置され、さらに、軸方向に 1 本の強化繊維が配置されている。ゴムチューブの内圧上昇によって発生する膨張は、周方向の繊維拘束により半径方向の伸びが抑えられ、軸方向の伸びに変換される。しかし、軸方向に強化繊維が配置されている箇所では、軸方向の伸びが拘束される。このため、ゴムチューブ内を加圧することによって図 4 に示すようにアクチュエータは軸方向に配置された強化繊維の側に大きく湾曲する。

図 2(b) に示すように、ECF タンク内部に配置された ECF ジェット発生部に直流高電圧を印加することにより、ECF タンクからアクチュエータ内部へ ECF ジェットによる流動が発生する。このため、ECF ジェットによりアクチュエータの内圧が上昇し、アクチュエータを湾曲させることが可能であると考えられる。また、ECF ジェット発生部への電圧印加を停止すると ECF ジェットによる加圧は停止し、シリコンゴムの弾性力によってアクチュエータは元の形状を回復する。

提案するロボットフィンガと類似した先行研究として、空気圧により駆動されるアクチュエータ⁽¹⁰⁾ が挙げられるが、本ロボットフィンガは、圧力源を内蔵しポンプおよびタンクが一体となっている点、圧力源の構造が機械式ポンプ(コンプレッサ)に比べ非常に単純

Fig. 1 Schematic diagram of ECF jet

Fig. 3 Configuration of bending actuator

(a) Configuration (b) Inner construction

Fig. 2 Concept of robot finger

(a) Initial state (b) Pressured at 60 kPa

Fig. 4 Motion of bending actuator

である点および作動流体が内部に封入された閉じた系である点において異なる。このような違いは、小型化において優位性を有すると考えられる。

なお、製作したアクチュエータの寸法は、全長 25 mm、直径 5 mm であり、シリコンゴムチューブの膜厚はおよそ 100 μm である。

4. ECF ジェット発生部

4.1 設計および製作 ECF ジェット発生部を図 5 に示す。図 5(a) は ECF ジェット発生部の構造を、図 5(b) は組立て後の断面図を示している。図 5(a) に示すように、ECF ジェット発生部は、外枠、カバー、スペーサおよび電極対(リング状電極、針状電極およびマウント)によって構成され、1つの ECF ジェット発生部内に合計 2つの電極対(針状電極と穴の対)を有する。図 5(b) に示すように、針状電極はマウント中心部の穴に差し込む形で接着されており、マウントとリング状電極の間にスペーサを挿入することにより電極間隔を一定に保っている。なお、電極間隔とは、図 5(b) に示すように針状電極先端とリング状電極の間隔のことである。また、外枠内部に入れられた電極対およびスペーサは、両端のカバーによって固定されている。

Abe らの研究⁽⁸⁾により、電極対寸法と ECF ジェットの流動には高い相関があることが明らかとなっており、針状電極の直径、リング状電極の内径および電極間隔が 0.13 mm、0.3 mm および 0.2 mm のとき比較的強い流動が発生することが知られている。このた

(a) Exploded view

(b) Cross sectional view
Fig. 5 ECF jet generator

め、本研究においても上記の電極寸法を採用した。なお、ECF ジェット発生部全体の寸法は、直径 5.0 mm、全長 3.4 mm である。

4.2 実験

4.2.1 電極間隔/電極対数の変化による圧力/流量の変化 上述したように、本研究では従来研究⁽⁸⁾を参考とし電極間隔を 0.2 mm と設計した。また、文献(8)における実験では、作動流体としてデカン二酸ジブチル(Dibutyl decane-dioate: DBD, 新技術マネイジメント社)を用いている。しかし、本研究においては、DBD と比較してより活発な流動を発生するとされている FF-101EHA2(新技術マネイジメント社)を作動流体として用いた。このため、FF-101EHA2 を用い、各電極間隔を変化させた際の圧力特性および流量特性を測定した。また、本研究においては、ECF ジェット発生部内の電極対(針状電極と穴の対)を 2 対としたため電極対数の変化による圧力特性および流量特性の測定も同様に行った。実験結果を図 6 および図 7 に示す。なお、DBD および FF-101EHA2 の物性値は表 1 に示す通りである。

まず、電極間隔および電極対数の変化による圧力特性への影響について述べる。図 6 より、従来研究⁽⁸⁾と同様に電極間隔を狭くするに従い発生圧力が増加して

Fig. 6 Relationship between pressure and applied voltage

Fig. 7 Relationship between flow rate and applied voltage

Table 1 Physical properties of DBD and FF-101EHA2

ECF	DBD	FF-101EHA2
Physical property		
Relative permittivity [-]	4.6	7.2
Electrical conductivity [S/m]	6.80E-10	2.20E-07
Density [kg/m ³]	938	1540
Viscosity [mPa · s]	7.5	1.6

いることがわかる。なお、本実験結果は、DBD を作動流体とした同条件の実験結果⁽⁸⁾と比較すると、発生圧力が約5倍となっている。電極間隔を0.2 mm 未満とした際の測定も行ったが、5.0 kV 付近において電極間に断続的な放電が生じたため電極間隔の最小値は0.2 mm とした。一方、図6より電極対を2対とすることにより、1対の場合と比較し高電圧時に発生圧力が僅かに減少する傾向にあることがわかる。これは、2つの電極対から発生するECF ジェットの圧力に差が生じている場合、低い方の圧力がECF ジェット発生部全体の発生圧力となるためであると考えられる。

つぎに、電極間隔および電極対数の変化による流量特性への影響について述べる。図7より、電極対の数にかかわらず、電極間隔を狭くするに従い流量が増加していることが分かる。これより、図6と合わせて考えれば、電極間隔を狭くするに従い、より活発な流動が発生していることがわかる。また、図7より電極対数を1対から2対に増加することにより流量が約2倍となることがわかる。

4・2・2 圧力-流量特性 図5に示したECF ジェット発生部(電極対数2, 電極間隔0.2 mm)に関して、圧力と流量の関係を測定した。測定結果を図8に示す。なお、本実験では可変バルブを用いて流路内の負荷圧力を調整することにより、各値を測定した。図8より、製作したECF ジェット発生部の最大発生圧力および最大発生流量は6.0 kV を印加した際に測定された33.55 kPa および53 ml/min であることがわかる。また、流量と圧力の関係がほぼ線形となることを確認した。

4・2・3 電極対の直列配置による圧力/流量特性の変化 図5に示したECF ジェット発生部を合計2つ(Jet A, Jet B)製作し、ECF ジェット発生部を直列配置した際の圧力特性および流量特性を測定した。実験結果を図9および図10に示す。なお、本実験では、Jet A の下流側に Jet B を配置し、この際、Jet A の針状電極底面と Jet B のリング状電極の間隔は1.4 mm とした。このとき、逆方向(Jet A から Jet B)への比較的弱い流動が発生し、順方向への流動に影響を与え

Fig. 8 Relationship between flow rate and pressure

Fig. 9 Relationship between flow rate and applied voltage

Fig. 10 Relationship between flow rate and applied voltage

ると考えられたため、針状電極根元部分に絶縁コーティングを施した。

図9および図10より、製作した2つのECF ジェット発生部は圧力および流量に関してほぼ同等な特性を示すことがわかる。また、これらの電極対を直列配置すると圧力が約2倍となることを確認した。本実験における最大発生圧力は60.49 kPaであり、これはアクチュエータの駆動に十分であることが図4よりわかる。図9より電極対を直列配置した際の発生圧力は、Jet A および Jet B 単体における発生圧力を足し合わせた値と比較し、若干減少しているが、これはECF ジェット発生部を直列配置したことによる流路内の抵抗の増加に起因すると考えられる。また、図10より2

つの電極対を直列配置することにより、電極対単体の場合と比較して流量が減少しているが、減少量は最大で4 ml/minでありアクチュエータの駆動に大きな影響はないと考えられる。

5. ECF ジェットによる 湾曲アクチュエータの駆動実験

5.1 実験 図11に示す実験装置を用いてECFジェットによる湾曲アクチュエータの駆動実験を行った。本実験は、ECFジェットによるアクチュエータの駆動が目的であるためアクチュエータ、ECFジェット発生部およびECFタンクを独立させ、それぞれをゴムチューブを用いて接続した。また、ECFジェット発生部は上述のJet AおよびJet Bを直列配置したものをを用いた。なお、図11においてアクチュエータ、ECFジェット発生部およびゴムチューブの内部は作動流体であるFF-101EHA2により満たされている。ECFの充填に関しては、真空引きを行うことにより達成した。すなわち、図11に示す実験装置を真空チャンバ内に配置し真空ポンプを用いて減圧した後、チャンバ内に大気圧を導入することにより、アクチュエータ、ECFジェット発生部およびゴムチューブ内部をECFにより満たした。

ECFジェット発生部に6.0 kVを印加し3.9 s経過した様子を図12に示す。なお、初期状態は図11に示す状態である。また、図11および図12に示すようにアクチュエータ先端の初期位置に座標系を固定し、各印加電圧をステップ入力した際のアクチュエー

タ先端の変位を測定したところ図13、図14および図15に示す結果となった。ただし、変位とは図12中に示したアクチュエータ先端の変位である。図13および図14は、各印加電圧における x 方向および y 方向の時間応答性を示している。図15は、各印加電圧におけるアクチュエータ先端の変位を0.1 sごとに記録した結果であり、アクチュエータ先端の軌跡を示している。なお、図15中に表記されている時刻は、各印加電圧においてアクチュエータの変位が収束した時刻を示している。

5.2 考察 まず、アクチュエータの x 方向の変位について述べる。図13より、各印加電圧ともにECFジェット発生部への電圧印加を開始してから0.3 s程度で変位が観測されはじめ、初期の変位は負方向であることがわかる。印加電圧が比較的低い4.0 kVおよび4.3 kVの場合は、変位が負方向のままで

Fig. 13 Response of bending actuator

Fig. 14 Response of bending actuator

Fig. 11 Experimental setup

Fig. 12 Motion of the bending actuator (Applied voltage 6.0 kV, $t = 3.9$ s)

Fig. 15 Characteristics of bending actuator

あり、4.7 kV 以上の電圧においては 1.0 s 付近から正方向の変位となり、印加電圧が高いほど大きな変位を示している。初期の変位が負である理由としては、アクチュエータ製作の都合上、軸方向に強化繊維が配置されていない側が初期状態において若干収縮しているためである。なお、6.0 kV を印加した際の x 方向の立ち上がり時間は 1.96 s であった。

つぎに、 y 方向の変位について述べる。図 14 より、 y 方向の変位に関しても x 方向同様、電圧開始から 0.3 s 程度から変位が観測されはじめ、数秒後に一定の値に収束していることがわかる。この際、5.3 kV 以下の電圧の場合は最大値に収束しているのに対し、電圧が比較的高い 5.7 kV および 6.0 kV の場合は最大値を経た後に一度値が減少し収束することがわかる。これは、図 15 に示すように、アクチュエータ先端の軌跡が円弧状になっているからである。なお、6.0 kV を印加した際の y 方向の立ち上がり時間は 0.87 s であった。

アクチュエータ先端の軌跡に関しては、図 15 より、印加電圧が高くなるに従い変位量が大きくなるが、各印加電圧における変位は同様な軌跡上に位置することがわかる。

本実験より、製作した ECF ジェット発生部を用いて、アクチュエータの駆動を確認し、図 15 より、ECF ジェット発生部への印加電圧を変化させることによりアクチュエータの変位を制御可能であることがわかった。

6. ポンプ・タンク一体型液圧駆動 ロボットフィンガ

6.1 設計および製作 製作したロボットフィンガを図 16 に示す。ロボットフィンガは湾曲アクチュエータ、ECF ジェット発生部および ECF タンクにより構成され、内部は共有の ECF により満たされている。ロボットフィンガ内への ECF の導入については、5 章と同様に真空引きを行うことにより達成した。ただし、本実験においてはロボットフィンガ後方に他端を外部 ECF タンクに浸したゴムチューブを接続し、真空引きを行った。ロボットフィンガ内を ECF により満たした後、図 16 に示すバルブを用いてゴムチューブを遮断し、バルブ後方のゴムチューブは切断した。このため、5 章における実験と異なりアクチュエータ、ECF ジェット発生部および ECF タンクが一体となり、全ての流体は密閉されている。また、ECF ジェット発生部内の各電極対に接続された導線は図 16 に示す ECF タンク後方のシリコンゴムキャップ内

Fig. 16 Photocopy of robot finger

Fig. 17 Motion of robot finger

を通り外部電源に接続されている。導線をシリコンゴムに挿入した後もゴムが弁の役割を果たすため、内部の ECF が漏れることはない。なお、ECF タンクは膜厚およそ 100 μm のシリコンゴム製であり、アクチュエータに比べ十分に大きくロボットフィンガの駆動に影響はないと考えられる。

6.2 実験 ロボットフィンガの駆動実験を行った。実験結果を図 17、図 18、図 19 および図 20 に示す。図 17 はロボットフィンガの駆動の様子を、図 18 および図 19 はロボットフィンガに各印加電圧をステップ入力した際の x 方向および y 方向に関する先端変位の時間応答性を、図 20 はアクチュエータ先端の軌跡をそれぞれ示している。なお、本実験での座標系および図 20 中の時刻は 5 章における実験と同様である。

本実験より製作したロボットフィンガの駆動を確認した。しかし、実験結果を 5 章における実験結果と比較すると、ロボットフィンガの変位が減少したこと、および図 20 に示すように先端の軌跡にばらつきが生じたことがわかる。これらは、ECF ジェットによる発生圧力が ECF タンクを収縮させるために使用されたことに起因すると考えられる。なお、アクチュエータおよび ECF ジェット発生部は 5 章における実験に用いたものと同様であるため、アクチュエータおよび ECF ジェット発生部の性能の差による影響はない。一方、ロボットフィンガの応答性に関しては、6.0 kV を印加した際に x 方向および y 方向の立ち上がり時

Fig. 18 Response of robot finger

Fig. 19 Response of robot finger

Fig. 20 Characteristics of bending actuator

間はそれぞれ 1.94 s および 0.68 s であり、5 章における実験よりも早い結果となった。これは、本実験においては 5 章における実験とは異なり、ECF ジェット発生部とアクチュエータの間にゴムチューブが存在しないため、この部分での圧力損失が無いからであると考えられる。

7. 結 言

本研究では、ECF を駆動源としポンプおよびタンクが一体となった液圧駆動ロボットフィンガを提案した。また、ロボットフィンガの圧力源である ECF ジェット発生部を設計および製作し、特性を評価した。この結果、ECF ジェット発生部に関する諸特性が明らかとなった。

つぎに、製作した ECF ジェット発生部を用いて湾曲アクチュエータの駆動実験を行った結果、ECF ジェットによるアクチュエータの駆動を確認し、ECF

ジェット発生部への印加電圧を変化させることによりアクチュエータの変位を制御可能であることがわかった。

さらに、上記のアクチュエータおよび ECF ジェット発生部を用いてポンプ・タンク一体型液圧駆動ロボットフィンガを製作し、駆動実験を行った結果、提案通りに駆動することを確認した。

今後は、ECF ジェットの応答性を明らかにするとともに、上記のロボットフィンガを複数使い、小型軽量かつ柔軟な 5 指ロボットハンドの実現を目指す。

文 献

- (1) Onishi, M., Odashima, T., Asano, F. and Luo, Z., Bio-Mimetic Control Research Center, and RIKEN, Development of PC-based 3D Dynamic Human Interactive Robot Simulator, *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, (2003-7), pp. 1213-1218.
- (2) Sasaki, D., Noritsugu, T. and Takaiwa, M., Development of Pneumatic Soft Robot Hand for Human Friendly Robot, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 15, No. 2 (2003), pp. 164-171.
- (3) Yamano, I., Takamuku, S. and Hosoda, K., Development of Underactuated Humanoid Robot Hand for Adaptable Grasp, *Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers, Robotics and Mechatronics*, CD-ROM, No. 1A1-1A11 (2008-6).
- (4) Kawanishi, H., Shimonura, H. and Shimizu, Y., Educational-industrial complex development of an anthropomorphic robot hand 'Gifu hand', *VSP and Robotics Society of Japan 2001, Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 3 (2001), pp. 357-363.
- (5) Maeno, T., Non-Linear Analysis and Control of Power Ultrasonic Motors, *Next-Generation Actuator Leading Breakthroughs*, Vol. 4 (2007), pp. 109-112.
- (6) Kaminaga, H., Yamamoto, T., Ono, J. and Nakamura, Y., Anthropomorphic Robot Hand with Hydrostatic Actuators, *Proceedings of the Robotics Society of Japan*, CD-ROM, Vol. 25, No. 1 L 17 (2007-9).
- (7) Konishi, S., Kawai, F. and Cusin, P., Thin flexible end-effector using pneumatic balloon actuator, *The Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 89, Issues 1-2 (2001), pp. 28-35.
- (8) Abe, R., Takemura, K., Yokota, S. and Edamura, K., Concept of a Micro Finger using Electro-conjugate Fluid and Fabrication of a Large Model Prototype, *The Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. A-136, issue 2 (2007), pp. 629-637.
- (9) Takemura, K., Yajima, H., Yokota, S. and Edamura, K., Integration of micro artificial muscle cells using electro-conjugate fluid, *The Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 144, Issues 2 (2008), pp. 348-353.
- (10) Shinohara, T., Dota, S. and Matsusita, H., Development of a Pneumatic Bending Soft-Actuator and its Application, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 711 (2005), pp. 3167-3173.