

HPQRを用いたエアタービンスピンドルの 高ロバスト化と省エネルギー化

加藤友規*

High-robust and energy saving control of air turbine spindle using HPQR

Tomonori KATO

The purpose of this research is to establish a quick and robust rotation control method of an air turbine spindle and apply it to an ultra-precision machine tool. We developed the high-precision quick-response pneumatic pressure regulator (HPQR) to control of air supply pressure of the air turbine spindle. We also set a disturbance force observer in the feedback control system to avoid changes of the rotation speed due to disturbance forces imparted to the air turbine spindle. The effectiveness of the proposed method was demonstrated through an air power evaluation experiment by rotation control and a disturbance force giving experiment. Compared with the conventional method, the superiority of the proposed method is clearly shown in terms of quick response, robustness, and low energy consumption. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed method, a new air turbine spindle system equipped with rotation control devices was designed and fabricated for the use in an ultra-precision milling machine. The effectiveness of the proposed method with the newly developed air turbine spindle has been demonstrated through rotation control experiments and disturbance giving experiments. The robustness and energy-conserving characteristics of the proposed method were demonstrated.

Key Words : Pneumatics, Air turbine spindle, Rotation control, Disturbance observer, Energy Saving

1. 緒言

超精密非球面加工機などの超精密加工機械において、高精度・高速対応・低摩擦・低振動などの優れた特性を有する静圧空気軸受式のエアタービンスピンドルが広く使用されている。著者らの研究室では、気体用超精密高速応答圧力レギュレータ (HPQR)¹⁾を供給空気の制御に用いることで、エアタービンスピンドルの回転数を高速・安定的に制御することと、省エネルギー化を実現することを目的として研究を進めている。

2. エアタービンスピンドルの製作と制御

2.1 回転数計測機能付エアタービンスピンドルの製作

切削加工時に切り屑や切削油の影響を受けずに回転数を安定的に計測するため、非接触方式の回転計をハウジング内に内蔵したエアタービンスピンドルを設計・製作した (Fig.1)。

2.2 回転数制御系の構成

エアタービンスピンドルによって切削加工を行う際に、加工荷の変動により主軸回転数が変動する欠点が報告されている。そこで、与えられた外乱を推定するために外乱オブザーバを設定した。この外乱オブザーバは、エアタービンスピンドルの入力である供給圧 P と出力である回転数 N の変動から外乱を推定するものである。外乱オブザーバのブロック

線図を Fig.2 に示す。

2.3 回転数制御実験とエアパワーの測定・比較

エアタービンスピンドルについて、回転数制御の有無による回転数の時定数とエアパワー (空気の消費エネルギー) の比較を目的に実験を行った。この実験では、提案方法でエアタービンスピンドルの回転数目標値を $N_{ref} = 30,000 \text{ min}^{-1}$ から $40,000 \text{ min}^{-1}$ にステップ的に変化させた。

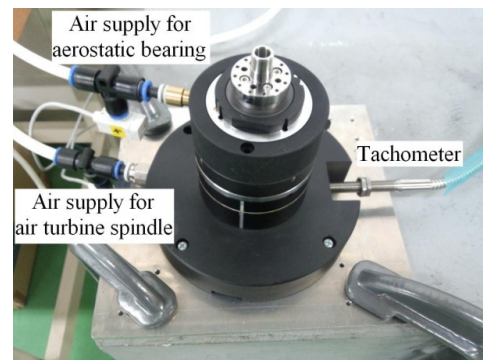


Fig.1 Photograph of newly developed air turbine spindle

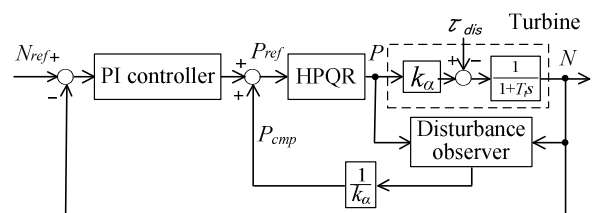


Fig.2 Block diagram of proposed rotation control system

* 福岡工業大学工学部知能機械工学科
(所在地: 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1)
(E-mail: t-kato@fit.ac.jp)

比較のために、エアタービンへの供給空気圧力を 113.1 kPa から 178.5 kPa にステップ状に変化させることで回転数目標値を $N_{ref} = 30,000 \text{ min}^{-1}$ から $40,000 \text{ min}^{-1}$ にステップ的に変化させる実験を行った。なお、回転数を安定させた状態で実験を行うため、エアタービンスピンドルを事前に 100 s 間駆動させ、回転数が安定した後に回転数を変化させた。本実験では、回転数がステップ的に変化し始めた時から回転数が安定する（ステップ幅の 98% となる $N=39,800 \text{ min}^{-1}$ に達する）までのエアパワーをエアパワーメータを使用して測定した。

2. 4 回転数制御実験の結果

回転数の測定結果を Fig.3 と Table 1 に、測定したエアパワーの積算値を Table 2 に示す。Table 1 より、提案方法では時定数は約 1.3 s であった。それに対して従来方法（圧力の一定圧制御のみ）では時定数は約 6.9 s であった。また、Table 2 より、提案方法では、回転数が安定するまでのエアパワーの積算値は 5.94 kJ であったのに対し、従来方法では 11.04 kJ であった。つまり、従来方法と比べ、回転数制御を行うことで回転数が安定するまでのエアパワーの積算値が約 46% 削減されたという結果となった。

2. 5 荒加工実験

開発したエアタービンスピンドルを工作機械の主軸に設置し難削材（SKD61）を側面切削にて加工することで切削外力を与える実験を行った（Fig.4）。実験では、回転数を $40,000 \text{ min}^{-1}$ で安定させた後に送り速度 750 mm/min で荒加工を行い、提案方法の場合と従来方法（圧力の一定圧制御のみ）の場合とで、回転数の状態を比較した。

2. 5 荒加工実験の結果

実験結果を Fig.5 に示す。実験結果より、従来方法の場合、切削抵抗が付与されると回転数が低下していき、最終的には $6,000 \text{ min}^{-1}$ 程度回転数が低下した。一方、提案方法を適用した場合には、回転数の低下は 400 min^{-1} 程度に抑えられ、外力が付与されてから 2 秒後には、外力が作用している状態にも関わ

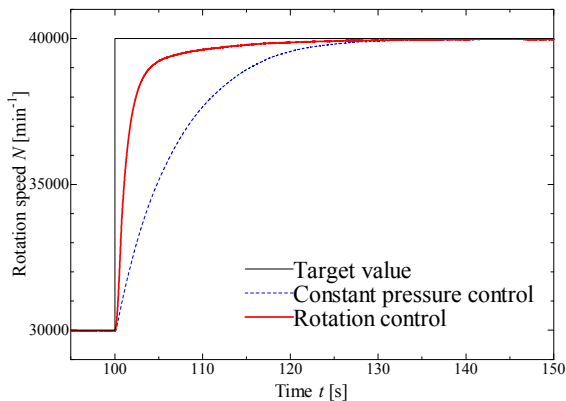


Fig.3 Experimental results of rotation speed control

Table 1 Experimental result of the rotation speed

Control method	Time constant [s]	Settling time [s]
Rotation control	1.3	9.55
Constant pressure control	6.9	20.49

Table 2 Experimental result of integral value of air power

Control method	Integral value of air power [kJ]	Reduction [%]
Rotation control	5.94	46.2
Constant pressure control	11.04	

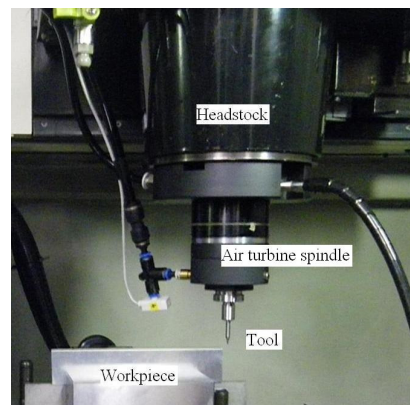


Fig.4 Photograph of the ultra-precision milling experiment

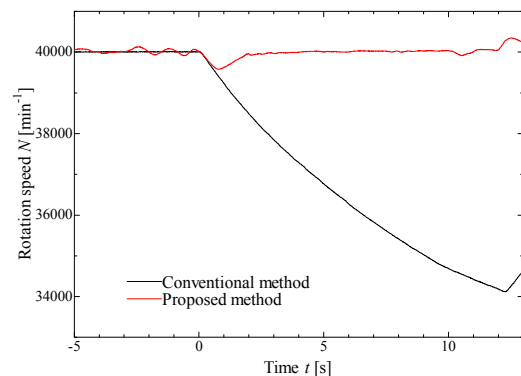


Fig.5 Experimental result of the milling experiment

らず回転数が $40,000 \text{ min}^{-1}$ まで回復していることがわかる。

参考文献

- 川嶋健嗣, 加藤友規, 山崎俊平, 香川利春: 気体用の超精密高速応答圧力レギュレータの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 38-2, 17/22 (2007)

高機能靴を用いた歩行訓練システムの開発

早川恭弘*, 金崎和馬**, 河中祥吾**, 土井滋貴***

Development of Walking Training System using High-Performance Shoes

Yasuhiro HAYAKAWA*, Kazuma KANEZAKI**, Shogo KAWANAKA**, Shigeki DOI ***

In this study, we produce High-Performance Shoes that can show the status of walking balance on Android-powered device. To show the status, we create an android application for presentation of status of walking balance in real time. Further, we also produced Walking Assist High-Performance Shoes that can change stiffness of the insole.

Key Word: Rehabilitation, Shoes, Walking Training, Android, Head Mounted Display

1. 諸言

現在,日本では少子高齢化の急速な進行に伴い,高齢者の転倒事故が増加している¹⁾. 転倒に至る高齢者の歩行は,一般的に加齢による身体能力の低下から歩行時の重心が身体の外側に大きく傾き,転倒に至ると報告されている. そこで,転倒を防止するためには,低下した身体能力を回復させる必要がある. 近年,高齢者の老化防止のため,ジョギングや水泳などの有酸素運動が注目されている. しかし,これらは身体能力の低下した高齢者には身体的負担が大きく,継続も困難である. そこで,高齢者にあまり負担をかけず,日常的に行うことが可能な方法として歩行訓練があげられる.

現在,転倒事故防止のため,安定歩行に関する研究がなされている²⁾. しかし,歩行補助具の多くはどれも大型であり,普段の生活の中で手軽に使用することは難しい. そこで,本研究では日常的使用頻度の高い靴に着目し,歩行状態の視覚的提示が可能なシステムの開発を行う.

2. 歩行提示システム

Fig.1 は,若年者と高齢者の歩行時における重心位置軌跡を示している. Fig.1 より高齢者は歩行時に重心位置が外側に振れることにより,不安定な歩行となり,身体を支え切れず転倒に至ることがわかる. このことより,高齢者の転倒を防止するには,重心位置の振れを防止し,身体を支えることが可能な筋力を維持することが必要であると言える. 本研究では,安定した歩行を実現するために,歩行状態を計測し提示することが可能なシステムの開発を行う.

* 奈良工業高等専門学校電子制御工学科
(〒639 - 1080 奈良県大和郡山市矢田町 22 番地)
(E-mail: hayakawa@ctrl.nara-k.ac.jp)

** 奈良工業高等専門学校専攻科機械制御工学専攻
(〒639 - 1080 奈良県大和郡山市矢田町 22 番地)
(E-mail: a0728@stdmail.nara-k.ac.jp)

(E-mail: a0768@stdmail.nara-k.ac.jp)

*** 奈良工業高等専門学校電気工学科
(〒639 - 1080 奈良県大和郡山市矢田町 22 番地)
(E-mail: doi@elec.nara-k.ac.jp)

*,**,*** Nara National College of Technology

本システムは高機能靴部及び視覚提示機能部から構成され,高機能靴部では足裏荷重による歩行状態検出及び中敷部の剛性変化による歩行アシスト,視覚提示機能部では Android デバイス画面上への視覚的表示を行う. 本研究では,持ち運び可能であり,軽量で被験者である高齢者の負担を軽減するシステムを開発することを目的とする. システムの構成概要を Fig.2 に示す. 次項以降で,システムに用いている各種装置の説明を行う.

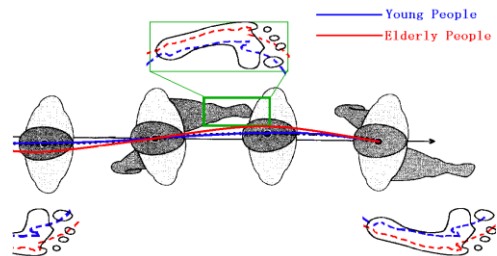


Fig. 1 Trajectory of Gravity Point³⁾

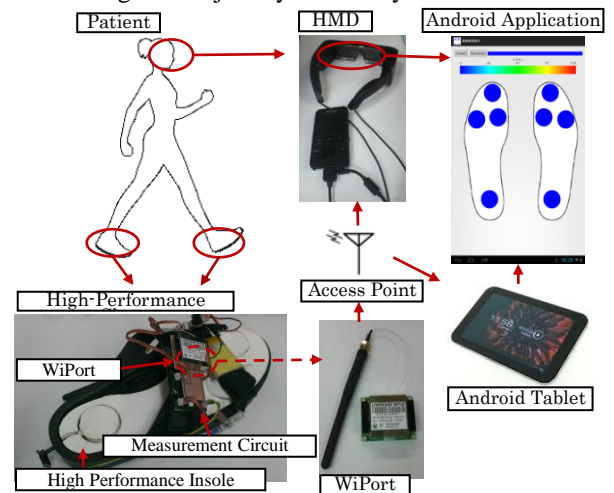


Fig.2 Walking Training System using High-Performance Shoes

3. 高機能靴

3.1 中敷き部

本研究で高機能靴の中敷き部に使用するアクチュエータを Fig.3 に示す. 本アクチュエータは, スポンジコア・ソフトラバーアクチュエータ (Sponge - Core - Soft Rubber - Actuator 以下 SCSRA) と呼ばれる.

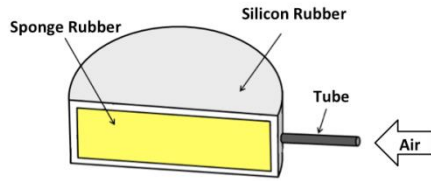


Fig.3 Structure of SCSRA

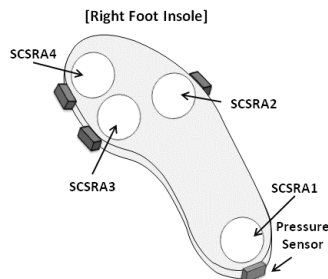


Fig.4 Arrangement of SCSRA

そして、本アクチュエータは、連泡型スポンジをシリコンゴムで覆った構造を有しているため、硬質なアクチュエータに比べ人間親和的であり、外圧に対し内部圧力を変化させることができる。また、スポンジ部に空気を充填することでアクチュエータの剛性を変化させることが可能である。これらの特徴から、本研究では、このSCSRAを足裏部の踏み込み圧検出用要素として使用し、Fig.4に示す歩行時の力のかかりやすい4ヶ所に配置した。

3.2 測定回路

高機能靴に搭載している測定回路を Fig.5 に示す。歩行時に足部に違和感なく、負担をかけないように縦 40[mm]×横 40[mm]×高さ 9[mm]と小型化している。また、制御部には、Atmel 社の AVR マイコンを用いている。通信方法としては、PC 画面に表示するために、従来 ZigBee 規格の XBee という通信モジュールを用いた通信方法を用いていた。今回 Android 端末と通信するために、新たに Wi-Fi 規格の WiPort という通信モジュールを用いた通信方法を可能とした。Fig.6 に測定データの通信システムを示す。

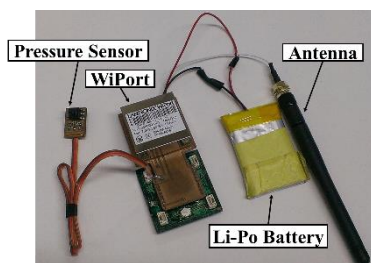


Fig.5 Measurement Circuit

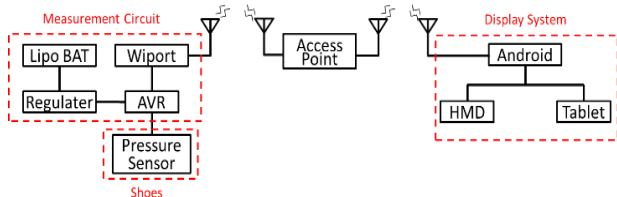


Fig.6 Construction of data sending system

3.3 提示アプリケーション

歩行状態を表示するディスプレイとして、Android 搭載の HMD とタブレット端末を用いるため、JAVA 言語を基本とする Android のアプリケーションの開発を行った。今回開発したアプリケーションのフローチャートを Fig.7 に示す。また、例として各 SCSRA に一定の圧力を加えたときのアプリケーション実行結果を Fig.8 に示す。

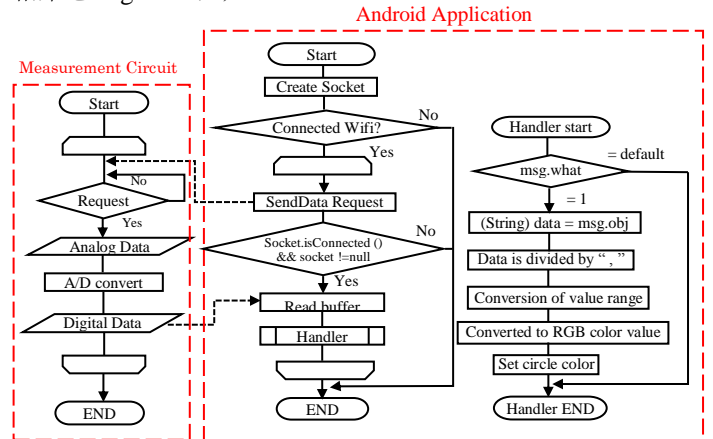


Fig.7 The Flowchart of Application

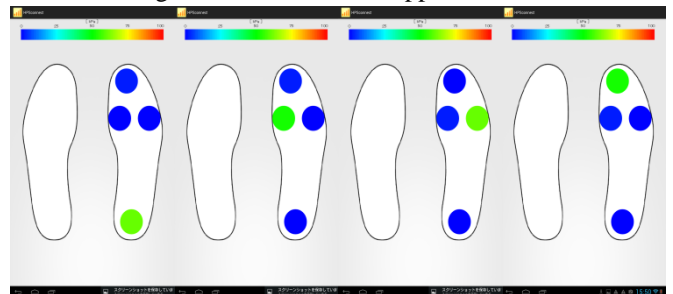


Fig.8 The results when each SCSRA pressured

4. 結言

本研究では、高齢者に負担をかけることなく安心安全な歩行訓練を実現するために、歩行状態を計測し提示可能なシステム開発を行った。そして、Android 用提示アプリケーションを作成したことにより、Wi-Fi 環境が整っていれば、Android 端末で歩行状態を色相変化で視覚的提示が可能となった。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(c)(No.245006699)により行われている。また、実験装置の一部を提供していただいた SMC 株式会社 に感謝いたします

参考文献

- 1) 総務省 統計局 政府統計の総合窓口人口推計年齢 (5 歳階級及び 3 区分), 男女別人口 (各年 10 月 1 日現在) - 総人口 (大正 9 年~平成 12 年) .xls
- 2) 和田 親宗,「靴型歩行計測装置を用いた歩行訓練支援システム / 歩行ナビゲーションシステム」(<https://www.jstshingi.jp/abst/p/11/1143/kit7.pdf>)
- 3) 高嶋 孝倫: “歩行中のヒト足部に着目した力学モデル解析とその応用に関する研究”,早稲田大学,pp.40-41,2003

EHD(電気流体力学)現象を用いた流体型アクチュエータ

○三井和幸*, 高橋智久*, 佐藤洋輔*, 長瀬広明*, 寺阪澄孝**, 下大川丈晴**

Development of the fluid power actuator using EHD phenomenon

Kazuyuki MITSUI*, Tomohisa TAKAHASHI*, Yousuke SATHO*, Hiroaki Nagase*,
Sumitaka TERASAKA**, Takeharu SHIMOOKAWA**

Recently, many types of fluid power actuators are used in a lot of field. However, this type of actuator has many problems such as occurrence of the vibration and noise. It is because this type actuator needs the peripheral device such as the compressor and the pump. To solve this problem, we decided to develop the new type of fluid power actuator by using the electro-hydro-dynamics (EHD) phenomenon which makes insulating fluid flow when a high voltage electric field is applied to that fluid.

Key Words : EHD, actuator, robot hand, snake type robot

1. 緒言

近年介護ロボットなど人間の身近で使用される機器や、災害現場などのように複雑に入り組んだ場所に入り込むロボットとして蛇型などの多関節ロボットにおいて流体駆動のソフトアクチュエータが注目されている。しかしこのアクチュエータにはポンプやコンプレッサ等の外部機器が必要となり、振動や騒音の発生、発熱および、バルブや調整弁などにより配管が複雑化し、結果としてシステム全体が大型化してしまうという問題がある。そこで我々はこれらの問題点を解決するために、流体が外力を必要とせず電圧印加により自ら流動するという EHD 現象を利用したアクチュエータを開発することとした。

2. EHD 現象及び EHD ポンプ

EHD(Electro Hydro Dynamics)現象とは、絶縁性流体中に 1 組の電極を挿入し、その電極間に高電圧を印加すると流れが発生する現象である。我々は Fig.1 に示した傾斜させた GND 電極と平板の+電極の間に EHD 現象による一方向の流れの発生が可能な電極構造を考案し、これを多段化し実用的な圧力の発生が可能な EHD ポンプを開発してきたり。そして、数段から最大 200 段の電極構成を持つ EHD ポンプを試作し、瞬間値であれば最大で約 800[kPa]の圧力の出力を実現し、500[kPa]程度までであれば安定した出力が可能となった。この EHD ポンプを駆動源としてシステムに組み込むことで、外部に駆動源を必要とせず、複雑な配管も必要としない小型・軽量のアクチュエータの開発が可能であると考えた

* 東京電機大学工学部機械工学科先端機械コース
(〒120 - 0026 東京都足立区千住旭町 5)
(E-mail: mitsui@cck.dendai.ac.jp)

** 三洋金属工業株式会社
(〒571 - 0042 大阪府門真市深田町 18-10)

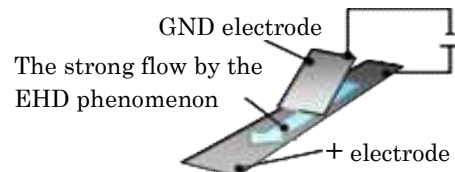


Fig.1 Electrode composition which generates the EHD phenomenon

3. EHD ポンプのアクチュエータへの応用例

3.1 EHD ポンプによるロボットハンドの駆動

EHD ポンプのアクチュエータへの応用の一つとして試作したロボットハンドの EHD ポンプでの駆動を試みた。試作したロボットハンドは Fig.2 に示したように、2 本の指がそれぞれ一つの関節を有し、その関節内に樹脂製の蛇腹を内装している。この蛇腹に EHD ポンプからの出力を接続し、液圧で指の関節を駆動する方法を採用した。

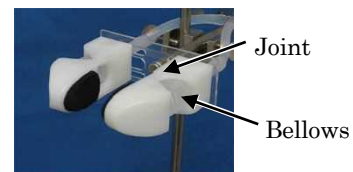


Fig.2 The robot hand by the EHD pump drive

このロボットハンドを実際に駆動したところ、水を満たした 2 リットルのペットボトルの口を指で挟んで保持できる握力を発揮した。

3.2 揺動型 EHD アクチュエータとヘビ型ロボット

3.2.1 揺動型 EHD アクチュエータ

EHD ポンプのアクチュエータへの更なる応用例として、EHD ポンプを駆動源として内蔵した Fig.3(a) のようにシーソーのように揺れ動くアクチュエータすなわち揺動型 EHD アクチュエータを考えた。さ

らに、この揺動型 EHD アクチュエータを 1 つの関節とし、これを Fig.3(b)のように多段に接続していくことで、関節それぞれに駆動源を有した多関節ロボットが開発できると考えた。

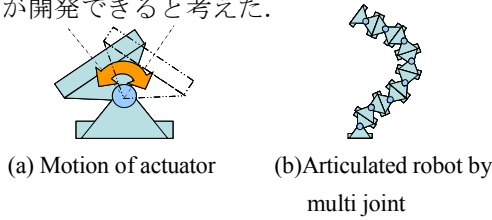


Fig.3 Swing motion type EHD actuator

Fig.4 に考案した揺動型 EHD アクチュエータの基本構造を示す。このアクチュエータはアッパーデッキ、ブリッジ、双方向 EHD ポンプを内蔵したロアデッキ、及び 2 基の稼動部により構成した。双方向 EHD ポンプとは Fig.5 に示すように、印加電圧を切り替えることにより流れを双方向に切り替えることが可能なポンプである。稼動部にはベロフラムシリンダを用い、ロアデッキ内蔵の双方向 EHD ポンプに直接接続した。Fig.6 に双方向 EHD ポンプの内部構造を示す。Fig.5 で示した電極構造を 15 段直列に配置しており、圧力は最大で 57.3[kPa]、流量は最大で 8.5[mL/s]である。このポンプを内蔵したアクチュエータの動作の概念図を Fig.7 に示す。双方向 EHD ポンプに電圧を印加し、一方のベロフラムシリンダに流体を圧送することでピストンがアッパーデッキを押し、回転軸を中心としてアッパーデッキが傾き、双方向 EHD ポンプに印加する電圧を切り替え流体の流れの方向を反転させることで動作させるベロフラムシリンダが切り替わり、アッパーデッキの傾く方向を切り替えられ、揺動運動ができる。この揺動型 EHD アクチュエータは、双方向 EHD ポンプを内蔵したロアデッキに直接稼動部を接続しているため、外部駆動機器や複雑な配管を必要としないシンプルな構造にすることが可能となった。実際に製作した揺動型 EHD アクチュエータを Fig.8 に示す。大きさは $48 \times 64 \times 68$ [mm]、重さは約 170[g]となった。アッパーデッキとロアデッキを平行にした状態を 0 [deg]とした場合、 -12 [deg]~ $+12$ [deg]の範囲で揺動運動ができる構造となっている。

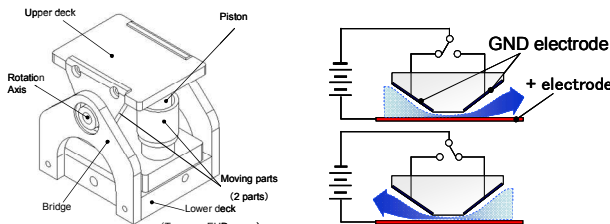


Fig.4 Structure of swing motion type EHD actuator Fig.5 Electrode structure of two-way EHD pump

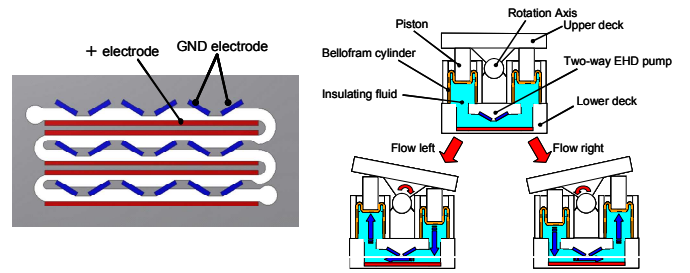


Fig.6 Internal structure of two-way EHD pump (Lower deck)

Fig.7 Actuation mechanism of swing motion type EHD actuator

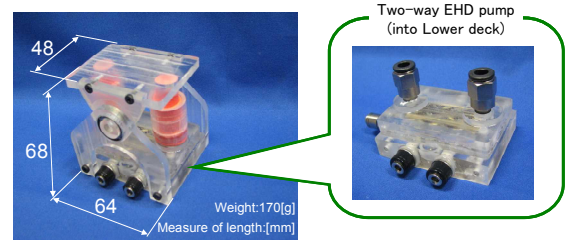


Fig.8 Developed the swing motion type EHD actuator

3.2.2 EHD ヘビ型ロボットの試作

Fig.9 に示すように揺動型 EHD アクチュエータを二組製作し、2 段に接続した場合の動作確認を行ったところ、2 段に接続しても滑らかな揺動動作が可能であった。この結果に基づき、揺動型 EHD アクチュエータを関節とした、3 節の EHD ヘビ型ロボットを試作した(揺動型 EHD アクチュエータに受動車輪を取り付けたものを 2 つ接続している)。実際に試作した EHD ヘビ型ロボットを Fig.10 に示す。各アクチュエータを操作することで、ロボットが前進することが可能であった。



Fig.9 Two device

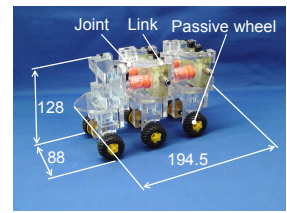


Fig.10 EHD snake

4. 結言

本研究では、EHD 現象を用いた流体駆動型アクチュエータの開発を行った。その結果、ロボット等を駆動する流体駆動型アクチュエータとして実現可能性を示すことができ、周辺機器が不要な小型アクチュエータとしての応用が期待される。

参考文献

- 1) 澤田瑞徳, 三井和幸ほか: EHD 現象を利用した高圧力ポンプの開発に関する研究, 平成 22 年度秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 133-135 (2010)

油中気泡の分離除去システム

坂間清子*, 田中 豊*, 鈴木隆司**

Separation and Elimination of Air Bubbles from Hydraulic Fluids

Sayako SAKAMA*, Yutaka TANAKA*, Ryushi SUZUKI**

Hydraulic fluids typically become aerated during use. Air bubbles entrained in hydraulic fluids cause numerous problems in hydraulic systems. Active bubble elimination devices that use swirl flow capable of separating and eliminating air bubble from the hydraulic fluid have been proposed and developed by researchers in our Smart & Clean Hydraulic Project. In this paper, we provide a brief description of the air bubble separation and elimination system and describe its principle of operation when installed in a hydraulic circuit to physically remove air bubbles from the hydraulic working fluid. This study investigates the high performance of the air bubble separation and elimination system, using experimental flow visualizations and numerical simulations of the device. The bubble removal system can be used to mechanically remove air bubbles from hydraulic fluids; this offers advantages such as the possibility of smaller reservoir sizes and lower overall system cost.

Key Words: Bubble eliminator, CFD, Entrained air, Flow visualization, Hydraulic systems

1. はじめに

油圧システムの作動油中の気泡は、作動油の酸化劣化、機器部材の壊食、機器の動特性の低下等の原因となる。したがって、これらの問題を解決するには気泡の取り除かれた作動油を使用することが望ましいが、一度作動油に気泡が混入すると、自然に浮上させて取り除くには長い時間を要する。本研究では、旋回流を利用して油中気泡を分離除去する気泡分離除去システムで作動油中の気泡を取り除き、油圧システムの性能を向上させることを目的としている。本稿では、気泡分離除去システムを用いた気泡除去法を示し、気泡分離除去システムの性能を向上させるために実施した流れの可視化実験と数値解析の結果を報告する。

2. 気泡分離除去システム

気泡分離除去システムは、気泡を作動油から分離させる気泡分離セクションと、作動油から気泡を除去する気泡除去セクションにわかれる。Fig.1は気泡分離除去システムの概略図である。気泡分離セクションには、旋回流を利用して作動油と気泡を分離する気泡除去装置が取り付けられている。気泡除去装置内で発生する旋回流により、比重の小さい気泡は圧力の低い装置の中心軸上に集合し、合体・拡大する。気泡分離セクションは、2つの流出ポートを有

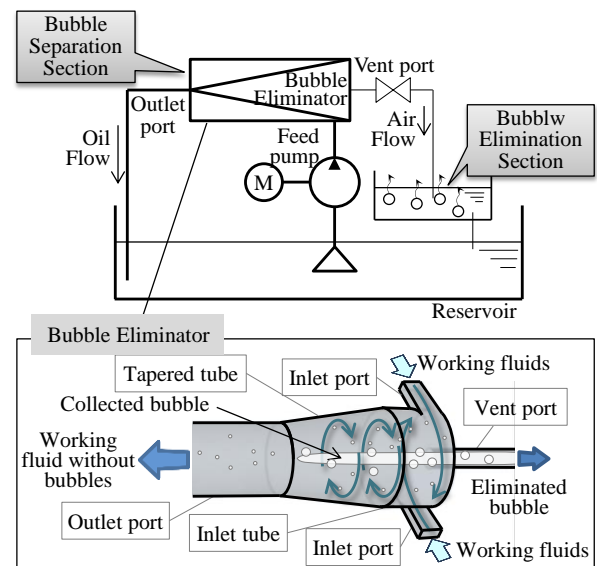


Fig.1 Air bubble separation and elimination system

し、気泡の取り除かれた作動油はタンクに、気泡除去装置内で集合した気泡は、放気口から気泡除去セクションに流出する。放気口から流出する気泡は気泡除去装置内で大きく成長しているため、気泡除去セクションでは短時間で浮上し、消泡する。

3. 可視化実験

本研究では、気泡分離セクションに取り付けられた気泡除去装置の性能を向上させるために、装置内の流れの可視化実験と数値解析を実施している。可視化実験は、すべて透明なアクリルで作成された気泡除去装置を用いて実施されている¹⁾。本節では、実験結果の一例として、気泡除去装置の流出口の径

* 法政大学大学院デザイン工学研究科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)

** オープスシステム
(〒153 - 0061 東京都目黒区中目黒 3-18-1)

* Hosei University
** Opus System Inc.

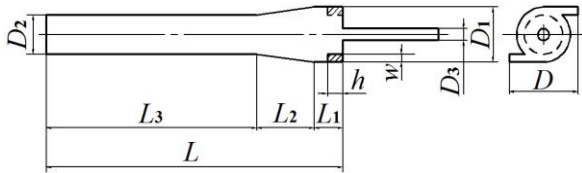


Fig.2 Geometry of bubble eliminator

Table 1 Dimensions of bubble eliminator

No.	D	D ₁	D ₂	D ₃	L	L ₁	L ₂	L ₃	w	h	mm
1	36	28	20	10	265	15	30	220	3	6	
2	36	28	15	10	265	15	30	220	3	6	
3	36	28	10	10	265	15	30	220	3	6	

D_2 を変更して実施した可視化実験の結果を示す。Fig.2 と Table 1 に実験で使用した装置の形状パラメータを示す。装置に流入する流体の体積流量は 20 L/min, コンプレッサで混入させる気泡の体積流量は 0.2 L/min, 作動油の動粘度は $31 \text{ mm}^2/\text{s}$ としている。Fig.3 に 6000fps で撮影した可視化実験の結果を示す。流出口径 D_2 が小さくなるほど, 気泡が集合しやすく, 集合した気泡は流出口方向に移動することがわかる。

4. 数値解析

気泡除去装置内部の流れを詳細に分析するために, 本研究では数値解析ソフトウェア STAR-CCM+を用いて流れの数値解析を実施している。本稿では, 装置の形状パラメータ, 作動油と気泡の流入流量, 作動油の物性, 流出口と放気口からの流体の流出比を可視化実験の条件に合わせて実施した解析の結果を示す。なお, 混相流モデルはオイラー混相流モデル, 乱流モデルはk- ϵ 乱流モデルを使用している。また, 混入気泡の径は全て 0.3mm とし, 気泡の変形, 合体, 拡大・縮小は考慮していない。

Fig.4 に D_2 を変更したときの装置横断面の気泡の含有率分布と気泡除去率 E_B を示す。気泡除去率 E_B は, 装置に流入した気泡の体積流量に対する放気口から除去された気泡の体積流量の比で表され, E_B が大きいほど, 装置の気泡除去性能が高いと評価できる。気泡の含有率分布は可視化実験と同様の結果を示しており, D_2 が小さい条件の方が気泡は装置の中心軸上に集合しやすく, 流出口方向に流れる傾向がある。 E_B は D_2 が大きいほど高い値を示しており, 気泡の除去性能が最も高いのは D_2 が 20mm の条件である。しかし, D_2 が 20mm の条件では気泡は装置の中心軸上で十分に集合しておらず, 気泡除去セクション内での消泡性は最も低いと推察される。以上のことから, 気泡の集合・合体のしやすさと気泡除去率の高さの両方を考慮することで, D_2 の選定が可能になることがわかる。

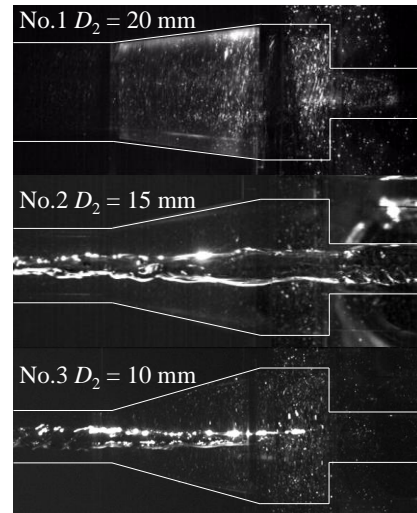


Fig.3 Experimental flow visualization

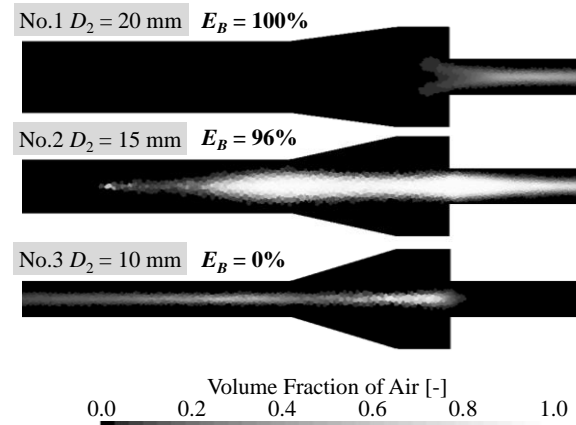


Fig. 4 Volume fraction of air

5. おわりに

本稿では, 油圧システムの油中気泡に起因する問題の解決のために, 気泡分離除去システムを用いた気泡除去法を提案した。また, 気泡を作動油から分離する気泡除去装置の流れ解析の結果を示し, 気泡除去性能を向上させる上で装置の形状パラメータの選定が重要であることを示した。

本研究は, 戦略的基盤技術高度化支援事業「油圧動力伝達システムに使用する油中気泡除去技術の開発」と JSPS 科研費 25・9669, 26420086 の助成を受けて実施されたことを付記して, 関係者に謝意を表す。なお, 本研究の数値解析は法政大学情報メディア教育研究センターのソフトウェアを用いて実施された。

参考文献

- 1) Sakama, S., Mishina, K., Tanaka, Y., Suzuki, R. : Flow Visualization for Bubble Elimination of Hydraulic Systems, Proc. 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, OS1-03-1 (2013)

油中気泡の分離除去による油圧システムの性能向上

田中 豊*, 坂間清子*, 五嶋裕之**, 鈴木隆司***

Performance Improvement of Hydraulic Systems with Bubble Elimination

Yutaka TANAKA*, Sayako SAKAMA*, Hiroyuki GOTO**, Ryushi SUZUKI***

A certain amount of air bubble is always present in a hydraulic fluid. Air bubbles entrained in hydraulic fluids cause numerous problems, such as the acceleration of oil degradation, decrease in lubricity, reduction in thermal conductivity, cavitation erosion, and higher noise emissions. Air bubbles in working hydraulic fluids must be actively separated and eliminated to realize performance improvement of hydraulic systems. Active bubble elimination devices that use swirl flow capable of separating and eliminating air bubble from the hydraulic fluid have been proposed and developed by researchers in our Smart & Clean Hydraulic Project. In this paper, the improvement of oil aging, oil temperature rise, effective bulk modulus and cavitation erosion are experimentally investigated in our laboratory's test. The bubble removal in the oil is essential to the prevention of oil deterioration, temperature rise, cavitation erosion and reduced oil rigidity.

Key Words: Air bubble, Bubble elimination, Cavitation erosion, Hydraulic systems, Oil degradation

1. はじめに

油圧動力伝達システムに用いられる作動油には、通常、数パーセントの空気が混入しており、この混入空気はシステムの特性に大きな影響をおよぼす。

本稿では、研究プロジェクトで開発した油中気泡の分離除去システム¹⁾を用いて、作動油中に混入した気泡を積極的に分離除去することで油の特性やシステムの性能が向上することを実験的に示す。

2. 油の酸化劣化試験

油中の気泡を積極的に分離除去することで油の酸化劣化を大幅に抑制できる。摩耗防止の添加剤のみを加えた鉱物油を作動油として用い、60℃に保たれた6.85 Lの作動油を圧力7 MPa、流量23 L/minでアキシシャルピストンポンプを使って456時間の循環試験を実施した。ポンプの吸い込み側からは、常時690 cm³/minで空気を強制的に混入させ、タンク戻り側に取り付けた気泡分離除去システムにより混入空気を除去した場合と、除去しない場合とで油の劣化の度合いを測定した。

Fig.1は連続運転に対して24時間か48時間ごとにサンプリングした60 cm³の油の全酸価値の変化である。気泡分離除去システムを動作させた場合の全酸価値は半分以下で酸化劣化の度合いが大きく抑制さ

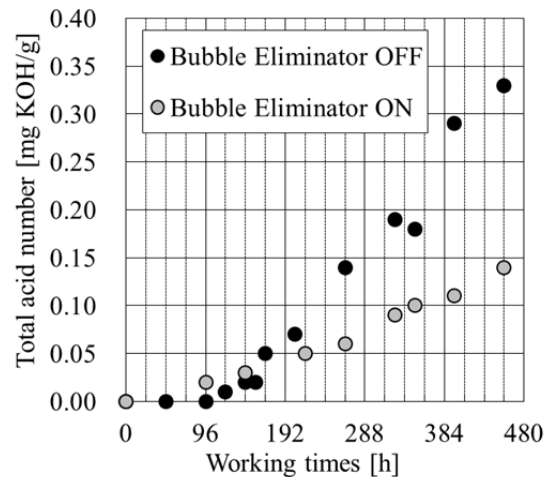


Fig. 1 Change of total acid number in pump test.

れ、結果として作動油の寿命を2倍以上に伸ばせる。

3. キャビテーション壊食試験

油中の気泡を積極的に分離除去することでキャビテーションの発生が抑制され、壊食量を大幅に低減できる。

Fig.2に示す噴流実験装置を用いてキャビテーション壊食実験を実施した。作動油タンク内には、別回路で気泡分離除去システムが組み込まれ、油中気泡を積極的に分離除去できる。ポンプの吐出圧力を40 MPa、吐出流量を5.7 L/minに設定し、円筒形絞り部を通過させることでキャビテーション噴流を発生させ、試験片に衝突させる。試験片材料はA1070アルミ合金を使用した。

Fig.3は気泡分離除去システムを動作させたときと動作させない時のキャビテーション噴流の様子を

* 法政大学大学院デザイン工学研究科
(〒102-8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)
** 機械振興協会技術研究所
(〒203-0042 東京都東久留米市八幡町 1-1-12)
*** オーバスシステム

* Hosei University
** Japan Society for the Promotion of Machine Industry
*** Opus System Inc.

高速ビデオカメラで撮影した結果である。気泡分離除去システムを動作させるとキャビテーション噴流の大きさが小さくなっていることがわかる。

Fig.4 は試験片の壊食の様子と壊食量の比較である。気泡分離除去システムを動作させない場合、10分間の噴流衝突実験で試験片は120 mg ほど減少し、表面では大きく壊食が進行する。一方、気泡分離除去システムを動作させると、壊食量は大きく減少し、試験片表面の壊食も少ないことがわかる。

以上のように、油中の気泡を積極的に分離除去し、タンク内の油の性状を保つことでキャビテーションの発生が抑制され、壊食量を大幅に低減できる。

4. おわりに

作動油中に混入した気泡を積極的に分離除去することで、油の酸化劣化やキャビテーション壊食が抑制できることを実験的に示した。この他に、油中気泡の分離除去システムを用いることで、油の温度上昇の抑制効果¹⁾や低圧領域における油の体積弾性係数の向上²⁾も確認されている。この油中気泡の分離除去システムが多く油圧動力伝達システムに搭載され、システムの性能向上に寄与することを期待したい。

本研究は、戦略的基盤技術高度化支援事業「油圧動力伝達システムに使用する油中気泡除去技術の開発」とJSPS 科研費 25・9669, 26420086 の助成を受けて実施されたことを付記して関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) Y. Tanaka, S. Sakama, R. Suzuki, Bubble Elimination from Working Oils for Environmentally Friendly Hydraulic System Design, Int. J. Automation Technology, Vol.6, No.4, pp.488-493, 2012.
- 2) Y. Tanaka, S. Sakama, H. Goto, Experimental Investigation of Effective Bulk Modulus of Oil with Entrained Air Bubbles, Proc. 12th MoVic2014, 2D22, 2014.

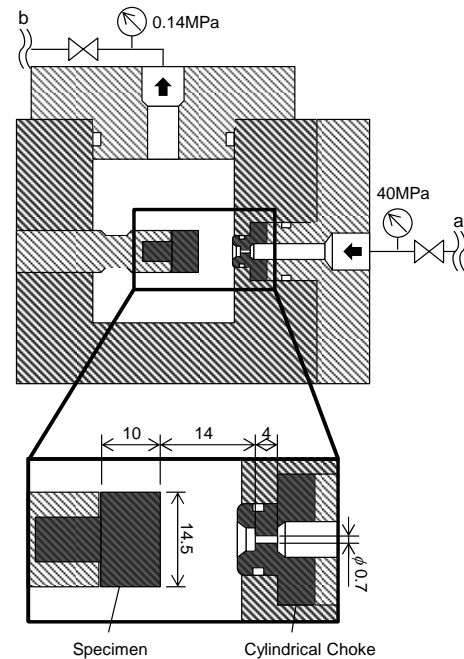


Fig. 2 Schematic of the test chamber for cavitation erosion test

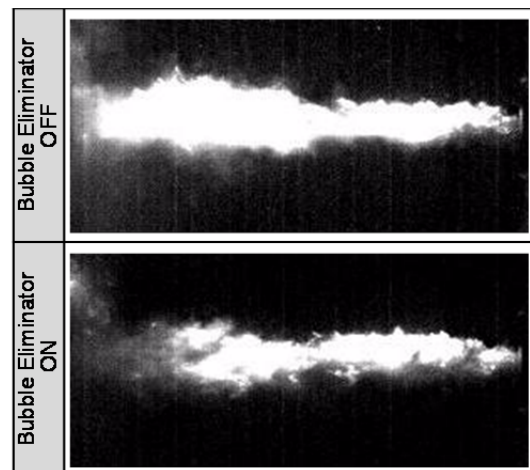


Fig. 3 High-speed digital images of cavitation jets with and without the bubble eliminator

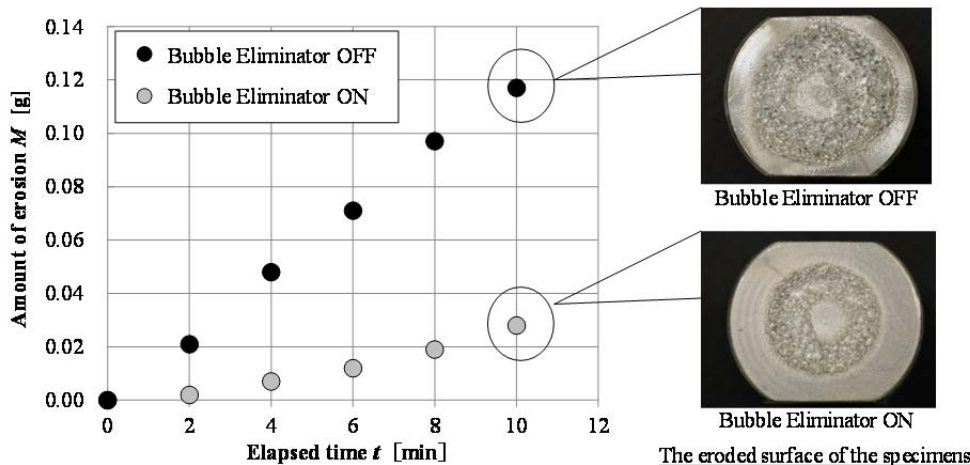


Fig. 4 Experimental results of cavitation erosion test with and without the bubble eliminator

気泡を含む油の体積弾性係数の測定

五嶋裕之*, 坂間清子**, 田中 豊**

Measurement of Effective Bulk Modulus for Hydraulic Fluid with Entrained Air

Hiroyuki GOTO*, Sayako SAKAMA**, Yutaka TANAKA**

Hydraulic fluids typically become aerated during use. Aeration strongly influences the bulk modulus of hydraulic fluid because air is significantly more compressible than oil. Entrained air in the form of bubbles reduces the effective bulk modulus. Air bubbles in working fluids must be actively separated and eliminated to realize performance improvement of hydraulic systems. Active bubble elimination devices that use swirl flow capable of separating and eliminating air bubble from the hydraulic fluid have been proposed and developed by researchers in our Smart & Clean Hydraulic Project. In this paper, we focus on the relation between the change in bulk modulus and the elimination of bubbles from hydraulic fluid. We conclude that the change in bulk modulus of the bubble-eliminated oil influences system performance with respect to positioning, power loss, response time, and stability in the hydraulic system.

Key Words: Air bubble, Bubble elimination, Effective bulk modulus, Hydraulic systems, Tangent bulk modulus

1. はじめに

油圧動力伝達システムのパワーの伝達媒体である作動油中の気泡は、作動油の見かけの剛性を低下させ、システムの動特性を低下させる。最近、気泡を含む油の等価体積弾性係数の数学モデルがいくつか提案され、CFD のプログラムコードに組み込まれたり、体積弾性係数の実験的な同定値との比較により、モデルの妥当性の検証が行われたりしている¹⁾⁴⁾。

本稿では油の体積弾性係数を測定する実験装置を紹介し、気泡をわずかに含む油と、プロジェクトで開発された気泡の分離除去システムにより油中気泡を除去した油の等価正接体積弾性係数を実験的に同定し、油中の気泡が等価体積弾性係数におよぼす影響を検討する。

2. 実験装置

Fig. 1 は油の等価体積弾性係数の測定に用いる実験装置である。この実験装置は、圧力容器と油圧サーボシリンダで構成されている。圧力容器の体積 V_0 は 1132 cm^3 で、その変形は無視できる程度に小さく設計されている。圧力容器には、油を流量 6 L/min で循環させた後、容器内に油を充填する油圧回路が接続されている。循環時の油温はタンク内で一定に保たれ、実験では油温 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ で測定が行われた。

作動油タンク内には別回路で気泡の分離除去シス

テムが組み込まれている。このシステムを動作させると、5 分ほどでタンク内の油中気泡は目視では気泡が観察できない程度まで減少する。Fig. 2 に透明な油タンクで行った気泡の分離除去システムの効果の確認実験の結果を示す。気泡で白濁した油に対して気泡の分離除去システムを動作させると、5 分ほどでタンク内の油の透明度が向上していることがわかる。

圧力容器内に油を充填した後、一定速度 1 mm/s の油圧サーボシリンダで 45 MPa まで容器内の油を加圧して戻し、その時のシリンダ変位から換算した体積変化と容器内の測定圧力変化から、等価体積弾性係数を求める。

3. 測定実験とその結果

測定実験では、ポンプ吸い込み側から 120 mL/min

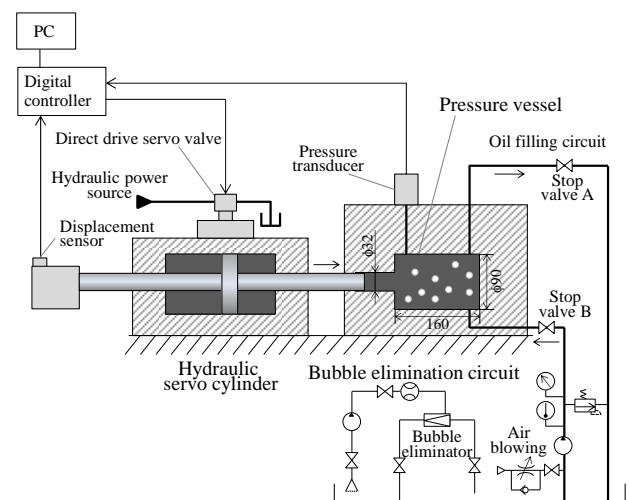


Fig. 1 Experimental setup for measurement of effective bulk modulus

* 機械振興協会技術研究所
(〒203-0042 東京都東久留米市八幡町 1-1-12)

** 法政大学大学院デザイン工学研究科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)

* Japan Society for the Promotion of Machine Industry
** Hosei University

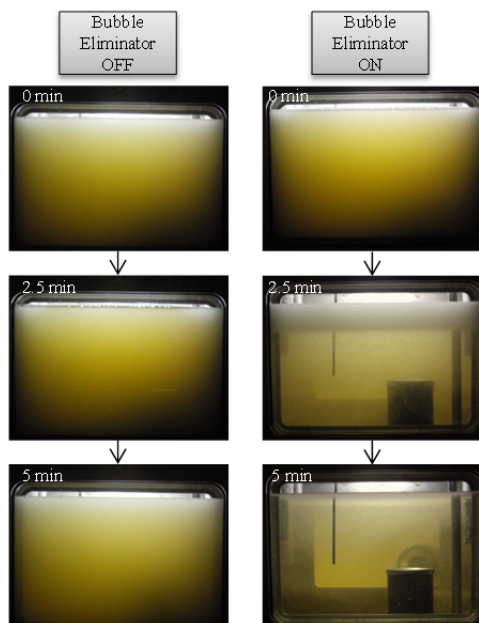


Fig. 2 Typical results of the experiments to eliminate air bubbles from the oil

で強制的に気泡を吹き込みながら、しばらく油を循環させた後、油を容器内に閉じ込めて、直ちにサーボシリンダで油を加圧・減圧した。次に油中の気泡分離除去システムを動作させ、タンク内の油を気泡の見えない状態に保った後、同様に容器内に油を循環させて閉じ込め、直ちに加圧・減圧して、シリンダ変位と容器内圧力変化を測定した。

Fig. 3 に体積変化と圧力変化の関係を示す。45 MPa の加圧工程に対して 2.5 % ほどの体積変化が生じる。また昇圧工程と降圧行程では曲線の経路が異なり、わずかなヒステリシスを持つ。これらの曲線の傾きは等価正接体積弾性係数を表し、圧力が高い範囲では気泡はすべて油中に溶解しているから、点線の接線と大気圧との交点は大気圧下における空気の含有率と見なせる。空気を混入した場合の含有率は 0.5 % 程度と見積もることができる。

Fig. 4 には、Fig. 3 の結果から計算で求めた等価正接体積弾性係数の値と数学モデル⁵⁾の値を示す。5 MPa 以下の低圧領域では、油中気泡を除去しない場合と除去した場合とでは、等価正接体積弾性係数の値に違いがみられ、除去しない場合はその値は小さく、油の見かけの剛性が低下している。しかし高圧領域では、両者の等価正接体積弾性係数の値はほぼ等しく見積もられている。また昇圧行程と降圧行程では、降圧行程の方が等価正接体積弾性係数はわずかに大きく見積もられる。これは高圧で油中に溶解した気泡が、降圧過程で析出するには時間がかかり、この時間的遅れが原因である。

4. おわりに

油の体積弾性係数を測定する実験装置により、気

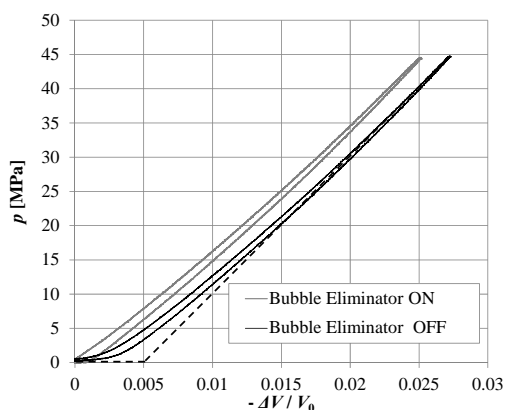


Fig.3 Pressure-volume characteristics depending on air contents

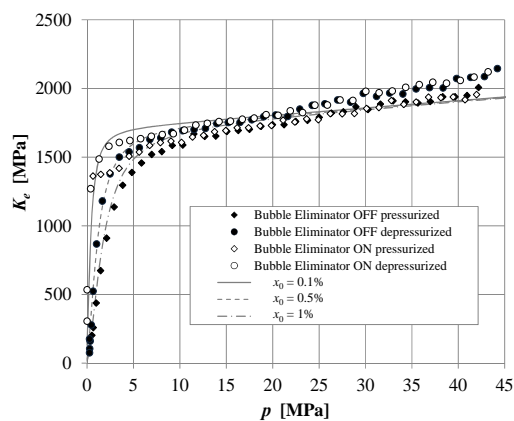


Fig.4 Effective bulk modulus as a function of pressure with initial entrained air contents

泡をわずかに含む油と油中気泡を除去した油の等価正接体積弾性係数を実験的に同定した。本研究は、戦略的基盤技術高度化支援事業と JSPS 科研費 25・9669, 26420086 の助成を受けて実施されたことを付記して関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) Kim S., Murrenhoff H., Measurement of Effective Bulk Modulus for Hydraulic Oil at Low Pressure, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 134 (2012), 021201-1-10.
- 2) Yang H., Feng B., Gong G., Measurement of Effective Fluid Bulk Modulus in Hydraulic System, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, NOVEMBER 2011, Vol. 133 (2011), DIO: 061021-1-6.
- 3) Hossein Gholizadeh, Doug Bitner, Richard Burton, Greg Schoenau, Modeling and Experimental Validation of the Effective Bulk Modulus of a Mixture of Hydraulic Oil and Air, Proc. ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power & Motion Control, FPMC2013-4493 (2013).
- 4) Junjie Zhou, Andrea Vacca, Bernhard Manhartgruber, A Novel Approach for the Prediction of Dynamic Features of Air Release and Absorption in Hydraulic Oils, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 135 (2013), 091305-7.
- 5) 坂間, 田中, 東, 五嶋, 油中気泡の除去が油の体積弾性係数におよぼす影響, 平成 26 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (2014), pp.40-42.

機能性流体による高機能メカトロシステムのデザイン

田中 豊*, 神戸晴夏*, 林田直之*, 横田眞一**, 枝村一弥***

Design of Advanced Mechatronics by Functional Fluid Power

Yutaka TANAKA*, Haruka KANBE*, Naoyuki HAYASHIDA*
Shinichi YOKOTA**, Kazuya EDAMURA***

A fluid power actuation has a great potential to realize simple, miniaturized and high-powered actuation system. Our research aims at the establishment of design and fabrication to perform miniaturization, high accumulation and high densification by integrating micro fluid power actuation system using high-powered micro robots. A pumping function generating fluid power is considered to be one of the most important elements in the fluid power actuation system. Electro-Conjugate Fluid, ECF can directly convert electric energy into kinetic energy of the fluid without mechanical moving parts. Prototype models of high-powered and miniaturized micro pump module using the ECF for micro fluid power actuation systems are fabricated and experimentally investigated. New shape and arrangement of electrodes is proposed and fabricated to miniaturize the high-powered micro ECF micro pump.

Key Words: ECF, Electrodes, Functional Fluid, Fluid Power Actuation, Micro Pump

1. はじめに

流体パワーの駆動原理は、既存の油圧・空気圧・水圧アクチュエータで広く使われている。特に流体に液体（油や水など）を用いた液圧駆動の場合、封じ込めにもなう自身の体積変化はほとんど無視できるため、剛性が高く、圧力を上げるほど高出力密度のアクチュエータとして機能する。またこの液圧パワーの駆動原理はマイクロ環境下でも高出力密度を発揮することが明らかとなっている¹⁾。

法政大学高機能メカトロデザイン研究室では、東京工業大学精密工学研究所や法政大学マイクロナノテクノロジー研究センターなどと共同で、機能性流体を用いたマイクロメカトロデバイスの研究開発を行っている。

本稿では各種アクチュエータをパワー密度の観点で比較した後、研究室で取り組んでいる機能性流体 ECF を用いたマイクロポンプについて紹介する。

2. アクチュエータの比較⁴⁾

Table 1 に示す AC サーボモータ、DC モータ、油圧・水圧ピストンモータ、空気圧モータ、ECF モータについて、パワー密度を計算し自重に対してプロットすると Fig.1 のようになる。液圧モータは電動モータに比べ桁程度、パワー密度が大きいことがわかる。またマイクロ領域で ECF は市販のアク

チュエータが存在しない際立った位置にプロットされていることがわかる。

Table 1 List of plotted symbols in figures

Symbol	Type	Number
▼	AC	739
▽	AC-Direct	17
▼	DC	259
●	Oil Swash plate piston	116
■	Oil Bent axial piston	118
◆	Oil Radial piston	240
▲	Air Vane	461
◇	Air Radial piston	14
●	Water Swash plate piston	5
+	ECF	4

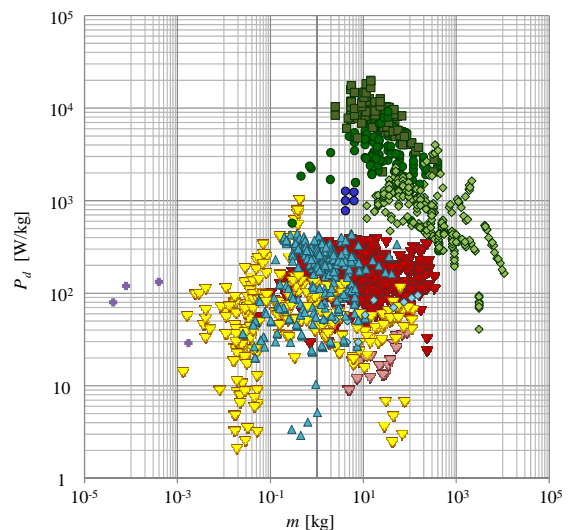


Fig. 1 Correlation between power density and actuator mass

* 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)

(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)

** 東京工業大学精密工学研究所

***新技術マネジメント

* Hosei University

** Tokyo Institute of Technology

*** New Technology Management Co.,Ltd,

3. 電界共役流体(ECF)

電界共役流体 ECF は、大坪・枝村により開発された絶縁性のある誘電性流体の一種である²⁾。ECFの特徴は正負の電極対を配置し、この電極間に直流電圧を印加すると、ECF中の不均一な電界により電極間に強いジェット流 (ECF効果) が生じることである。流体中に電極を配置して高電圧を印加するだけで流動が生じることから、機械的可動部を必要としない簡易な構造で電気-流体パワー変換素子が実現できる。

4. 試作したマイクロポンプ

強い ECF ジェットにより大きな出力圧力が得られる針状の正電極とリング状の負電極の組み合わせによる円筒形 ECF ポンプを設計試作した。外径 3.8mm、全長 7mm の円筒容器内に、針状の正電極と対向させてリング状負電極を電極間距離 200 μm 程度まで近づけて配置する。電極間に直流高電圧を印加すると、針状正電極からリング状負電極に向けて ECF ジェットが生じ、出力ポートから流体パワーが取り出せる。この円筒形 ECF ポンプの出力は、ECF 効果の原理と構造から、電極の寸法や形状、配置がポンプ出力に大きな影響をおよぼす

Fig.2 に試作した円筒形 ECF マイクロポンプと平面形 ECF マイクロポンプ³⁾を示す。また Fig.3 に両者の吐出圧力の比較を示す。円筒形 ECF マイクロポンプは、印加電圧 5kV で吐出圧力 6.1kPa、無負荷吐出流量 172mm³/s の出力を実現した。また以前に試作した平面形 ECF マイクロポンプと比較して、吐出流量では劣るものの、吐出圧力で2倍の高出力と体積比率で12分の1程度の小形化を実現した。

5. 小形高出力化

一体化構造に適した小形高出力液圧源の実現には、正負電極対をどこまで小形化して近接配置できるかが課題である。高出力を維持しながら、より小形化を目指し、正負の電極を板状の加工電極によるポンプ構造を提案した。Fig.4 に従来のポンプと提案するポンプ構造の比較を示す。この提案した電極対の実装による小形液圧源を試作すれば、従来の円筒形マイクロポンプモジュールの全長を約12分の1、外径を約3分の1まで小形化できる。これは自重に換算すると約90分の1に相当する。

6. おわりに

パワー密度の観点から各種アクチュエータの性能を比較し、試作した ECF マイクロポンプについて紹介した。本研究は JSPS 科研費(22560256)、JST・A-Step (AS251Z00941K)、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム」(2013~2017 年度)の支援

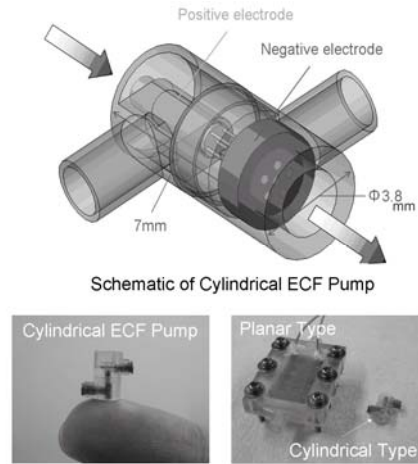


Fig.2 ECF Micro Pump Module

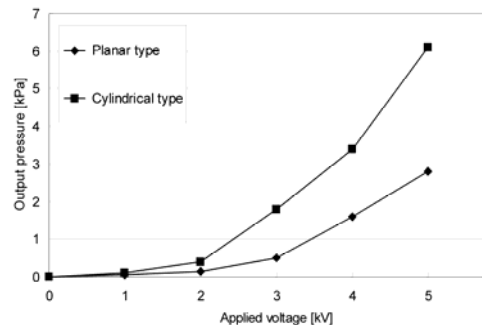


Fig.3 Output pressure for planar type and cylindrical type of ECF pump modules

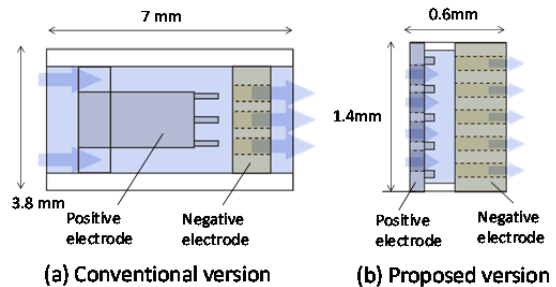


Fig.4 Comparison of structure for ECF pump

を受けて実施された。

参考文献

- 1) 吉田, 横田, 流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究 (第1報), 油圧と空気圧, 25巻, 2号 (1994), pp.281-288.
- 2) Y. Ohtsubo, K. Edamura, Dielectric Fluid Motors, Applied Physics Letters 71(3), 318 (1997), pp. 318-320.
- 3) Y. Tanaka, S. Yokota, Design and Fabrication of Micro Pump for Functional Fluid Power Actuation System, Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs Part III Micro Actuators (2010), pp.153-164, Springer.
- 4) Y. Tanaka, S. Sakama, S. Yokota, K. Nakano, Comparative Study on Performance of Fluid Power and Electric Actuators, Proc. 3rd China-Japan Joint Workshop on Fluid Power (2014).

パラレルメカニズムの産業応用に関する研究

田中 豊*, 渡邊幸平**, 丸山諒人**, 瀬戸口小織**, 五嶋裕之***

Research on Industrial Applications of Parallel Kinematics Mechanism

Yutaka TANAKA*, Kohei WATANABE*, Ryoto MARUYAMA*
Saori SETOGUCHI*, Hiroyuki GOTO**

Spatial parallel mechanism has been widely used to realize rigidity, high accuracy, multi-degrees-of-freedom and complicated motion in application of industrial fields such as machine tools, coordinate measuring systems, robot manipulators and motion simulators. In our project team innovative machine tools based on the parallel mechanism have been proposed and developed to fabricate flexible shape of tubes or evaluate anisotropic materials. Motion simulators based on tripod parallel mechanisms has been also proposed and developed to realize six-degrees-of-freedom for compact motion platforms. In this paper we introduce to apply the parallel kinematics mechanism to concept design of the innovative machine.

Key Words: Material testing machine, Motion simulator, Parallel kinematics mechanism, Tube bending machine

1. はじめに

パラレルメカニズム(PKM)は、複数の駆動アクチュエータをすべて並列に配置することで必要な自由度を得るリンク機構である。この運動機構は、エンドエフェクタを複数のアクチュエータで間接的に支持していることから、リンクの連結部の角度・変位誤差がそれぞれの平均の値となるため、シリアル機構に比べて可動領域は狭くなるものの、リンク機構全体がコンパクトで高精度な姿勢制御を実現できる利点を持っている。こうした特長を活かし、ロボットや各種機械装置に利用されている。

法政大学高機能メカトロデザイン研究室では、(一財)機械振興協会技術研究所殿や(株)菊池製作所ものづくりメカトロ研究所殿、法政大学大学院先端モーションシミュレータ技術研究所などと共同で、PKMを応用した様々な産業機械装置の研究開発を行っている。本稿ではPKMを用いたパイプ曲げ加工機と多自由度材料試験機、小形フライトシミュレータ装置について紹介する。

2. パイプ曲げ加工機

Fig.1 に開発したパイプ曲げ加工機¹⁾を示す。油圧式6自由度PKMの台座部に可動ダイスが設置され、固定ダイスとの相対運動により、押し出されたパイプの任意の曲げ加工を実現している。パイプの

曲げ形状は、パイプが押し出される速度に応じて、固定・可動ダイス間の距離と角度をPKMで制御することにより得られる。

3. 多自由度材料試験機

Fig.2 は開発した多自由度材料試験機である。通常の一方向引張材料試験機のヘッド部に6自由度PKMを設置し、多自由度の複合荷重を与えることができる。位置と力のハイブリッド制御手法を導入し、様々な負荷条件に対応した材料試験が実現できる。

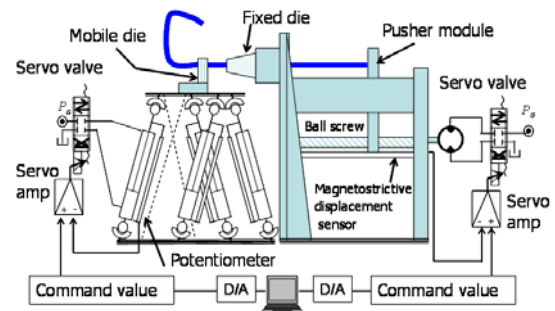


Fig.1 Versatile bending machine

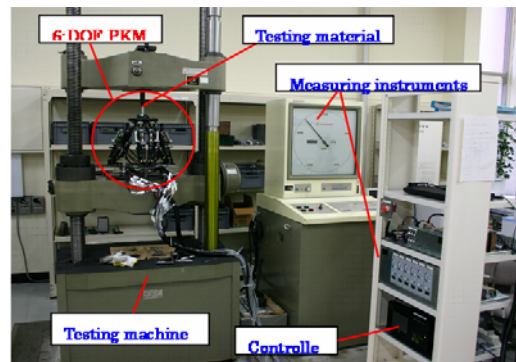


Fig.2 Schematic structure of the proposed material testing system

* 法政大学大学院先端モーションシミュレータ技術研究所
** 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)
*** 機械振興協会技術研究所
(〒203-0042 東京都東久留米市八幡町 1-1-12)
*, ** Hosei University
** Japan Society for the Promotion of Machine Industry

4. 小形フライトシミュレータ装置

従来のフライトシミュレータシステムの体感用可動ステージには、Stewart-Gough 形 PKM が広く用いられている。しかしこの PKM は大形で設置面積が広く、アクチュエータ自身がステージを支える構造で、可動角度範囲が小さく、中・小形機の持続的な加減速運動を模擬するには工夫が必要であった。

研究室では従来の PKM に代わり、アクチュエータをすべて土台面に配置した 3 脚 PKM を開発し、これをフライトシミュレータの可動ステージに適用することを提案している²⁾。Fig.3 と Fig.4 に 2 つのタイプの 3 脚 PKM の構成図を示す。いずれも可動ステージが回転ジョイントで固定長の脚の一端で接続され、他端は球面ジョイントを介して平面上を運動するアクチュエータと接続されている。Fig.3 の回転形は脚先端の平面運動がそれぞれ独立した回転方向と半径方向の運動で、Fig.4 の平面形は独立した XY 方向の平面運動である。この 3 脚 PKM は設置面積が小さく、大きな可動角度が得られる特長がある。

航空機の運動特性を評価するために、仮想動作シミュレータを用いてサイズ別の航空機の運動を計測した。航空機の数学モデルは座席数 8 席の King Air, 180 席の Boeing737, 480 席の Boeing747 を用い、パイロット訓練生に仮想動作シミュレータを操作してもらい飛行データを収集した。Fig.5 は仮想動作シミュレータによる飛行データ収集の様子である。航空機モデルに対する収集された加速度と角速度から、飛行運動の体感を模擬する可動ステージの 6 自由度姿勢を算出した。Table 1 に運動を模擬するステージの変位と角度の最大・最小の値を示す。この結果から、小形航空機ほどステージの変位と角度が大きくなるのがわかる。またステージの角度においては、特に角度 θ の範囲が大きく、従来の Stewart-Gough 形 PKM の可動角度範囲では、小形航空機の挙動を十分に模擬できない。

5. おわりに

PKM を用いたパイプ曲げ加工機と多自由度材料試験機、小形フライトシミュレータ装置について紹介した。3 脚 PKM は 3D プリンタのステージやヘッド可動部への適用など様々な応用が期待される。

参考文献

- 1) 五嶋, 田中, 一柳, パラレルメカニズムを用いた曲げ加工機による管材の三次元加工, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 第 41 巻, 第 4 号(2010), pp.74-79.
- 2) Y. Shiga, Y. Tanaka, H. Goto, H. Takeda, Design of Six Degree-of-freedom Tripod Parallel Mechanism for Flight Simulator, International Journal of Automation Technology, Vol.5, No.5 (2011), pp. 715-721.

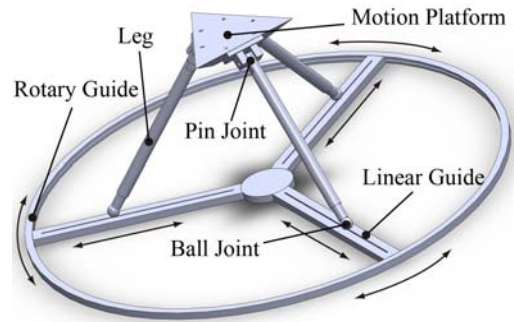


Fig. 3 Rotational type of tripod parallel mechanism

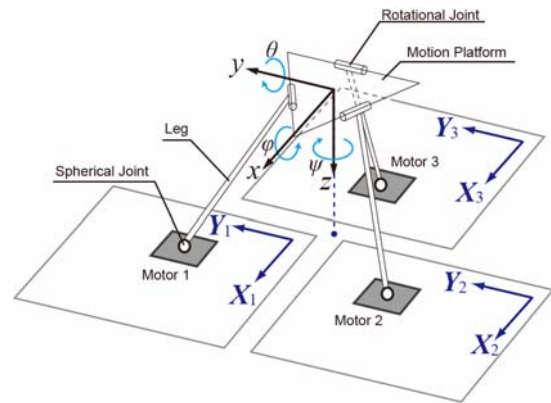


Fig.4 Planar type of tripod parallel mechanism



Fig. 5 Analysis of motion by pilot through visual system

Table 1 Maximum displacements and angles of motion platform simulating the aircraft motions

	King Air	Boeing 737	Boeing 747
x	-1.40 ~ 1.82 m	-0.17 ~ 1.84 m	-0.06 ~ 1.25 m
y	-0.25 ~ 0.48 m	-0.14 ~ 0.08 m	-0.04 ~ 0.04 m
z	-1.03 ~ 0.67 m	-4.59 ~ 1.58 m	-0.64 ~ 1.23 m
φ	-6.3 ~ 10.9 deg	-5.6 ~ 2.8 deg	-2.1 ~ 2.3 deg
θ	-36.3 ~ 26.7 deg	-36.2 ~ 3.5 deg	-23.7 ~ 1.8 deg
ψ	-1.5 ~ 1.7 deg	-0.9 ~ 1.3 deg	-1.0 ~ 0.9 deg

EHD 流体を利用したポンプに関する研究

○濱田溪太郎*, 中川和之*, 築地徹浩*

Study on Pump Using Electro-hydro-dynamics (EHD) Fluid Flow

Keitaro HAMADA*, Kazuyuki NAKAGAWA*, Tetsuhiro TSUKIJI*

A functional fluid flows by itself when electric fields are applied to the functional fluid. This phenomenon is called EHD (electro hydro dynamics) phenomenon. Using the EHD phenomenon, it is possible to utilize the functional fluid flows to pumps with fewer parts and sliding areas. We produced multi-holes electrode pump. This pump was arranged some cylindrical electrode pair (some holes) on the same electrode plate. The pumps have some feature. First, the structure is simple and processing is easy. Second, we can reverse the one-way flow by replacing the positive electrode with the negative electrode. We used the HFE-7100 (Hydro Fluoro Ether) as functional fluid causing the EHD phenomenon. We measured pressure-flow rate characteristics of the two pumps connected in series when voltage is applied to the multi-holes electrode pump (N7D1W1G1 pump) 2500V and 3000V. And we compared the pressure-flow rate characteristics to those of the cylindrical electrode pair pumps using liquid crystal as the functional fluid measured in the past. Furthermore, we produced new multi-holes electrode pump (N9D1W1G1 pump). We measured pressure-flow rate characteristics of the two pumps connected in series when voltage is applied to the new multi-holes electrode pump (N9D1W1G1 pump) 3000V.

Key Words: Functional Fluid, Electro Hydro Dynamics, Pump

1. はじめに

機能性流体に電場を印加すると機能性流体自らが流動を行う。これは、EHD (Electro Hydro Dynamics) 現象と呼ばれる。本研究では、機能性流体を使用し、EHD 現象を利用した部品点数や摺動部の少ない利点を持つポンプを製作しその圧力-流量特性の比較を行う。過去に当研究室では作動流体に液晶を用いた円筒電極対ポンプを用いた研究が行われてきた。本研究では、作動流体を可視化によって液晶よりも速い流速が得られたハイドロフルオロエーテル (以下 HFE-7100) に変更し同一電極平面上に複数個の円筒電極対を有する多孔型電極対ポンプが製作された。このことにより、ポンプ内で気泡が生じた場合でもポンプが詰まらず流動がストップすることがなくなるものと考えられる。

本研究では、EHD 現象を利用したポンプを試作しその圧力流量特性を測定し、従来のポンプの特性と比較することを目的とする。

2. 多孔型電極対ポンプによる特性実験

円筒電極を応用した多孔型電極 (直径 1mm の穴を 7 つ開けたもの) を製作した。この電極を使用して製作したポンプを N7D1W1G1 (穴の個数 7 個、

穴の直径 1mm, 電極幅 1mm, 電極間距離 1mm) ポンプとする。N7D1W1G1 ポンプの概要を Fig.1 に示す。

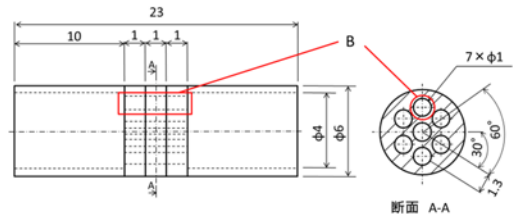


Fig.1 The drawing of a N7D1W1G1 pump

次に、穴の個数を変えた場合、圧力流量特性にどのような変化が生じるかを調査するために、穴が 9 つ直径 1mm、電極幅 1mm、電極間距離 1mm の多孔型電極を製作した。この電極を用いて製作したポンプを N9D1W1G1 ポンプとする。N9D1W1G1 ポンプの概要を Fig.2 に示す。

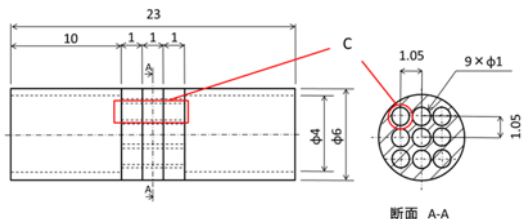


Fig.2 The drawing of a N9D1W1G1 pump

Fig.1 の B の部分および Fig.2 の C の部分の断面

* 上智大学理工学部
(〒102 - 8554 東京都千代田区紀尾井町 7 - 1)
(E-mail: t-tukiji@sophia.ac.jp)
* Sophia University

を切り抜いた模式図を Fig.3 に示す.

多孔型電極を用いたポンプは, Fig.3 の円筒電極対ポンプを複数個, 同一平面上に並べた構造になっており, 穴1つ1つの全周(360°)からの回転流動によって一方向の流動を発生させている.

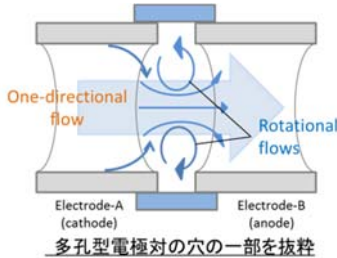


Fig.3 The flow inside a cylindrical electrode

まず, 作動流体を HFE-7100 とした N7D1W1G1 ポンプを 2 つ直列に接続したポンプに電圧を 3000V, 2500V を印加した場合で測定した流量と圧力の関係および過去に行われた作動流体を液晶とする円筒電極対ポンプを 2 つ直列に接続したポンプの流量と圧力の関係¹⁾を Fig.4 に示す.

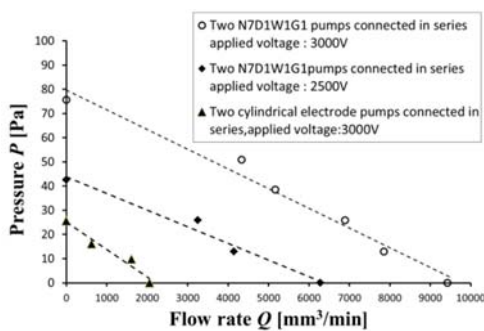


Fig.4 Influence of voltage on pressure

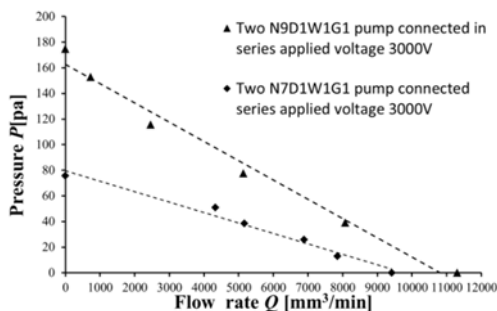


Fig.5 Influence of the number of holes on pressure

Fig.4 から, 多孔型電極対ポンプを 2 つ直列に接続したポンプの圧力-流量特性をグラフに表すとプロットした点はほぼ一直線上になった. また, 同条件で印加電圧を低下させた場合, グラフの近似直線は圧力あるいは流量の減少方向に平行移動した. この

ことから, ポンプに印加する電圧は, ポンプの圧力, 流量に影響するものと考えられる.

また, 液晶を用いた円筒電極対ポンプと HFE-7100 を用いた N7D1W1G1 ポンプでの圧力流量特性を比較すると, 圧力, 流量ともに HFE-7100 を用いた N7D1W1G1 ポンプの方が優れていることが分かった. これは, N7D1W1G1 ポンプの方が, 円筒電極対ポンプに比べて, 回転流動を発生させる全周の長さが長いためであると考えられる. また, 作動流体を液晶から HFE-7100 に変更したことも大きな要因あると考えられる.

次に, 作動流体として HFE-7100 を使用し, 多孔型電極を用いたポンプ N7D1W1G1 ポンプと N9D1W1G1 ポンプの圧力流量特性を 3000V の電圧を印加し調査した. その結果は, Fig.5 にまとめられる.

Fig.5 より, プロットした点はほぼ一直線上に整理することができた. 穴の個数を, 7 個から 9 個に増加した場合, 圧力, 流量共に増加することが分かった. これは, 穴 7 つの場合と 9 つの場合では, 9 つの方が, 電極に対して穴の開いている部分の割合が大きくなり流動の抵抗となる部分が減少したためと考えられる. また, 回転流動を発生させる全周の長さが穴 9 つの方が長くなったため(穴 7 つの場合は, およそ 22mm, 9 つの場合がおよそ 28mm)と考えられる.

3. 結論

1. N7D1W1G1 ポンプにおいて電圧を増加させていった場合, ポンプの流量及び圧力は共に増加し流量-圧力グラフは流量もしくは圧力の増加方向に平行移動する.
2. 作動流体が HFE-7100 である多孔型電極対ポンプは作動流体が液晶である円筒電極対ポンプよりも, 圧力, 流量ともに大きくなる.
3. 穴の個数を 9 つに増やした N9D1W1G1 ポンプの圧力, 流量は N7D1W1G1 ポンプの圧力, 流量よりも増加することが分かった. これは, 穴が増えたために流動抵抗が減ったことと, 回転流動を発生させる部分の長さが長くなったことが大きな要因と考えられる.

参考文献

- 1) Kohei MIYAHARA, Kenta KODAMA, Tetsuhiro TSUKIJI “Pump Using Nematic Liquid Crystalline Flow Under Direct Current Electric Field”, Proceedings of the 2012 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition Volume 7 : IMECE2012-86480 pp. 1069-1075, 2012

油圧制御技術とシミュレーション

○真田一志*

Control technology and simulation for oil-hydraulics

Kazushi SANADA*

This study presents a simulation model of pipeline dynamics as an example of control technology and simulation for oil-hydraulics. The author proposed the optimized finite element model of pipeline dynamics, which is finite element approximation of the equation of motion and the continuity equation of incompressible fluid flow in a pipe. Grid spacing for the finite element approximation is adjusted in order to improve accuracy of natural angular frequencies of the model against theoretical values. The optimized finite element model is represented by a state equation widely used in the field of control engineering. It is easy to implement the model to commercial simulation software. As an example, control technology and simulation using the optimized finite element model applied to common-rail injection system is introduced. Usage of the finite element model improves accuracy of control technology and simulation.

Key Words : Oil-hydraulics, Control, Simulation, Modeling, Pipeline dynamics

1. はじめに

油圧制御技術のモデルベース開発を目指して、シミュレーションの高度化の研究を行っている。管路の過渡現象のモデルとコモンレール式燃料噴射装置に応用した例を紹介する。

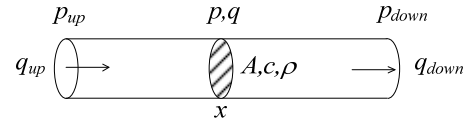


Fig. 1 Pipe model

2. 最適化有限要素モデル¹⁾

Fig. 1 に示すように、断面が円形で、非圧縮性流体が流れる管路を考える。管路の軸に沿って圧力と流量の格子点を交互に設定する (Fig. 2)。流れの運動方程式 (式(1)) と連続の式 (式(2)) を、交互格子系をもとにした線形形状関数を用いて、有限要素近似すると式(3)で示す状態方程式が得られる。状態変数 \mathbf{x} は式(4)に示すように、格子点の圧力と流量から成る。入力 $\bar{\mathbf{p}}$ は、管路の両端の圧力である (式(5))。

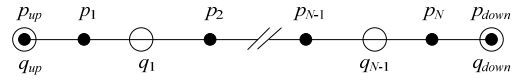


Fig. 2 Interlacing grid system

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{A}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - p_f(q) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{A} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}_p \mathbf{x} + \mathbf{B}_p \bar{\mathbf{p}} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T, \mathbf{p}^T]^T \quad (4)$$

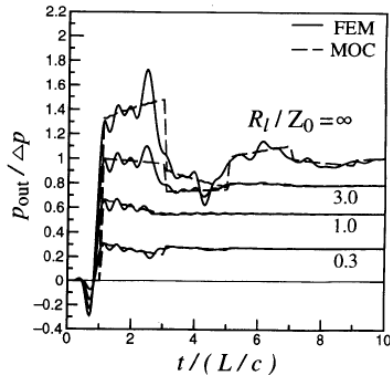
$$\bar{\mathbf{p}} = [p_{up}, p_{down}]^T \quad (5)$$

格子点の配置は、モデルの固有角振動数の近似精度が極力高くなるように最適化した。Fig. 3 に示す管路の一端の圧力がステップ状に増加した場合、他端の絞りの前の圧力をシミュレーションした結果を Fig. 4 に示す。下流端の絞りの強さ R_l / Z_0 が無限大の場合は閉鎖端を意味し、ゼロの場合は圧力一定の開放端を表している。格子点を均等に配置した Fig. 4 (a) では、不自然な数値的な振動が表れている。モデル固有値の近似精度を評価関数として、格子点配置を数値探索手法により最適化した場合の結果を Fig. 4 (b) に示す。不自然な数値的な振動が低減されており、最適化の効果が現れている。そのため、本モデルを最適化有限要素モデルと呼んでいる。

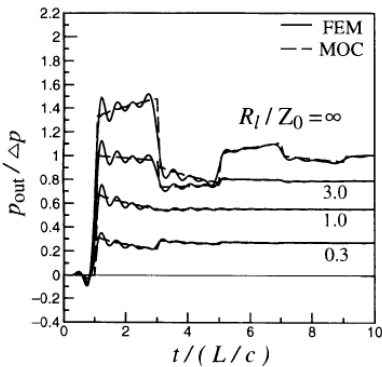


Fig. 3 Step input to a single pipe terminated with a restriction

* 横浜国立大学大学院工学研究院
(〒240 - 8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
(E-mail: ksanada@ynu.ac.jp)



(a) Uniform grid system



(b) Optimized grid system

Fig. 4 Transient pressures p_{out}

2. 燃料噴射のシミュレーション²⁾

高圧燃料を貯蔵し、電気信号によって噴射を制御するコモンレール式 (Fig. 5) が普及している。噴射に伴う圧力脈動は燃料噴射率に影響する。

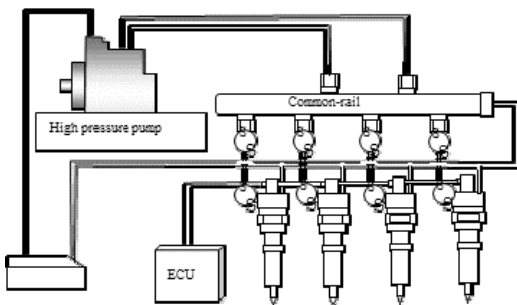


Fig. 5 Common-rail fuel injection system

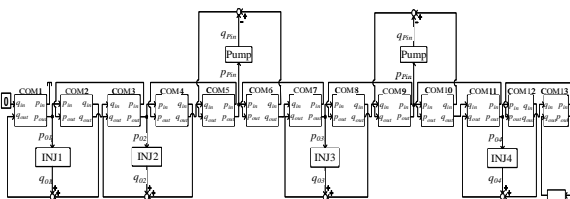


Fig. 6 Simulation model using the optimized finite element model

コモンレールを最適化有限要素モデルで近似した (Fig. 6)。燃料噴射に伴い変動する噴射弁圧力と燃料噴射率について、実験結果とシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。プレ噴射、メイン噴射、ポスト噴射を想定した。破線がモデルによるシミュレーション結果であり、実線の実験結果をよく再現している。燃料噴射率を精密に制御するため、シミュレーションによる挙動予測が活用できる。

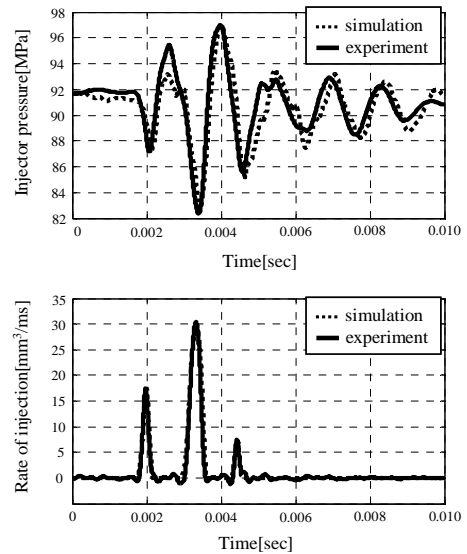


Fig. 7 Simulation results

4. おわりに

最適化有限要素モデルは制御工学の状態方程式で表現できることから、市販の数値計算ソフトで容易に使うことができる。管路の長さや内径、作動油の粘度などの必要な諸元を入力すれば係数行列を自動的に出力するソフトを開発しており、さまざまな事例に活用することができる。

参考文献

- 1) K Sanada, C W Richards, D K Longmore and D N Johnston, A finite element model of hydraulic pipelines using an optimized interlacing grid system, Proceedings of Institution for Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol.207, 1993, 213/222 (1993)
- 2) Hiroshi Akiyama, Hiroyuki Akiyama, Akira Kato, Toshinori Saiki, Kazushi Sanada, and Naoki Kado, Precise Fuel Control of Diesel Common-Rail System by Using OFEM, SAE Technical Paper (2010-01-0876), 31/40 (2010)

フルードパワーサイエンス

○風間 俊治*

Fluid Power Science

Toshiharu KAZAMA*

Mechanical Systems Design Laboratory at Muroran Institute of Technology is a research laboratory in Hokkaido, Japan, involved in fluid power systems and components. To improve further reliability and performance of the systems, there is a need to overcome the complex problems and to understand the fundamental phenomena. We, therefore, name 'Fluid Power Science' and tackle on doing the science, especially relating to tribology of hydraulic pumps, motors, cylinders, and valves, optimal design of bearings, and mechanism of erosion caused by cavitating jets for oil- and water-hydraulics.

Key Words : Tribology, Oil/Water-hydraulics, Cavitation erosion, Bearing/Sealing parts, Equipment

1. はじめに

北海道内でフルードパワーを専門とする唯一の教育研究機関として、フルードパワーシステムおよびコンポーネントの信頼性や性能を強く支配する「トライボロジー」と「キャビテーション」について、「水道水」と「作動油」の両者から焦点を当てたテーマに取り組んでいる。

2. 「フルードパワーサイエンス」

フルードパワーは、動力の伝達に流体を用いる工学・技術分野であることは論を俟たない。油圧の特長は、動力密度が高く、応答速度が高く、無段変速域が広いことにある。空気圧の特長は、自動化への容易な適用、防爆性、緩衝性などである。更なる信頼性や性能の向上には、トライボロジーやキャビテーションなどに係わる課題を克服する必要がある。現象の本質を科学し、その結果を統合し、新たなフルードパワーシステムを創出する学問分野を「フルードパワーサイエンス（油空圧科学）」と名づけ、液体物性や表面性状などにも注目して、それらに関する基盤的研究を推し進めている。

3. 熱混合潤滑モデル

「高品位化」「高動力密度化」「高効率化」「低騒音化」「水圧対応」等を図るためには、「トライボロジー」がキーテクノロジーとなる。表面粗さの干渉や接触、

作動液体の物性値変化、摺動部の発熱、部材の弾性変形の考察や影響の評価などをはじめ、従来の取扱いを超えたモデルの構築を手掛けている。

4. 油圧ポンプ性能試験

液圧ポンプ・モータには、一層の環境負荷の低減や安全性の向上が求められている。高品位ポンプ・モータの開発に資する最適設計指針を提示することを目指して、ピストンポンプ、ベーンポンプ、歯車ポンプの摺動部温度や諸性能を計測して、実験的なアプローチを行っている。

5. ピストンポンプ・モータ用スリッパ

斜板式油圧ピストンポンプ・モータの一層の高品位化ならびに高付加価値化を目指して、スリッパ・斜板間に着目して、数理モデリングならびに数値解析に取り組んでいる。また、そのトライボロジー特性を実機作動条件にて把握できる試験機を試作し、スリッパの姿勢や温度分布の高精度計測に挑んでいる。

6. 噴流キャビテーション壊食

キャビテーションおよびキャビテーション壊食は、液圧機器の信頼性や性能を著しく低下させる。とりわけ、高圧化や水圧化では、最重要課題のひとつとなる。液圧機器内部に生じる壊食は、キャビテーション噴流の衝突に基づく。そこで、噴流衝突式試験装置を用いた実験や簡易的な可視化計測を通して、液体の種類にも着目しつつ、現象の解明と抑制法の提案を目指している。

* 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域
(〒050 - 8585 北海道室蘭市水元町 27-1)
(E-mail: kazama@mmm.muroran-it.ac.jp)
* Muroran Institute of Technology

最近の主な論文 (抜粋)

- 1) 風間, 鈴木, 鈴木, 成田, 桜井: 斜板式アキシアルピストンモータに用いられるスリッパのしゅう動部温度とすきま形状の同時計測, 日本フルードパワーシステム学会論文集, **45-2**, 22/28 (2014)
- 2) 風間: 油圧ベーンポンプの熱潤滑実験に関する一考察, C28, 第13回「運動と振動の制御」シンポジウム USB 論文集, No.13-18 (2013)
- 3) 風間: 感圧フィルムを利用した噴流キャビテーション壊食の簡易予測手法の検討, 日本設計工学会北海道支部 2012 年度研究発表講演会講演論文集, 3/4 (2013)
- 4) 風間, 齋藤, 成田, 花島: 粘度制御式ジャーナル軸受の開発 (検証実験と数値計算との比較), トライボロジー会議 2013 春 東京 USB 予稿集, D11 (2013)
- 5) 風間, 秋山, 熊谷, 成田: 噴流衝突式によるキャビテーション壊食に関する研究 (噴流衝突面のねじ形状ならびに傾斜角度の影響), 平成 25 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 34/36 (2013)

What's FPSci?

Fluid power is a term describing engineering and technology by using a fluid (liquid or gas) to transmit power. To improve further reliability and performance, there is a need to overcome the problems relating to tribology and cavitation and to understand the fundamental phenomena. We, therefore, name 'Fluid Power Science' and tackle on doing the science, unifying the results, and creating novel fluid power systems.

Mixed THL

Tribology is the key technology of the next generation pumps and motors in terms of high quality, high efficiency, high power density, noise reduction, and tap-water use. A modified lubrication model has been developed, which includes effects of roughness interaction, surface contact, lubricant properties, heat generation, and elastic deformation.

Pump Test

According to salient issues included in the Kyoto Protocol, reduction in the environmental burden imposed

by fluid power components has become very important. To construct the optimum design, thermal effects on lubrication have been investigated experimentally by measuring tribological parts' temperatures and pump performance of piston, vane, and gear types.

Piston Slipper

To improve reliability and performance of swashplate axial piston pumps and motors, bearing/sealing parts between the a slipper and a swashplate have been studied. Theoretical modeling and numerical calculation have been pursued. An in-house test rig was built. The slipper attitude and temperature distributions are tried to be measured under actual operating conditions.

Jet Cavitation

Cavitating jets in hydraulic components, especially for high pressurization and with tap-water, cause serious problems such as erosion. Based on jet cavitation erosion test and simple visualization technique, the mechanisms of erosion have been investigated and the methods to reduce erosion have been proposed, including the effects of liquid types.

Recent Papers (Selected)

- 1) Kazama, T., Kumagai, K., Osafune, Y., Narita, Y., and Ryu, S.: Effects of Oblique Surfaces with Grooves on Erosion by Cavitating Oil Jet, Proc. FLUCOME2013, OS1-03-4, USB (2013)
- 2) Kazama, T. and Narita, Y.: Numerical Simulation of a Slipper Model for Swash Plate Type Axial Piston Pumps and Motors: Effects of Concave and Convex Surface Geometry, International Journal of Automation Technology, **6-4**, 434/439 (2012)
- 3) Kazama, T., Kumagai, K., and Narita, Y.: Effect of Nozzle Outlet Geometry and Impinged Surface Geometry on Erosion Caused by Cavitating Jets for Hydraulic Equipment, Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, **10-1**, 91/101 (2011)
- 4) Kazama, T., Sasaki, H., and Narita, Y.: Simultaneous Temperature Measurements of Bearing and Seal Parts of A Swash Plate Type Axial Piston Pump — Effects of Piston Clearance and Fluid Property, Journal of Mechanical Science and Technology, **24**, 203/206 (2010)

メッシュ電極形 ECF ポンプの電極間隔と性能の関係

桜井康雄*, 中田 毅**, 枝村一弥***

Relation between Gap of Electrode and Performance of Mesh Type ECF-pump

Yasuo SAKURAI*, Takeshi NAKADA**, Kazuya EDAMURA***

An Electro-conjugate Fluid (ECF) is one of functional fluids. A strong jet flow is generated between a pair of electrodes when a high voltage is applied to ECF through the electrodes. By the use of this strong jet flow, a pump with simple structure, no noise, no vibration and no sliding part can be developed. From this view point, the authors had developed the printed circuit board multi-layered type ECF-pump and the tube type ECF-pump in order to realize a new liquid cooling system for CPU by ECF. And the performance of the liquid cooling system composed of the printed circuit board multi-layered or the tube type ECF-pump had been investigated. To realize the new liquid cooling system by ECF, it is necessary to make the size of the ECF-pump more compact. Accordingly, the authors has been proposed a compact ECF-pump. This pump is composed of nickel-plating metallic meshes as electrode, an acrylic spacer to decide the gap of the electrodes, acrylic flanges to connect pipes. This pump is manufactured by pasting these components with an epoxy bonding agent. The merit of this ECF-pump is that the structure is simple, how to manufacture is easy, and the gap of the metallic meshes as electrode can be determined by only the thickness of the acrylic spacer easily. To investigate the basic characteristics of the proposed ECF-pump, various experiments have been carried out. In this article, the performance of the ECF-pump is shown. Namely, the experimental results on the relation between the gap of the metallic mesh electrodes and the performance of the ECF-pump is described. These experimental results show that the ECF-pump has remarkable properties when the gap between two metric meshes as electrode is set at 0.1mm.

Key Words : Functional Fluids, Electro-conjugate Fluid, Pump, Metric mesh

1. 緒言

電界共役流体(Electro Conjugate Fluid : ECF)¹⁾とは、機能性流体の一種である。この液体に一对の電極により直流高電圧を印加すると電極間で他の液体に比べ非常に強いジェット流が発生するという特徴を有している。この現象を利用することにより、摺動部分を必要としない単純な構造を持つ振動および騒音が発生しないポンプを開発することが可能であると考えられる。

このようなポンプの用途の一つとして、近年、その高機能・高性能化が著しい電子機器で用いられる電子チップ、特に、パーソナルコンピュータの高性能化に伴う発熱量の増大が問題となっているCPUをECFで冷やす新しい液冷システムへの応用が考えられる。

このような背景の下、本研究室では2種類のECFポンプ^{2,3)}を提案した。しかしながら、ECFによる新しい冷却システムの実用化ならびに用途拡大の観点から、ECFポンプのさらなる小形化が求められている。そこで、本研究室では、一对の電極に金属メッシュ^{4,5)}を用

いたECFポンプ（以後、メッシュ電極形 ECF ポンプ）を提案した⁶⁾。ここでは、このポンプの電極間隔がメッシュ電極形 ECF ポンプの性能におよぼす影響について実験的に検討した結果について述べる。

2. メッシュ電極形 ECF ポンプの概要⁶⁾

メッシュ電極形 ECF ポンプの構造を Fig.1 に示す。このポンプは、ニッケルメッキを施した2枚の金属メッシュ、その間に挟むアクリルスペーサ、金属メ

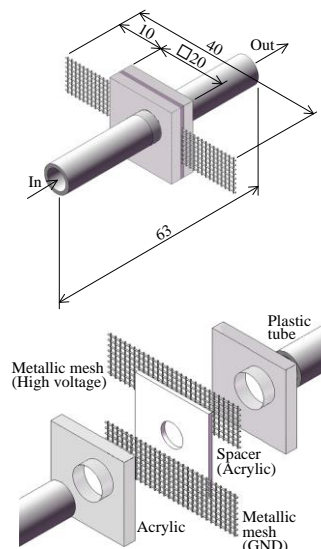


Fig.1 Mesh type electrodes ECF-pump

* 足利工業大学工学部創生工学科
(〒326 - 8558 栃木県足利市大前町 268-1)
(E-mail: ysakurai@ashitech.ac.jp)
** 東京電機大学情報環境学部情報環境学科
(所在地 〒270 - 1382 千葉県印西市武西学園台 2-1200)
*** (有) 新技術マネージメント
(所在地 〒124 - 0023 東京都葛飾区新小岩 2-9-1-306)
* Ashikaga Institute of Technology
** Tokyo Denki University
*** New Technology Management Co., Ltd.

ッシュを抑えるアクリル板と内径 6mm のプラスチックチューブで構成されている。このような構成とすることで、金属メッシュの間隔を簡単に決めることができることという長所を本ポンプは有する。

3. 電極間隔が性能におよぼす影響

Fig.2 に示すような実験装置を製作し、2枚の金属メッシュの間隔 L 、すなわち、電極間隔をスペーサの厚さを調整することにより変化させ、電極間隔がポンプ吐出し量におよぼす影響を実験的に検討した。次いで、Fig.3 に示すような実験装置を製作し、 L を変化させ、電極間隔がポンプ吐出し圧力におよぼす影響を実験的に検討した。なお、本ポンプのメッシュの粗さの最適値は GND 側が #120 (120 メッシュ/1 インチ)、高電位側が #150 (150 メッシュ/1 インチ) であることを前報で明らかとした⁶⁾。ここでは、メッシュはこのサイズを用いる。また、本実験で用いた ECF は、現在最も強いジェット流が発生することが確認されている FF-3 EHA2 である。

Fig.4 に電極間隔 L を変化させた場合のポンプ吐出し量 Q_p とポンプへの入力電圧 V_{in} の実験結果を示す。この図より、電極間隔を狭くするほど吐出し量が大きくなり、 $L=0.1\text{mm}$ の時では、 $V_{in}=2.5\text{kV}$ とすると $Q_p=3.77\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 、 $V_{in}=2.0\text{kV}$ では $Q_p=3.47\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ となる。本研究室で開発した管路形 ECF ポンプでは $V_{in}=2.0\text{kV}$ の時、 $Q_p=5.03\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ という結果が得られており、メッシュ電極形 ECF ポンプは、管路形 ECF ポンプの約 69%の吐出し量が得られていることがわかる。メッシュ電極形 ECF ポンプの大きさは、管路形 ECF ポンプの大きさに比べて非常に小さい。よって、ポンプ管体の容積に対する吐出し量という点において、管路形 ECF ポンプに対するメッシュ電極形 ECF ポンプの優位性が明らかである。

Fig.5 に電極間隔 L を変化させた場合のポンプ吐出し圧力 P とポンプへの入力電圧 V_{in} の実験結果を示す。ポンプ吐出し圧力においても、前述した吐出

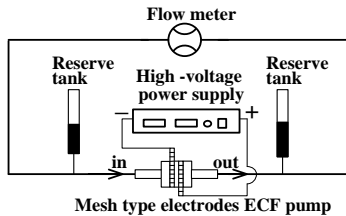


Fig.2 Experimental apparatus (pump discharge)

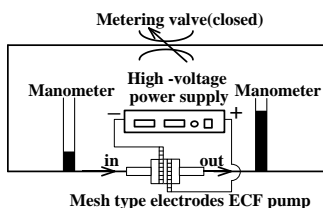


Fig.3 Experimental apparatus (pump pressure)

量と同じ傾向を示していることがわかる。メッシュ電極 ECF ポンプでは、 $L=0.1\text{mm}$ の時、入力電圧 $V_{in}=2.0\text{kV}$ では $P=1.4\text{kPa}$ で、本研究室で開発した管路形 ECF ポンプでは $V_{in}=2.0\text{kV}$ で、 $P=6.04\text{kPa}$ である。メッシュ電極形 ECF ポンプは、管路形 ECF ポンプの約 23%の吐出し圧力が得られていることがわかる。管路形ポンプと本ポンプの管体の大きさに対するポンプ吐出し圧力の面においても、本ポンプの優位性が明らかであることがわかる。

4. 結言

メッシュ電極形 ECF ポンプの設計パラメータである電極間隔とポンプ吐出し量、ポンプ吐出し圧力について実験的に検討した。その結果、本研究室で開発した管路形 ECF ポンプに比べ、ポンプの管体の容積に対する吐出し量および吐出し圧力の面でメッシュ電極形 ECF ポンプの優位性が明らかとなった。

参考文献

- 1) 例えば、横田眞一、貞本敦史、近藤豊、大坪泰文、枝村一弥：電解共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ (ステータ電極(SE)形マイクロモータの提案)、機論 C, **66**-642, 627/633(2000)
- 2) 桜井康雄、門井寛人、中田毅、枝村一弥：プリント基板多層形 ECF ポンプの開発と液冷システムへの応用、機論 C, **72**-715, 991/996(2006)
- 3) 桜井康雄、中田毅、枝村一弥：管路形 ECF ポンプの開発と CPU 液冷システムへの応用、機論 B, **75**-753, 966/971(2009)
- 4) 中田毅、桜井康雄、枝村一弥：電界共役流体を用いたピストン形リニアアクチュエータの開発、機論 C, **71**-706, 2014/2019(2005)
- 5) 特許 3225016 「リニアモータ」、特許権者：395016615、有限会社新技術マネジメント
- 6) 五十嵐友彰、桜井康雄、中田毅、枝村一弥：メッシュ電極を用いた ECF ポンプの開発、平成 21 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集、46/48(2009)

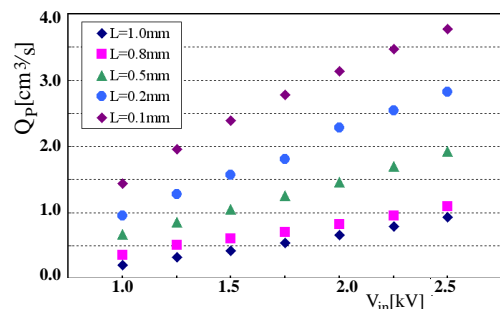


Fig.4 Experimental results (pump discharge)

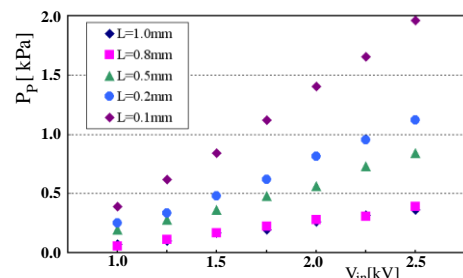


Fig.5 Experimental results (pump pressure)

顎関節症治療手技スカルケア実施時の力計測用センサの動特性

長屋貴洋*, 桜井康雄**, 本戸歳知***

Dynamic Characteristics of Force Sensor for Skull Care

Takahiro NAGAYA*, Yasuo SAKURAI**, Toshitomo HONDO***

Recently, the number of the patients with temporomandibular joint disorder is increasing. Their chief complaint is disturbance of mouth opening, abnormalities in temporomandibular joint, or a pain of temporal region. Furthermore, the number of the patients with temporomandibular joint disorder is projected to increase because of a change of Japanese diet, that is many Japanese preferably eat soft foods. Main treatment for temporomandibular joint disorder is to adjust teeth alignment by using a bite plate. However, this treatment is symptomatic therapy and it is difficult to cure temporomandibular joint disorder by using this treatment. Then, skull care has been proposed, which is a new method of treatment for temporomandibular joint disorder. And, a number of good treatment results by skull care have been reported. However, skull care depends on the maneuver of the dentist who has developed the method. In order to make a number of dentist use skull care, it is required to develop a system to check and instruct the magnitude of force applied to a patient by a dentist at least. As the first step to realize this system, it is necessary to develop a sensor to measure the magnitude of force without giving a pain to a patient. In this article, two kinds of sensors are shown, one is for measuring the magnitude of force applied to cranial part through the palm of the dentist and another one is for measuring that applied to the gums through the finger of the dentist. The experimental results for static and dynamic characteristics of these sensors are described. And it is shown that these sensors have the satisfactory characteristics.

Key Words : Pneumatics, Force sensor, Dentistry, Temporomandibular joint disorder, Skull care

1. 緒言

近年、顎関節症で歯科外来を訪れる患者の数が増加している。さらに、近年の日本人の柔らかいものを多く食べるという食事の変化により、顎関節症を患う患者数が増えるものと予想されている。

現在、この治療は、スプリントなどの矯正装置による噛み合わせの調整を中心とした対症療法が主流である。一方、近年、頭蓋療法を用いた顎関節症の治療法（以後、スカルケア）が提案され良好な治療効果が得られている¹⁾。しかしながら、スカルケアはこの治療法を開発した歯科医の手技に依存しているのが現状である。この治療法を多くの歯科医が簡単に実践できるようにするためには、この治療法を開発した歯科医の手技を模倣するシステム開発が必要とされている。これを実現するための第一段階として、静および動的な力を患者に痛みを与えることな

く計測可能なセンサが必要となる。

そこで、著者らは、スカルケアに必要な力を計測するためのセンサの提案と試作を行い、その性能を実験的に検討した結果を報告した²⁾。スカルケアは、頭蓋骨を手の平で押す手技と左右の歯茎内側を同時に指で外側に押す手技に大別できる。そのため、センサは手の平用と指用の2種類を開発した。ここでは、これらのセンサの動特性を実験的に検討した結果を示す。

2. センサの構造と静特性

手の平用センサおよび指用センサの構造を Fig.1

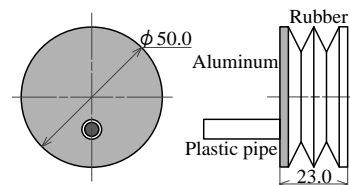


Fig.1 Structure of sensor for a palm

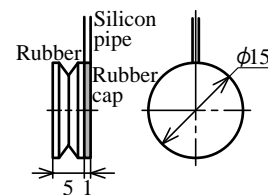


Fig.2 Structure of sensor for a finger

*(株)コガネイ

(〒184 - 8533 東京都小金井市緑町 3-11-28)

**足利工業大学工学部創生工学科

(〒326 - 0845 栃木県足利市大前町 268-1)

(E-mail:ysakurai@ashitech.ac.jp)

***顎関節研究所

(〒350 - 0209 埼玉県坂戸市大字塚越 1-4)

*Koganei Corporation

**Ashikaga Institute of Technology

***Research Institute of Temporomandibular Joint

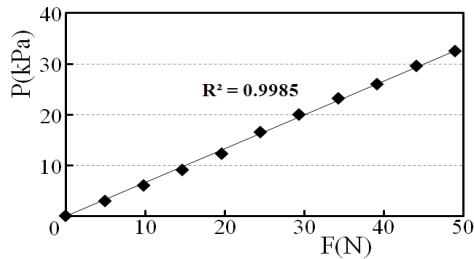


Fig.3 Static characteristics of sensor for a palm

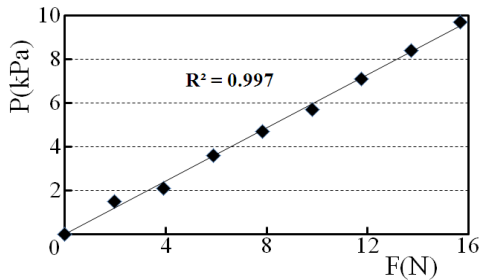


Fig.4 Static characteristics of sensor for a finger

および Fig.2 にそれぞれ示す。これらのセンサは手の平や指でセンサを押すことにより発生する空気圧を計測し、加えられた力を求める。

Fig.3 および Fig.4 にこれらのセンサの静特性の実験結果と近似線を示す。予備実験によりスカルケアで歯科医が頭部に加える力の最大値が約 49N、歯茎に加える力の最大値は約 14.7N であることが明らかとなっていたことから、これらのセンサで計測可能な力の最大値を決めた。これらの図より、手の平および指用センサは十分な精度で一次式により近似できることがわかる。

3. センサの動特性実験

Fig.5 に示す実験装置を製作し、手の平および指用センサの動特性実験を行った。センサでロードセルを周期的に押し、その時のロードセルにより計測された力 F_L とセンサ内の空気圧の時間的な変化をデータロガーにより計測した。なお、静特性実験時と動特性実験時では周囲の温度すなわち空気の温度が異なる。これらのセンサの特性は十分な線形性を有することが Fig.3 および Fig.4 より明らかとされている。よって、動特性実験に先立ち手の平用センサにおいては 20N の力を、指用センサにおいては 2.5N の力をそれぞれ加え、センサにより計測された圧力 P を力に変換する係数を補正するものとした。手の平用センサを用いて周期的な力を加えた際に計測した空気圧から求めた力 F_p およびロードセルにより計測した力 F_L と時間 t との関係を図.6 に示す。指用センサを用いて周期的な力を加えた際に計測した空気圧から求めた力 F_p およびロードセルにより計測した力 F_L と時間 t との関係を図.7 に示す。

これらの実験結果より、手の平用および指用セン

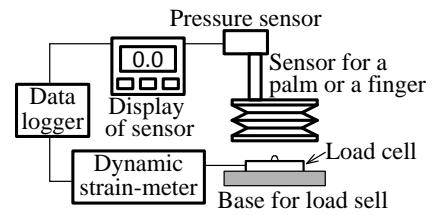


Fig.5 Experimental apparatus

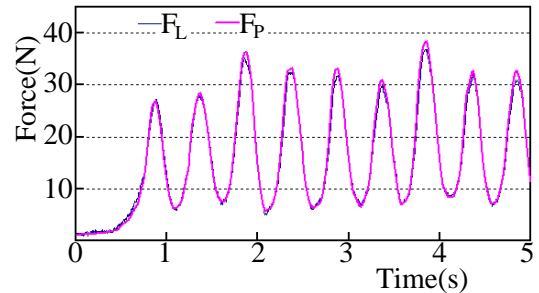


Fig.6 Dynamic characteristics of sensor for a palm

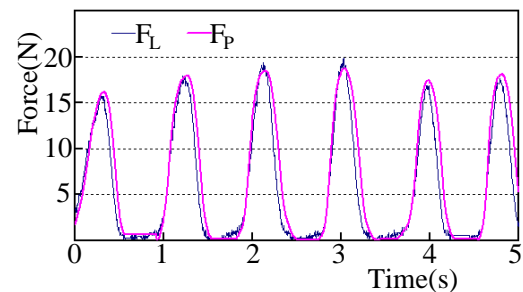


Fig.7 Dynamic characteristics of sensor for a finger

サは周期的な力の計測においても十分な精度を有していることがわかる。

4. 結言

ここでは患者に痛みを与えず歯科医の使い勝手の良い、スカルケアに必要な力を計測するセンサの動特性を実験的に明らかにした結果について述べた。その結果、手の平用および指用センサは周期的な力を十分な精度で計測できることが明らかとなった。今後の課題は、これらのセンサを歯科医に試験的に使用してもらい、どの程度の動特性が必要であるか明らかにすること、および、必要であればこの結果に基づきセンサの仕様を再検討することである。

参考文献

- 1) 本戸歳知：スカルケアによる顎関節症の治療，歯界展望 別冊，110-1，154/162(2007)
- 2) 長屋貴洋，桜井康雄，森下雄司，本戸歳知：顎関節症治療法スカルケア施術時の力計測センサの開発，平成 25 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集，16/18(2013)

漏れに起因する圧力低下抑制素子の提案

石川優*, 桜井康雄**, 兵藤訓一***, 饗庭健一****

Proposal of a Component Restricting Pressure Drop Based on Leakage

Yu ISHIKAWA*, Yasuo SAKURAI**, Norikazu HYODO***, Kenichi AIBA****

This article deals with a component to restrict pressure drop based on a leakage. One of the advantages of an oil-hydraulic system is to keep the value of oil pressure when pressurized oil is enclosed in a container. However, when the pressurized oil is enclosed in a head end or a rod end chamber of an actuator by a check valve or shut-off valve, the value of the oil pressure is decreased by the leakage from the check valve or the shut-off one. In order to prevent this, it is required to employ a non-leakage valve which is expensive, to use an accumulator or to control the pressure by using a valve or a pump control. From the view point of cost reducing or energy saving, it is necessary to prevent this pressure drop by using a simple mechanism. In this article, a component to prevent the pressure drop is proposed to realize this. The proposed component is composed of a metal container within an elastic element. The energy of oil is stored in the elastic element. When the pressure is decreased by the leakage from a valve, the energy in the elastic element is supplied to oil and the pressure drop is prevented. Thus, the structure of the proposed component and the mechanism to prevent the pressure drop are simple. The proposed component is fabricated and some experiments are carried out in order to confirm the validity of the mechanism to prevent the pressure drop and to make clear its basic characteristics. Consequently, it is shown that the mechanism of the proposed component is valid and the value of the enclosed pressure is kept at 86-93% of that of the enclosed initial pressure after one hour by using it.

Key Words : Oil-hydraulic component, Leakage, Pressure Drop, Energy-saving

1. 緒言

油圧システムの長所の一つは、密閉された空間に作動油を閉じ込めると、一定の圧力を発生し続けるという点である。この長所を利用すると、重力に逆らって負荷質量を保持する場合、外部からのエネルギー供給を必要としない。また、工作機械でワークを一旦保持してしまえば外部からエネルギーを加える必要がなくなる。しかしながら、パイロット操作チェック弁あるいはストップ弁により作動油を密閉された空間に封入した場合、この弁の漏れにより作動油の圧力が低下してしまう場合がある。この漏れによる圧力低下が問題となる場合、ノンリークタイプのチェック弁あるいはストップ弁、または、アキュムレータを用いる必要がある。

ここでは、チェック弁あるいはストップ弁からの漏れがあった場合においても封入された作動油の圧力をある一定時間同じ値に保つことが可能な油圧素

子（以後、圧力低下抑制素子）を提案し、その特性について実験的に明らかにした結果を示す。なお、ここで提案する油圧素子は、筆者らの一部が提案した油温上昇による密閉容器内の圧力上昇を防ぐ圧力変化抑制素子¹⁾を応用したものである。

2. 圧力低下抑制素子の概要

圧力低下抑制素子の構造を Fig.1 に示す。なお、この図は圧力低下抑制素子を実験用の圧力容器（耐圧 21MPa、容積 100cc）に取り付けた状態である。この図に示した通り、この圧力低下抑制素子はその特性が安定している温度が広範囲であり耐薬品性にも優れているシリコンゴムとそれを囲う容器により構成されている。

Fig.2 に圧力低下抑制素子を使った漏れに起因する圧力低下を抑制する原理を示す。Fig.2(a)に示すよ

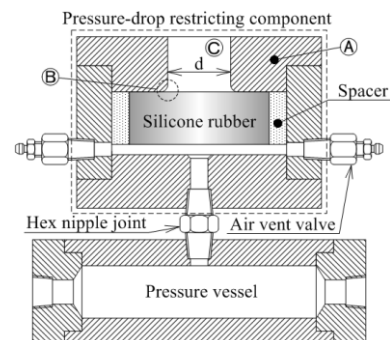


Fig.1 Structure of pressure-drop restricting component

*坂本工業(株)

(〒373 - 0041 群馬県太田市別所町 292)

**足利工業大学工学部創生工学科

(〒326 - 0845 栃木県足利市大前町 268-1)

(E-mail:ysakurai@ashitech.ac.jp)

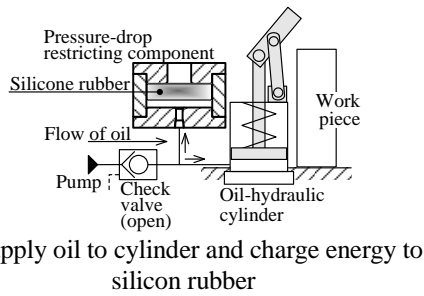
***東京計器(株)

(〒327 - 0816 栃木県佐野市栄町 1-1)

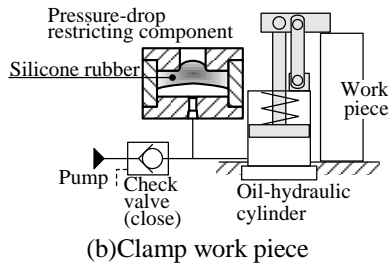
*Sakamoto Industry Co.,Ltd.

**Ashikaga Institute of Technology

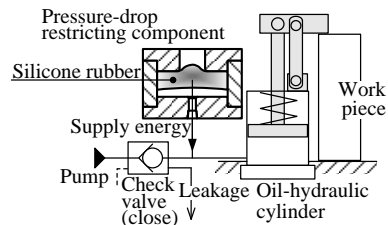
***Tokyo Keiki Corporation



(a)Supply oil to cylinder and charge energy to silicone rubber



(b)Clamp work piece



(c)Prevention of pressure drop based on leakage

Fig.2 Principle of restricting pressure drop based on leakage

うに、ポンプにより油圧シリンダに作動油を送る。ここで、作動油の一部のエネルギーがシリコンゴムに蓄積され Fig.2(b)の状態となる。Fig.2(b)ではポンプが停止しチェック弁が閉じ圧力低下抑制素子にエネルギーが蓄積された状態である。ここで、Fig.2(c)に示した通りチェック弁から作動油の漏れにより圧力低下が始まった場合、圧力低下抑制素子内のシリコンゴムに蓄えられたエネルギーが作動油に供給され、この圧力低下を抑制する。

3. 圧力低下抑制素子の特性実験

提案する圧力低下抑制素子の有効性および基本的な特性を検討するために製作した実験装置を Fig.3 に示す。気泡が実験におよぼす影響をできる限り減らすため気泡除去装置を取り付けた。

提案する素子の有効性を検討するために、圧力容器に作動油を 1.0MPa を目標として封入し、圧力低下抑制素子を取り付けた場合と取り付けない場合で実験を行った。実験結果を Fig.4 に示す。この図より、素子を取り付けない場合、弁からの漏れにより圧力容器内の圧力は約 30 分後には 0 になり、素子を取り付けた場合、容器内の圧力は若干下がるものの 1 時間経過後においても約 0.96MPa と封入圧力である 1.0MPa より約 4%低い値となることがわかる。よ

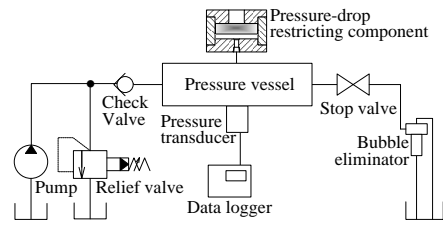


Fig.3 Experimental apparatus

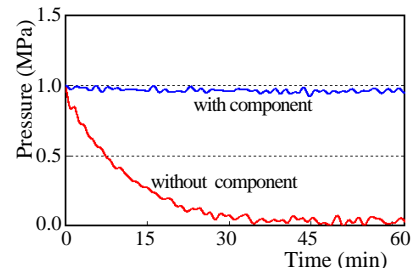


Fig.4 Validity of the proposed component

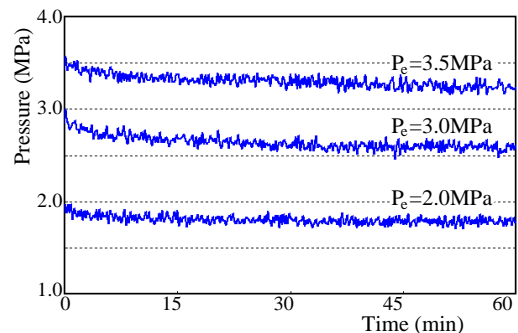


Fig.5 Experimental results varying enclosed pressure

って、提案する素子が作動油の漏れによる圧力低下の抑制に有効であることがわかる。

提案する圧力低下抑制素子の性能について検討するため、作動油の封入圧力 P_e を変化させて実験を行った。実験結果を Fig.5 に示す。これらの実験結果より、圧力容器内部の圧力は実験開始直後から低下し最終的に一定値に収束することがわかる。また、その値は圧力容器へ封入圧力 P_e の目標値の約 86%~93%となることが明らかとなった。

4. 結言

ここでは、弁からの漏れがあった場合においても封入された作動油の圧力がある一定時間同じ値に保つことが可能な圧力低下抑制素子を提案し、その有効性および性能について実験的に検討した。その結果、提案する素子を用いれば、容器内の圧力を実験開始から 1 時間経過後でも封入圧力の 86%~93%とできることが明らかとなった。今後の課題はこの圧力を封入圧から低下させないことである。

参考文献

- 1) 桜井, 鈴木, 饗庭, 吉成, 川島, 木原: 油圧作動油の温度上昇に起因する圧力変化抑制素子の提案, 日本機械学会論文集(C編), 78-788, 1163/1168(2012)

油圧回路設計・動特性解析用シミュレーションパッケージ OHC-Sim Ver.2.7 with User Customized Function

桜井康雄*, 田中和博**, 中田 毅***, 幸田武久****

Simulation Package OHC-Sim Ver.2.7 for Design of Oil Hydraulic Circuit and Analysis of its Dynamic Characteristics

Yasuo SAKURAI*, Kazuhiro TANAKA**, Takeshi NAKADA***, Takehisa KOHDA****

To make the design and the improvement processes of an oil-hydraulic circuit more effective and systematic, it is effective to predict the dynamic characteristics of the circuit beforehand by computer simulation. And then, it is necessary to derive the mathematical model for the circuit and to make the program for computer simulation. Therefore, some exclusive simulation packages had been developed, which provide the environment where an oil-hydraulic circuit can be designed and improved easily based on the simulated dynamic characteristics without deriving mathematical models and making simulation program. OHC-Sim is one of such exclusive simulation packages. It had been developed with the support of JFPS (the Japan Fluid Power System Society) and has been enhanced in the research committee of JFPS. OHC-Sim has a user-friendly graphical user interface in Windows® environment, and provides easy design and improvement of an oil-hydraulic circuit referring to the simulated results on personal computer. Furthermore, OHC-Sim has the user-customized function, which is based on bond-graph method. By using this function, users can register the mathematical models for their own new oil-hydraulic components to the database of OHC-Sim, and it becomes possible to carry out the simulation of the dynamic characteristics of a complicated oil-hydraulic circuit. In this article, outline of OHC-Sim Ver.2.7 is described.

Key Words : OHC-Sim, Oil-hydraulic circuit, Dynamic characteristics, Simulation

1. 緒言

OHC-Sim (Oil-Hydraulic Circuit Simulation)は油圧回路設計を能率的、系統的に進めるため開発された油圧回路設計・動特性解析用シミュレーションパッケージである。初期開発は(一社)日本フルードパワーシステム学会の支援により行われ、実用化に向けての開発は、初期開発終了後本学会に設置されたOHC-Sim 特別研究委員会において行われた。

ここでは、OHC-Sim Ver.2.7の概要および特徴について述べる。

2. OHC-Sim Ver. 2.7 の概要

OHC-SimはWindows®上で動作するシミュレーションパッケージである。OHC-Simでは、Fig.1に示すように、油圧記号に基づいたアイコンを用いて、コンピュータのディスプレイ上に、油圧回路を編集

する。OHC-Sim Ver.2.7においては、画面上で編集された油圧回路を見やすくするために、Fig.2に示すように、油圧要素アイコンを回転できるように改良した。また、Fig.3に示すように、油圧要素アイコン間を接続する線を中心で直角に折れ曲がるように改良した。各油圧要素のパラメータは各要素に対応するパラメータ設定画面でSIあるいは工学単位で入力することができる。データベースには、油圧要素機器の数学モデルが、ボンドグラフ法¹⁾により記述・登録さ

* 足利工業大学工学部創生工学科
(〒326 - 8558 栃木県足利市大前町 268-1)
(E-mail:ysakurai@ashitech.ac.jp)
** 九州工業大学情報工学部機械情報工学科
(所在地 〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4)
*** 東京電機大学情報環境学部情報環境学科
(所在地 〒270-1382 千葉県印西市武西学園台 2-1200)
**** 京都大学大学院工学研究科
(所在地 〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
* Ashikaga Institute of Technology
** Kyushu Institute of Technology
*** Tokyo Denki University
**** Kyoto University

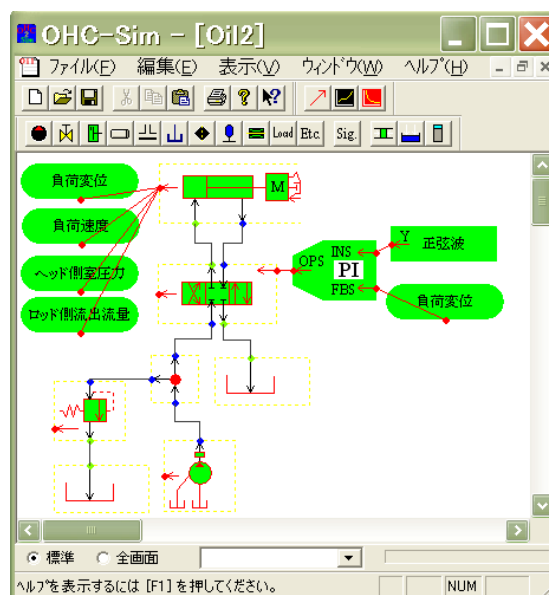


Fig.1 Edit of oil-hydraulic circuit on OHC-Sim

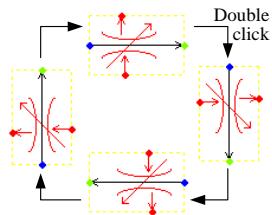


Fig.2 Rotation of oil-hydraulic component icon

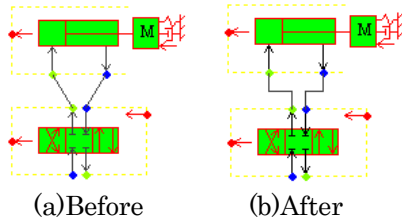


Fig.3 Improvement of connection of oil-hydraulic component icons

れている。このデータベースに登録されている油圧要素機器の数学モデルを結合することにより、自動的に回路全体の数学モデルが導出され、BGSP for OHC-Simによりシミュレーションが実行される。その結果は Fig.4 に示すように画面上で簡単に確認できる。また、OHC-Sim Ver.2.7 から、Fig.5 に示す通り、物理量どうしの関係を描くことも可能となった。

OHC-Sim Ver.2.7 では、計算実行時のタイムアウトの時間をシミュレーション実行前にユーザー側で設定可能となっている。タイムアウトで計算が終了した場合においても、途中までの計算結果のグラフを描くことが可能となっている。これらの機能により、計算エラーが出ていること、不自然な計算結果であることを早い段階でユーザーは知ることができる。

ユーザーカスタマイズ機能により、ユーザー独自の油圧要素の数学モデルを OHC-Sim に追加・登録することができ、既存の素子と組み合わせた広範な油圧回路の動特性のシミュレーションが可能となっている。なお、この機能を用いて OHC-Sim に油圧要素の数学モデルを取り込む際、ボンドグラフ法によるモデル化が必要となる。この機能による素子の登録例を Fig.6 に示す。

3. 結言

ここでは OHC-Sim Ver.2.7 の概要を示した。システムの動特性のシミュレーションに興味をお持ちの方は、本学会創立 40 周年記念事業の一環として、2011 年 5 月末より本学会のホームページから無償でダウンロードできるようになった OHC-Sim 公開版 (OHC-Sim Ver.2.7 のダウングレード版) を是非一度お使いいただき、OHC-Sim の使い方をマスターしつつ、油圧回路のコンピュータシミュレーションの有用性を体験して欲しい。さらに、OHC-Sim

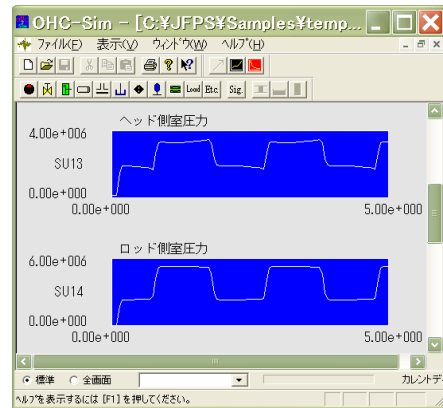


Fig.4 Display of simulated results-1

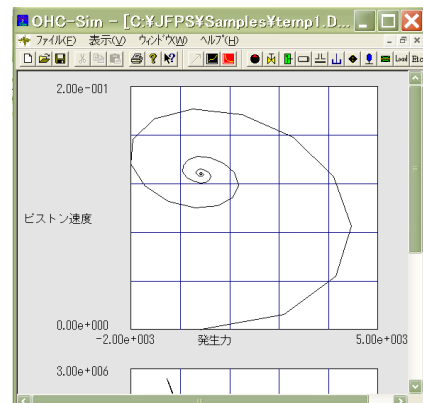


Fig.5 Display of simulated results-2

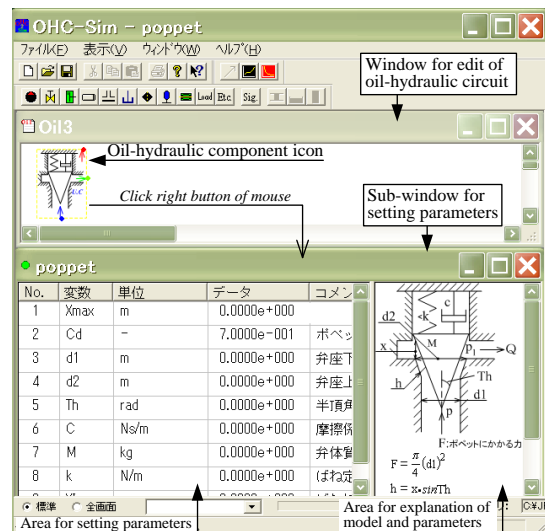


Fig.6 Poppet valve registered by user customized function

に興味を持たれた方は、価格が低く設定されている OHC-Sim Ver.2.7 を是非一度お使いいただき、さらには、第 17 期となった OHC-Sim 特別研究委員会に参加していただくことを期待している。

参考文献

- 1) e.g. Thoma, J.U. : Simulation by Bondgraphs, 1990, Springer-Verlag

水道水駆動マッキベン型人工筋のモデル化および変位制御

小林亘*, 伊藤和寿**, 山本紳一郎***

Modeling and Displacement Control of Water Hydraulic McKibben Muscles

Wataru KOBAYASHI*, Kazuhisa ITO**, Shin-ichiro YAMAMOTO***

This paper concerns with displacement control and online parameter estimation of water hydraulic McKibben muscles. The purpose is to compensate the effect of loads connected with the muscles because loads strongly affect the control performance. In this paper, model predictive control is applied and a nominal model is obtained by linear system identification. Then recursive least square algorithm is combined with the proposed control to identify muscle parameters in real-time. Compared with a conventional control, this method can compensate the harmful effect of loads.

Key Words: Water hydraulics, McKibben muscles, Recursive least squares, Model predictive control

1. はじめに

マッキベン型人工筋は、柔軟・軽量・高出力密度という特長を有するアクチュエータとして知られており、医療福祉分野を中心に広く用いられている。取り扱いの容易さや回路内の流体が漏れた際の影響を考慮して、駆動源には空気圧を用いることが多い¹⁾。本研究では、1) 水中での使用に最適、2) 水道水を作動流体として使用でき駆動源のポンプが不要、といった点から水圧駆動マッキベン型人工筋の適用を提案しており、具体的にはリハビリテーション装置への適用を想定している²⁾。

水道水駆動マッキベン型人工筋は、使用圧力範囲が近い従来の空気圧駆動型と同等の圧力-筋変位特性を有しており、同様の用途で使用することができる。一方、制御性能がそれほど高くないという問題点も空気圧駆動型と同様に有している。特に、負荷の大きさにより人工筋の収縮特性が大幅に変化してしまうため、負荷変動を考慮した制御系設計が求められている。

本論文では、モデルベース制御を適用し、負荷変動を人工筋モデルのパラメータ変動として捉え、時々刻々パラメータを推定する逐次最小二乗法³⁾ (RLS) を適用した制御手法を提案する。制御側にはモデル予測制御⁴⁾を適用し、これにRLSアルゴリズムを用いたパラメータ推定器を組み合わせることで公称モデルの同定誤差を低減し、負荷の変動が制御性能に与える影響を補償する。

2. 人工筋モデル

本研究では、システム同定理論を用いて、以下に示す数学モデルを実験により導出した。このとき、Fig. 1 に示す実験装置により、システム同定に必要な入出力データを計測した。

$$\begin{aligned} l(k) &= 1.065l(k-1) - 0.189l(k-2) \\ &\quad + 0.2272u(k-1) + 0.2270u(k-2) \\ &= \theta^T \varphi(k) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \theta &= [1.065 \quad -0.189 \quad 0.2272 \quad 0.2270]^T \\ \varphi(k) &= [l(k-1) \quad l(k-2) \quad u(k-1) \quad u(k-2)]^T \end{aligned}$$

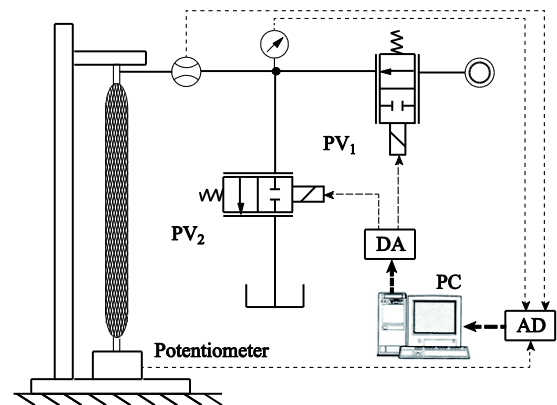


Fig. 1 Experimental setup

式(1)で与えられる人工筋モデルは、入出力データをまとめたリグレッサベクトル $\varphi(k)$ および人工筋パラメータベクトル θ から構成されている。このとき、負荷の有無により変動する人工筋パラメータ θ を適応的に推定する。逐次最小二乗法を用いた人工筋のパラメータベクトルの更新則を以下に示す⁴⁾。

* 芝浦工業大学大学院理工学研究科
(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)
(E-mail: nb12102@shibaura-it.ac.jp)
** 芝浦工業大学システム理工学部機械制御システム学科
(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)
*** 芝浦工業大学システム理工学部生命科学科
(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)
*,**,*** Shibaura Institute of Technology

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \varepsilon(k) \quad (2)$$

$$\varepsilon(k) = l(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (3)$$

ただし,

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (4)$$

このとき、式(3)の $\varepsilon(k)$ は実測値と人工筋モデルの出力の差をあらわす同定誤差であり、式(2)の $P(k)$ は更新ゲインと呼ばれる。

3. モデル予測制御

本研究では、人工筋変位制御に用いるコントローラにモデル予測制御を適用する。本研究で用いるモデル予測制御は、Fig. 2 に示すように、予測区間 H_p ステップ後に予測出力が目標軌道と一致するように入力を生成する比較的簡単なケースである。

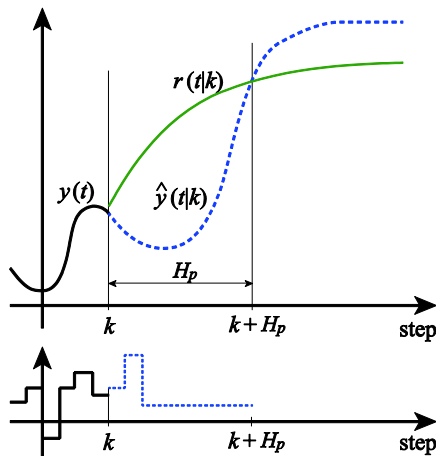


Fig. 2 Model predictive control

4. 人工筋変位制御計測実験

従来のモデル予測制御と RLS を用いた提案手法の有負荷時における制御性能を比較するため、人工筋変位制御実験を行った。なお、負荷として 3.5kg の円盤状のおもりを人工筋下端部に接続した。Fig. 3 に実験結果を示す。

人工筋の収縮特性より、有負荷時において収縮率が小さくなることから、人工筋モデルのパラメータも同様に小さくなることが予想される。しかし、従来の手法では負荷によるこの影響を考慮することができず、式(1)で与えられたモデルのみで計算を行うことから、予測出力が実測値より大きく見積もられ、結果として全体的に収縮量が低下している。一方、RLS アルゴリズムを用いてオンラインで推定可能な提案手法ではオフセットすることなく目標軌道に追

従できている。

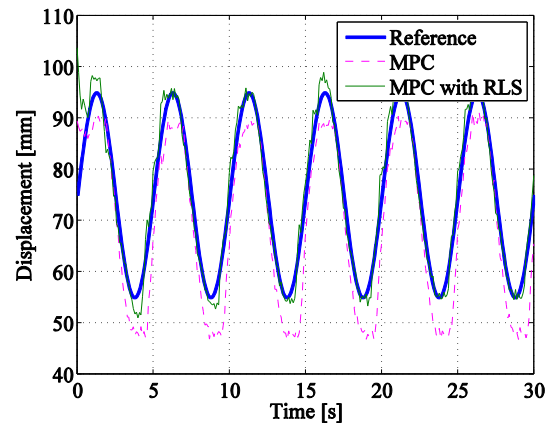


Fig. 3 Experiment of displacement control with load: 3.5 kg (comparison of MPC with RLS and MPC)

5. おわりに

マッキベン型人工筋は、負荷の影響により収縮特性が大きく変化するアクチュエータである。そのため、負荷変動を考慮した制御系設計が求められる。本研究では、モデル予測制御を人工筋へ適用し、モデルベースでの制御系設計を提案した。具体的には、負荷変動による制御性能の劣化を補償するため、人工筋モデルの各パラメータをオンラインで推定する手法として、RLS アルゴリズムを用いた逐次最小二乗法の適用について検討した。また、オンライン推定法の有効性について、実験で従来手法と比較することにより検証した。その結果、負荷を接続した際に予測出力が大きく見積もられ収縮量が低下してしまう従来手法における問題点が解決され、無負荷時とほぼ同等な制御性能を得られることが示された。

参考文献

- 1) 山本, 三好: 空気圧アクチュエータを用いた水中歩行補助装具の開発, 油空圧技術, Vol. 46, 64/68(2007)
- 2) W. Kobayashi, K. Ito: Development of Gait-training Orthosis with Water Hydraulic McKibben Muscle, The 12th International symposium on Fluid Control, measurement and Visualization, 64/66(2013)
- 3) 足立: システム同定の基礎, 東京電機大学出版局, 170/174(2009)
- 4) J. M. Maciejowski, 足立・菅野訳: モデル予測制御 制約のもとでの最適制御, 東京電機大学出版局(2005)

長管路を有する水圧システムにおけるシリンダのセンサレス速度制御

○岡本 高*, 伊藤 和寿**

Sensorless Cylinder Velocity Control of Water Hydraulic System with Long Pipelines

Takashi OKAMOTO*, Kazuhisa ITO**

This paper presents a method for velocity estimation for water hydraulic control system with long pipelines. Pipeline dynamics should be considered in water hydraulic systems because the resonance of pressure in the pipeline is occurred due to lower viscosity of a pressure medium. A simple approximated four-pole model is introduced to estimate the system dynamics based on pressure and flow rate. Using this model, the cylinder velocity is first estimated, and then it is applied to feedback control. The experimental results show that velocity control is realized with estimated velocity.

Key Words : Water Hydraulics, Sensorless, Long-Pipeline, Four-pole model, Transfer matrix

1. はじめに

フィードバック制御や負荷推定を行う際には通常、対象となるシステムの出力信号が必要となる。しかし、装置の使用環境や構成などの制約によって、出力信号のセンサによる直接的な計測ができない場合がある。これに対し、本研究では解析対象を水圧シリンダシステムに限定し、回路内の二点の圧力情報のみに着目することで速度センサに代わる出力信号の推定を行う。ここで、作動流体の違いによる管路の圧力伝達特性の違いとして、水と油の比較を Fig.1 に示す。

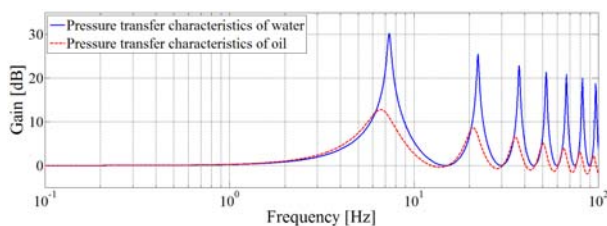


Fig.1 Comparison of transfer characteristics

作動流体に水を使用する水圧駆動では、その粘性の低さに起因して管路の動特性が顕著に現れることが知られている。したがって、水圧システムにおいて圧力情報に着目した推定手法を適用するためには、管路の動特性を考慮する必要がある。今回は管路の

特性に着目する目的で、片側 46m の鋼管（以下、長管路）を含めたシステムを対象とした。

2. 対象システム

水圧システムの構成を Fig.2 に示す。ポンプ等を含む供給源から先は、サーボ弁、両ロードシリンダ、およびそれらを接続する長管路で構成される。また、長管路のサーボ弁側には片側のみニードル弁による絞りを設けた。この絞りはサーボ弁側の流量を推定するために用いる。

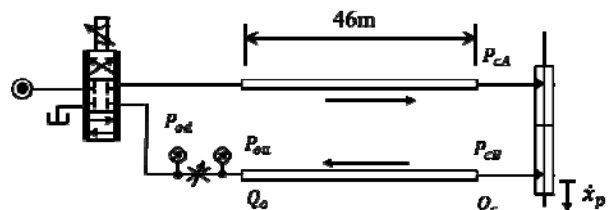


Fig.2 Construction of the system

3. シリンダ速度の推定方法

本研究では、絞り弁前後の圧力情報のみに基づいた速度推定を行うが、シリンダ摺動部での漏れ流量が存在しないことを仮定すると次式が成り立つ。

$$\dot{x}_p = \frac{1}{A_p} Q_c \quad (1)$$

つまり、シリンダ速度の推定は、シリンダ側で発生する流量の推定に置き換えることができる。以降ではこの流量を推定することを目的とする。

管路内流れの解析には伝達マトリックス法が広く

* 芝浦工業大学大学院理工学研究科機械工学専攻

(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)

** 芝浦工業大学システム理工学部機械制御システム学科

(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)

(E-mail:kazu-ito@shibaura-it.ac.jp)

*,** Shibaura institute of technology

用いられるが、作動流体の粘性による圧力損失をどの程度厳密に考慮するかにより、取り扱いの複雑さが異なる。しかし、水の粘性の低さから、管路内の流体の運動を考えた場合の粘性による圧力損失の影響は小さいと考えられる。以上の理由から、本研究では取り扱いの容易さに重みを置いたモデル⁽¹⁾を用いる。4端子モデルを次式に示す。

$$\begin{bmatrix} P_{cb}(s) \\ Q_c(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\rho L^2 s(s+R)}{2K} & \frac{\rho L(s+R)}{\pi a^2} \\ \frac{\pi a^2 L s}{K} & 1 + \frac{\rho L^2 s(s+R)}{2K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ou}(s) \\ Q_o(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 a ：配管半径、 ρ ：密度、 K ：等価体積弾性係数、 R ：ポアズイユ抵抗、 L ：管路長、である。式(2)の第二式によって、絞り弁における圧力・流量に基づいたシリンダ速度の推定を行う。

4. 流量係数の推定

上述の通り、速度の推定には絞り弁における流量の計測が必要となる。しかし、非定常流量が計測可能な流量計は一般に高価であるため、過渡的な応答が比較的容易に計測可能な圧力センサを用いて、絞り弁前後の圧力差から流量の推定を行う。予備実験により得た絞り弁の流量特性を Fig.3 に示す。

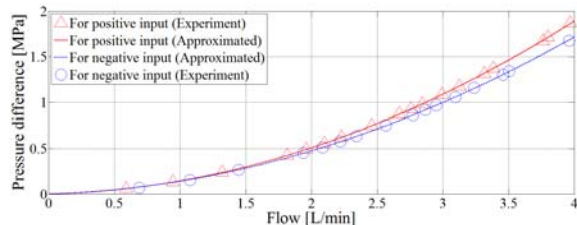


Fig.3 Pressure-flow characteristics of needle valve

上図より、絞り弁の流量特性は流れの方向によって異なることがわかる。この絞り前後の圧力差と流量の関係を二次関数として直接近似することで得た式に基づいて、圧力差を流量に変換する。

5. 速度推定実験

シリンダを正弦波状に運動させた場合における速度推定実験を行った。供給圧力が 4MPa の時の推定結果を Fig.4 に示す。ここでは計測値に対して、絞り弁での流量をピストンの受圧面積で除すことで得た値、4端子モデルに基づいて推定した値の二つを表している。

一つ目の推定値では管路の振動モードを再現する事が出来ていないが、管路の動特性を考慮したモデルでは一次の振動モードが再現されている。しかし、この推定値には振幅の減少や位相の遅れが確認される。これは、式(2)に含まれる微分演算処理および計

測した圧力信号のノイズに対して、ローパスフィルタを適用したためと考えられるが、近似4端子モデルの適用によって過渡応答が推定可能であることが確認された。

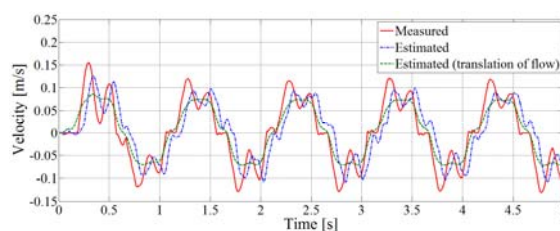


Fig.4 Estimation result of cylinder velocity

6. フィードバック制御実験

第5章で示した推定値のフィードバックによるシリンダ速度制御結果を Fig.5 に示す。制御則には一般的な積分制御を用い、目標値は 0.1m/s のステップ信号として与えた。

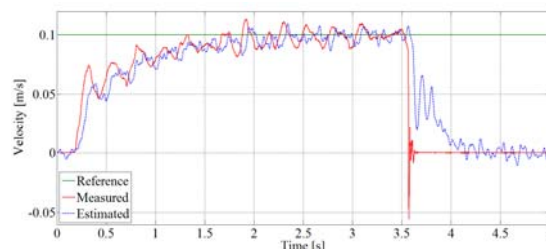


Fig.5 Result of velocity control

上図より、推定値による目標値への追従が可能であることが確認された。しかし、目標値に到達するまでの振動が確認されることから、今後ゲインや制御則の選定が必要である。また、推定値の定常値は式(3)よりわかるように絞りで推定した流量と一致する。このため、本研究で行った手法では絞りの流量特性の推定精度が重要となる。

7. おわりに

絞りの流量特性が正確に既知、かつシリンダ摺動部での漏れ流量がないことを条件に、配管部の二点の圧力差のみに基づいてシリンダ速度を推定する手法を提案し、その妥当性を評価した。また、一定速度を目標値とした速度制御実験では、46m の配管を経たアクチュエータをサーボ弁側のみのセンサに基づいた推定値により制御可能であることを示した。

参考文献

- (1) 竹中 利夫, 浦田 暎三: 油圧制御, 丸善株式会社, pp.126-129 (1986)

マイクロ液圧と機能性流体 ECF を用いたマイクロ液圧源

東京工業大学 精密工学研究所 横田 眞一, 金 俊完

Abstract: The paper proposes “Micro hydraulics” using integrated ECF jet generators in series and parallel and describes the fabricating process of the ECF micropump as a power source of micro hydraulics using MEMS technology. ECF is a kind of functional and dielectric fluid. A strong and active jet flow of ECF is generated between electrodes surrounded by ECF when high DC voltage is applied to the electrodes. This phenomenon called as ECF effect is a promising candidate for micro actuation, thanks to the advantages of miniaturization and high output power density. The micropump using ECF jet is a key to realize a micro hydraulics, so its realization results in the micro powerful actuation. To combine easy fabrication and high performance, we propose a novel ECF micropump that consists of triangular prism electrode and a slit electrode pairs (TPSE). MEMS-based ECF micro-pumps with TPSE pairs are successfully fabricated. Its maximum output pressure and flow rate are 60 kPa (no flow) and 310 mm³/s (no load), respectively at 3 kV of the applied voltage. As a method to obtain higher output power, this research also make an attempt to fabricate higher aspect ratio of TPSE pairs by forming them in the multilayer, called as the 3D integration of TPSE pairs. We successfully realized the 3D integration of TPSE pairs by using the combination of micro mechanical fabrication technique and thick photoresist lithography. The height enlarges by 1.7 times, while the flow rate increases by 2.1 times. The experiment results prove the feasibility of the ECF micropumps by using higher aspect ratio electrodes fabricated by the multi-layer process.

Key Words: Microhydraulics, Functional fluid, Electro-conjugate fluid, ECF-jet generator, Micropump, MEMS

1. はじめに

本研究室では、マイクロ液圧の可能性を探っている。その手段としては、不均一な電界を印加すると著しいジェット流（ECF ジェット）を生じる ECF（Electro-Conjugate Fluid, 電界共役流体）などのように、外部刺激により特有の機能性を発現する機能性流体による圧力を利用している。このような機能性流体を応用することで、電磁形などの従来のアクチュエータでは実現が困難であった、液圧源のマイクロ化、高機能なマイクロアクチュエータおよびマイクロセンサの開発を行うとともに、それらの応用を図っている。

2. MEMS 技術による ECF マイクロポンプ^{2-3,5-6)}

不均一な電界を ECF に印加し、ECF ジェットを発生させる電極対を用いて、小形化により出力パワー密度の向上が期待できる ECF マイクロポンプユニットを提案、開発している。このマイクロユニットを管路に沿って複数配置する（管路形マイ

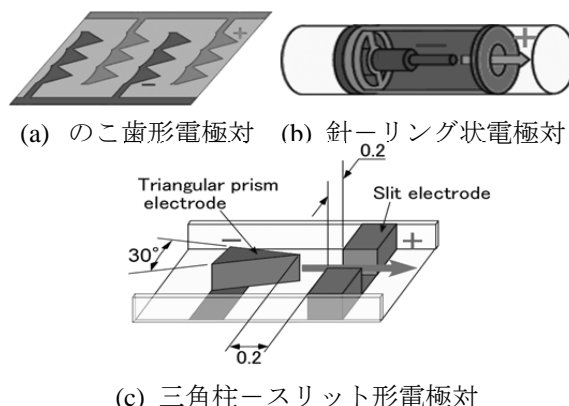


図 1 ECF ジェット発生器の電極対

クロポンプ²⁾), あるいは集積化することにより、平面構造、立方体構造も可能である³⁾。その高出力化および大量生産対応のためには、電極対を高精度に製作し、高密度に配置できることが必要であり、マイクロサイズでの電極の製作と位置合わせが容易な MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いることが望ましい。

この ECF マイクロポンプの特性は、電極対の形状により大きく異なる。のこ歯形電極対 (図 1(a)) は、MEMS 加工が容易な平面構造であるが、吐出

圧力は低い。一方、針ーリング状電極対 (図 1(b)) は、吐出圧力は高いが、MEMS 加工が難しい 3 次元構造である。そこで、MEMS 加工と高吐出圧力を両立するため、針ーリング状電極対に近い形状で、高アスペクト比をもつ三角柱ースリット形電極対 (図 1(c)) を提案している。目標寸法は、スリット電極のスリット幅 0.2 mm, 三角柱電極の先端角度 60°, 電極間隔 0.2 mm, 電極高さ 0.5 mm であり、厚膜レジストによる鋳型製作と電解メッキ技術による電鍍を融合させた MEMS プロセスにより三角柱ースリット形電極対を 5 対並列、10 対直列に配置した平面形 ECF マイクロポンプを試作した³⁾。ECF として FF-101 を用い特性実験を行った結果、印加電圧 4 kV のとき、最大吐出圧力 78 kPa (1 対あたり 7.8 kPa) を実現している³⁾。同じ条件下での針ーリング状電極 1 対あたりの吐出圧力 (25 kPa)⁴⁾には及ばないが、本電極対は高密度な直列・並列化が可能であるため、パワー密度の点で高出力化が期待できる⁵⁾。

また、さらなる高出力パワー密度のマイクロ液圧源を実現するために、TPSE を三次元的に集積した (図 2) 高アスペクトの ECF マイクロポンプ (3D-EMP)を開発している。3D-EMP は、スリット幅 200 μm , 電極間隔 200 μm , 三角柱の先端角度 60°, 電極柱の高さ 880 μm であり (図 3, 4), 平面集積 ECF マイクロポンプと比べて、高さ比は 1.7 倍であったものの、吐出流量は 2.1 倍を得ている⁶⁾。上記の実験結果から、電極対を平面・三次元集積化することで、ECF マイクロポンプの出力パワー密度が向上できることが明確になっている。

3. おわりに

本稿では、MEMS を用いた ECF マイクロポンプについて簡単に紹介した。機能性流体 ECF を用いることにより、従来技術では困難であったマイクロ液圧システム、マイクロアクチュエータおよびマイクロセンサを実現できる可能性を有しており、ひとつの応用としてマイクロ液圧サーボが考えら

れ、その実現を目下目指している。

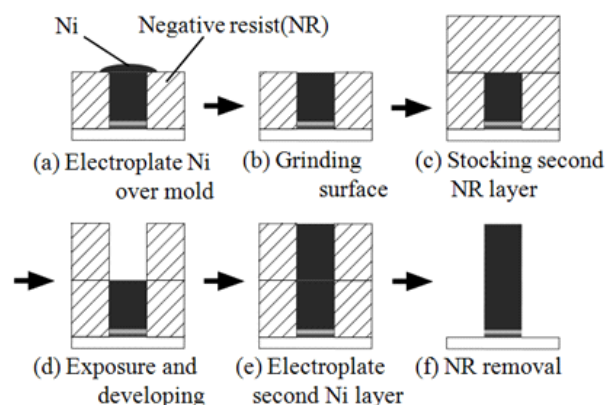


図 2 多層化による高アスペクト比の具現

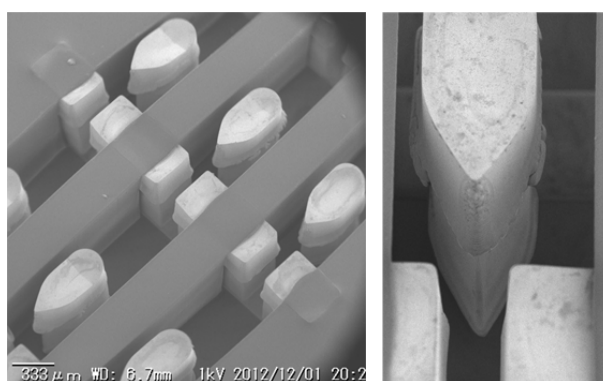


図 3 MEMS 技術により製作された電極対 (TPSE)

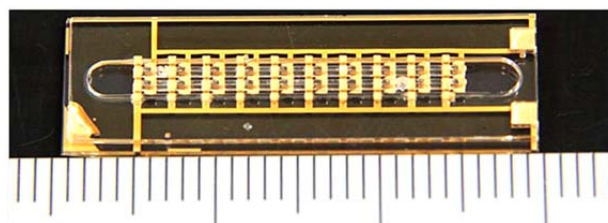


図 4 ECF マイクロポンプ

参考文献

- 1) S. Yokota, K. Edamura: Proc. IMechE, Part I: J. of Systems and Control Engineering, **220-4** (2006), pp.251-256.
- 2) グエンヴィンソントン, 金, 横田, 枝村:機学 ROBOMECH 講論集, (2010), CD-ROM, 1P1-B05.
- 3) J.-W. Kim, T.V.X. Nguyen, S. Yokota, K. Edamura, Proceedings of ICMT (2011), pp.546-551.
- 4) S. Yokota, F. Yajima, K. Takemura, K. Edamura: Advanced Robotics, **24-14** (2010), pp. 1929-1934.
- 5) 横田眞一:基調講演-マイクロ液圧, 秋季フルードパワーシステム講論集, (2010), pp.1-4.
- 6) 金, 山田, 横田, 枝村, 春季フルードパワーシステム講論集, (2013), pp.109-111.

機能性流体 ERF を用いたマイクロアクチュエータシステム

吉田和弘*, 巖祥仁*, 金俊完*, 横田眞一*

Microactuator Systems Using Electro-Rheological Fluid

Kazuhiro YOSHIDA*, Snag In EOM*, Jonn-wan KIM*, Shinichi YOKOTA*

This paper presents microactuator systems using electro-rheological fluid (ERF). The ERF changes its apparent viscosity due to electric field, and its flow can be controlled with a simple ER microvalve. In this paper, as research topics, an ER microfingert system using an alternating-pressure source and a divided electrode type flexible ER valve (DE-FERV) are introduced.

Key Words : ERF (electro-rheological fluid), Microactuator, Alternating pressure, Soft actuator, MEMS

1. まえがき

ERF (Electro-Rheological Fluid: ER 流体, 電気粘性流体) を 2 枚の平板電極間に満たし電極に電圧を印加すると, 電界により粘度が可逆的に変化する (ER 効果). ER 効果を用いると, 固定電極から成る制御弁 (ER バルブ) で液圧アクチュエータの圧力を制御する, マイクロ化に適したシンプルな構造の ER マイクロアクチュエータを実現することができる. 本研究室では, ERF のような機能性流体を応用した高機能なマイクロアクチュエータシステムの開発を行っている. 本稿では, ERF を用いたマイクロアクチュエータシステムの代表的な研究事例を紹介する.

2. ERF

ERF は, 誘電体微粒子を誘電液体中に安定に分散させた粒子分散系と, ネマティック液晶に代表される均一系に大別される. ネマティック液晶は, Fig. 1 に示すように棒状分子から成り, 印加電界により電極上の分子の配向が変化し, ER 効果を生じる¹⁾. 本

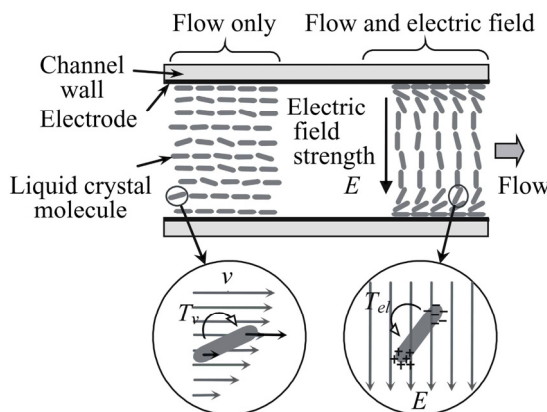
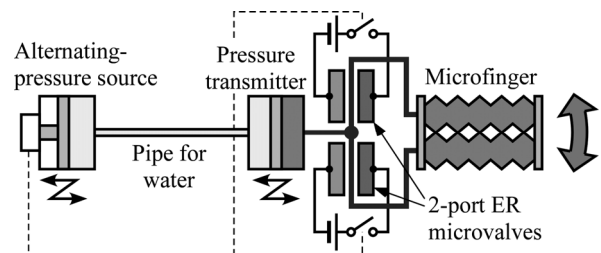


Fig. 1 ER effect of nematic liquid crystal

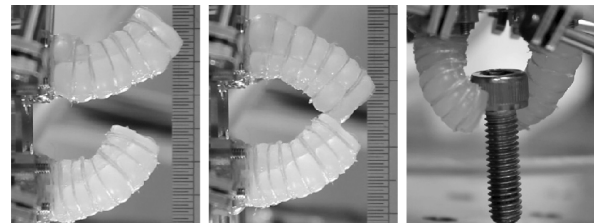
研究室では, 分散粒子の沈降, 磨耗の問題がなく, 狭い流路でも流れが安定しており, マイクロシステムに適しているネマティック液晶を ERF として用いている.

3. 交流圧力源を用いた ER マイクロフィンガシステム

交流圧力源を用いた ER マイクロフィンガシステム²⁾の概要を Fig. 2(a)に示す. 本システムは, 交流圧力に同期して ER マイクロバルブを開閉させマイクロフィンガの屈曲を得るアクチュエータシステムで, 1 本の配管で作動流体の供給および戻りを行うことができる. また圧力伝達部を介して低粘度の流体で交流圧力を伝達すれば, 配管を細くすることができる. したがって, フィンガ数が増しても配管の問題は小さく, 複雑な動作を行うマイクロロボットなどに応用することができる. Fig. 2(b)に示すように長さ 16 mm のアーム 2 本から成るグリッパを試作し, 各フィンガの独立動作および把持動作を確認した. 現



(a) Basic structure



(b) Motion of gripper

Fig. 2 ER microfingert system using alternating-pressure source

* 東京工業大学 精密工学研究所
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-R2-42)
(E-mail: yoshida@pi.titech.ac.jp)
* Tokyo Institute of Technology

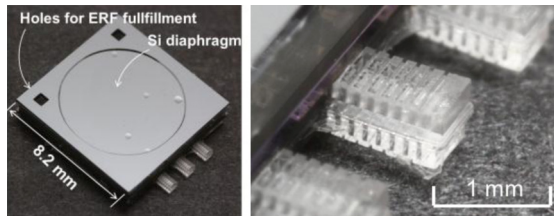


Fig. 3 ER microfingers fabricated by MEMS process

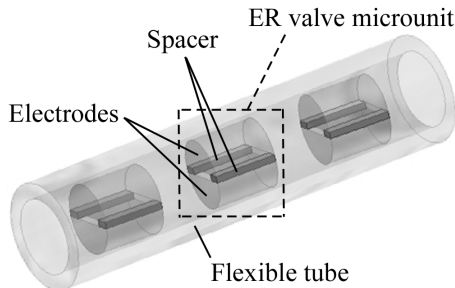


Fig. 4 Divided Electrode type flexible ER valve (DE-FERV)

在, MEMS プロセスによるマイクロ化を検討している (Fig. 3 参照)³⁾.

4. 電極分割形フレキシブル ER バルブ (DE-FERV) とその応用

Fig. 4 のように, ER バルブの電極を軸方向に分割し柔軟なゴムチューブで接続した構造で, ソフトアクチュエータに応用することができる電極分割形フレキシブル ER バルブ (Divided Electrode type Flexible ER valve: DE-FERV) を提案, 開発している⁴⁾. Fig.5(a)は, 加圧時に強化壁により径方向の膨張を抑え軸方向に伸長するゴム製チャンバと DE-FERV を貼り合わせ屈曲を行うマイクログリッパのフィンガである⁵⁾. 長さ 10 mm で, 流路の電極部は合計長さ 5.0 mm, 幅 1.0 mm, 間隔 0.10 mm のフィンガ 2 本から成るグリッパを試作し, Fig. 5(b)のように物体の把持動作を実現した. 現在, MEMS プロセスによりさらなるマイクロ化を検討している (Fig.6 参照)⁶⁾.

5. あとがき

本稿では, 本研究室における ERF を用いたマイクロアクチュエータシステムの研究事例について簡単に紹介した. 詳細は, ホームページ <http://yokota-www.pi.titech.ac.jp> をご参照いただきたい.

参考文献

1) De Volder, M., Yoshida, K., Yokota, S. and Reynaerts, D.: The use of liquid crystals as electrorheological fluids in microsystems: model and measurements, J. of Micromechanics and Microengineering, **16**-3, 612/619 (2006)

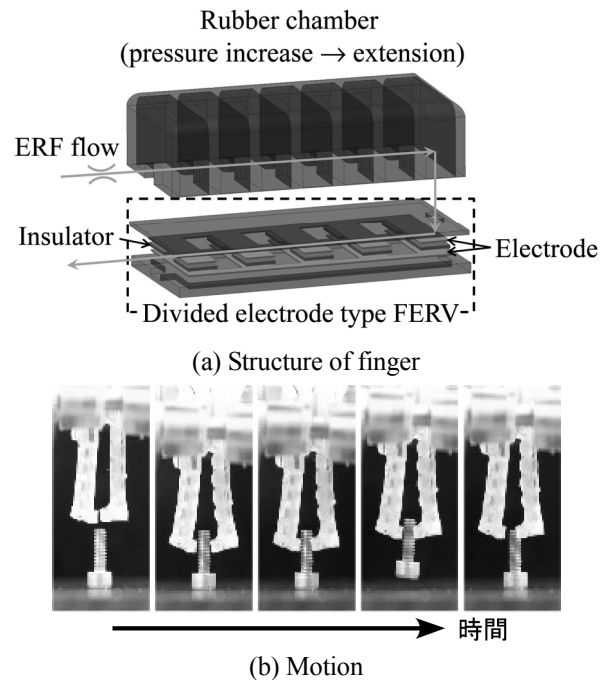


Fig. 5 Microgripper using DE-FERVs

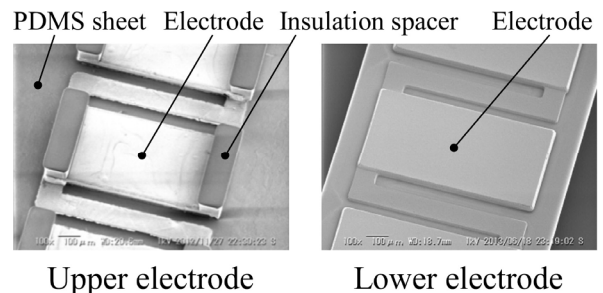


Fig. 6 Electrodes fabricated by MEMS process for DE-FERV

- 2) Yoshida, K., Miyoshi, T., Eom, S.I. and Yokota, S.: A Multi-DOF ER Microactuator System Using Alternating-Pressure Source, Proc. of ICMT2012 (CD-ROM), 1/5 (2012)
- 3) Miyoshi, T., Yoshida, K., Kim, J.-W., Eom, S.I. and Yokota, S.: Development of a MEMS-Based ER Microgripper Using Alternating-Pressure Source, Proc. of ACTUATOR14 (CD-ROM), 394/397 (2014)
- 4) Yoshida, K., Hakoda, S., Eom, S.I. and Yokota, S.: An ER Microvalve Having Two-DOF Flexibility, Proc. of ICMT 2011 (CD-ROM), 46/49 (2011)
- 5) Yoshida, K., Hara, S., Eom, S.I. and Yokota, S.: A Novel Microgripper Using Flexible Electro-Rheological Valves, Proc. of Mechatronics 2012, **3**, 834/839, (2012)
- 6) Yoshida, K., Tsukamoto, N., Kim, J.-W. and Yokota, S.: A Divided Electrode Type Flexible Electro-Rheological Valve Fabricated by MEMS Technologies, Proc. of FLUCOME2013 (USB), OS5-01-1 (2013)

Twin-tube 式配管探査ロボット

穂坂 憲一, 劉 海博, 楯 貴志, 塚越 秀行 (東工大)

Abstract: In this study, a new method to advance and to carry wired sensors like a camera inside narrow and curving pipelines is proposed, which is aimed at watching the condition inside the pipelines. In order to increase the advancing distance and to carry a wired camera, the alternately-actuated drawing out type drive is proposed. In this method, since the tube is alternately pressurized, the area of the tube which passes in Λ -drive can be confined. As a result, the robot has many features with the superiority of the drawing-out type drive actuator. Finally, it is experimentally verified through experiments that this robot is able to go through some narrow and curving pipelines.

Key words: Mobile mechanism, Pneumatic, Pipe inspection robot

1. はじめに

長年地中に埋設されていたガス管は、腐食などにより破断や亀裂の恐れがある。このため、定期的に配管内の検査を行う必要があるが、コストなどの観点から、配管を掘り起こさずに内部の映像を取得する方法が求められている[1,2]。小口径配管内の検査方法として、カメラなどの探査機を押し込む方式が用いられてきた。しかし、このような方式では、直線状の経路に対しては有効であるもの、複雑に湾曲した管内深奥部に挿入することは困難であった。

この課題解決のため、筆者らは Twin 構造チューブによる狭隘地形内の移動探査ロボットを開発しその有効性を確認してきた(図1)[4]。

本稿では、長距離推進を実現する三つの方策を新たに紹介する。すなわち、1)鉛直配管内でも大きい支持力を発生しやすい能動蛇行機構,2)ラダー構造による推力の増加,3)分岐管において推進方向を選択する操舵機構、などである。

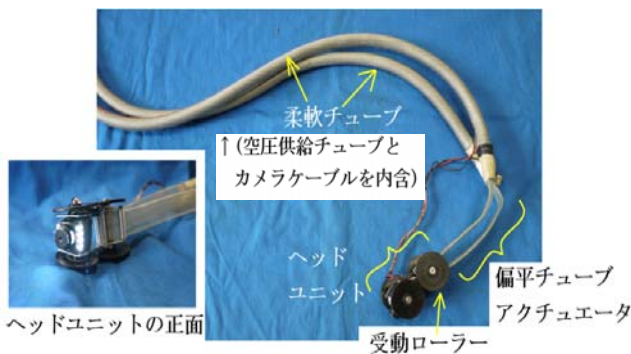


図1 試作した Twin-snake-I の外観

2. 基本構成と推進原理

Twin 構造チューブは、図2に示すように2本の柔軟チューブ・それらを連結する偏平チューブ・ヘッドユニットなどから構成されている。推力は、 Λ -drive(ラムダドライブ)[3]と名付けた駆動原理によりヘッドユニットで生成される。すなわち、偏平チューブの内部を一方から流体圧で加圧すると座屈が生じ、この座屈点が流路を遮断しつつ下流側にスライドするという原理である。従って、加圧側チューブを環境に固定すると、無加圧側チューブが前方に繰り出される。また、加圧側チューブを切替えることにより、交互に前進することが可能となる。さらに、

無加圧側チューブを固定して加圧すると、加圧側チューブが後退する動作も生じる。以上の前進・後退方法により、鉛直の配管内でも体幹を支えながら推進することが可能となる(図3,4)。

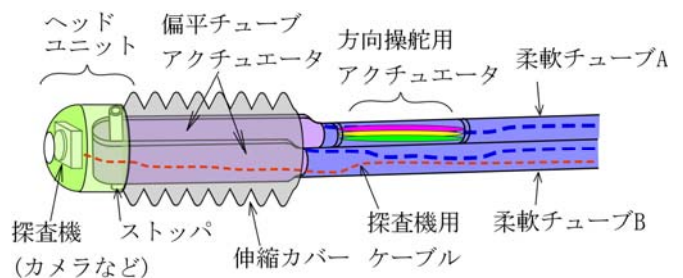


図2 基本構成

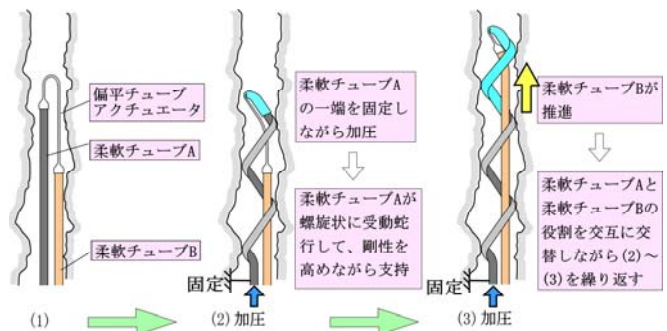


図3 受動蛇行による鉛直方向への推進原理

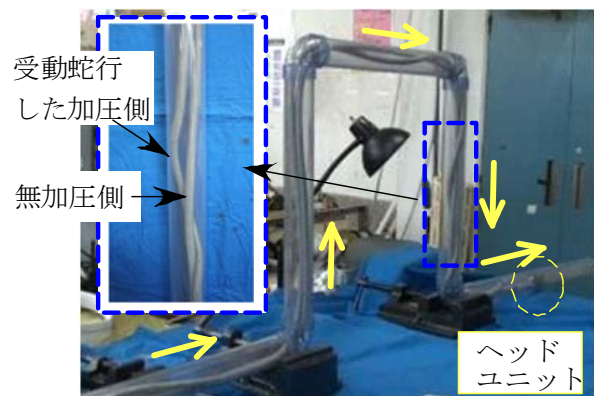


図4 鉛直管を含む内径 50mm の4曲がりの屈曲管内の移動

3. 能動蛇行による支持力の向上

鉛直配管内の推進距離を長くするには、剛性増加だけに頼らず、一定間隔毎にチューブを配管内に支持固定しながら推進する機能が求められる。

そこで、受動的支持の限界(図5)を克服し、能動的に力を生成して蛇行する構造を導入する。図6に示す能動蛇行機構は、扁平チューブとマッキベン人工筋肉との並列構造を柔軟チューブの途中に設けたものである。柔軟チューブの一方を加圧すると、扁平チューブとマッキベン人工筋の双方も加圧される。このとき、マッキベン人工筋が収縮する効果により、扁平チューブは螺旋状に変形しながら剛性を増すため、配管内壁を押し付けながら加圧側チューブを配管内に固定できる。

上記能動蛇行機構として、外径7mm 全長300mmのマッキベン人工筋肉、および外径8mm 全長300mmの扁平チューブを使用した。内径50mmの塩ビ管内において、チューブ内の圧力と発生した支持力とを測定結果から、内径50mmの配管内で0.4MPaに加圧された能動蛇行機構は約17Nの支持力を発生でき、約20mのチューブを鉛直方向に支えられるものと見積もれた。

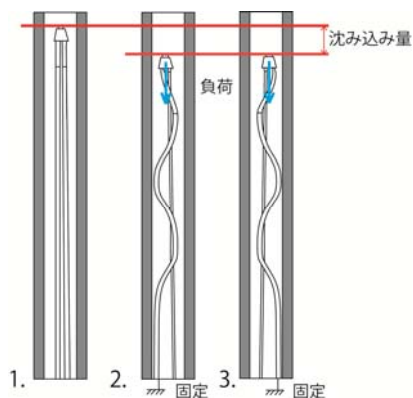


図5 受動蛇行の限界

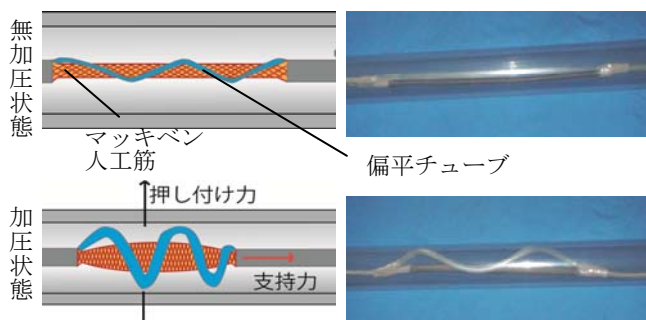


図6 能動蛇行による支持力の生成原理

4. 実験

試作した探査機のTwin-snake-IIの外観を図7に示す。探査機の推力と湾曲方向を操作するために、双方を同時に操作できるコントロールボックスも開発した。

まず、先行研究において推進困難な内径50mmの分岐管における方向操舵実験を行った。コントロールパネルにあるジョイスティックを用いて、短時間でスムーズな方向操舵を行えることを確認した(図15)。さらに、試作1号機であるTwin-snake-Iでは推進不可能だった内径50mm、高さ4mの鉛直管内の推進実験を行った。能動蛇行機構により、高さ4m程度の配管に対して、1分間程度で上れることを確認した。また、内径50mm、全長14m、6つの曲り部がある長距離配管における推進実験も行い、14mの距離を約5分間(推進速度50mm/s)で踏破できることが確認した(図7)。

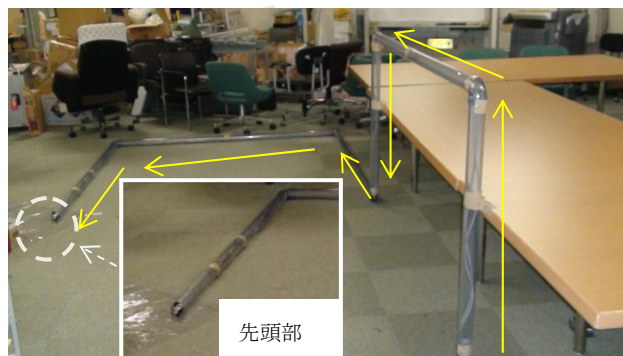


図7 全長14mの配管の推進実験

5. 結論

柔軟なTwin構造チューブによる配管内移動距離を拡張するために、能動蛇行機構とラダー状推進ユニットを導入し、これらの有効性を実験により確認した。また、探査機の前頭ユニットに柔軟構造の方向操舵ユニットを装備することにより、曲がり部の適応性を損なうことなく、分岐管で推進方向を選択可能となることも確認できた。

今後は、配管内に存在する障害物の踏破性能や操作性の向上策を検討していく予定である。

謝辞：本研究は科研費基盤B(課題番号：25289057)および油空圧機器技術振興財団のご支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] "平成22年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「次世代保安向上技術調査」(保安技術調査)(総合調査)調査報告書", 社団法人日本ガス協会, 2013
- [2] "繰り出し式アクチュエータを利用したカメラのガスパ管内相通性評価試験について", 東京ガス(株)パイプライン技術センター, 2011
- [3] 森 庸太郎, 塚越 秀行, 北川 能, 鎌倉 圭: "リア流体アクチュエータ: Δ (ラムダ) ドライブの提案", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1A1-B24(2008)
- [4] 穂坂 憲一, 塚越 秀行, "繰り出し式柔軟流体アクチュエータによる狭隘地形内の移動探査ロボット—第2報: 方向操舵手法, ロボティクス・メカトロニクス講演2012

スライド式柔軟流体アクチュエータ: Λ -drive

東京工業大学 森 庸太朗 塚越 秀行

Abstract: This paper discusses a new type of fluid powered actuator sliding along a flexible tube. The actuator named Λ -drive is composed of a flat tube and a slider. In the slider, the tube is bent and then the buckling point occurs, which helps to cut off the fluid passage and to seal in order to provide the driving force to the slider without generating large friction. In this paper, after the conventional sliding actuators are compared, the design method of the proposed actuator for making stable drive possible, the classification of the driving mode, and the analysis of the output force are discussed. Finally, as one of the applications of the actuator, the active drive of the zipper is proposed and its feasibility is shown.

Key words: Soft actuator, Pneumatics, Water hydraulics, Search & rescue, medical robot

1 はじめに

流体アクチュエータの駆動方式の1つとして、チャンバー内の流路の一部をなんらかの方法で遮断し、加圧しながらその遮断部を上流から下流にスライドさせる方式が存在する。「遮断部スライド駆動」とも呼べるこの方式は、チャンバーとして長い柔軟チューブを用いたときにその有用性が高く、1) 装備したチューブの自然長とほぼ同等のストローク長を得られ、2) 湾曲経路に沿った運動も生成でき、3) 遮断部およびチューブのどちらでも出力ポートとして使用できる、など特異な性質を備えている。そのため、これまでも複数の構成例が模索されてきたものの、摩擦の低減とシール機能の向上を同時に望める遮断方法が課題となっていた。

本稿では、上記課題解決を図る遮断方法として、チューブの座屈現象に着目する。そして、「 Λ -drive(ラムダドライブ)」[1]と名付けた遮断部スライド駆動を紹介し、遮断部の特性や安定な駆動力を生成するための設計方法を検討する。そして、これらの適用例も紹介する。

2 Λ -drive の動作原理とチューブの製作

チューブを押しつけることなく流路を遮断する方策として、筆者はチューブの座屈に着目した。Fig.1に示すように、無加圧状態で断面の潰れた扁平チューブを曲げてリング状のスライダに通し、その一方から内部を流体圧で加圧すると、スライダは下流側に搬送される。曲げ部中央のチューブが屈服座屈に達し、流路を遮断したまま座屈点が下流側に移動するからである。曲げ部の形状とギリシャ文字 Λ との類似性から、この構成を Λ -driveと名付けた(Fig.2)。なお、扁平チューブの代わりにパイプ状チューブの使用は適さない。なぜなら、流路は遮断できるもの

の、座屈点を境に下流側のパイプ状チューブを押し潰す力が抵抗となり、座屈点がスムーズに移動しにくいからである。よって、本稿で以降述べるチューブは、すべて扁平チューブを示すものとする。

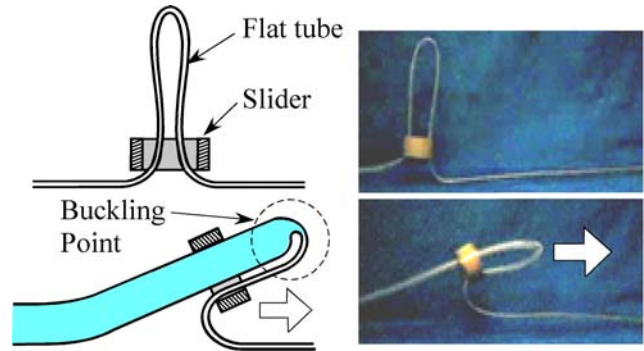
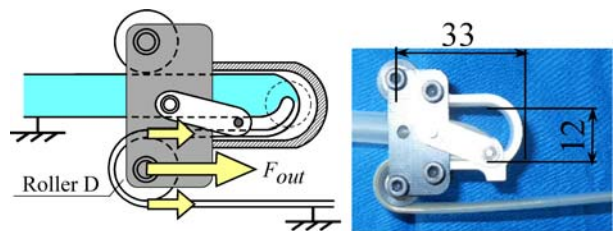
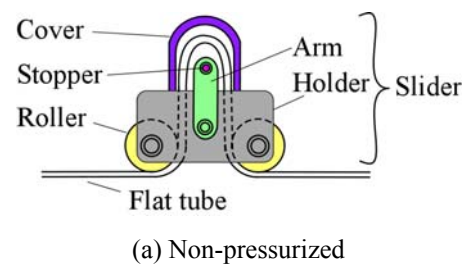


Fig.1 Basic principle of Λ -drive



(b) Pressurized
Fig.2 Slider Structure of Λ -drive

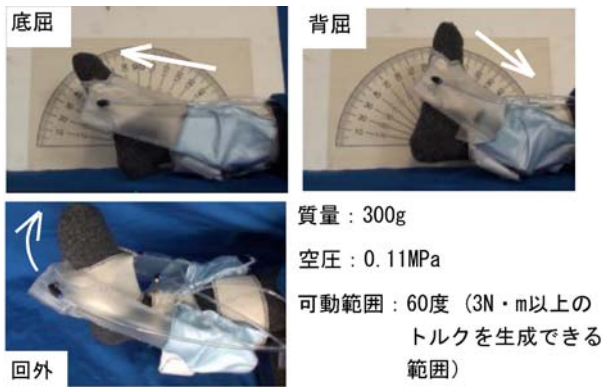


Fig.3 Application to Motion Socks to prevent from blood clot

チューブまたはスライダのいずれかを固定したとき、その他方が本アクチュエータの出力として取り出される。チューブを円筒に巻き付けた状態でチューブの一端を空気圧で加圧したとき、スライダは螺旋運動を生成し、スライダを人体の脛部に固定したとき、チューブが足関節の屈伸運動 (Fig.3) を生成することが確認されている。

3 海洋探査用流体ロープウェイへの適用

災害によりがれきが流出した港湾施設内、岩場の散在する浅瀬、磯波帯、などにおいては荒波や障害物の影響を受けるため、ダイバーによる捜索作業や自立式潜水ロボットによる情報収集作業は困難である。このような状況でも目標軌道に沿って海中を安定に移動する方策の1つとして、流体ロープウェイ (Fluid Powered Ropeway)[1]の適用を試みることにした。すなわち、海洋内に簡易的に設置したホースに沿って、ゴンドラ探査機を移動させるという方法である (Fig.4)。ホースの設置方法として、ヘリからの空中落下、ボートで迂回しながらの搬送、または近距離の場合には投擲なども挙げられる。

ここで、ホースとして扁平チューブと同様に無加圧状態で扁平形状を有する消防ホースを用いることとした。消防ホースは摺動に対して耐摩耗性が高く、そのうえ耐圧1.2MPa程度まで有するため、 Λ -driveの高出力化を図るうえでも有望である。

試作したゴンドラ探査機は Fig.5 および Table1 に示すような構成となった。ホースの一端を岸辺に固定し、アンカーを用いて他端を海底に固定したうえで (Fig.5)、水道水圧により消防ホース内を加圧したとき、約 300mm/s の速度で海上に露出した岩場を乗り越えながらゴンドラ探査機が移動できることを確認した (Fig.6)。さらに、浮力調整用容器内の水量調整により、ゴンドラは海中を安定に移動できることも確認された。

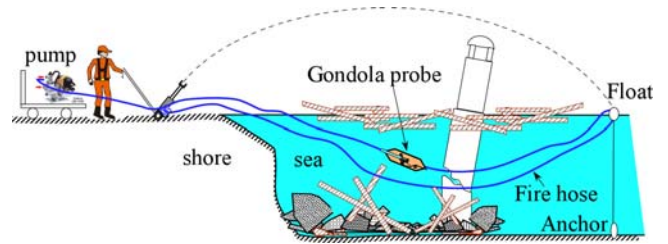


Fig.4 Marine inspection by Fluid Powered Ropeway

Table 1 Specification of the developed gondola

Length	920mm
Height	282mm
Width	250mm
Weight	21kg
Applied water pressure	0.4MPa
Speed	300mm/s
Output power	180W
Payload	60kgf



Fig.5 Gondola traversing over the rocks in the sea



Fig.6 Gondola sliding along the fire hose inside the sea

4 結言

本稿では、装備したチューブの自然長と同等のストローク長を得られる遮断部スライド駆動に着目し、 Λ -driveと称する新たな駆動方式を紹介した。また、それらの妥当性を検証するために、海洋探査機への適用例も示し、その有効性を確認した。

[1] Yotaro Mori, Hideyuki Tsukagoshi, Ato Kitagawa, "Fluid Powered Ropeway: Self-propelled Probe Sliding Along Flexible Tube", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.2, 215-224 (2011)

飛行マニピュレータ —ドア開け動作を目指して—

Aerial work robot with manipulation function
-Aiming for door opening operation-

浜田 貴弘, 飯塚 隆真, 渡辺 将広, ダメートリ アシュリ, 塚越 秀行 (東工大)

Takahiro HAMADA, Tokyo Institute of Technology
Ryuma IIZUKA, Tokyo Institute of Technology
Masahiro WATANABE, Tokyo Institute of Technology
Dameitry Ashlih, Tokyo Institute of Technology
Hideyuki TUKAGOSHI, Tokyo Institute of Technology

This paper describes on the development of an aerial work robot with the manipulation function. Until now, a moving means of the search robot for a dangerous building has been developed by the crawler. However, the crawler is difficult to correspond to the place uneven terrain and the elevation of the ladder. In order to solve the problem, it is suggested the flying robot with a manipulation function approach to make its own access road. This time, we propose a method for implementation of door opening. And, through experimentation, we have verified the effectiveness of this approach to the problem.

Key Words: Rescue robot, Aerial manipulator, Pneumatic actuator

1. 緒言

火災や放射能汚染事故などの災害の対応策として、作業者の安全性を確保しつつ遠隔操作により危険建物内の情報を収集できるロボットが求められている。このようなロボットの移動方法に着目してみると、先般の福島第一原発事故において、原子炉建屋内に投入されたロボットはいずれもクローラ型であった。操作が比較的簡便な割に高い対地適応性が得られ、そのうえ高いペイロードも維持しやすいため、現状では実用性の高い移動方式の1つと思われる。

しかし、災害現場では、障害物の散乱した凹凸の激しい地面や梯子の昇降による垂直移動を要する場所など、クローラでは対応しづらい環境が少なからず存在する。このような状況にも対応する一策として、3次元空間を自在に浮遊できる飛行ロボットの活用が有効である。そのうえ、仮に進入経路が閉ざされた場合でも、飛行ロボット自体が経路を切り開く機能を有していれば、建物内を広域に探査することも可能となる。

そこで本研究では、「飛行マニピュレータ」と名付けた力作業も行える飛行ロボットの新たな概念を導入し、その一例として、4枚の回転翼を搭載したヘリコプター(クワッドローター)によるドア開け作業の実現方法を検討している。第一報では、クワッドローターをドア面に吸着固定する方法を提案し、回転翼の揚力によりドアの押し開け動作が可能となることを示した[1]。第二報では、飛行マニピュレータの概念と構成を整理し直したうえで、ドアノブを回す動作を軽量・高出力な構成により生成するための「アクセス動作分離駆動式アーム(ADD-Arm)」を提案した[2]。

本報では、ドア開け動作手順と機能を検討し、実現に要したマニピュレータについて詳細に報告する。

2. ドア開け動作手順

2.1 飛行マニピュレータの構成

本研究で目指す「飛行マニピュレータ」とは、張り付き動作を行うための姿勢変換機能、作業時の反動を支えるための固定支持機能、そして、ペイロードの小さな飛行体に搭載可

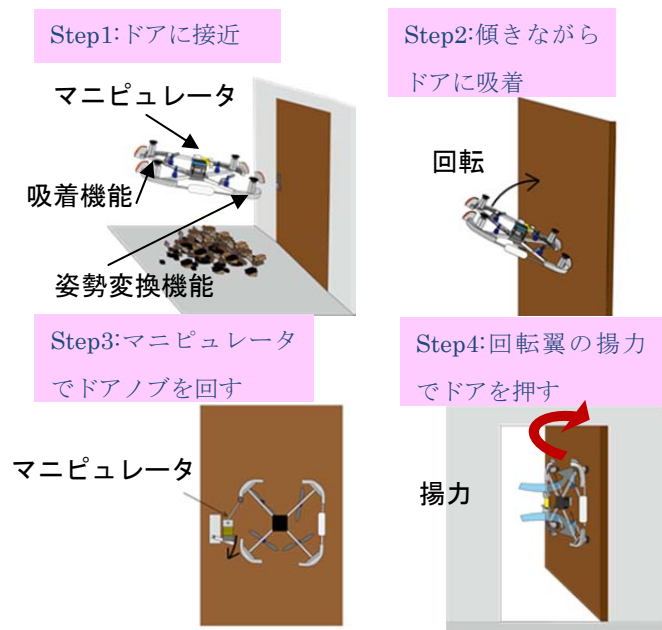


Fig.1 Process of door opening by Aerial Manipulator

能な軽量高出力のマニピュレーション機能を融合した新しい飛行作業ロボットである。浮遊しながら軽量物体を掴む飛行ロボットはすでに報告されているが[5]、本研究で目指す飛行マニピュレータはこれとは異なり、飛行体を環境に固定支持したうえで、人間の行う日常作業の一部を代行できる程度の力の生成を目指したものである。

筆者らはこのような飛行マニピュレータの一例として、クワッドローターによるドア開け動作の実現を目指している。そのプロセスは、Fig. 1 に示すように、1)前傾姿勢のままドアに接地し、2)後方回転翼の揚力を高めて本体平面がドア面と平行になるまで前転させてドア面に固定し、3)マニピュレータでドアノブを回した後、4)回転翼の揚力によりドア開け動作を実現するというものである。この実現のための機能について述べる。

2.2 姿勢変換機能

クワッドローターは、前方二つの揚力に対し、後方2つの揚力が大きくと前進を行う。その特性を生かし、前方を固定しながら前進すると、自然とピッチ軸周りの回転が起こる。その実現のために、ヒンジと吸盤を用いた機構を導入した。すなわち、前進時にドアに衝突することで吸着し、ピッチ軸周りに回転して、後方の吸盤を張り付けるという手法である。これにより、前傾姿勢のままドアに接地し、本体平面をドア面と平行になるまで前転させることが可能になった。

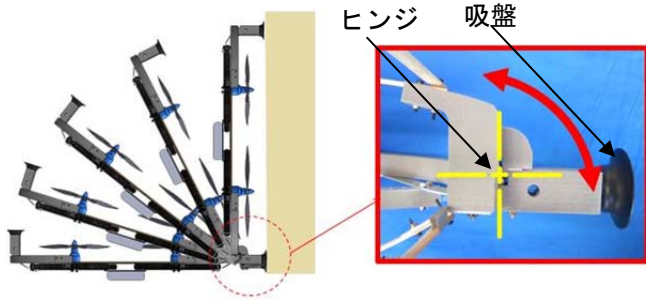


Fig.2 Rotation mechanism

3. ADD-Arm ソフトバッグ主体式

可変拘束機構の全体像は Fig.3 のように、拘束ワイヤと復元力を発生する引きバネで構成されており、SMA アクチュエータの ON・OFF 動作で拘束状態を切り替える。初期状態では縮んでおり、SMA アクチュエータを OFF にし、ロック状態で加圧すると、拘束を施していない箇所から膨らみ、大きな湾曲角を生成する。SMA アクチュエータを ON にし、ロック状態を解除すると、ワイヤが送り出され、まっすぐの状態になる。減圧すると、引きバネの復元力で初期状態に戻る。

動作の様子を Fig.5 に示す。可変拘束機構を二つ設け、左右の湾曲動作ができるものをドアノブ回しへ応用すると、湾曲しながらドアノブ上面へアプローチしていることがわかる。そして、拘束状態を解除し、ドアノブ回しを行う。これにより、ドアノブを回せる範囲は拘束無しに比べ、拘束を施し湾曲動作を実現することで、約3倍に拡張される。

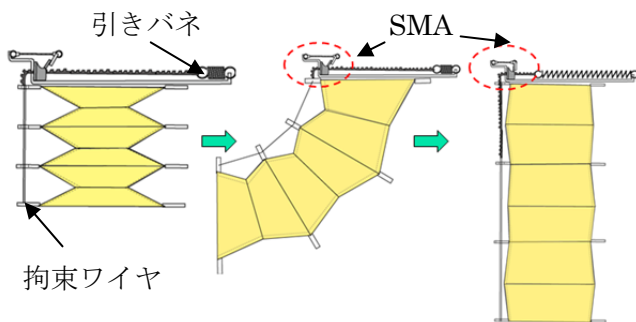


Fig.3 variable restriction mechanism

4. ドア開け動作の実現

4.1 全体構成

Fig.4 に飛行マニピュレータを示す。総重量 1700g になり、ADD-Arm は側面に搭載し、カウンタウェイトに吸着用とアーム用のマイクロポンプ(電装産業：型番 DSA-1-12)を2個搭載することにより重心バランスをとる。コントローラとして Ardupilot2.6 を用いており、飛行と吸着機能、アームの操作を行っている。飛行時間は5分間で、通信距離は最大で 100m である。

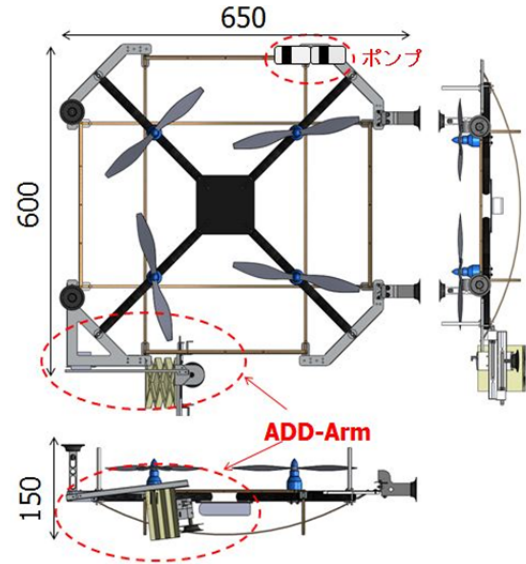


Fig.4 Over view of the aerial manipulator

4.2 動作実験

Fig.5 にドア開け動作実験の様子を示す。①ドアに接近し、目標位置にアプローチしている。②後方回転翼の揚力を高めて本体平面がドア面と平行になるまで前転させてドア面に固定している。③ADD-Arm ソフトバッグ主体式を用いて、手先の吸盤を吸着させ、約2分間の時間でドアノブを回すことができています。④回転翼の揚力を用いて、ドアを押しあけています。このように、ドア開け動作の一連の流れを可能だと示すことができた。

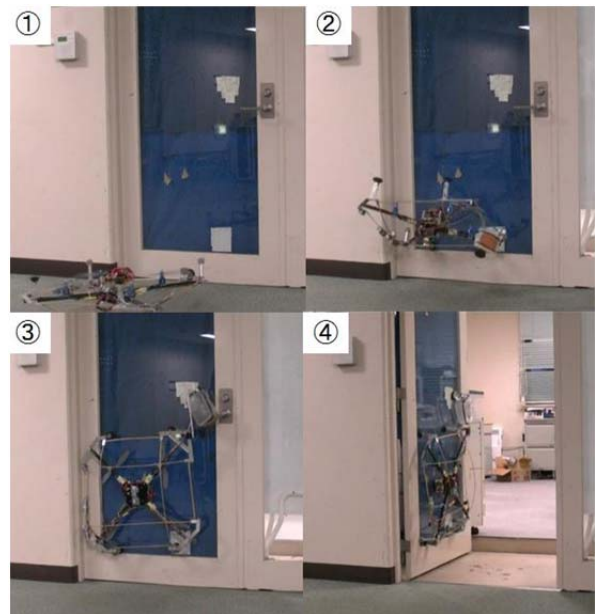


Fig.5 Implementation of door opening

参考文献

- [1] 碓, 浜田, Dameitry, 塚越, 北川: マニピュレーション機能を有する飛行作業ロボット ー第1報: 吸着固定方法の提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2013), 1P1-P06(2013)
- [2] 浜田, 飯塚, Dameitry, 塚越: マニピュレーション機能を有する飛行作業ロボット ー第2報: 軽量高出力マニピュレータの提案, 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 論文集, 1C1-1(2013)

磁気粘性流体制御のための界磁機構の研究

(横浜国立大学大学院 佐藤研究室におけるフルードパワー関連研究 (機能流体分野))

佐藤恭一*

Power-Saving Magnetization Device for Magnetorheological Fluid Control

(Research and Development on Functional Fluid in SATO Laboratory, Yokohama National University)

Yasukazu SATO

Sato Lab. in YNU proposes two mechanisms for controlling the viscosity of a magnetorheological fluid (MRF) to save a significant amount of electric power consumed during the magnetization process. The mechanisms take advantage of the magnetization / demagnetization property of permanent magnet materials and the permanent magnet nature. Those consume no electric power while maintaining the applied external magnetic field to the MRF. The devices can also continuously control the intensity of the magnetic field using very little electric power. The magnetizing devices are very effective in maintaining the magnetic field to the MRF, while saving a significant amount of electric power. The devices are especially useful in applications where long duration magnetization necessary.

Key Words : Magnetorheological fluid, Power-saving, Electromagnetic system, Viscosity

1. はじめに

横浜国立大学佐藤研究室では、動力の伝達、変換、制御を中心とした研究を行っており、フルードパワー分野では、油圧システムの高効率化、油圧機器を制御するための電磁アクチュエータ (電動-油圧インタフェース)、空気圧アクチュエータ、磁気粘性流体制御用の電磁システムに関する研究を行っている。本報では、それらの研究テーマの中から、磁気粘性流体 (Magnetorheological fluid : 以下 MRF) の粘性を制御するための界磁機構の省電力化について紹介する。

MRF は、外部磁界の変化に応じて粘性が変化する機能性流体である。通常、その外部磁界はソレノイド (電磁石) で生成されるが、MRF に磁界を与えて維持している間はソレノイドへの通電が必要であり、電力が消費される。外部磁界は MRF の粘性を設定するために用いられ、MRF が外部にする粘性による仕事には関係しないため、ソレノイドの消費電力はほぼ全てが動力ロスとなる。この動力ロスを低減するため、当研究室では二種類の界磁機構の省電力化法を提案している。一つは、電磁石と永久磁石材料を用いたハイブリッド界磁法であり、外部磁界の強さを変化させる瞬間のみ電力を消費するが、磁界を維持する間では電力を消費しない方法である¹⁾。もう一つは永久磁石のみを用いる界磁方法であり、磁

気回路内での永久磁石の移動により MRF に作用する磁界の強さを調整するが、永久磁石の移動や保持に必要な力をほぼゼロとすることで機械的な動力消費を低減する方法である²⁾。いずれの方法も、MRF の界磁機構以外に、磁界の変化と維持を必要とする電磁アクチュエータ、例えば電磁弁のソレノイドなどにも応用できる技術と考えられる。

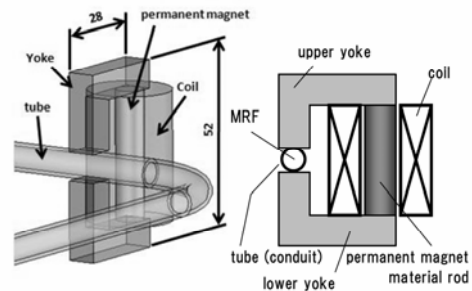


Fig.1 Electromagnet / permanent magnet hybrid magnetizing device for magnetorheological fluid control

2. 電磁石と永久磁石材料を用いたハイブリッド MRF 界磁機構

Fig.1 に電磁石と永久磁石材料を用いたハイブリッド MRF 界磁機構の構造図を示す。従来の MRF 界磁機構では、電磁石 (コイル) がヨークを介して MRF が流動する流路に磁界を与えるのに対し、当界磁機構では、磁気回路的には直列に、構造的にはコイルの内部に、永久磁石材料である Alnico5 のロッドが配置されていることが特徴である。当界磁機構では、電磁石は MRF を界磁するためではなく、永

* 横浜国立大学大学院工学研究院
(〒240 - 8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
(E-mail: yasukazu@ynu.ac.jp)
* Yokohama National University

久磁石材料を着磁/減磁するために用いられる。すなわち, MRf に作用する磁界の強さを変化させる瞬間のみ電磁石に通電し, これにより着磁/減磁された永久磁石材料が, 磁界を維持する間の磁界源の役割を果たす。電磁石通電時は相応の電力消費があるが, 磁界を一定維持する間は電力消費がないため, 磁界維持時間が長いアプリケーションほど省電力となる。

永久磁石材料の着磁/減磁プロセスと, MRf にかかる磁界の強さは以下により調整される。電磁石により瞬間的に正磁界が発生されると, 消磁していた永久磁石材料は着磁し, 電磁石通電オフ後は MRf のパーミアンス線との交点(動作点)で磁界を維持する, また, 電磁石により瞬間的に逆次回が発生されると, 永久磁石材料は減磁し, 電磁石通電オフ後は消磁状態となる。この着磁/減磁プロセスは, 永久磁石材料の磁化特性のメジャーループに沿った変化であるが, 電磁石の瞬間的な磁界の印加の強さを制御することにより, 磁化特性のマイナーループを用いて, MRf のパーミアンス線上で任意の磁界の強さを制御することができる。

試作した当方法による MRf 界磁機構では, 0.7 秒以上磁界を一定で維持する場合は, 電磁石のみの連続通電より省電力であり, 磁界維持時間が長くなるほど省電力効果が大きいことが確認されている。

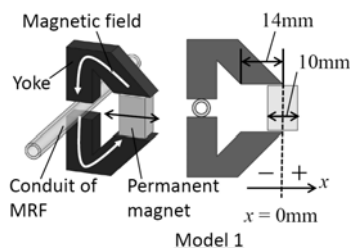


Fig.2 Basic configuration of magnetizing device for MRf control using only a permanent magnet

3. 永久磁石材料を用いた MRf 界磁機構

Fig. 2 に永久磁石を用いた MRf 界磁機構の基本形 (Model 1) を示す。MRf に作用する磁界の強さは, ヨークと永久磁石のオーバーラップ量で調整できる。一見, 永久磁石のみなので電力消費はないと誤認されやすいが, 実際は常に永久磁石にヨーク内に引き込む力 (以下, 永久磁石推力) (Fig.3) が作用し, 永久磁石位置を保持, 移動するための機構 (アクチュエータ等) で動力が消費される。この永久磁石推力を低減できれば, 永久磁石を保持する機構が省動力化できる。

Fig.4 に, 永久磁石位置に関わらず永久磁石推力が生じない磁気回路の概念図 (Model 2) を示す。ヨークを対称形とし, 図右側の磁気回路には, 磁気特性

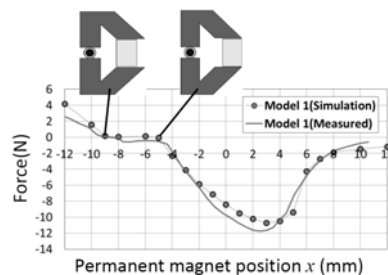


Fig.3 Thrust acting on the magnet for every magnet position (Model 1)

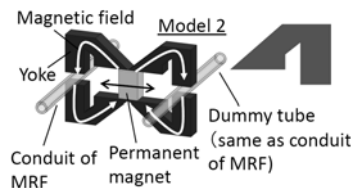


Fig.4 Symmetric yoke configuration for the concept of invariable reluctance as a function of magnet position (Model 2)

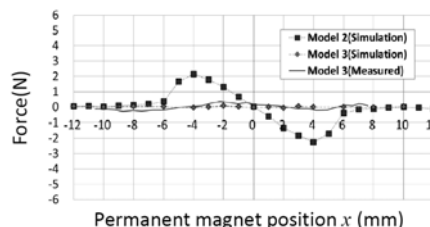


Fig. 5 Thrust acting on the magnet for every magnet position (Model 3) with thrust of Model 2 shown for comparison

をそろえるために MRf を封入したダミーのチューブが配置されている。永久磁石が発生した磁束は左右ヨークに振り分けられるが, その総量は永久磁石位置によらず一定となるように磁極形状を設計しているため, 永久磁石から見た磁気抵抗が磁石位置によらず一定となり, 永久磁石推力が生じない。実際には, 磁極先端のエッジ部の磁気飽和のため, 磁気的対称性が崩れるため, わずかな永久推力が生じる。磁極先端エッジ部の形状を, 磁気飽和を考慮して再設計 (Model 3) することにより, Fig.5 に示すように, 永久磁石推力を永久磁石位置によらずほぼゼロとすることができる。

参考文献

- 1) Sato, Y., Umebara, S., Power-saving magnetization for magnetorheological fluid control using a combination of permanent magnet and electromagnet, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No.11, pp.3521 - 3524. (2012)
- 2) Sato, Y., Power-saving Magnetizing Device for Magnetorheological Fluid Control using Permanent Magnet, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No.11, (to be published on Nov. 2014). (2014)

耐圧ベローズ気体ばね気密省エネシステムの研究

(横浜国立大学大学院 佐藤研究室におけるフルードパワー関連研究 (空気圧分野))

佐藤恭一*

Power-saving Airtight Pneumatic System using Pressure-resistant Thin-wall Metal Bellows Air Springs

(Research and Development on Pneumatic Systems in SATO Laboratory, Yokohama National University)
Yasukazu SATO

Sato Lab. in YNU is developing the active air-spring system with pressure-resistant metal bellows for posture control of a vehicle in turning, accelerating and decelerating motion. In turning, the vehicle tends to tilt to the outside of the curve by the centrifugal force. This roll motion reduces the grip force of the front and rear tires inside of the curve. The vehicle involves the pitch motion by its inertia in accelerating and in decelerating. For maintaining the grip performance of all the tires, the roll tilting and pitch tilting have to be restored by the stiffness control of the air-spring suspension system of all wheels. The system consists of metal bellows type air-springs in each wheel suspension. The metal bellows type air-spring suspension and air compressor are specially designed to have a high-pressure-resistant property up to 0.7MPa. The pneumatic power is transmitted through the power-saving airtight closed circuit, which is effective both for supplying and recycling the power.

Key Words : Air suspension, Metal bellows, Vehicle posture control, Actuator, Compressor

1. はじめに

横浜国立大学佐藤研究室では、動力の伝達、変換、制御を中心とした研究を行っており、フルードパワー分野では、油圧システムの高効率化、油圧機器を制御するための電磁アクチュエータ(電動-油圧インタフェース)、空気圧アクチュエータ、磁気粘性流体制御用の電磁システムに関する研究を行っている。本報では、それらの研究テーマの中から、耐圧ベローズ気体ばねを用いた気密省エネシステムの研究について紹介する。

アクチュエータ、タンク、コンプレッサ等を気密機器で構成し、気体を予め密封しておき、アクチュエータが必要とする気体量をコンプレッサで直接制御することができれば、大気中にエネルギーを持った気体を排出することなく省エネシステム得られる。しかし、気体を漏れなく封じ込め、さらに大変位で伸縮できるような機器がなく実用化されていない。そこで、当研究室では薄肉金属ベローズと粘弾性リングの組み合わせで、0.7MPa程度までの耐圧性を有し、大変位が得られる耐圧ベローズを開発した。その耐圧ベローズの応用として車両の姿勢制御装置を試作し、車両走行試験を行っている。

2. 耐圧薄肉金属ベローズ

金属ベローズはゴムなどの高分子材料と異なり気体を透過しないので、完全密封で伸縮可能なアクチュエータを構成できるが、伸縮量を大きくするためには薄肉化することが必要で、耐圧性が確保できない問題があった¹⁾。ベローズ内圧増加による破損の要因は、わん曲部曲げモーメント増加による曲率の増加である。そこで、Fig.1に示すように、薄肉金属ベローズのわん曲部低圧側に粘弾性リングを挿入することにより、わん曲部がつぶれることを防止し、耐圧性を向上させた耐圧ベローズを開発した²⁾。試作した耐圧ベローズの仕様をTable 1に示す。

Table 1 Pressure-resistant thin-wall metal bellows specification

Item	Specification
Material	SUS304
Thickness	0.15 mm
Diameter, Pitch	68×50, 4 mm
Viscoelasticity ring	O ring, JIS 1A S48

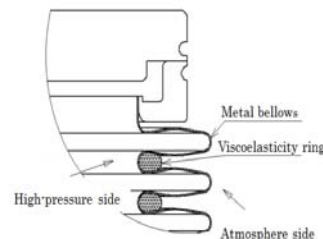


Fig.1 Pressure-resistant thin-wall metal bellows

* 横浜国立大学大学院工学研究院
(〒240 - 8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
(E-mail: yasukazu@ynu.ac.jp)
* Yokohama National University

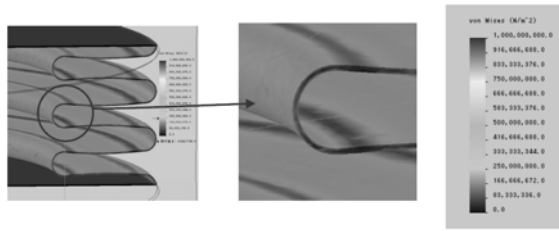


Fig. 2 Stress distribution of conventional thin-walled metal bellows at an inner air pressure of 0.7 MPa (maximum stress of 800 MPa is observed at the inner fold)

開発した構造のベローズの耐圧性は、解析と実験により確認されている。Fig. 2, Fig. 3に従来ベローズと耐圧ベローズの応力分布のFEM解析例を示す。耐圧ベローズは、粘弾性リングによりわん曲部の応力集中が緩和されていることがわかる。

3. 耐圧薄肉金属ベローズを用いた空気ばね

耐圧薄肉金属ベローズの応用例として、Fig. 4に空気ばねと油圧ダンパで構成される車両サスペンションユニットを示す。このユニットを車両の四輪の懸架系に搭載し、四輪の各ばね長を空気圧で制御する試作車をFig. 5に示す。搭載されるコンプレッサも、耐圧薄肉金属ベローズを電動カムで伸縮運動させるものである。空気圧回路は気密回路（閉回路）とし、回路に空気を充填したまま、排気は行わない。四輪各部の車高が中立車高となる定常状態では、重心位置により多少の差はあるが、回路圧が大気圧とコンプレッサ最大圧のほぼ中間圧となるよう設定されている。

コンプレッサは、車両の状態に応じて、回路内の空気を縮長するサスペンションから伸長するサスペンションに移動する役割を果たす。また、中間圧を基準に圧力差を発生させるので、大気圧から各サスペンションの必要圧に加圧するのに比べて省動力となる。車両の旋回や加減速が終わり定常状態となったときは、高压側と低压側の空気圧回路を導通することにより車両は中立車高に自己復帰する。

具体的には、車両は旋回時に遠心力で旋回の外側に傾くが、その傾きを内側に戻すように旋回内側、外側のサスペンション長を変えるアンチロール制御を行う。車両加減速時のピッチングに対しても、前後輪のサスペンション長を変えるアンチピッチ制御を行う。

4. おわりに

IFPEX2014 カレッジコーナーの当研究室の出展では、試験車両に代わり、サスペンション部に用いた耐圧薄肉金属ベローズ空気ばねの試験装置を展示する予定である。

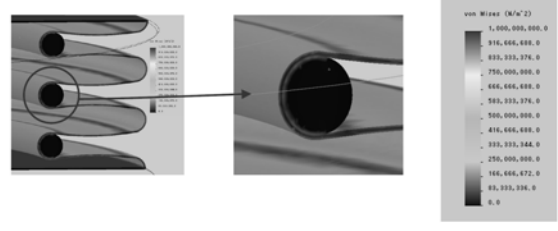


Fig. 3 Stress distribution of pressure-resistant thin-walled metal bellows with viscoelastic rings at the inner air pressure of 0.7 MPa (a stress about ~370 MPa is observed at the inner fold)

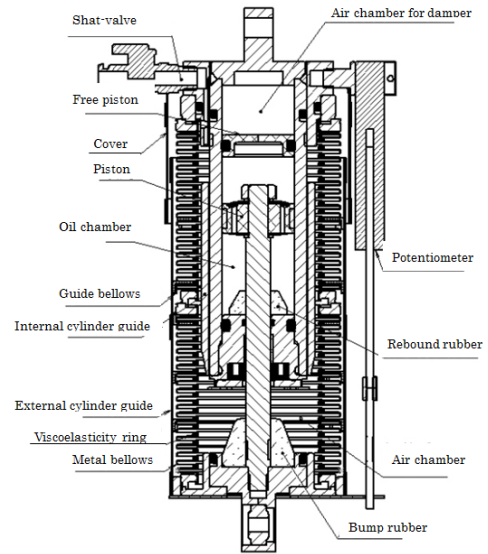


Fig. 4 Air spring using pressure-resistant thin-walled metal bellows and oil type damper



Fig. 5 Test vehicle in posture control (in anti-roll compensation while turning right)

参考文献

- 1) JIS B8265 : 2003 圧力容器の構造—一般事項, 付属書 10 (規定) 圧力容器の伸縮継手
- 2) 佐藤, 新堀, 耐圧ベローズ空気ばねによる車両の姿勢制御, 平成 25 年春季フルードパワーシステム講演論文集, pp. 115-117. (2013)

空気圧を用いた福祉支援システムの開発

高岩昌弘*, 佐々木大輔*, 平田健太郎*

Development of Pneumatic Welfare Robot

Masahiro TAKAIWA, Daisuke SASAKI and Kentaro HIRATA

In Japan, we are facing highly aged society, where robot technology is necessarily required to assist functionally deteriorated person or support nursing labors. We have been developing human support robot to be applied as rehabilitation or power assist work. In the IFPEX, we exhibit some kinds of developed welfare robots, power assist glove and power assist wear using pneumatic soft actuator and walking support shoes using wearer's weight.

Key words: Rehabilitation, Power assist, Pneumatic soft mechanism, Walking support shoes

1. 研究室の紹介

岡山大学知能機械制御学研究室では、空気圧ゴム人工筋などのソフトアクチュエータや従来の空気圧アクチュエータを用いて、リハビリテーションやパワーアシスト等、人を支援するロボットシステムの開発を行っている[1]-[6]. この度のIFPEXでは、空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブと、装着者の体重を利用した歩行支援シューズについて紹介する.

2. 空気圧ゴム人工筋の開発とその応用

2.1 パワーアシストグローブへの応用[3]

シート状湾曲型空気圧人工筋を手甲部に配置し、手指の屈曲動作の支援を目的に開発したパワーアシストグローブを第1図(a)に示す. 各指

の圧力を制御することで第1図(b)(c)のように握り動作やつまみ動作など手指に必要な動作を行うことができる.

2.2 パワーアシストウェアへの応用[4]

図2に示す開発したパワーアシストウェアは、下肢の支援を目的とした衣服状の装置であり軽量かつ使用者の動作を阻害しない構造である. アクチュエータの内圧を調整することで、支援力を能動的に変えることができる. 背面に携帯型の空気圧源、バッテリー、コントローラを内蔵している. また、低圧駆動のアクチュエータを使用しているため、二酸化炭素ボンベなどでの駆動も可能である.



図1 パワーアシストグローブ

* 岡山大学大学院自然科学研究科
(〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)
(toshiro,takaiwa,daisuke)@sys.okayama-u.ac.jp
* Graduate school of natural science and technology
Okayama university



図2 パワーアシストウェア

3 装着者の体重を利用した空気式歩行支援シューズの開発



図3 歩行支援シューズ

超高齢社会である我が国において、高齢者の生活の質の維持・向上は重要な課題である。歩行は高齢者の健康維持に不可欠であるが、高齢者の事故要因の約8割が転倒によるものと報告されている。これは、加齢に伴う足関節背屈筋群の筋力低下により遊脚期における背屈位が低く、歩行がすり足状となるためである。高齢者は転倒すると若年者比べて骨折しやすく、寝たきりになる場合もある。歩行支援装置に関する研究としては、MR流体を用いた粘性抵抗可変の継手を有する短下肢装具や、空気圧受動要素を用いた足の尖足(爪先が鉛直下向きに垂れた状態)を防止する足関節装具などに関する研究が行われている。

本研究では、高齢者のつまずきによる転倒防止のため、遊脚期になった際につま先を上に向ける動作(背屈動作)を支援する機能を備えた歩行支援シューズ(図3)を開発する。このように能動的に支援動作を行うには何らかのエネルギー源が必要となるが、従来の電動モータ等を用いたのではコストや装置の複雑化を招き、一般の外歩き用シューズとして得策とは言えない。そこで本研究では装着者の体重(位置エネルギー)に着目する。そして、空気圧の特徴を利用することにより、装着者の位置エネルギーを機械的な仕事に変換する仕組みを提案し、これを小型化して靴に組み込むことで、電気エネルギーを一切利用しない駆動方法を提案する。

参考文献

- [1] Toshiro Noritsugu, Daisuke Sasaki, Masafumi Kameda, Atsushi Fukunaga, Masahiro Takaiwa, Wearable Power Assist Device for Standing Up Motion Using Pneumatic Rubber Artificial Muscles Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.19, No.6, pp.619~628, 2007
- [2] 荒金正哉, 則次俊郎, 高岩昌弘, 佐々木大輔, 猶本真司, シート状湾曲型空気圧ゴム人工筋の開発と肘部パワーアシストウェアへの応用, 日本ロボット学会誌, 第26巻, 第6号 pp.674-682, 2008
- [3] 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘, 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本ロボット学会誌, 第24巻, 第5号 pp.640-646, 2006
- [4] Daisuke Sasaki, Toshiro Noritsugu, Masahiro Takaiwa, Development of Pneumatic Lower Limb Power Assist Wear driven with Wearable Air Supply System, Proc. of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), 2013, pp.4440-4445
- [5] 高岩昌弘, 則次俊郎, 正子洋二, 佐々木大輔: 空気式パラレルマニピュレータを用いた手首部リハビリ支援装置の開発---理学療法士の徒手訓練動作の獲得と手首特性の多自由度計測---, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.8, pp.107-114, 2007
- [6] Masahiro Takaiwa, Toshiro Noritsugu, Development of Energy Autonomous Type Pneumatic Walking Support Shoes, Journal of Robotics and Mechatronics・Vol.21・No.3・353-358・2009.6

空気圧ベローズで駆動する微動ステージのナノ位置決め

○水野智国*, 藤田壽憲*

Nanoscale Positioning of Fine Motion Stage Driven by Pneumatic Bellows

Tomokuni MIZUNO*, Toshinori FUJITA*

The semiconductor industry requires accurate stage positioning, in the order of nanometers, for many fabrication processes. In addition, the demand for precision positioning of nanometer-order is increasing with the progress of nanotechnology. Currently, such precise positioning is realized using a stage driven by a piezoelectric element. However, the piezo-electric element has disadvantages of low durability and short stroke. These disadvantages can be removed by the use of a pneumatic bellow actuator instead of a piezoelectric element. In this study, a stage for fine movement has been developed with air bearing driven by pneumatic bellows, and the positioning control method has been examined. Consequently, the positioning accuracy is 0.01 ± 0.9 [nm] and the positioning resolution is 1 [nm] with good positioning repeatability, when feed forward and proportional-integral (PI) control was performed. It is concluded that the developed stage has precise positioning accuracy of nanometer-order and can be applied to many cases where the use of a piezoelectric element cannot be realized.

Key Words : Pneumatics, Position Control, Nanoscale, Bellows, Stage

1. 緒言

半導体産業を中心に超精密位置決めに対する需要は年々増加する傾向にある。特に露光や三次元実装などの装置においてはナノメートルオーダーの超精密位置決めに対する需要はますます高まっている。

ナノテクノロジーの進展に伴い、特に半導体産業を中心に超精密位置決めに対する需要は高まっている。特に露光や三次元実装などの装置においてはナノメートルオーダーの精度が求められている。

この精度を実現するアクチュエータとして、圧電素子が多く利用されている。しかしながら、その変位は積層形としても高々50[μm]と小さく、積層する際に使用される接着剤の耐久性も問題となっている。一方、空気圧では微動アクチュエータとしてベローズが用いられてきた。その変位は圧電素子と比較して100倍以上も大きく、容易に数ミリ程度の変位が得られる。また金属製ベローズではすでに耐久性が明らかにされ信頼性も確立されている。空気圧ベローズによりナノメートルの位置決めが実現できれば、圧電素子の欠点を克服できる空気圧ベローズが圧電アクチュエータの代替と成り得る。

このような背景から、本研究では静圧軸受案内で支持されたステージを空気圧ベローズにより駆動する微動ステージを構築し、ナノメートルの超精密位置決め制御を実現することを目的とする。

2. ベローズで駆動する微動ステージ

Fig.1に構築した微動ステージを示す。ステージには空気圧ベローズが対向して設置されている。これらの気圧ベローズに差圧を発生させ、ステージを駆動する。差圧を発生させる制御弁にはノズルフラップ型サーボ弁を用いた。一般的なノズルフラップ型サーボ弁では小孔による固定絞りと組み合わせて構成されている。この絞りで発生する高速流が弁内で減衰する際に、流体ノイズとなりステージを振動させることがわかった。そこで本研究では、すきま流れを利用した絞りに置き換え、粘性流れにより弁内への流速を抑制し、流体ノイズを低減した低流体ノイズサーボ弁を採用している。ステージ変位は半導体レーザを用いた格子干渉方式のリニアエンコーダ（以下、レーザスケールと呼ぶ）で計測した。最小分解能は62.5[pm]である。

ステージの制御アルゴリズムをFig.2に示す。ベローズはばね特性を有するため制御対象は定位性を有し、P制御だけではオフセットを生じる。これを補償するためにフィードフォワード制御を行った。さらにベローズやサーボ弁特性によるヒステリシスの補償のためにPI制御を加えている。フィードフォワードゲインはステージ特性から決定し、比例ゲインと積分時間は位置決め精度を重視しながら試行錯誤により決定した。

3. 位置決め制御結果

Fig.3にステージの位置決め精度を調べた結果を示す。(a)が中心付近での結果であり(b),(c)が中心から ± 600 [μm]の位置での結果である。 ± 600 [μm]の位置はステージのストローク端付近である。位置決め精度はか

* 東京電機大学

(〒120 - 8551 東京都足立区千住旭町 5)

(E-mail: 13kmm38@ms.dendai.ac.jp)

* Tokyo Denki University

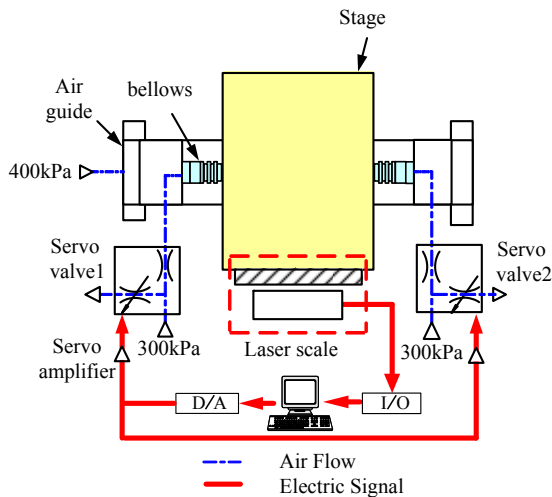


Fig.1 Schematic diagram of stage drive system

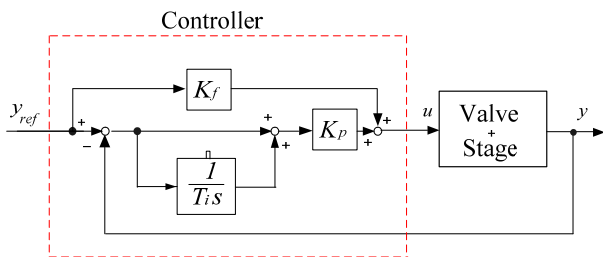


Fig.2 Control algorithm of stage drive system

たより e とばらつき σ を用いて $e \pm 3\sigma$ で評価される. 図に示したステップ応答の整定後のデータからこれらを求めた. その結果, 中心付近で位置決め精度は $0.01 \pm 0.9[\text{nm}]$ となった. これに対し $+600[\mu\text{m}]$ の位置では $0.03 \pm 0.9[\text{nm}]$, $-600[\mu\text{m}]$ の位置では $0.05 \pm 1.2[\text{nm}]$ の結果となり, 中心付近の精度と比べて若干, 劣っている結果となった. しかし, 変位センサの分解能や実用性を考慮すると中心付近以外でも位置決め精度は良好であると言える.

位置決め分解能を調べた結果を Fig.4 に示す. (a) が中心付近, (b), (c) が中心から $\pm 600[\mu\text{m}]$ の位置からステップ幅を $1[\text{nm}]$ として 3 秒間隔でステップ信号を階段状に与えたときのステージの応答である. 入力したステップ幅で変位を得られれば, その幅の分解能を得ることができる. Fig.4 において毎回のステップ信号に対し, $1[\text{nm}]$ 毎に目標値に追従しており, $1[\text{nm}]$ の分解能を有していることが確認できる. 弾性ヒンジのステージに比べ位置決め分解能も大幅に向上することができた. またデータとしては示さないが再現性も良好であった.

4. 結論

本研究では空気圧ベローズで駆動する静圧案内で支持されたステージの超精密位置決め制御を行った. そ

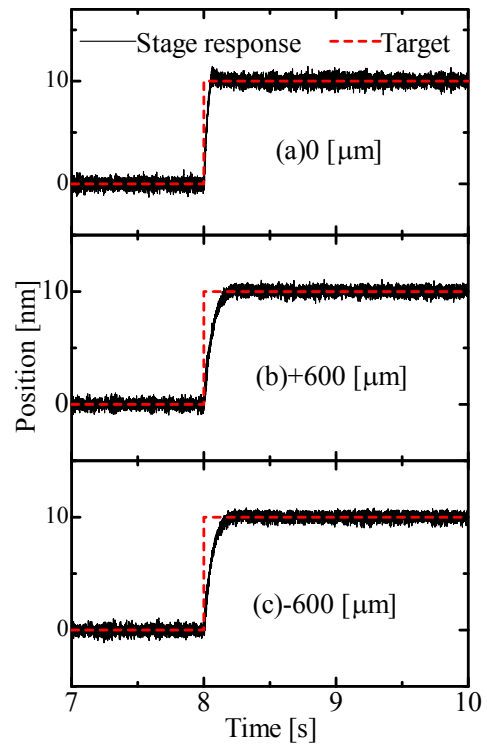


Fig.3 Positioning accuracy of stage

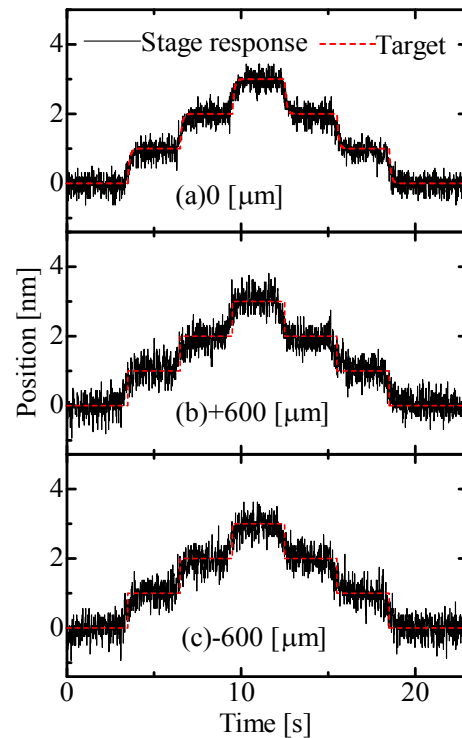


Fig.4 Positioning resolution

の結果, 良好な再現性を保ちながら $0.01 \pm 0.9[\text{nm}]$ の位置決め精度と $1[\text{nm}]$ の分解能を実現することができた.

なお, 本研究は JSPS 科研費 基盤研究(C) 22560251 の助成を受けたものです.

ヘルムホルツ型油圧サイレンサの容量形状と減衰特性

栗林 哲也* , 一柳 隆義** , 西海 孝夫**

Relationship between the Attenuation Characteristics and Volume Configurations of a Helmholtz Type Hydraulic Silencer

Tetsuya KURIBAYASHI* , Takayoshi ICHIYANAGI** , Takao NISHIUMI**

A Helmholtz type hydraulic silencer, which is based on the resonance phenomena of a mass-spring-damper system for its attenuate principle, is known as one of the most practical silencers in the hydraulic systems. The purpose of this research is to clarify the influence of volume geometry on the attenuation characteristics. In particular, a mathematical model that considers the flow for the radial direction of the cylindrical volume and the elastic deformation of the volume vessel wall as effective bulk modulus of working fluid is newly proposed for the design case that L/D is smaller.

Key Words : Hydraulic silencer, Pressure pulsation, Transmission loss, Bulk modulus

1. はじめに

ヘルムホルツ型油圧サイレンサは圧力脈動の下流への伝ばを減衰することで、油圧システムの低振動化や低騒音化に寄与している¹⁾。このサイレンサは狭帯域でしか減衰効果を得られないために、減衰性を正確に予測する必要がある。円筒容量部の形状が扁平なサイレンサの場合、従来から用いられてきた軸方向の粘性平面波動理論による分布定数系モデルでは減衰特性を正しく評価できないことが報告されている²⁾。

本研究では、サイレンサの容量形状が減衰特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。まず、扁平型円筒容器の半径方向に平面波動理論を適用した分布定数系モデルを新たに構築する。つぎに、サイレンサ容量部の上下壁面の弾性変形が減衰特性に与える影響について調べる。

2. 減衰特性の数学モデル

Fig. 1 にヘルムホルツ型油圧サイレンサの構造を示す。同図(a)は容量部に一般的な形状である細長い円筒容器を用いたサイレンサ、同図(b)は容量部の形状が扁平なサイレンサである。本章ではこれらの減衰特性を表わす分布定数系モデルを求め、容量部の長さ L と直径 D との比 L/D をパラメータとして、ヘルムホルツ型油圧サイレンサの形状が減衰特性に与える影響を明らかにする。

本研究では、減衰特性を表す指標として透過損失

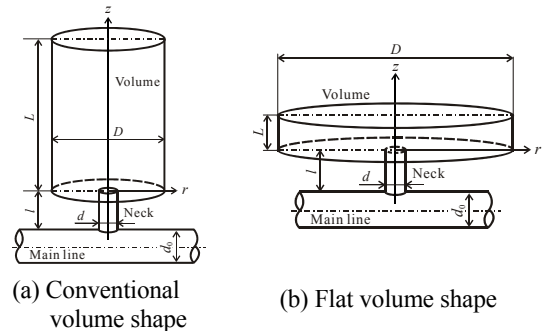


Fig. 1 Helmholtz type hydraulic silencer

TL を用いる。ヘルムホルツ型油圧サイレンサのようにサイレンサが主管路に分岐接続されている場合には、透過損失 TL は次式のように表される。

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \left| 2 + \frac{4\rho c}{\pi d_0^2 Z_h} \right| \right) \quad (1)$$

ここで ρ , c , d_0 は作動油の密度、油中音速、主管路の直径である。また Z_h はサイレンサの入口インピーダンスを表わす。

サイレンサの入口インピーダンス Z_h は、分布定数系モデルにおいては容量部の形状に応じて考える必要がある。Fig. 1(a)のように容量部が細長い円筒の場合には、容量部内の流体に対して軸方向に伝ばする圧力脈動(流量脈動)が支配的と考えられる。一方、Fig. 1(b)のように容量部が扁平な場合には、脈動は半径方向に伝ばすると考えられる。本研究では、それぞれの軸方向および半径方向に伝ばする圧力脈動および流量脈動の基礎方程式は軸方向および半径方向のナビエ・ストークス方程式と圧縮性を考慮した連続の方程式とし、脈動の伝ば特性を解析することによって、サイレンサの入口インピーダンス Z_h を求める。

* 防衛大学校 理工学研究科

(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

(E-mail: ed12006@nda.ac.jp)

** 防衛大学校 機械システム工学科

* Graduate School, National Defense Academy

** Mechanical Systems Engineering, National Defense Academy

理論モデルの妥当性を検証するために、ヘルムホルツ型油圧サイレンサの容量部の比 L/D を変化させて透過損失特性を実測した。供試サイレンサは容量部の体積が $V = 1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 、その比が $L/D=0.03\sim 50$ の全 10 種類とした。またネック部の寸法には直径 $d = 12.0 \text{ mm}$ 、長さ $l = 45.0 \text{ mm}$ を用いる。Fig. 2 は計測に用いた油圧回路と計測システムであり、測定には 4 圧力 2 システム法を用いた³⁾。

Fig. 3 に容量部の比 L/D を変化させて実測したヘルムホルツ型油圧サイレンサの共振周波数 f_r の実験結果を示す。同図より、比 L/D が大きく容量部が細長くなる場合には軸方向の分布定数モデルと実測値はよく一致することが確認できる。ところが、比 L/D が小さく容量部が扁平になる場合を見ると、半径方向の分布定数系モデルで得られた傾向と同様に実測値の共振周波数 f_r が低下している。ただし、その低下度合は比が $L/D = 0.3$ まではモデルと一致しているが、それ以下の領域では著しい差異が見られる。

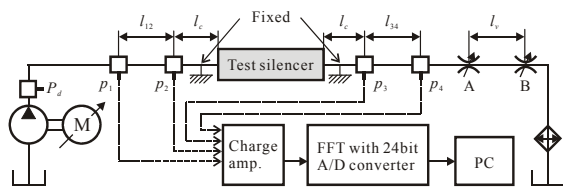


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

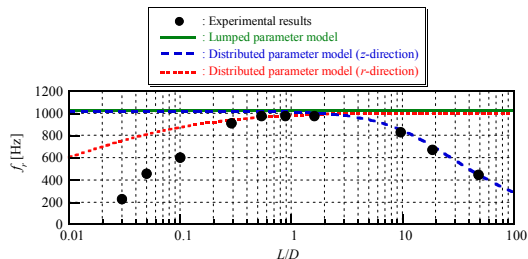


Fig. 3 Influence of dimensional ratio for resonance frequency

3. 上下壁面の弾性変形と有効体積弾性係数

Fig. 3 における差異の原因を圧力脈動に起因する扁平な容量部の上下壁面において生じる弾性変形と考える。そこで、弾性変形の影響は作動油の見掛けの体積弾性係数として等価的に取り扱うことにより、有効体積弾性係数がサイレンサの減衰特性に与える影響について調べる。上下壁面の変位を薄板の曲げにおける最も単純なラグランジュによる低次近似の古典平板理論により表わすと、容量部の上下壁面の弾性変形を考慮した作動油の有効体積弾性係数 $K_e(r)$ は次式で与えられる。

$$K_e(r) = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{\alpha_1(r) + \alpha_2(r)}{L}} \quad (2)$$

ここに K は作動油の体積弾性係数であり、係数 $\alpha_1(r)$ 、 $\alpha_2(r)$ は古典平板理論において壁面の垂直応力とたわみの関係を表わす比例定数である⁴⁾。本研究では簡略化のため、式(2)を半径 r に関する積分の平均値 \bar{K}_e で近似する。なお係数 $\alpha_1(r)$ 、 $\alpha_2(r)$ は壁面の厚さ h_i をパラメータに持つ。

壁面における弾性変形の影響を検証するために、容量部の直径が $D=135 \text{ mm}$ 、長さが $L=25 \text{ mm}$ のサイレンサの共振周波数 f_r を実験により求めた。Fig. 4 に上下壁面の厚さを $h_i=10, 20, 30, 50 \text{ mm}$ とした結果を示す。同図より共振周波数 f_r はカバー厚さ h_i が薄いほど低くなるが、有効体積弾性係数 \bar{K}_e を用いた分布定数系モデルは弾性変形を考慮しないモデル ($K=1.66 \text{ GPa}$) に比べ減衰特性が実験と定性的に一致する。また同図において実験結果は回路の平均圧力 p_d にかかわらずほぼ等しくなっており、壁面の弾性変形の影響は、容量部内の平均圧力の高低に影響を受けないことが分かる。

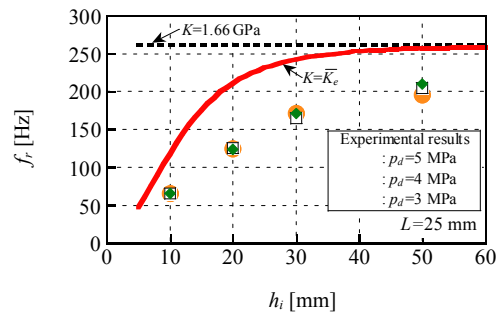


Fig. 4 Relationship between wall thickness and resonance frequency

4. おわりに

本研究では、ヘルムホルツ型油圧サイレンサの形状が減衰特性に及ぼす影響を円筒容量部の形状を考慮した 2 種類の分布定数系モデルおよび実験により検証した。また扁平なサイレンサの容量部の上下壁面における弾性変形の影響を加えた有効体積弾性係数を導出し、その妥当性を明らかにした。

参考文献

- 1) 日本機械学会編, 事例に学ぶ流体関連振動, 第 2 版技報堂出版株式会社編, 流体振動, p.189 (2008)
- 2) 鷲尾誠一, 高橋智, 向畑和男, 山口智史, ヘルムホルツ共鳴器型油圧脈動フィルタの研究, 油圧と空気圧, Vol.24, No.6, pp.729-735 (1993)
- 3) 小嶋英一, 一柳隆義, 油圧ポンプに起因する油圧システム内の圧力脈動の発生と伝ば: 第 2 報, 油圧サイレンサの脈動伝達特性と性能評価法の検討, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.61, No.583, pp.1014-1022 (1995)
- 4) 例えば, 日本機械学会編, 機械工学便覧基礎 α3 材料力学, 初版, p.48 (2004)

作業療法士の施術を再現する手指関節リハビリ装置の開発*

谷口 造成 **, 内藤 佑介 **

A Hand Rehabilitation Device to Prevent Contracture for Finger Joints Based on an Occupational Therapy

Hironari TANIGUCHI, Yusuke NAITO

This paper describes the concept, design, prototype and evaluation of the hand rehabilitation device with pneumatic soft actuators. The device has two different actuators, stepping motors and the pneumatic soft actuators which are used for the range of motion (ROM) and relaxation exercise. We measured the flexion and extension angles in the rehabilitation test. As the results, we confirmed that the rehabilitation system is able to provide ROM exercise.

Key Words: Hand rehabilitation, Pneumatic soft actuator, ROM exercises, Relaxation exercises

1. 緒 言

事故や病気により運動機能障害を起こす患者は、年々増加している。これにより関節を動かさない状態が続くと、拘縮という現象が起きる。拘縮は、関節可動域の制限を引き起こし、患者の日常生活を困難にさせるため、手指関節の拘縮予防や軽度の拘縮改善を目的に、作業療法士によるリハビリ運動が行われる。しかしながら、作業療法士がリハビリできる時間は限られており、患者は十分なリハビリを受けられないことがある。また、作業療法士を含む介助者の数が、患者数に対して不足しているため、介助者にかかる負担も懸念されている。

これまでも、これらの問題を解決するために、様々な手指関節を対象としたリハビリ装置が開発されている。しかしながら、これらの装置は関節可動域訓練（以下、ROM 訓練と記す）だけを目的としており、作業療法士が行うリハビリの再現には至っていない。そこで本研究では、関節可動域訓練だけでなく筋ストレッチングの動作も行うことのできる手指関節用のリハビリ装置を開発することを目的とする。本報では、本リハビリ装置の設計、製作および筋ストレッチングと関節可動域訓練の評価試験について述べる。

2. リハビリ装置の試作

手指関節リハビリ装置を開発するにあたり、財団法人津山慈風会津山中央病院リハビリテーション課の作業療法士の方々に協力していただき、実際に患者に行っている

手指関節のリハビリ運動を調査した。この調査から、ROM 訓練は、指を曲げる動作（屈曲）、指を反らす動作（伸展）、指を開く動作、把持動作の時に形成される 5 指と 1 指を近づけるような動作（手のアーチ）の 4 種類の ROM 訓練があることが明らかになった。また、作業療法士は患者の筋肉をもみほぐすマッサージ、手のむくみを取り除くために手を圧迫するなどの筋ストレッチングを行っていることもわかった。筋ストレッチングは、患者の緊張を取り除き、ROM 訓練の効果を高めることが目的であるため、ROM 訓練を実施する前に行われる。この調査結果を踏まえ、今回は筋ストレッチングと屈曲および伸展の 2 種類の ROM 訓練を実現するリハビリ装置を試作することとした。

手指のリハビリは、第 1 指（親指）から第 5 指（小指）を対象に実施される。しかし第 1 指は、他の指に比べ自由度が高く、単独でリハビリすることが多い。従って、本リハビリ装置は、第 1 指を除いた第 2 指から第 5 指の筋ストレッチング、屈曲および伸展運動を同時に行える構造とした。Fig. 1 に製作したリハビリ装置を示す。

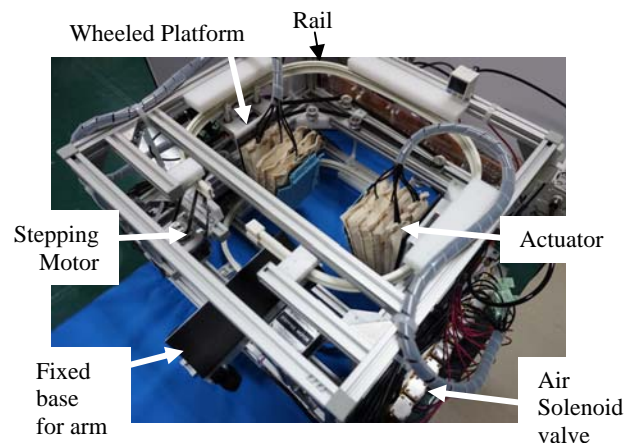


Fig.1 Prototype of rehabilitation device for finger joints

* 平成 21 年 12 月 25 日 原稿受付

** 津山工業高等専門学校電子制御工学科
(所在地：岡山県津山市沼 624-1)
(E-mail: taniguti@tsuyama-ct.ac.jp)

3. 評価試験

3.1 筋ストレッチングの動作試験

Fig.2に筋ストレッチングの様子を示す。それぞれのアクチュエータに空気圧を印加することで、手指を挟みこむような形で圧迫する。この動作を指先から手の甲まで台車を移動させながら行うことで筋ストレッチングを実現できることを確認した。筋ストレッチングの効果は、まだ検証していないため、今後の課題である。



Fig.2 Photograph of massaging the muscles of the hand

3.2 屈曲動作試験

Fig.3(a)に屈曲動作の実験結果を示し、Fig.3(b)に作業療法士が行う様子を示す。各関節の屈曲角度は、MP関節が目標値90度に対して48度、PIP関節が目標値100度に対して91度、DIP関節が目標値80度に対して71度であった。従って、PIP関節およびDIP関節では、目標値に近い角度で屈曲できることを確認した。しかしながら、MP関節は目標角度の50%程度しか屈曲できなかった。これは、アクチュエータが掌の下部のふくらみと接触してしまうことで、アクチュエータをDIP関節と指先間に、適切に作用していないことが原因であると考えられる。また、作業療法士による屈曲動作は、指を包み込みすべての関節を同時に屈曲させているが、リハビリ装置による屈曲では、各関節を別々のタイミングで屈曲させていることがわかった。

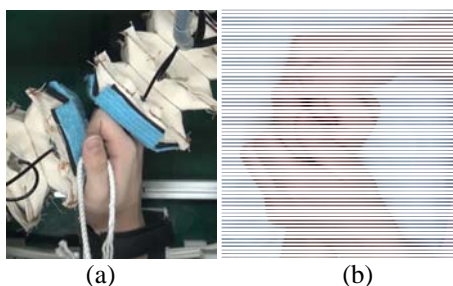


Fig.3 (a) The measurement result of the flexion movement and (b) photograph of the rehabilitation treatment by an occupational therapist

3.3 伸展動作試験

次に、Fig.4(a)に伸展動作の実験結果を示し、Fig.4(b)に作業療法士が行う様子を示す。各関節の伸展角度は、MP関節が目標値45度に対して34度、PIP関節およびDIP関節が目標値0度に対して共に0度であった。この結果より、PIP関節およびDIP関節は、目標角度を実現したが、MP関節は目標角度の75%であり、関節可動域の最大可動域まで動かすことはできなかった。これは、手首の固定が不十分で、手首が伸展方向に反ってしまっていること、また手首の固定に用いている手の甲に接触しているアクチュエータが、MP関節の伸展を阻害していることが原因と考えられる。また、作業療法士による伸展動作と、リハビリ装置による伸展動作は、各関節を曲げるタイミングや方法は同じであることがわかった。

節が目標値45度に対して34度、PIP関節およびDIP関節が目標値0度に対して共に0度であった。この結果より、PIP関節およびDIP関節は、目標角度を実現したが、MP関節は目標角度の75%であり、関節可動域の最大可動域まで動かすことはできなかった。これは、手首の固定が不十分で、手首が伸展方向に反ってしまっていること、また手首の固定に用いている手の甲に接触しているアクチュエータが、MP関節の伸展を阻害していることが原因と考えられる。また、作業療法士による伸展動作と、リハビリ装置による伸展動作は、各関節を曲げるタイミングや方法は同じであることがわかった。

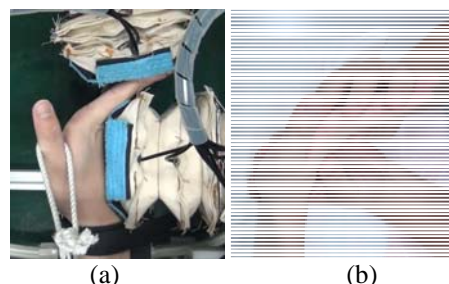


Fig.4 (a) The measurement result of the extension movement and (b) photograph of the rehabilitation treatment by an occupational therapist

4. 結言

本稿では、空気圧ソフトアクチュエータを用いた手指関節のリハビリ装置の試作と、筋リラクゼーション運動およびROM訓練の動作実験について紹介した。特にMP関節のROM訓練が十分でないことがわかった。今後の課題として、各種運動の精度向上、実現できていない関節可動域訓練の動作（指をひらく、手のアーチ）への対応、装置の小型化などが挙げられる。

謝辞

本研究は、平成25年度公益財団法人JKA機械工業振興補助事業（競輪）の補助（25-118）および平成26年度公益財団法人油空圧機器技術振興財団研究助成の補助を受けて実施されました。また、財団法人津山慈風会津山中央病院リハビリテーション課の作業療法士の皆様に多大なる協力をいただきました。

参考文献

- 1) 國米良太, 王前力人, 谷口浩成, "手指関節リハビリ装置に用いる多段型空気圧ソフトアクチュエータの開発", 日本機械学会中国四国学生会第44回学生員卒業研究発表講演会前刷集 (CDROM), 718, (2014)

ガス圧駆動による歩行支援装具

小山 紀*, 吉満 俊拓**, 北川 能***

Gas Driven Walking Assist System

The study aims to develop the walking assist system which works independently having all energy source in it. The system has pneumatic cylinders as actuator, so the carbon dioxide gas is used. It is generated from the solid state dry-ice using environmental heat. All equipment for gas control that is dry-ice container, control valves, microcomputer and battery are included in the bag, then the assist system works without using another power supply

1. 緒言

誰でも簡単に使える汎用歩行支援装具の開発を目的としている。様々な場所で使えるよう、必要な動力源を内蔵している。

2. 歩行支援装具

ガス圧により動作する歩行支援装具を図1に示す。靴を含む外殻式の装具で膝の伸展時にシリンダを伸ばして歩行を助ける。膝が伸びた状態では装具の膝リンク部は上死点にあるため、もう一方の脚を上げるため全体重を支えても決して膝が折れることはない。

シリンダを駆動するタイミングを決定するには歩行状態を知る必要がある。誰でも使える装具にするためにはセンサを人に取り付けるのではなく、全て装具に設置するのが望ましい。現在、装具には靴底に感圧センサ、膝関節に角度センサ、大腿部に加速度センサなどを配置している。動力源を含む必要な機材をすべて背中のザックに収め



図1 歩行支援装具

ていて屋外での利用が可能である。写真の撮影時にはガス圧源として高圧容器に空気を詰めて使ったが、現在は Dry-Ice Power Cell¹⁾を用いている。0.5 l の容積のタンクに 420 g のドライアイスを入れた場合、約 1200 歩の歩行が可能であった。

*明治大学理工学部

(所在地〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1)

**東京工業大学理工学研究科

***神奈川工科大学創造工学部

参考文献

- 1)北川ほか：三重点における相変化を利用した携帯空圧源の開発，日本フルードパワー学会論文集，Vol.36No.6号,pp.158-164,(2005)

レスキュー用アシストスーツ

神奈川工科大学 吉満俊拓*

Development of Power Assisting Suit for Assisting Rescue Crew

Toshihiro YOSHIMITSU*

Mountains rescue and a firefighter's rescue operation in the disaster site of an earth-flow disaster have much difficulty. Their activity place has much rubble with a sloping ground or an irregular ground, and cannot perform prompt movement. In such a situation, the rescue efforts in a heavy industrial machine or a rescue instrument cannot but become rescue it is difficult and according to human power. Activity at a narrow unstable place, since the foothold is bad, the load to a lower half of the body is high, the injury by fatigue is induced. Therefore, a prolonged rescue operation with an operator's large burden is difficult. In the irregular ground or a sloping ground, the assistant suit needs to have the free motion which does not bar activity, and the motion which assists a joint. In order to work continuously by the irregular ground and sloping grounds, such as mountains rescue and the time of an earth-flow disaster, the leg power assistant suit aiming at mitigation of a physical load, extension of activity time, and injury prevention of the rescuer itself is developed.

Key Words : Rescue, Pneumatic actuator, Dash pot

1. 研究目的

山岳救助や土砂災害時など、不整地・傾斜地で継続的に作業を行なわなければならない状況において、身体的負荷の軽減・活動時間の延長と救助者自身の怪我防止を目的とした下肢パワーアシストスーツを開発する。求められる機能として

- ・軽量化
- ・斜面での下肢の負担軽減・怪我の防止
- ・長時間の活動が挙げられる。

本研究では、山岳救助や土砂災害時など、不整地・傾斜地で継続的に作業を行なわなければならない状況において、身体的負荷の軽減・活動時間の延長と救助者自身の怪我防止を目的とした下肢パワーアシストスーツを開発する。

2. レスキュー用アシストスーツ概要

アシストスーツは腰固定部・大腿部・膝関節用アクチュエータ・下肢部・足関節機構・足底部で構成されている。腰固定部は前半分がベルト状で使用者にアシストスーツを固定する。大腿部・下肢部はアクチュエータと共に膝関節の支援し、足関節機構は足首の支援する。足底部はアシストスーツと靴の固定がワンタッ

チで可能な構造であり、速やかな装着を可能としている。アシストスーツ総質量は約 6.0Kg である。

基本骨格図を、Fig.1 に示す。

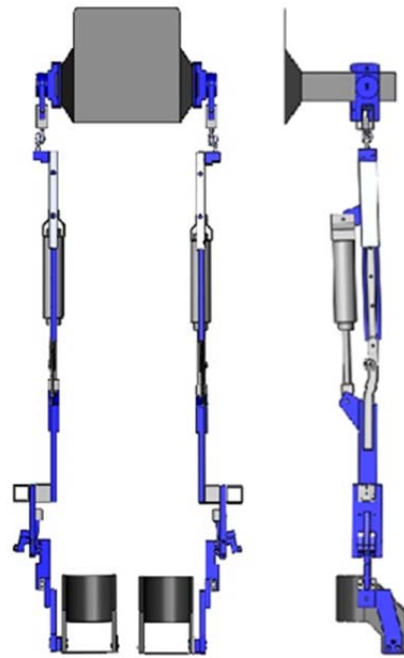


Fig.1 Assisting Suit for Rescue

2.1 膝関節機構

作業時に膝関節機構に求められる機能として、

- ① 大腿部・下肢の筋力アシスト
- ② 膝関節に加わる衝撃力の緩和がある。一般的に膝関節に加わる衝撃力は登坂時比べて降坂時が高く、衝撃力緩和・疲労軽減を第一とし

* 神奈川工科大学創造工学部ロボットメカトロニクス学科
(〒243 - 0292 神奈川県厚木市下荻野 1 0 3 0)
(E-mail: yosimitu@rm.kanagawa-it.ac.jp)

*Kanagawa Institute of Technology

た降坂時の膝関節への衝撃力緩和を主たる目的とし、第二に大腿部・下肢の筋力アシストとする機構を開発した。膝関節アクチュエータは空気圧シリンダを用いヘッド側配管にスピードコントローラと空気タンク(100cc)を取り付ける。スピードコントローラにはサーボモータが取り付けられておりマイコンからの信号により絞りを可変にすることができる。

2.2 足関節機構

作業時に足関節機構に求められる機能として、

- ① 不整地・斜面などで足関節が内反・外反動作をする際に妨げとならない。
- ② 足首捻挫を引き起こしそうな状況において速やかに足関節を固定し捻挫を予防する。がある。不整地・斜面では足関節は様々な動きを求められる。

足首の横向きの可動には、4 節リンクを利用しスーツの関節中心を装着者の足首の関節中心と合わせ足首の動きに追従し、アシスト性が高いものとなっている。さらに足関節機構に取り付けられた可変ダンパにより足首の内返し方向への可動を制限する。可変ダンパにはサーボモータが取り付けられておりマイコンからの信号により絞りを可変にすることができる。

3. 実験結果

3.1 アシストスーツ関節機構

15~30° の斜面を設定し、実際の斜面における稼働実験を行なった。アシストスーツ装着・非装着時の足関節可動域を評価した。結果を Fig. 2 に示す。

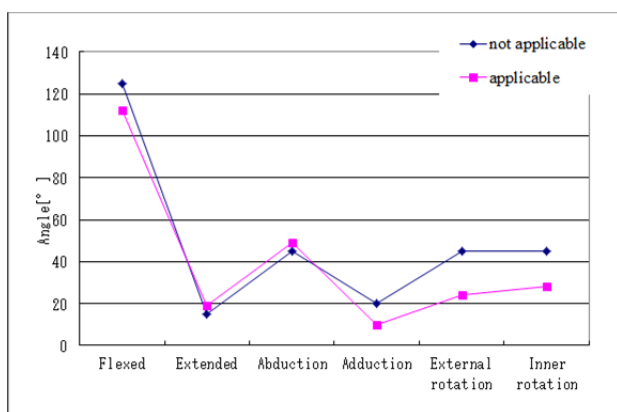


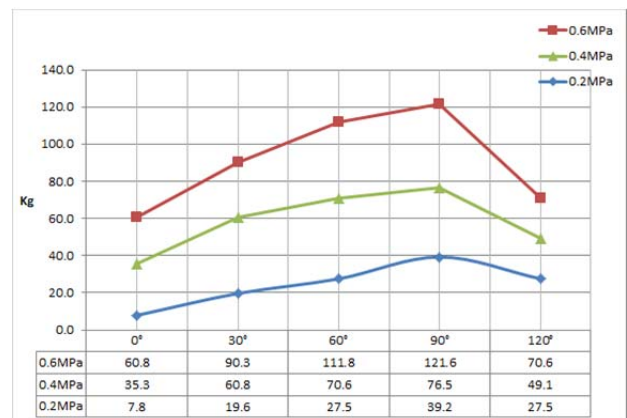
Fig.2 Ankle range of joint motion

図よりスーツ装着時の可動範囲は、非装着時に比べても遜色のない値を示しており、アシストスーツを装着しても非装着時と同様の可動範囲での行動が可能である。アシストスーツ装着状態で斜面に立つことに障

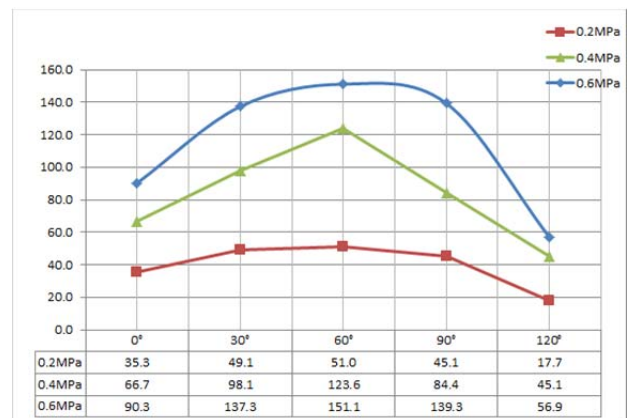
害はなく、アシストスーツの足関節機構によって補助され、通常時よりも斜面で立つことは容易である。

3.2 アシスト機構

膝関節機構の衝撃力緩和実験を行った。空気圧タンク内圧力は 0.7MPa とした。実験条件として可変絞りの開度を①全閉② ①から 1/2 回転開③全開、とした。空気圧アクチュエータの吸収力実験結果を Fig. 3 に示す。③の全開状態ではアクチュエータの推力とほぼ同じ値を示したが①・②ではアクチュエータの速度に比例し吸収力が増加し、膝関節に対する衝撃力の吸収が可能となった。



(a) Flexing action



(b) Extended action

Fig. 3 Experimental result of ballistic force

5. 結論

不整地・傾斜地で継続的に作業を行なうため、S レスキュー用下肢パワーアシストスーツを開発した。災害救助時における救助者の身体的負荷や疲労が軽減され

- ・活動時間の延長
- ・救助者自身の怪我防止

が期待できる。

高齢者の姿勢保持と重心移動のための空気圧装置の開発*

村松久巳**, 寺内 滯央***

Development of Pneumatic Apparatus for Assistance of Standing and Shift in Center of Gravity in the Elderly

Hisami MURAMATSU, Reo TERAUCHI

Japan is facing a super-aged society. It is necessary to close a gap between life expectancy and healthy life expectancy in accordance with increase average life expectancy. Five-year Strategy for Medical Innovation robot was described in Japan Revitalization Strategy issued by the Cabinet Office. In conformity with the principle of it, both the METI and the MHLW advance the undertaking in development and promotion of nursing-care equipment utilized robotics technology. Priority areas of the undertaking are transferring care, movement support, excretion support and watch support. For the care and the supports, it is important to hold standing position and to shift in center of gravity in the elderly. We have been developed a pneumatic apparatus composed from a support device for standing and a support device for shift in center of gravity. The support device for standing can hold standing posture. The support device for shift in center of gravity can assist stepping motion. Though the elderly frequently adopts hip strategy when standing posture is unstable, the pneumatic apparatus can't support motion of the hip strategy. In this study, we add a new function to the support device for standing in order to assist motion during the hip strategy. The support device for standing is consisted of a suspender, a stopper, a back gripper, a harness and a belt. Pneumatic artificial rubber muscles in the back gripper grasp a connecting bar and other pneumatic artificial rubber muscles in the suspender hold a trunk of the subject. Pneumatic artificial rubber muscles are newly installed to incline the support device for standing. By means of tipping the suspender to front around the center of the back gripper, the subject wearing the support device for standing inclines to front. Relationship between angular displacement of the suspender and pressure supplied to the pneumatic artificial rubber muscles is examined experimentally. It is shown that the improved pneumatic apparatus is available to assist the motion during the hip strategy judging from trajectories of center of pressure measured by a stabilograph.

Key Words: Pneumatics, Aged person, Hip strategy, Support device, Trajectory of center of pressure, Stabilometer

1. 緒 言

厚生労働省が2014年7月に2013年における日本人の平均寿命を公表した¹⁾。男性80.21歳、女性86.61歳となり、男性の寿命ははじめて80歳を超え、女性は世界一の寿命である。平均寿命の向上に加えて、平均寿命まで健康に生活できることが大切であり、健康寿命に関するつぎの方針が示されている。「日本再興戦略」の第2章2節 戦略市場創造プランに示された、テーマ1:「国民の健康寿命の延伸」にロボット介護機器開発5カ年計画²⁾が述べられている。これをうけて経済産業省と厚生労働省では、ロボット技術の介護利用を具体的に移乗介助、移動支援、排泄支援および見守り支援を重点分野と定め、両省は連携して事業を推進している³⁾。従来の複雑かつ高額なロボットから、単純かつ安価で利便性の高いロボット介護機器の開発をめざし、2025年の需要に応えるように計画している。身体機能の低下した高齢者の移乗介

助、移動支援、排泄支援および介護者の身体の負荷低減のために、高齢者の立位保持は大切な身体的能力である。さらに歩行に向けて、前段階に立位姿勢の保持と外乱に対する姿勢調節の機能が求められる。著者らは立位保持装置⁴⁾とこれを発展した空気圧装置⁵⁾の開発を進めており、静止立位の保持、左右方向への重心の移動および図1(d)のステップング方略が支援できることを明らかにした。しかし高齢者は外乱に対して図1(a)の静止立位を保持するとき、図1(b)の足関節方略に比べて図1(c)の股関節方略を多くとると報告されているが⁶⁾、本空気圧装置にはこの機能がない。そこで本研究では静止立位の姿勢から股関節方略の姿勢に移す支援機能を空気圧装置に付加し、この効果を実験的に明らかにすることを目的とする。

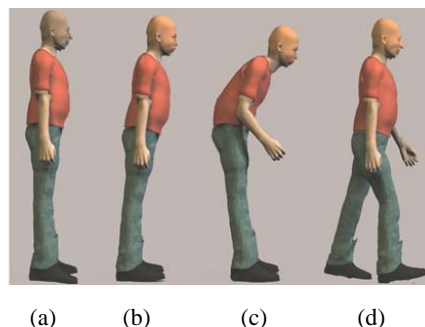


Fig. 1 Standing position and three strategies

* 平成26年8月5日 原稿受付

** 沼津工業高等専門学校 機械工学科
(所在地: 静岡県沼津市大岡3600)
(E-mail: muramatu@numazu-ct.ac.jp)

*** 沼津工業高等専門学校 機械工学科 学生

2. 空気圧装置に加えた機能

空気圧装置は立位保持装置と重心移動装置から構成されている。これら2つの装置の構造については前報⁶⁾に述べているので、本研究で追加した部分について述べる。図2は平行棒に取り付けた空気圧装置の前方部分を断面図示し、被験者にこの装置を装着した状態を示す。空気圧ゴム人工筋肉の一端を立位保持装置のストッパに接続し、さらに他端を平行棒の支柱に固定する。空気圧ゴム人工筋肉 (Festo 社 MXAM-20-AA) を2本並列配置し、供給圧力 $P_2=0.1\sim0.5\text{MPa}(\text{gauge})$ で加圧し収縮する。側方把持部は平行棒を把持している状態であり、前後に移動しない。バックグリッパの供給圧力 P_1 を変えて、バックグリッパに内蔵した4本の空気圧ゴム人工筋肉による連結棒を把持する力を調整する。この後、サスペンダにつないだ空気圧ゴム人工筋肉を加圧すると、静止立位の状態を支援しているサスペンダは前方に傾斜し、このときの角度 θ を測定した。さらに重心動揺計 (アニマ社 GP-5000) を用いて、圧中心の軌跡を測定した。健康な成人男性がサポート、重り、エプロンおよびゴーグルを装着し、擬似高齢者となりこれを被験者とした。

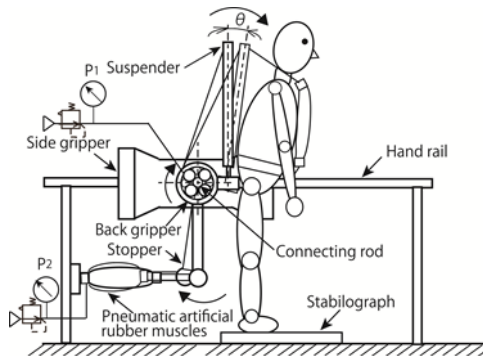


Fig.2 Mechanism for assistance of hip strategy

3. サスペンダの傾斜角

図3にサスペンダの傾斜角 θ と空気圧ゴム人工筋肉への供給圧力 P_2 の関係を示す。供給圧力 P_2 を 0.1 から 0.4MPa(gauge)に増加すると、ストッパを引く力が増加して傾斜角は増加するが、0.4MPa(gauge)以上ではほぼ一定となる。またバックグリッパへの供給圧力 P_1 が小さいすなわち連結棒の把持力が小さいほど、傾斜角は大きい。

4. 圧中心の移動

図4(a)は空気圧装置を装着しないで、被験者が静止立位から股関節方略の姿勢に随意的に変化したときの圧中心 COP の軌跡を示す。COP が不規則に振れる2つの領域があり、前後方向の -2cm 近傍の位置が静止立位であり、

1.5cm 近傍の位置が股関節方略の姿勢の位置である。この2つの領域を結ぶ線が、2つの姿勢に移動するときの COP の軌跡である。図4(b)は空気圧装置を装着した場合 ($P_1=0.3\text{MPa gauge}$, $P_2=0.5\text{MPa gauge}$)の圧中心 COP の軌跡を示す。図4(a)に認められた2つの領域は存在しないこと、2つの姿勢に移動するときの COP の軌跡が図4(a)の2つの領域間の前後方向長さにほぼ等しい。

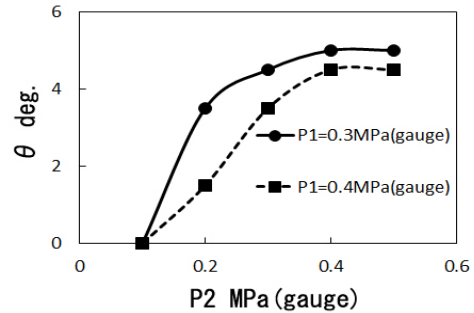
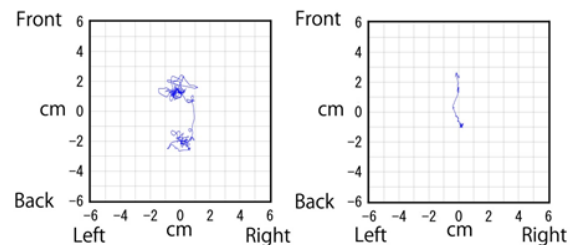


Fig.3 Angular displacements of suspender



(a) (b)

Fig.4 Trajectories of COP

5. 結 言

空気圧装置のストッパに空気圧ゴム人工筋肉を接続し、これによって発生する引張力を活用し、静止立位の姿勢から股関節方略の姿勢に移る支援機能を空気圧装置に追加することができた。今後、空気圧装置のアシストを力学的に検討する。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 25 年簡易生命表の概況，主な年齢の平均寿命，<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life13/dl/life13-02.pdf>
- 2) 内閣府：日本再興戦略，http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/saikou_jpn.pdf, p.68 (2013)
- 3) 厚生労働省：ロボット介護機器開発5ヵ年計画について，<http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-12301000-Roukenkyoku-Soumuka/0000034903.pdf>, p.3 (2003)
- 4) 村松久巳，柴野顕裕，小笠原和也：空気圧ゴム人工筋肉を用いた立位保持装置の開発，平成 24 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集，p.55-57 (2012)
- 5) 村松久巳，山本繁樹，千葉玲央：人間の歩行開始時の運動を支援する空気圧装置の開発，日本設計工学会秋季大会研究発表講演会講演論文集，p.193-194 (2013)
- 6) Horak, F.B., Shupert, C.L., et al.: Components of postural dyscontrol in the elderly :a review, *Neurobiol. Aging*, 10, p727-738, (1989)

内視鏡把持ロボットのためのモーションセンサを用いた 非接触型操縦インタフェースの提案

宮崎良兼*, 菅野貴皓**, 遠藤玄**, 川嶋健嗣**

Proposal of a Non-Contact Type Interface Using a Motion Sensor For Endoscopic Robot

Ryoken MIYAZAKI*, Takahiro KANNO**, Gen ENDO**, Kenji KAWASHIMA**

In recent years, the number of endoscopic surgeries is increasing. One of the problems in endoscopic surgery is the disturbance of endoscopic image due to the jiggling of the scopist's hand. Robotic endoscope holders have been developed to solve this problem. In this work, a user interface is developed to improve the operability of a robotic holder system while keeping surgeons and assistants clean. A non-contact type interface using a hand-tracking device is proposed so that the operator can intuitively command the robot without touching anything. Experimental comparison with other endoscopic manipulation method is conducted to confirm the effectiveness of the proposed system.

Key Words: Pneumatic system, Endoscopic surgery, Surgical robot, User interface, Motion sensor

1. 緒 言

内視鏡外科手術では、スコピストが内視鏡を把持する必要があるため、手ブレによって映像が乱れる、患者の周辺に人が密集する等の問題点がある。これを解決するために、Computer Motion 社¹⁾は、ロボットに内視鏡を把持させることで手ブレを防ぐことを提案した。しかし、内視鏡を操作する際に、不潔部であるコントローラを持つ必要があり、衛生面に課題が残る。只野ら²⁾は手術者が装着するヘッドマウントディスプレイにジャイロセンサを取り付けることで、手術者の頭の動きに合わせて内視鏡を操作するシステムを提案した。問題点を解決していることに加えて、手術者が内視鏡を操作できるため、スコピストが不要になるという面では優れている。しかし、手術者の体にセンサを付ける必要があることや、フットペダルを使用することから手術者の作業が増えてしまう。

先に挙げた関連研究から、ロボットによって内視鏡を把持する手法は有効であるものの操作性の面で課題が残る。そこで本研究では、内視鏡システムにおいて操作者の清潔性を確保し、かつ直感的に操作できることを目的に、モーションセンサを用いた非接触型インタフェースを提案する。本提案システムはマスタスレーブシステムであり、2章・3章でそれぞれスレーブとマスタのシステムについて述べ、4章で評価実験の結果を示す。

* 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科

** 東京医科歯科大学 生体材料研究所

(所在地：東京都千代田区神田駿河台 2-3-10)

2. スレーブ：内視鏡把持ロボット

スレーブには Fig.1 に示すような著者らの研究室で開発されている内視鏡把持ロボットを用いる。このロボットは、内視鏡操作に必要な Up/Down, Right/Left, Zoom In/Out, Roll の 4 自由度を有している。また、空圧制御であるため滑らかな動作が可能である。本システムではマスタから送信された目標速度を積分し、内視鏡先端の目標位置を導出する。これを把持アームの逆運動学演算によって各関節変位の目標値に変換し、逆動力学のフィードフォワード補償を加えた PD 制御によって各関節が発生すべき目標トルクを計算する。目標トルクを空気圧アクチュエータ変位から関節変位までのヤコビアンを用いて、空気圧アクチュエータの目標駆動力に変換する。さらに、目標駆動力を目標圧力に変換し、空気圧センサの値との誤差をフィードバックし、PID 制御則によってサーボバルブを操作することで目標駆動力を実現する。

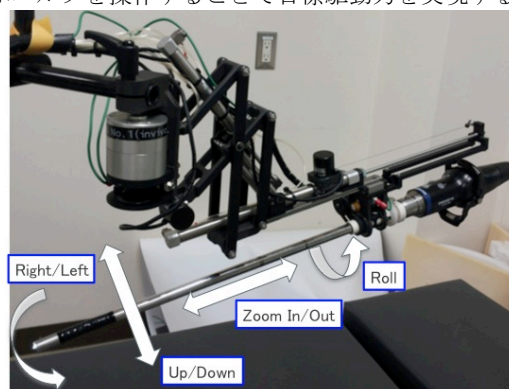


Fig.1 Endoscopic robot

3. マスタ : モーションセンサ

3.1 モーションセンサ

センサに Leap Motion [3] を使用し、取得した右手の座標情報を用いて、スレーブを制御する。このセンサはセンサ中心部を原点 O とした検出範囲内の手の各関節の XYZ 座標を得られる。また、滅菌シートで覆った場合でもセンシングが可能であることを著者らは実験的に確認しており、衛生管理が必要な手術室でも利用可能である。

3.2 右手との連動

Fig.2 はスレーブの 4 自由度動作および Pause と対応する右手の動作である。取得したデータに対して 10 フレーム(約 0.083 秒)分の単純移動平均を求めることで平滑化する。誤作動が生じるのを回避するため、回転動作の後に、前後動作をおこなうなど動作が変わる場合には、20 フレーム(約 0.167 秒)分を読み捨てる。スレーブへは UDP を用いて目標速度を送信する。

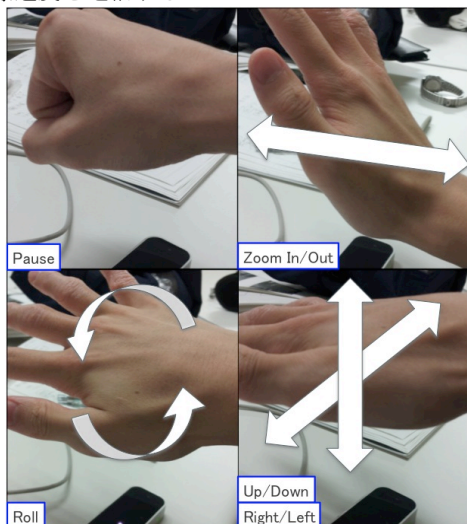


Fig.2 Motion of the right hand for a robot operation

Pause は、手を握った場合とし、各動作の目標速度を 0 とする。

Roll は、手を左右に傾かせた場合とする。判定条件は、掌のなす Roll 角 Φ が閾値を超えていて、かつ親指先端 Y 座標と小指先端 Y 座標の差が 4mm 以上とし、Roll 角の正負に合わせた一定の速度値を目標速度とする。

Zoom In/Out は、手を傾けた状態での手の Z 軸方向の動作とする。判定条件は、掌のなす Pitch 角 θ が閾値を超えていて、かつ中指先端 Y 座標と手首 Y 座標の差が、中指先端と中指第 3 関節の距離より大きい場合とする。このときの手首 Z 座標の変位から求めた移動距離を時間で微分したものを目標速度とする。

Up/Down および Right/Left は、手の Y 軸・X 軸方向の動作とする。他の動作がおこなわれていない場合に動作させ、掌中心 XY 座標の変位から求めた移動距離を時間で微分したものを目標速度とする。

4. 評価実験

4.1 実験方法

被験者はディスプレイに映された内視鏡の映像を頼りに、視界を遮ったドライボックス内の目標を番号順に探す。このときの所要時間を、手で内視鏡を操作した場合、頭に装着したジャイロセンサで操作した場合、本提案システムで操作した場合で比較する。本実験では直感性を評価するために十分なトレーニングをおこなわない。

4.2 実験結果

Fig.3 は被験者 A-E の 5 名による評価実験の結果である。縦軸が所要時間を、横軸に被験者ごとの結果を示す。衛生面を考慮しなければ、手で内視鏡を直接操作するのが最も操作性が良いのは自明である。また、個人差はあるものの、本提案システムとジャイロセンサを比べた場合では同程度の結果を得ることができた。この結果はセンサに触れずに非接触で内視鏡把持ロボットを操作する手法としては、有効であると考えられる。

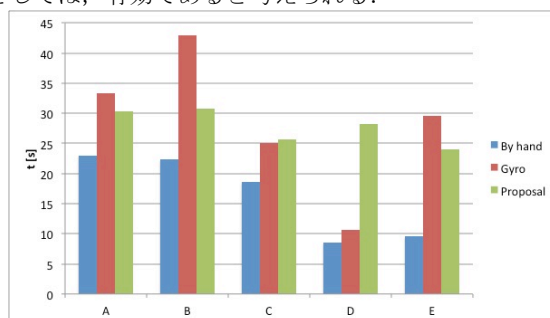


Fig.3 Experimental results

5. 結 言

本論文では、内視鏡外科手術における内視鏡把持ロボットの問題点を解決するため、衛生面と操作の直感性に優れるモーションセンサを利用した操作を提案し、評価実験をおこなった。時間的に優位な結果を得ることができなかったものの、ジャイロセンサを用いた場合と同程度の結果を得られたことから、本提案が有効であると結論付けた。今後の課題として、トレーニングを行った被験者による実験、操作性向上のために情報を視覚的に提示することやスレーブの可動範囲の拡大があげられる。

参 考 文 献

- 1) Sackier JM, Wang W.: Robotically assisted laparoscopic surgery; From concept to development, Surgical Endoscopy, 8, p.63-66 (1994)
- 2) 只野耕太郎, 川嶋健嗣, 田中直文, 小嶋一幸: 空気圧駆動ロボットアームとヘッドマウントディスプレイを用いた立体内視鏡操作システム, 日本医工学治療学会, Vol.24, No.3, p.177-184 (2012)
- 3) <https://developer.leapmotion.com>

手術支援ロボットの体内4自由度鉗子マニピュレータ

菅野貴皓*, 川嶋健嗣*

A 4-DOF Forceps Manipulator for Surgical Robot System

Takahiro KANNO*, Kenji KAWASHIMA*

A novel forceps manipulator for the surgical robot system IBIS is developed. The developed forceps has a 4-DOF mechanism inside the abdominal cavity so that pivoting motion around the entry point is reduced, avoiding the interference with other manipulators, surgeons, or assistants. The 4-DOF motion is realized using two flexible joints which are driven by push-pull wire of Ni-Ti hyper-elastic alloy, which make the mechanism of the forceps simple and thus low-cost and reliable. Since the wire of the forceps are driven by compact pneumatic cylinders, the manipulator is lightweight and achieves high power-to-weight ratio. Since it is difficult to derive the inverse kinematics of the flexible 4-DOF forceps, a velocity-based control law without the calculation of inverse kinematics is proposed. The experimental results show that the proposed methods achieves the good position tracking performance.

Key Words : Surgical robot, Forceps manipulator, Flexible mechanism

1. はじめに

内視鏡手術は、患者の皮膚に10mm程度の穴を開けてそこから内視鏡や鉗子などのツールを挿入して行う外科手術であり、手術後の回復が早いという利点がある。しかしながら、鉗子の操作が難しく視野も狭いため高度な技能が必要とされている。

本研究室では、手術支援ロボットIBISの開発を行っている¹⁾。IBISは空気圧駆動を採用することで、電動モータを用いたda Vinci²⁾などの既存の手術ロボットと比べて大幅な小型化に成功している。また、空気圧を圧力センサで計測することで、臓器と接触したときの力や縫合糸を引っ張る力を検出し、医師に力覚フィードバックをすることが可能となっている。

多くの手術ロボットは、Fig. 1(a)のように体外に4自由度、体内に2自由度というリンク機構を採用しているが、体外の駆動部が医師や他のロボットに衝突するといった課題を抱えている。一方で、Fig. 1(b)のような体内4自由度を有する鉗子を用いれば、体外のロボットの動作を抑えてこれらの課題を解決することが可能である。本研究では、柔軟関節を用いた体内4自由度鉗子を開発し、鉗子先端の位置を制御する手法を検討した。

2. 体内4自由度鉗子

試作した4自由度鉗子は、Fig. 2に示すように2個の柔軟関節からなっている。各々の柔軟関節は β

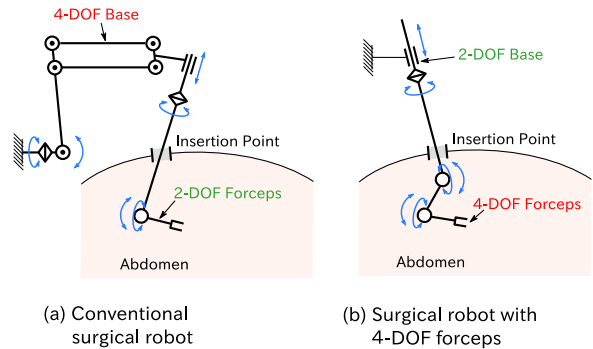


Fig. 1 Concept of 4-DOF forceps manipulator

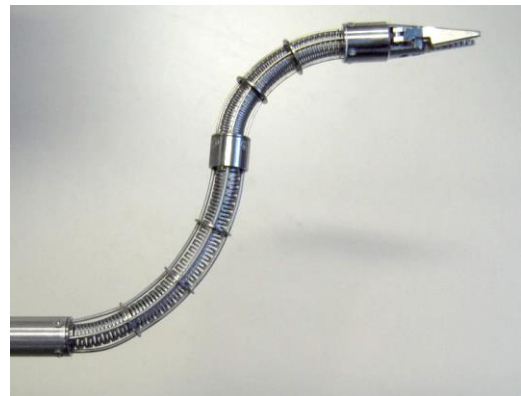


Fig. 2 Prototype of the forceps manipulator

チタンのパイプにスリットを入れたものである。隣り合うスリット同士の角度が90度となるように加工されているため、2方向に曲げることが可能である。この柔軟関節を2個直列に並べることによって合計4自由度の動作を実現している。試作した β チタンパイプは、屈曲が容易なだけでなく、縫合作業などで手首を回すのに十分なねじり剛性を確保して

* 東京医科歯科大学生体材料工学研究所
(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-3-10)
(E-mail: kanno.bmc@tmd.ac.jp)
* Tokyo Medical and Dental University

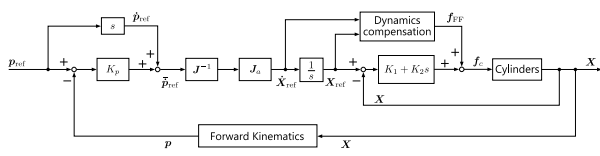


Fig. 3 Velocity-based position controller

いる。

関節の長さは、第1関節が 50 mm、第2関節が 30 mm となっており、100 mm×100 mm×100 mm 程度の可動範囲を実現している。また、鉗子マニピュレータの直径は 8 mm である。挿入方向の並進と手首の回転については、体外の駆動部によって駆動する。

鉗子先端のグリップ部には小型の空気圧シリンダが内蔵されており、パイプの中心を通る空気圧チューブから送られてきた空気によってシリンダを押しこめてグリップを閉じる機構になっている。従来の鉗子ではワイヤなどを用いて開閉を行っていたため、鉗子の屈曲によって開閉用のワイヤが動いてしまい、屈曲動作と開閉動作の干渉が発生していたが、本研究の鉗子では屈曲動作と開閉動作を完全に分離することができる。

従来の2自由度鉗子では、1個の柔軟関節を4本のワイヤを使用して屈曲させていたが、4自由度鉗子を駆動するには合計8本のワイヤが必要となる。本研究で開発した鉗子では、第1関節および第2関節をそれぞれ4本の Ni-Ti パイプと4本の Ni-Ti ワイヤによって駆動する。第2関節を駆動するワイヤが第1関節を駆動するパイプの中を通る同軸構造とすることによって、シンプルな機構を実現している。

また、βチタンパイプの外側数カ所にワイヤと同程度の径の穴が空いたディスクを溶接してワイヤガイドとしている。

3. 4自由度鉗子の位置制御

手術ロボットにおいては、ロボットに医師の手と同じ動きをさせるために鉗子先端の位置を制御する必要がある。従来、IBISの鉗子マニピュレータにおいては、鉗子先端の目標位置から逆運動学計算を行って空気圧シリンダの目標位置を求めてから、求めた目標位置にシリンダの実際の位置が追従するようなフィードバック制御を行っている。

しかしながら、本研究の4自由度鉗子は逆運動学の解を解析的に求めることが困難であり、従来とは異なる制御則を必要とする。本研究では、手先位置からシリンダ位置を求めることができないものの、手先速度とシリンダ速度の関係を表すヤコビ行列が容易に求まる点に着目し、速度ベースの制御系を構築した (Fig. 3)。まず、マスタから送信された目標

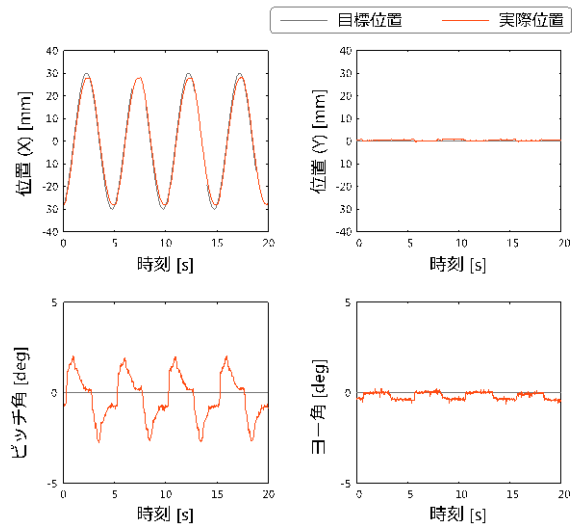


Fig. 4 Experimental results

位置の情報を微分して目標速度を求め、それにヤコビ行列を掛けることでシリンダの目標速度を求める。次に、このシリンダ目標速度を積分してシリンダの目標位置を計算し、シリンダ位置制御を行う。また、速度ベースで制御を行うと速度の積分計算の誤差によって位置がずれるため、目標位置と実際位置の誤差をフィードバックして目標速度を補正している。

提案した制御系を実装して先端の位置を1方向に動かす実験を行った結果を Fig. 4 に示す。数十ミリ秒の追従遅れが見られるものの良好な制御性能を達成している。ただし、鉗子先端で円軌道を描くといった複雑な動作については追従性が不十分であり、制御系の改良が必要である。

4. まとめ

本研究では、手術支援ロボットのための体内4自由度鉗子を開発した。βチタンの柔軟関節を2個結合することで、各関節2自由度、合計4自由度の屈曲が可能な鉗子を試作した。関節の駆動には超弾性ワイヤと超弾性パイプを用いることでシンプルな機構を実現した。また、鉗子先端の位置を制御するために、逆運動学を解く必要のない速度ベースの制御系を提案した。

参考文献

- 1) Tadano, K., Kawashima, K.: Development of a Master-Slave System with Force-Sensing Abilities using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery, *Advanced Robotics*, **1763-1783**, 24/12 (2010)
- 2) Guthart, G. S., Salisbury Jr, J. K.: The Intuitive Tele-Surgery System: Overview and Application, *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, **618-621**, (2000)

CFD を用いた空気圧管路系の流動解析

鈴木智哉*, 村山栄治*, 川上幸男**

Flow Analysis of Pneumatic Tubes by Computational Fluid Dynamics

Tomoya SUZUKI*, Eiji MURAYAMA*, Yukio KAWAKAMI**

In order to operate correctly the complicated pneumatic system, it is necessary to investigate the flow characteristics. Therefore in this research, the geometric model is created for a flow path and performed fluid measurement conducts fluid analysis for the flow of the air in a difficult flow path by Computational Fluid Dynamics. And the flow of air is visualized from an analysis result. Finally, comparison and examination are performed for the flow characteristic by the difference in the flow path.

Key Words: Computational Fluid Dynamics, Pneumatic Tube, Flow Characteristic

1. 緒 言

空気圧機器を使用した空気圧システムは、工場内での FA 化などにより製造業をはじめとした幅広い産業分野において利用されている。そのなかでも、空気圧管路は重要な構成要素の一つである。最近では、空気圧機器の小型化、内部構造の集積化や製造加工コストの削減を目的として、平面に溝を加工し、上部板で密閉し、流路を形成するため、断面が円形でない事例等が多く見受けられる。この場合、機器に組み込まれた空気圧管路の流量特性を把握するには、実験的にこれらの特性試験を行うことは難しい状況となっている。

本研究では、断面形状が円形だけではなく、円形以外の実験による流体計測の困難な種々の管路に対して CFD(Computational Fluid Dynamics)解析を活用して、それらの流量特性について明らかにすることを目的とする。具体的には、CAD により構築した流路解析モデルに対して、CFD シミュレーションを行い、管路内部での流動状況を明らかにすることにより、流路前後での圧力差や流量との関係の導出を行う。対象とする円形以外の管路断面形状は、矩形断面流路(正方形・長方形)、三角形断面流路、楕円断面流路、ボールエンドミル断面流路などであり、最終的には音速コンダクタンス C と臨界圧力比 b との関係を用いて、それぞれの形状ごとに整理することを考えている。ここでは、空気圧流路のなかでも内部流路として広く用いられている円形断面流路の流路解析の結果について報告する。

2. 数値計算法

本研究では、有限体積法を用いた流体解析ソフトウェアである ANSYS FLUENT(ANSYS Inc.)を用いて流動解析を行う。CFD において乱流を数値解析するための数学モデルとして、RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)、LES(Large Eddy Simulation)、DNS(Direct Numerical Simulation)の3つに大きく分類される。なかでも RANS の乱流モデルとして、最も広く有効性が確認された $k-\varepsilon$ モデルを使用して解析を行う¹⁾。また、使用する $k-\varepsilon$ モデルの基礎方程式を(1)~(5)に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\bar{u}_i u_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \right\} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \left(C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \right\} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

ここで、 u :流速、 p :圧力、 k :乱流エネルギー、 ε :乱流エネルギー散逸率、 ν_T :渦粘性係数、 C_μ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 、 σ_ε :モデル定数とする。モデル定数には、一般的に幅広い乱流流れの範囲に対して使われる以下の値を用いる¹⁾。

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (6)$$

3. 解析対象

解析には、Fig.1 に示すような内径 4[mm]、長さ 250[mm]の空気圧管路を流路解析モデルとして作成する。また、管路出口付近での空気の流れを実際の流路環境に近い条件にするため、管路端部に内径 24[mm]、長さ 150[mm]の拡大管部分を設けた。

* 芝浦工業大学大学院理工学研究科
(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)
(E-mail: md13040@shibaura-it.ac.jp)

** 芝浦工業大学システム理工学部
(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)

**, Shibaura Institute of Technology

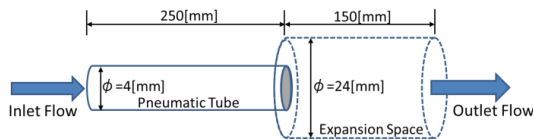


Fig. 1 Model of circular tube with expansion space

4. 流入流量計測実験・CFD 解析条件

CFD 解析を行うにあたり，流入口と流出口の境界条件を規定する必要がある．そのため，Fig. 1 のような内径 4[mm]，長さ 250[mm]の円管路を使用し，Fig. 2 に示すような実験回路を用いて，タンク内に空気を充填，圧力制御弁を 0.5 [MPa(gauge)] に設定し，大気開放の条件で，円管路へ流入する流量計測実験を行った．計測した流量値をもとに，Table 1 に示す解析条件で CFD 解析を行う．

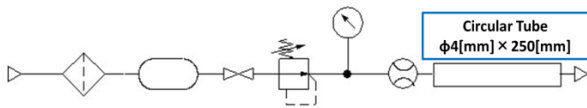


Fig. 2 Pneumatic experiment circuit
Table 1 Simulation conditions

Fluid	Air - ideal gas
Temperature[K]	298
Inlet Mass Flow rate[kg/s]	0.0150
Outlet Pressure [MPa(gauge)]	0
Turbulence Model	Standard k-ε model
Solution Method	Pressure-Based Coupled Solver SIMPLE

5. 結果・考察

流入流量計測実験で計測した値と，CFD 解析によって求めた値の結果を Table 2 に示す．また，CFD 解析により求めた圧力と流速の分布をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示し，管路端部の拡大部分での流速分布図を Fig. 5 に示す．

Table 2 より，実験で計測した値と CFD で解析した値を比較すると，ほぼ近い値である．流入流速や圧力を比較すると，多少のずれがあるが，これは今回の解析には管路内の壁面管摩擦などが解析上で考慮されていないためと考えられる．また，圧縮性流れで断面積一定の管路部分では，マッハ数 1 で臨界状態となる³⁾．Fig. 5 の流速分布の結果を見ると，圧縮性流れの管路内部流れの傾向を CFD 解析でとらえられていると考えられる．

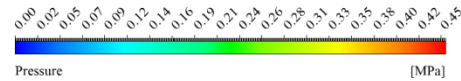


Fig. 3 Result of simulated pressure

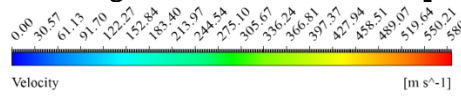


Fig. 4 Result of simulated velocity

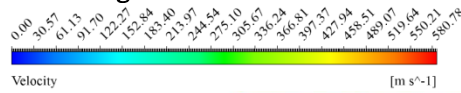


Fig. 5 Result of simulated velocity in expansion space

Table 2 Result of experiments and simulations

	Experiments Values	CFD Results
Inlet Mass Flow rate[kg/s]	0.0150	0.0150 Boundary condition
Outlet Mass Flow rate[kg/s]	0.0150	0.0151
Inlet Velocity[m/s]	139.4	164.2
Inlet Pressure [MPa(gauge)]	0.5	0.451
Outlet Pressure [MPa(gauge)]	0	0 Boundary condition

6. 結 言

今回は，円管路を流路解析モデルとして構築し，実験値と CFD 解析の比較を行いながら，流動状況を可視化することが出来た．今後は，矩形や三角形などの断面形状の異なる流路についても流動状況を調べて，音速コンダクタンス C と臨界圧力比 b の関係を使って，断面形状ごとに流量特性の検討を行う予定である．

最後に本研究を実施するにあたり SMC 株式会社よりご支援を賜ったことを記し，謝辞に代える．

参考文献

- 1) H.K.Versteeg,W.Malalasekera : An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 森北出版, pp.43-85, (2011)
- 2) 小林敏雄, 富樫盛典: バックステップ流れにおける乱流モデルの比較, 日本機械学会論文集, No.93-0633, 71-78, (1993-11)
- 3) 松尾一泰: 圧縮性流体力学, 理工学社, pp.64-65, (1994)

等温化容器を用いた差圧センサーの動特性試験装置の開発

○阪本大介^{*}, 尹鍾皓^{**}, 香川利春^{***}

Development of Dynamic Characteristic Tester of the Differential

Pressure Sensor using Isothermal Chamber

Daisuke Sakamoto^{*}, Chongho Youn^{**}, Toshiharu Kagawa^{***}

This paper reports a newly developed pneumatic pressure wave generator. The developed pressure wave generator responds to the requirement of the dynamic calibration of pressure sensors that must detect small differential pressures. A closed chamber of about 200 milliliters capacity is filled with air and stuffed with a thin metal wire bundle. A small piston is inserted to the cabinet. When the piston moves, the pressure in the chamber changes correspondingly. The stuffed wire bundle has a large heat capacity which absorbs generated heat by air compression. Consequently, the air temperature in the chamber is kept almost constant; hence the pressure amplitude becomes unchanged by the change of frequency of the piston motion. Experiments are performed with various volume of stuffed wire, whose range is from zero to ten percent of the box space, and with various frequencies of piston motion.

Key Words : Dynamic calibration, Pressure sensor, Isothermal chamber

1. はじめに

一般に、圧力計の静特性測定は、規格も整備されているし、測定ないし検定のための標準機も確立されている。一方、動特性の測定、検定方法は標準化されていないが、多くの研究¹⁾がなされており、また、変動する圧力の検出に用いる圧力センサでは、構成要素の固有振動数を十分高くしておけば、ある程度の周波数までは、静特性と同じ特性が期待できるから、メーカーなども固有振動数の記載ですませている。研究されている動特性試験の方法は数百ヘルツから数千ヘルツと、比較的高い周波数に関するものがほとんどである。一般的な単一圧力を測定する場合は、これで良いのであるが、微圧ないし微差圧センサでは問題が生じる。それは、微差圧ないし微圧を検出するためには、ダイアフラムなどの剛性を大きくできず、したがって固有振動数が低くなるからである。圧力計が変動する微小な差圧を正しく検出しているか否か、を知るためには、まず信頼できる基準圧力信号を発生させる必要がある。本研究で開発する正弦波発生装置は、この要求に応じる基準圧力信号を発生させるものである。この装置では、Fig. 1 に示すように、容器に空気を閉じ込め、その

容器に小さなピストンをはめて、ピストンの往復運動により、制御された圧力変動を生じさせる。この場合には、ピストンの往復運動は容器内空気の体積変化を生じさせるから、ボイル・シャルルの法則にしたがう圧力と温度の変化が生じる。温度は容器との熱交換を通じて周波数の影響を受ける。もし温度を一定に保てれば、体積変化に応じる圧力変化の予測が正確に行える。先行研究において、川嶋、舟木らは容器内に金属線を詰めることで、容器内の空気をほぼ等温に維持できることを示した²⁾³⁾。そこで、本研究においても、容器内に熱容量が大きく、伝熱面積の多い物質（金属ウール、Fig. 1 参照）を充填して、容器内空気の温度変化を十分小さくして、周波数に依存しない圧力変化を発生させようとする。この場合には、充填量などにより、入力であるピストン変位に対する、圧力の振幅や位相がどのようになるかを明らかにしなければならない。ここで試作した例では、50Hz までの実験範囲において、振幅が一定で、位相ずれが許容できる程度のパラメータ選定を行うことができたので、その結果を報告する。

2. 非定常微圧発生装置験

製作した非定常微差圧発生器を Fig. 2 に示す。本装置は電動機、ピストン駆動部及びピストン、シリンダーから構成される。ピストンの駆動方式はスライダ・クランク機構を用い、ピストンの駆動速度は電動機の回転速度により制御する。電動機軸とクランクはカップリングにより結合されており、クラン

^{*}東京工業大学メカノマイクロ工学精密工学研究所
(〒226 - 8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)
(E-mail: sakamoto.d.aa@m.titech.ac.jp)

^{**}東京工業大学精密工学研究所

^{***}東京工業大学総合理工学研究科

クは電動機と同期して回転する。クランクは軸中心のずれ L_c が 1 mm となる二つの軸から構成されており、片側の軸を電動機軸に、もう一方の軸をシャフトに接続する。シャフトには二つのベアリングを中心距離 L_s が 100 mm になるように取り付けられており、ベアリングを通じてクランクとピストンを接続している。モータの回転速度を一定に制御することで、ピストン変位を正弦波状に変化させることができる。

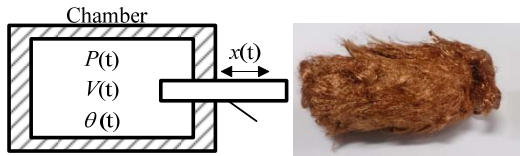


Fig. 1 Schematic of isothermal chamber

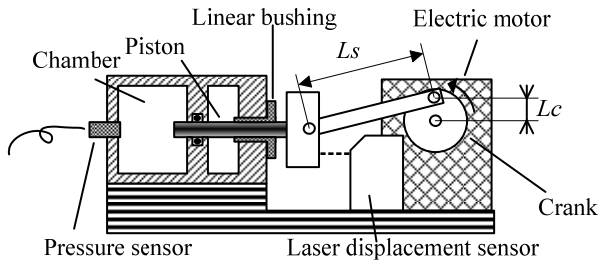


Fig. 2 Experimental setup

3. 実験結果

充填材には線径は 20 ミクロンの被覆銅線を用いる。また、充填率は 0~10%まで変化させる。それぞれの充填率において、周波数:1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 Hz でピストンを動かし、シリンダー内の圧力及びピストンの変位を計測した。サンプリング時間は 1~10Hz で 1ms, 15~50 Hz で 0.1ms とした。Fig. 3 に測定結果の一例として、銅線をシリンダ容積の 1% 充填し、ピストンを 50Hz で往復運動させた場合の圧力応答を示す。図より、圧力はピストンの駆動周波数で変動しており、概ね正弦波で変化していることがわかる。図には微小な高調波が重なっているが、これは静止中も見られるので、計測系で生じているノイズである。これ以外は正確な正弦波となっていることを周波数解析で確かめてある。圧力センサで測定した圧力、 P_{exp} 、及びピストン変位から推定される等温変化時の圧力波形、 P_{iso} 、を周波数解析し、振幅を求めた。

それぞれの充填率において横軸に周波数、縦軸に圧力振幅の比を取り、まとめたものを Fig. 4 に示す。図より、 P_{exp} と P_{iso} の振幅比は周波数の増加に伴い大きくなり、充填率の増加に伴い小さくなることわかる。

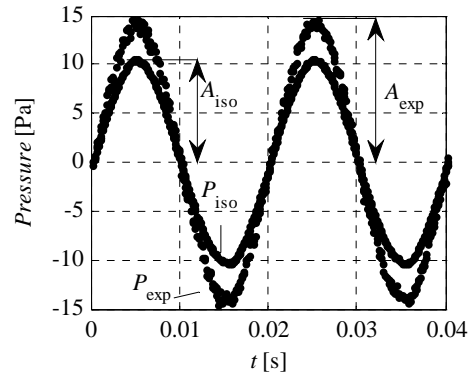


Fig. 3 Pressure wave with 1% wire

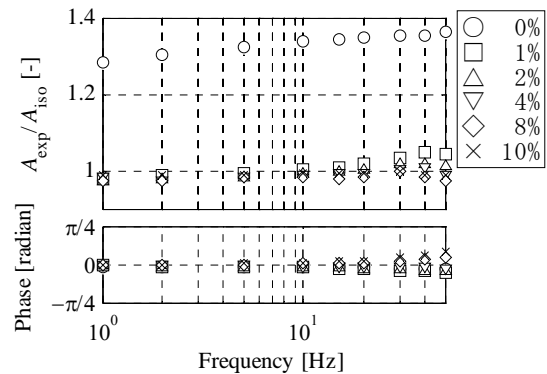


Fig. 4 Pressure amplitude ratio (P_{exp}/P_{iso}) with wire

4. まとめ

線径 20 ミクロンの銅線を用いて、容器内の銅線の充填率を 0~10%まで変化させ、微小容積変化時の容器内圧力を計測した。

その結果、充填率の増加に伴い、容器内の圧力変化が等温に近づくことが確認した。大気圧下において本装置を用いて発生した圧力は、ピストン変位から推定が可能であり、計測したピストン変位をリファレンスとして、圧力センサの微圧変動における動特性試験が可能であることがわかった。

参考文献

- 1) T. Fujiyoshi, Experimental Manufacture of Hydraulic Pressure Pulsator for Measuring Frequency Characteristics of Pressure Transducers, Journal of Japanese society for Non-Destructive Inspection (1994)
- 2) Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, Unsteady flow generator for gases using an isothermal chamber, Measurement 33 (2003) 333-340.
- 3) Tatsuya Funaki et al., Generator of variable gas flows using an isothermal chamber, Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 835