

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

システム

Mar. 2024 Vol. 55 No. 2

特集 「触覚技術と応用技術」



The 12th JFPS International Symposium on Fluid Power

HIROSHIMA 2024

2024

October
22-25

Tue.

Fri.

URL <http://www.jfps.jp/net/I2thjfps/>

On behalf of the Japan Fluid Power System Society (JFPS), we are pleased to announce the 12th JFPS International Symposium on Fluid Power, Hiroshima 2024.

The first symposium was held at Tokyo Institute of Technology in 1989. Since then, every three years, the JFPS International Symposium on Fluid Power has been held. The last one was managed to be held in 2021 during the pandemic, thanks for the great cooperation of the participants.

The next symposium will be held in Hiroshima-city during October 22 to 25, 2024. The symposium will be addressing recent developments in fluid power technologies including oil-hydraulics, pneumatics, water hydraulics and functional fluids, and will include presentations on basic researches, applications and case studies. State-of-the-art exhibitions of fluid power systems and components will place special emphasis on industrial applications and their engineering backgrounds. Organized oral and poster sessions will be provided a valuable forum of exchanging ideas and opinions on current and newly developing technologies for researchers and engineers from all over the world. In this symposium, the Best Paper Awards and Young Talent Student's Paper Awards for the best papers and presentations for a high potential will be instituted for the presenters. Hiroshima is located to the west of the main island of Japan and is a modern city that has undergone a miraculous reconstruction after World War II. The conference venue is in a very convenient location, next to Peace Park and close to downtown. We look forward to seeing you in Hiroshima in 2024.

Yukio Kawakami

General Chairperson : Prof. Yukio KAWAKAMI
Shibaura Institute of Technology

Key Dates

Deadline for Abstract submission : March 1, 2024
Notification of Abstract acceptance : April 1, 2024
Deadline for Symposium Paper submission : May 1, 2024
Notification of Final Symposium Paper acceptance : July 1, 2024
Early registration on or before : August 1, 2024

Venue

International Conference Center Hiroshima
<https://www.pcf.city.hiroshima.jp/icch/english.html>

Call for Papers

Prospective authors for technical sessions must first submit abstracts for consideration. The prescribed format for the abstract will be used for screening. All abstracts must be submitted by March 1, 2024.

The abstracts will be initially screened based on the content and merits. We also invite our colleagues who are new to these fields to participate in this symposium. The authors of the accepted abstracts will be requested to submit the symposium paper and presentation video by the deadlines. Each paper accepted by the symposium will be accessible for a limited time to registered participants. The selected papers will be recommended for publication in the JFPS International Journal of Fluid Power System (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jfpsij>). If your symposium paper is selected as a recommendation paper or if you submit your paper to the JFPS Journal, the symposium paper will be excluded from the proceedings published after the symposium, and you will be requested to rewrite your paper as a journal paper according to the Instructions to Authors of the JFPS Journal.

Key Dates

Deadline for Abstract submission: March 1, 2024
 Notification of Abstract acceptance: April 1, 2024
 Deadline for Symposium Paper submission: May 1, 2024
 Notification of Final Symposium Paper acceptance: July 1, 2024
 Early registration on or before: August 1, 2024
 Deadline for Video submission: September 1, 2024
 Symposium: October 22-25, 2024

Abstract Submission

Abstracts can be submitted through the symposium website (<https://www.jfps.jp/net/12thjfps/>). Please contact the Paper Submission Office for any problems or questions regarding abstract submission. The contact address is provided on the abstract submission page.

Author Participation

The organizing committee requires at least one of the authors to attend and present their own paper at the symposium.

Event Schedule (Tentative)

Oct. 22nd	PM	Welcome reception
Oct. 23rd	AM	Opening ceremony and Invited lectures
	PM	Sessions, Exhibition
Oct. 24th	AM	Sessions, Exhibition and Invited lectures
	PM	Sessions, Exhibition, Banquet
Oct. 25th	AM	Sessions
	PM	Sessions, Closing ceremony

Social events participation are for free.

Venue

International Conference Center Hiroshima
 1-5, Nakajime-cho, Naka-ku, Hiroshima JAPAN
 Map URL : https://www.pcf.city.hiroshima.jp/icch/e_access.html



■ The International Conference Center Hiroshima

Registration Fee

Category	Early registration	After early registration
Presenter	¥ 100,000-	Pre-registration only
Presenter (Student)	¥ 60,000-	Pre-registration only
Co-author, Chair, Participant	¥ 100,000-	¥ 120,000-
Student	¥ 60,000-	¥ 75,000-

Topics

The organizing committee of the 12th JFPS International Symposium is soliciting participants for oral and poster presentations during sessions on the categories of fluid power systems based on oil hydraulics, pneumatics, water hydraulics, and functional fluids. The topics of interest for the symposium include, but are not limited to, the following:

- Aeronautics, space, and marine
- Application of control theory
- Aqua drive and water hydraulics
- Automobile
- Basic theory and technologies
- Cavitation and fluid mechanics
- Components and systems
- Construction, mining, and agriculture
- Energy saving and clean energy
- Environmental friendliness
- Functional fluids
- Human-machine systems
- Hydraulic fluids
- Information technology
- Injection molding and manufacturing machines
- Medical and welfare equipment
- Micro/nano machines
- Noise and vibration
- Robotics and mechatronics
- Simulation and modeling
- Tough robotics
- Transformation of fluid power
- Tribology, seals, and contamination control

The organizing committee is also planning the following organized sessions:

- Green and smart hydraulics
- Soft actuators

and the related subjects.

Awards

During the symposium, the organizing committee of the 12th JFPS International Symposium on Fluid Power will award the Best Paper, Best Student Paper, and Student Presentation for the pioneering work in the field of fluid power. The committee expects the authors to apply for the awards (the Best Student Paper and Student Presentation are only for students). If you apply for the awards or recommendations to the JFPS Journal, you must create a symposium paper of 6-12 pages and submit the presentation video by the deadline.

Call for Commercial Exhibitions

During the symposium, the room for commercial exhibitions will be open. Manufacturers and dealers are welcome to present their own products in current and new technology in fluid power systems or components, simulation software, and advanced measurement instruments. The fee for 1 booth is ¥ 100,000.

If you are interested in exhibiting, please contact the secretariat for details.

Secretariat

The 12th JFPS International Symposium, Hiroshima 2024
 E-mail : hiroshima2024@jfps.or.jp

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目次

特集「触覚技術と応用技術」

【巻頭言】

「触覚技術と応用技術」発刊にあたって 兵藤 訓一 54

【解説】

空中超音波による触覚フィードバック 篠田 裕之 55

空気圧駆動機構を用いた人工指による材質認識システム 吉満 俊拓 59

繊細ハプティックデバイスの実現を目指したMR流体デバイスとその評価法の開発
菊池 武士 64

力触覚技術とその土木分野へ応用 野崎 貴裕 68

建設重機の臨場感のある遠隔操作の実現を目指して 江沢 迪和 72

VR/AR空間におけるフルードパワーを用いたウェアラブルな全身型力覚提示システム
澤橋龍之介, 中村 太郎 76

【会議報告】

日本機械学会2023年度年次大会におけるフルードパワー技術研究 吉田 和弘 81

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る—過去の経験が今につながる— 栗 奉憲 83

笑顔で活躍—お仕事フルードパワー便— —これまでの進学選択を振り返って— 渡邊 悠希 86

【企画行事】

2023年度オータムセミナー開催報告「環境負荷の低減を進める空気圧システム」 飯田 知良 88

2024年度企画行事紹介 桜井 康雄, 小林 亘 90

【会告】

共催・協賛行事のお知らせ 71

理事会・委員会報告	92
会員移動	93
2024年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー「触覚技術と応用技術」	93
2024年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」	93
次回予告	94

■表紙デザイン：浅賀 美希 勝美印刷㈱

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Haptic Technology and Applied Technology"

[Preface]

On the Special Issue "Haptic Technology and Applied Technology"	Norikazu HYODO	54
---	----------------	----

[Review]

Tactile Feedback Using Airborne Ultrasound	Hiroyuki SHINODA	55
Material Recognition System with an Artificial Finger Using a Pneumatic Tendon-Driven Mechanism	Toshihiro YOSHIMITSU	59
Development of Measurement Procedure on Magnetorheological Fluid Device for Fine Haptic Interface	Takehito KIKUCHI	64
Real Haptics Technology and its Application in the Field of Civil Engineering	Takahiro NOZAKI	68
Aiming to Realize Realistic Remote Control of Heavy Construction Equipment	Michika KOZAWA	72
Wearable Full-body Force Feedback System Using Fluid Power in VR/AR Space	Ryunosuke SAWAHASHI, Taro NAKAMURA	76

[Conference Report]

Researches of Fluid Power Technologies in Mechanical Engineering Congress, 2023 Japan	Kazuhiro YOSHIDA	81
---	------------------	----

[Topics]

Senior talk to students—Past Experiences Lead to the Present—	Yoshinori SHIZUKU	83
Active with a smile! —Report on Fluid Power's work- Reflecting on Previous Career Choices	Yuki WATANABE	86

[JFPS Activities]

The Report of JFPS Autumn Seminar in 2023	Tomoyoshi IIDA	88
Introduction of Events of JFPS in 2024	Yasuo SAKURAI, Wataru KOBAYASHI	90

[JFPS News]

71, 92, 93, 94

「触覚技術と応用技術」 発刊にあたって

著者紹介



ひょう どう のり かず
兵 藤 訓 一

東京計器株式会社
〒327-0816 栃木県佐野市栄町1-1
E-mail : n-hyoudou@tokyo-keiki.co.jp

1993年株式会社トキメック（現 東京計器株式会社）入社、油圧機器・システムの開発・設計に従事、日本フルードパワーシステム学会の会員

近年IoTやDXの普及、そして働き方改革や労働者不足など、人への安全や作業効率の改善に向けた取り組みとして、機械の遠隔操作の向上は欠かせない技術となっている。

この遠隔操作に欠かせない技術として、人が感じる触覚のデータ化はさまざまな業界で期待されている。触覚技術（ハプティック技術）は、ゲーム業界やエンターテインメント業界で広がりを見せているが、この技術をフルードパワーへ応用することで、フルードパワーへの新しいユーザインターフェースの可能性が広がると思われる。

本特集号では、触覚技術の紹介とフルードパワーへの応用例などについて、各分野でご活躍されている研究者や技術者の皆様に解説記事を執筆いただいた。

はじめに、篠田裕之氏（東京大学）には、「空中超音波による触覚フィードバック」と題して、空中超音波による非接触での触覚提示技術をご紹介いただいた。本解説では、触覚提示技術の現状をまとめ、フルードパワーシステムの制御への活用可能性について解説していただいた。

吉満俊拓氏（神奈川工科大学）には、「空気圧腱駆動機構を用いた人工指による材質認識システム」と題して、空気圧ロボットを対象とした人工指でリアルタイムに識別できる材料認識システムをご紹介いただいた。本解説では、ヒトが物に触れた時に感じる質感を「質感因子」とし、空気圧腱駆動機構を用いた人工指にてヒトのような触覚感性を持つ認識

システムを解説していただいた。

菊池武士氏（大分大学）には、「繊細ハプティックデバイスの実現を目指したMR流体デバイスとその評価方法の開発」と題して、MR流体デバイスとその評価方法をご紹介いただいた。本解説では、MR流体、およびMR流体デバイスの性能評価において、特にハプティックデバイスの開発に関連する項目について紹介し、測定方向や既存のデータを使う際の注意点（難しさ）について解説していただいた。

野崎貴裕氏（慶應義塾大学）には、「力触覚技術とその土木分野への応用」と題して、力触覚技術の概要についてご紹介いただいた。本解説では、力触覚技術を土木分野における活用の可能性について解説していただいた。

江沢迪和氏（株式会社大林組）には、「建設重機の臨場感のある遠隔操作の実現を目指して」と題して、建設重機の遠隔操作に対する「リアルハプティクス技術」事例をご紹介いただいた。本解説では、これまでのロボットハンド等に活用されているリアルハプティクス技術は操作器と作業装置が共に電動駆動機構で構成されているものに対して、油圧と電動の駆動機構間で力触覚を伝送するシステムを解説していただいた。

最後に中村太郎氏と澤橋龍之介氏（中央大学）には、「VR/AR空間におけるフルードパワーを用いたウェアラブルな全身型力覚提示システム」と題して、フルードパワーを用いたウェアラブルな全身型力覚提示システムをご紹介いただいた。本解説では、その装着型装置について提示対象の身体部位ごとに、装着概要と応用したVRコンテンツを解説していただいた。

本特集号で紹介した事例が今後ますます発展することを期待すると共に、フルードパワー技術のさらなる社会貢献を期待する。

最後に、ご多忙にもかかわらずご寄稿頂いた執筆者の皆様に深く感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。

（原稿受付：2024年1月22日）

解説

空中超音波による触覚フィードバック

著者紹介

しのだ ひろ ゆき
篠田 裕之東京大学
〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5
E-mail: hiroyuki_shinoda@k.u-tokyo.ac.jp

1990年東京大学大学院修士課程修了。同大学助手、東京農工大学講師、助教授を経て、2013年東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。ハプティクス、物理情報学などの研究と教育に従事。計測自動制御学会、日本バーチャルリアリティ学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

近年、空中超音波による非接触での触覚提示技術が注目を集めつつある。個体デバイスへの機械的接触を前提とする従来の触覚提示では、皮膚の広い範囲に多彩な分布触覚を再現するのは困難であると考えられていた。近年の超音波触覚提示技術は、そのような分布触覚再現を可能にしつつある。空中での触覚提示技術が提案された2008年当時はその提示力が弱く、特殊な振動感覚が感じられるのみであった。しかし近年、比較的強くしっかりとした圧覚まで再現できることが改めて見出され、その分布を制御することで多様な触感が再現できることが実証されてきている。本稿ではこのような触覚提示技術の現状をまとめ、フルードパワーシステムの制御への活用可能性について考察する。

2. 超音波触覚提示のこれまで

超音波による触覚提示は2008年に東京大学で実証された¹⁾。超音波による非接触触覚提示と空中映像を同期させたデモが2009年にはじめて行われ^{2),3)}、2013年にはブリストル大学で多点提示のアルゴリズム⁴⁾が提案されるとともに有力なベンチャー企業、Ultrahaptics (のちにUltraleap) が設立された。さらに2015年ごろまでに空中ボタンやアイコンを、触覚フィードバックを感じながら操作する「空中触覚タッチパネル⁵⁾」、プロジェクタ映像と非接触触覚を重畳する「触覚プロジェクタ^{6),7)}」さらに3次元映像と空中触覚提示を同期させた「視触覚クローン⁸⁾」などが実演展示された。

当時は「非接触にもかかわらず触覚が感じられ

る」という意味で注目されたが、再現される触覚は、現実の物体の接触とはかなり異なる特殊な感覚に限定されていた。弱い振動が感じられることはあっても、現実の物体に触れたときのようなリアリティの高い触覚提示は困難と考えられていた。そのような中、2018年からJST CREST「実体化映像」プロジェクトが実施された^{9),10)}。インタラクティブな空中映像に触覚を付与し、空中映像に物理的実体感を付与することを目指したプロジェクトであり、これによって触覚提示技術が大きく進展した。提示可能な触感の幅が大きく広がり、一定程度の万能性を有する触感再現が可能になりつつある。

3. 空中超音波触覚提示技術のポイント

3.1 触感を強める

超音波触覚提示の初期において、生成される放射圧が小さいことは最も重要な問題であった。放射圧は、その反射面上での音響エネルギー密度に比例しており、提示箇所での音圧を高めることで提示力が増大する。しかし超音波発生素子の出力強度を高めさえすれば目的が達せられる訳ではないので注意が必要である。文献¹¹⁾⁻¹⁴⁾に指摘されているように、空中超音波が平面波として伝搬できる音圧には上限が存在する。すなわち音源からある距離だけ離れた地点で観測すると、音源の振幅を増大しても観測音圧が頭打ちになる飽和現象が報告されている。この上限値の存在は、音圧が意図せず過大になる危険を遠ざけ、安全性を高めてくれる一方で、触覚提示力の限界を示す数値ともなる。この限界値を引き上げるための実用的方法は、多方向から（広角から）超音波を集束させることであり¹⁵⁾、この集束角度が十分大きければ、 10^4Pa を超える焦点音圧も生成可能であることが実験で確認されている¹⁶⁾。したがって、著者らの研究室では、当面装置が大がかりになる不利益については目をつむり、大面積フェーズドアレイによってなるべく高い音圧分布を形成しながら実験を行った。以下で紹介するのは、主にそのような大型フェーズドアレイを用いて得られた成果である。

3.2 圧力分布の物理的再現

空中超音波による触感再現のためにまず必要となるのは、仮想物体と皮膚との接触状態に応じた力分布を

想定どおりに再現する技術である。多点への集束技術としては、Carterらの研究⁴⁾に続いてGerchberg-Saxton (GS) アルゴリズム¹⁷⁾やLevenberg-Marquardt (LM) 法¹⁸⁾などを適用した有力な方法が提案されている。このときの一つの制約は、デバイスが発生できる放射圧に余裕がなく、すべての超音波素子をフル稼働させる必要がある、ということである。発生すべき音圧分布からフェーズドアレイの駆動パターンへの逆問題を解いた結果、フェーズドアレイの一部の素子だけが強く出力する駆動パターンが得られた場合を考えてみよう。この駆動パターンに比例し、かつすべての素子の出力が定格に収まるように振幅を決定すれば、そのとき送出される総音響パワーは、各素子が最大振幅で駆動される場合よりは常に小さくなる。そして音響パワーの小ささは、そのまま放射圧による力の総和の小ささを意味する。そのため、各素子の駆動振幅は一定としながら、位相だけを変化させて所定の放射圧分布を形成できれば、最大印可力を大きくする意味でもっとも望ましいことになる。このような駆動は可能であろうか？

上記のような制約のもとでも良好な解が得られるアルゴリズムが現実提案されており、前述のGSやLMを含む手法が松林らの文献¹⁸⁾にまとめられている。各素子の駆動振幅が一定、というのは一見非常に強い制約であるが、ターゲット上で放射圧が所定の値になっていればよく、超音波位相は任意であってよい、という自由度がこれを可能にしている。

周波数40kHzの超音波を用いる場合、その波長は8.5mm程度である。ワークスペースを取り囲むようにフェーズドアレイを配置した場合には半波長程度まで集束させることができるため、指先上にも圧力分布を作り分けることが可能である。図1(a)のような平面への接触分布だけでなく、超音波の回折も考慮しつつさまざまな局所形状を再現できることが、松林らによって示されている¹⁹⁾。図1(b)に示す研究では、指が柔軟体に接触する際の接触面積変化の違いによって弾性の差異を提示できることも検証されている²⁰⁾。

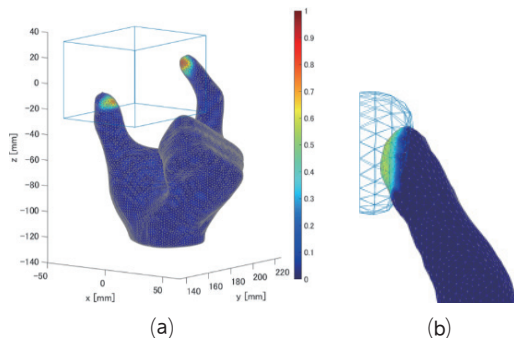


図1 指先の圧力分布再現 [19][20]

3.3 圧覚の提示

空中超音波による提示力には実用上の限界があり、仮想物体との接触深さに応じた力をそのまま印加するだけでは触感の一部しか再現できない。特に圧覚、すなわち時間的に緩やかにしか変化しない力については感覚のしきい値を超えることができず、その感覚の提示は困難と考えられていた。そのため、初期の触覚提示は振動刺激に限定されており、たとえばその圧力を200HzでAM変調する方法が多用されていた。ただしここで感じられるのは明らかな「振動覚」であり、物体に静かに触れたり把持したりする際に感じられる触感とは異なるものであった。

最近の森崎らの研究により、LM変調 (Lateral Modulation)²¹⁾において、その変動周波数を10Hz以下に設定し、さらに焦点変位のステップを十分細かくして余計な振動成分が発生しないようにすることによって、疑似的な圧覚が得られることが明らかになった^{22), 23)}。十分に注意を向ければ完全には静止していないが、体感的にはかなり圧覚に近い感覚が再現される。皮膚上のある領域に、物理的に定常な圧力を与えた場合、その感覚は順応によって時間とともに弱くなる。それに対してこの疑似圧覚は、刺激を与えている間、その知覚強度を維持する。そのとき体感される圧覚を、実際の圧覚と比較してもらうと、物理的に受けている力よりも数倍以上大きい力を感じることが確認できる。順応が進んだ静圧と比較した場合には、それよりもさらに大きな静圧と感じられる。

圧覚が再現されるようになったことで、力学量に起因する触感要素が一通りそろったことになる。すなわち物理的な印加力と空間解像度には一定の制約があるものの、その範囲で一種の万能性をもって触感を再現するための要素がそろったといえる。

3.4 冷覚の提示

触感を構成している物理的刺激の主要構成要素は力学的作用と熱的作用である。物体に触れたときの温度変化によって、熱伝導度の違いを見分けることができ、それが質感の知覚に重要な役割を果たしている。また接触物体から伝わる温度の情報は、触覚の印象やメンタルな効果に強く影響するパラメータでもある。非接触での皮膚温度上昇は、そのため、赤外線などの照射によって皮膚温度を上昇させる手法はすでに提案されていたが²⁴⁾、非接触での冷覚提示は困難と考えられていた。それに対して近年、水の常温ミストが漂う中で皮膚に超音波を集束させると、皮膚表面付近の気化熱によって図2のように冷却が生じることが中島らによって確認されている²⁵⁾。図2の例では、超音波照射の直後から0.5sの間に3Kの温度低下がみられ、これは一般的なペルチェ素子などによる冷却と比べて遜色のない冷却速

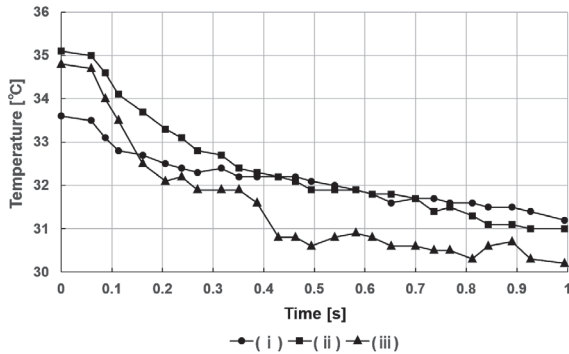
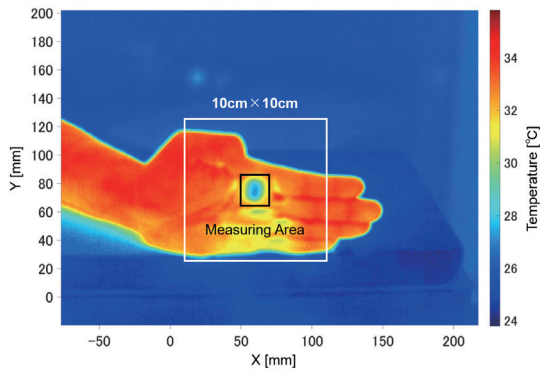


図2 ミストと超音波による冷覚の提示. 下のグラフは超音波照射直後からの皮膚表面温度を示す. 文献25)から転載

度である. また, 焦点位置制御により冷却スポットを移動し, その移動を知覚可能であることも確認されている.

4. マニピュレーションへの適用

前章において, 正確な圧力分布再現をするための要件, 静的な圧覚に対する人間側の感度低下をカバーする手法, さらに温度の感覚も超音波で提示する方法を示した. この技術は手の周囲を取り囲む全方位型のフェーズドアレイ配置でも実証されており, 任意の方向から接触したりVR物体を把持したり, ということもある程度可能になっている. 図3はそのようなデモの一例である.

これらの触感再現は, 柔らかい物体との接触, あるいは硬いものであってもそれがごく軽く触れる状況の再現に限定されている. そのため現時点の応用分野としては, コンピュータインタフェースやエンターテインメントなどが想定されることが多い. 触覚フィードバック応用の王道の一つである, 遠隔マニピュレーションへの適用は, まだ本格的には検討されていない.

物体を操作する場合, 操作がもっとも容易になる反力の範囲が存在する. 反力が強すぎると思い通りの速度で動かすことができず, 疲労もしやすい一方, 軽すぎると意図せずに動かしてしまったり, ホームポジションが定まらなくなったりすることで逆に操

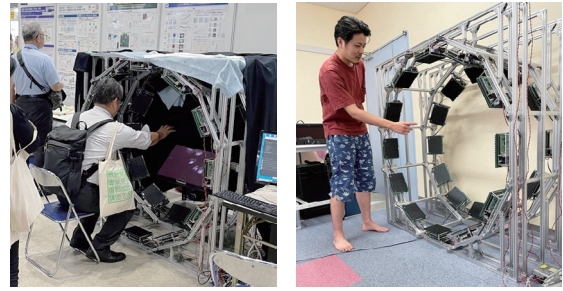


図3 イノベーションジャパン2023での展示(左)と装置外観(右). VR物体を全方向から触り, 実体感を感じることができる.

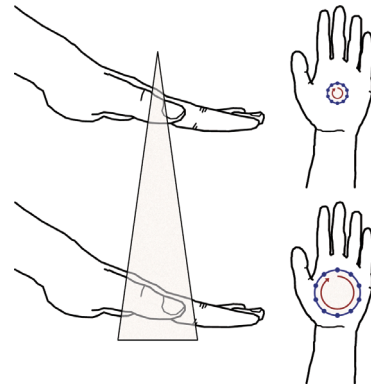


図4 触覚刺激による手の位置の提示. 文献27)から転載.

作しにくく, 疲れやすくなる. 自動車のハンドルのパワーアシストでは, ほどよい反力を設定することで誤操作を防ぎ, 疲労を軽減している. 空中超音波による触覚はその明瞭さ, という意味では決して弱すぎることはないと考えるが, 手の操作を安定させたり, そこに手をかけて休んだりするための反力までは発生させることができず, 従来のマニピュレーションの力覚フィードバックをそのまま代替できるものではない.

しかし, 皮膚刺激の分布は, 少なくとも空間中の位置の情報を伝えるためには有効である. たとえばVRの取っ手がある一方向に押し込む際の押し込み量を常に触覚的に把握しておきたいケースを考えよう. 図4のように押し込みたい方向に手の平を向け, 押し込み量に応じて手の平に円形の触覚刺激領域を形成する. 位置に応じてその大きさを変化させれば, 直感的にVR取っ手の位置を体感させることができる^{26), 27)}. たとえば押し込んでいくにしたがって円の半径が広がっていくと, 自分が今どのくらい押し込んでいるのか, あるいは少し手を動かしてどのくらい押し込み量が増えたのか, といった情報を直感的に知覚することができる.

また, 空間中にホームポジションを提示したり, 複数あるVR操作レバーの一つに手を誘導したり, など, 超音波の触覚刺激は, 操作に伴う付加的な情報を伝えるのに活用することもできる²⁷⁾. 操作をコ

ンピュータがアシストし、節目節目の決断のみを人間が行っている状態で、コンピュータが推奨する補正量や操作方向などを伝えたり、遠隔ロボットの皮膚センサが、指先以外の部分で感じている触覚を操作者にも体感させ、周囲の状況を伝えたりすることも可能である。遠隔のロボットが周囲の物体に不用意に接触・衝突しそうなとき、触覚を通してそれを事前に通知することもできる。

5. おわりに

以上、空中超音波触覚提示技術の現状と、遠隔マニピュレーション支援の活用可能性について考察した。3次元的に自在に圧覚の分布を作り出せる点で、遠隔操作のフィードバックにも有効であると考えられるが、実証実験はまだほとんど行われていない。今後は楽しみな応用領域である。

参考文献

- Iwamoto, T., Tatezono, M., Shinoda, H. : Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound, Proc. Eurohaptics, 504-513 (2008)
- Hoshi, T., Takahashi, M., Nakatsuma, K., Shinoda, H. : Touchable holography, Proc. ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies. ACM, New York, NY, USA, Article No. 23 (2009)
- Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T., Shinoda, H. : Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 3, No. 3, pp. 155-165 (2010)
- Carter, T., Seah, S.A., Long, B., Drinkwater, B., Subramanian, S. : UltraHaptics : Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces, Proc. UIST '13, 505-514 (2013)
- Monnai, Y., Hasegawa, K., Fujiwara, M., Yoshino, K., Inoue, S., Shinoda, H. : HaptoMime : Mid-air haptic interaction with a floating virtual screen, Proc. the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '14), pp. 663-667 (2014)
- <https://www.youtube.com/watch?v=Bb0hNMxxewg>
- Hasegawa, K., Shinoda, H. : Aerial display of vibrotactile sensation with high spatial-temporal resolution using large-aperture airborne ultrasound phased array, Proc. IEEE World Haptics Conference 2013, pp. 31-36 (2013)
- Makino, Y., Furuyama, Y., Inoue, S., Shinoda, H. : HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1980-1990 (2016)
- Shinoda, H. : Creation of Realistic Haptic Experiences for Materialized Graphics, AsiaHaptics 2022, Nov. 12-14, Beijing (2022)
- <https://materialized-graphics.hapislab.org/>
- 星貴之 : 超音波曝露に関する再考, 78巻9号p. 508-513 (2022)
- 鎌倉友男編著, 非線形音響 (コロナ社, 東京, 2014).
- Rudenko, O.V. : Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics Springer, NewYork (1977)
- Blackstock, D.T. : Onplane, spherical, and cylindrical soundwaves of finite amplitude in lossless fluids, J. Acoust. Soc. Am., 36, 217-219 (1964)
- Inoue, S., Suzuki, S., Shinoda, H. : Multiunit Phased Array System for Flexible Workspace, in Ultrasound Mid-Air Haptics for Touchless Interfaces, Orestis Georgiou Ed., pp. 241-260 (2022)
- Suzuki, S., Inoue, S., Fujiwara, M., Makino, Y., Shinoda, H. : AUTD3 : Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 14, No. 4, pp. 740-749, 31 March (2021)
- Plasencia, D.M., Hirayama, R., Montano-Murillo, R., Subramanian, S. : Gs-pat : high-speed multi-point sound-fields for phased arrays of transducers, ACM Transactions on Graphics (TOG), vol. 39, no. 4, pp. 138-1 (2020)
- Matsubayashi A., Makino, Y., Shinoda, H. : Accurate Control of Sound Field Amplitude for Ultrasound Haptic Rendering Using the Levenberg-Marquardt Method, Proc. IEEE Haptic Symposium 2022, 21-24 March (2022)
- Matsubayashi, A., Makino, Y., Shinoda, H. : Rendering Ultrasound Pressure Distribution on Hand Surface in Real-Time, Proc. EuroHaptics 2020, pp. 407-415, 2020.
- Matsubayashi, A., Yamaguchi, T., Makino, Y., Shinoda, H. : Rendering Softness Using Airborne Ultrasound, Proc. IEEE World Haptics Conference, pp. 355-360 (2021)
- Takahashi, R., Hasegawa, K., Shinoda, H. : Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus, IEEE Trans. Haptics, Vol. 13, No. 2, pp. 334-342 (2020)
- Morisaki, T., Fujiwara, M., Makino, Y., Shinoda, H. : Non-Vibratory Pressure Sensation Produced by Ultrasound Focus Moving Laterally and Repetitively with Fine Spatial Step Width, IEEE Transactions on Haptics, Volume 15, Issue 3, pp 441-450, Nov. (2021)
- Morisaki, T., Fujiwara, M., Makino, Y., Shinoda, H. : Noncontact Haptic Rendering of Static Contact with Convex Surface Using Circular Movement of Ultrasound Focus on a Finger Pad, IEEE Transactions on Haptics, to appear, Nov. (2023)
- Saga, S. : Thermal-Radiation-Based Haptic Display using Laser-Emission-Based Radiation Control, Proc. IEEE World Haptics 2019, WP2P. 10 (Work-in-Progress Papers) (2019)
- Nakajima, M., Hasegawa, K., Makino, Y., Shinoda, H. : Spatiotemporal Pinpoint Cooling Sensation Produced by Ultrasound-Driven Mist Vaporization on Skin, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 14, No. 4, pp. 874-884, 04 June (2021)
- Freeman, E., Vo, D.-B., Brewster, S. : Haptiglow : Helping users position their hands for bettermid-air gestures andultrasoundhaptic feedback, Proc. IEEE World Haptics conference (WHC), pp. 289-294 (2019)
- Hiura, K., Suzuki, S., Morisaki, T., Fujiwara, M., Makino, Y., Shinoda, H. : Three-dimensional hand guidance by midair haptic display, arXiv : 2304. 11413 (2023)

(原稿受付 : 2023年12月14日)

解説

空気圧駆動機構を用いた人工指による
材質認識システム

著者紹介

よし みつ とし ひろ
吉 満 俊 拓神奈川工科大学
神奈川工科大学創造工学部
〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030
E-mail : yosimitu@rm.kanagawa-it.ac.jp

2000年明治大学大学院博士後期課程修了。同年神奈川工科大学工学部助手。現在は教授。空気圧制御システムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会などの会員。博士(工学)。

1. 緒 言

近年の高齢化社会に伴い、生活の中でロボットを利用する関心は高まりを見せている。介護現場や病院等で活躍することが望まれるが、ヒトとの接触が多い現場において安全面の問題は大きい。この問題への対応策として、駆動源に空気圧を用いることが挙げられる。空気には圧縮性があり、ヒトとの接触に安全性が高い。また、ロボットとヒトが安全に共存する上で必要な事項として、外界からの情報収集がある。このような研究は、視覚や聴覚といった分野では盛んに行われている。しかし、触覚の分野は高分子圧電材料を用いた田中ら¹⁾の研究があるが、触覚情報を収集するセンサが確立されていない点や、ヒトが物体に触れたときに脳内でどのように処理されているかが不確定である点で、未解決な問題も多い。

一方で、ヒトが物に触れたときに感じる金属のような冷たい触感や木材特有の温もり、綿のふわふわした感触といった触覚から感じ取る質感は脳の処理によって与えられる。質感の感じ方は、過去の経験や年齢によって個体差が生じる。たとえば熟練した大工職人は木材に触れただけで木の状態や品質を瞬時に見抜く卓越した触覚感性を有しており、医者は患者に触診をすることで微妙な異常を発見することができる。ヒトが物に触れたときに脳内で感じる質感は個体差があるために、いくつの要素から感覚を得ているか解明することは困難である。

本研究では質感の要素を質感因子と呼び、それぞ

れ「硬さ因子」「表面状態因子」「温度因子」と名付ける。

これら三つの因子による測定値は単なる物理量であり、各質感因子を基にヒトの触覚感性を再現させる必要がある。材質認識の工学的実現を考えたとき、有用性のみを考えればヒトの皮膚感覚などを再現していく必要はないように思える。たとえば各センサから得られるデータを、ヒトの皮膚感覚とは違う物理量として計測して解析した方がより合理的に思える。特定の感覚に着目したもものとして、各種の特徴を持ったセンサが開発されている。例として、弾性・粘性変化を用いるもの²⁾や、熱伝導率を用いるもの³⁾、表面粗さを用いるもの⁴⁾などがある。また、触覚センサ自体の開発に関しては、前述した高分子圧電材料を用いたもの¹⁾や歪ゲージを用いるもの⁵⁾や有機トランジスタを用いるもの⁶⁾、光を用いるもの⁷⁾などがある。しかしながら、ヒトの材質認識を行うメカニズム、皮膚の持つ柔らかさ、薄さ、形態的な特性、および数ミクロン程度の表面粗さを知覚できるメカニズムなど、いまだにヒトの感覚機能から学ぶことは多い。また触覚は、視覚や聴覚と異なり物体に触れ、動かすことによって初めて物体の硬さ、表面状態、温度等を検出することができる感覚であり、動かすと言う能動性が重要な意味を持つ感覚である。

本研究では、歪ゲージと熱電対を用いて、表面状態、硬さ、温度を検出する関節を持つ人工指を製作し、空気圧アクチュエータを用いて能動的な触覚動作を導入することによりヒトに近い触覚感性機能を持つ空気圧式人工指を開発した。また、ニューラルネットワークの最適化を行いヒトと同等の材質の判別を行える材質認識システムを構築する。

2. 人工指のシステム

人工指全体のシステム概略を図1に示す。各センサの信号は、データロガーを介してPCへと伝達する。PCでは表面状態、硬さ、温度の三つの因子波形を活動電位への変換をした後にニューラルネットワークの処理を行う。ヒトが物体表面をなぞる時、物体表面で指がスティックスリップ現象を起こすこ

とが質感の一部を構成していると考えられる。そこで、圧縮性を有し低剛性な空気圧アクチュエータを用いることで、ヒトが物体表面をなぞる動作により近い状態を実現する人工指システムを構築した。

シリンダは、試料を押さえつける動作をするZ軸方向、試料をなぞる動作をするX軸方向、さらに2本の腱による指の曲げ動作のあわせて3自由度で駆動する。各シリンダの駆動制御は電空レギュレータで行い、シリンダの各チャンバー内の圧力を個別に制御することによって、動作や速度を調整できるシステムとなっている。

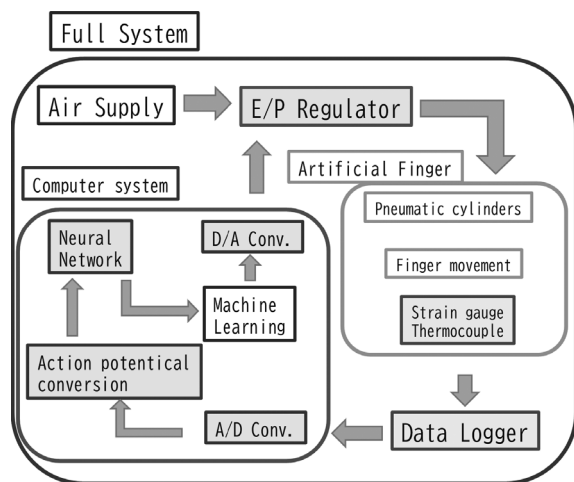


図1 材料認識システム概要図

人工指センサ部分の構造を図2に示す。骨格部分にはアルミを使用し、骨格の直下に人工指を人肌に加温するためのシリコンラバーヒータを設置してある。骨格の周りを覆う人の指を模擬している部分は、軟質のポリウレタン樹脂を使用する。センサは歪ゲージを人工指先端から根元にかけて四つ配置しており、熱電対は歪ゲージと歪ゲージの間に三つ配置されている。また、各センサを保護する目的で3層から成る塩化ビニル製のグローブで覆っている。

表面状態の微小変化をとらえやすくする目的で、歪ゲージ直下にビーズを新たに取り付けた。これらのセンサから押さえつけ動作時に硬さ因子、温度因子、なぞり動作時に表面状態因子を得ている。

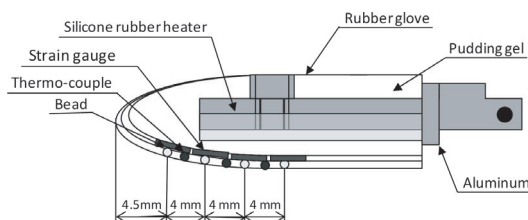


図2 人工指構造図

3. 各質感因子の抽出

硬さ因子は皮膚と対象物が接触したときの皮膚変形をしめしている。人工指が対象の試料に接触したときの変形を歪ゲージで測定を行う。表面状態因子は皮膚と対象物が摩擦する際に発生する振動をしめす。本システムにおいては歪ゲージの変形量を微分することで加速度を算出し、これを人工指の振動と定義する。温度因子は皮膚と対象物が接触した時の熱移動を示している。これは人工指を予め人肌に加温しておき、試料に接触した時の温度変化を熱電対によって測定する。

3.1 硬さ因子

硬さ因子として、人工指内部変形の量に着目しており、変形による電圧は常に正方向である必要がある。しかし、稀に接触部位から距離のある周辺では負方向への電圧変化が見られることがある。硬さ因子の入力波形においては、負方向への電圧を補正する処理をおこなっている。

3.2 表面状態因子

表面状態では人工指がなぞり動作をする時の歪ゲージの振動を計測する。ここでは、歪ゲージの変位を二階微分して加速度を導出する。一般に精度を考えると中央差分が有利であるとされるが、時系列でのデータは微分をするときに未来のデータが必要となるため、処理に遅れが生じる。すなわちリアルタイムに変換することを考えれば後方差分が有利である。

3.3 温度因子

温度因子は押さえつけ動作時の人工指から試料への熱移動を計測する。人工指はヒトの肌表面温度に近い35[°C]付近まで加温して実験を行うため、通常熱移動の方向は人工指から試料への方向となる。熱電対は人工指の温度を計測しているため、試料に触れるとどの場合でも温度は緩やかに降下する。

温度因子では熱電対の温度が上昇するか下降するかで意味が大きく変わるため、温度降下量の正負は重要な情報である。したがって、温度因子では絶対値をつけることはしていない。

4. ヒトの触覚感性機能の評価

ヒトのような触覚感性を持つ認識システムを構築するには、ヒトの脳内で起こる感性を定量的な値で抽出して、後のニューラルネットワークでの教師データとして利用する必要がある。また、能動的な触覚動作を人工指へ導入するためにもヒトの触覚感性データは必要である。ヒトの感性情報を抽出するための心理評定法は、いくつか提案されているが、

本研究ではマグニチュード推定法をベースに用いた。

感覚尺度の上限は被験者によって決定されるため、得られたデータに対し正規化を行う。正規化は上限値1、下限値0となるように行う。評価試験は、研究で使用している20種類の試料を用いて3人の被験者に3回ずつ行った。各被験者3回の心理評定法による評価結果の中でもばらつきがあった。そこで本研究ではヒトの心理評定法の評価結果から材質識別可能な分解能を示す段階別感性評価法を提案した。

本研究で行う材質認識の精度もこの13種類を判別できることを目標とする。硬さ因子と表面状態因子の散布図で表したものを図3に示す。

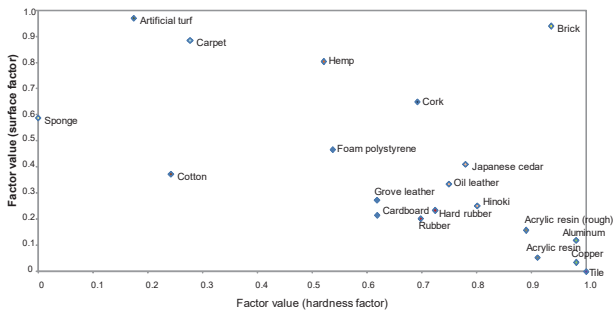


図3 硬さ因子と表面状態因子の散布図

5. 能動的な触知覚動作の人工指への導入

受動的な触知覚動作による質感因子データとヒトの触覚感性データでは、特に表面状態因子に大きな違いがあることがわかる。ヒトは、触知覚動作の中で指の角度を無意識に操作し指に加わる負荷を調節して材質認識を行っているのに対し、人工指の場合負荷を一定でなぞり動作を行っている。

受動的な触動作の場合、速度を抑えていても、押さえつけ動作時に人工指と試料の接触による衝撃が少なからずあり、それがばらつきの原因となっていることが考えられる。それに対して能動的な触動作の場合、試料との接触による衝撃が少ない測定が可能となり、ばらつきの原因を取り除いた触動作が行えると言える。

そこで、本研究では、関節の曲げを利用した能動的な触知覚動作を提案する。具体的には、押さえつけ動作時に得られた硬さ、温度因子を利用して、なぞり動作時の試料に対しての押さえつけ力を調節するというものである。また、このときの押さえつけ力の決定には、ニューラルネットワークを導入した。これは、ヒトと同等の動作過程を再現するために使用した。ニューラルネットワークは、シグモイド関数を用いた多層パーセプトロンを使用し、学習方法は、バックプロパゲーションを使用した。ニューラル

ネットワークの教師データであるなぞり動作時に使用する供給圧の決定は、各供給圧による測定結果から得られた表面状態因子データ（人工指がなぞり動作する間の振動波形の積分値）を用いて、ヒトの触覚感性データに近い表面状態因子データになるように供給圧を試料ごとに決定した。ニューラルネットワークの訓練データを表1とし、与えた各値を表2とした。

構築したニューラルネットワークを用いて提案した測定を研究で使用している20種類の試料に対してそれぞれ3回行った。各質感因子の測定結果をヒトの触覚感性データと受動的な触知覚動作による各質感因子を並べて図4、図5、図6、に示す。図より、特に受動的な触知覚動作の際に問題であった表面状態因子データが改善されていることがわかり、これより能動的な触知覚動作の人工指への導入が材質認識システムにとって有益であることがわかる。

表1 ニューラルネットワーク訓練データ

Sample	Voltage [mV]	Temperature [°C]	Supply pressure [MPa]
Aluminum	0.931	1.000	0.02
Acrylics	0.926	0.500	0.02
Brick	0.908	0.537	0.02
Tile	0.896	0.663	0.02
Rubber	0.594	0.491	0.10
Japan cedar	0.569	0.445	0.07
Cork	0.556	0.414	0.02
Foam polystyrene	0.462	0.000	0.04
Hemp	0.340	0.285	0.04
Cotton	0.272	0.387	0.23
Carpet	0.148	0.061	0.26
Artificial turf	0.102	0.273	0.26
Sponge	0.100	0.061	0.26

表2 ニューラルネットワーク設定値

Learn number	5000
Learn rate	0.1
Gain of sigmoid function α	1
Number of samples	13
Input element number	2
Hidden element number	30
Output element number	1

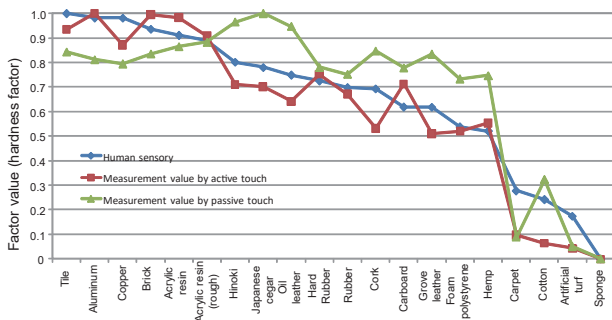


図4 硬さ因子の評価結果

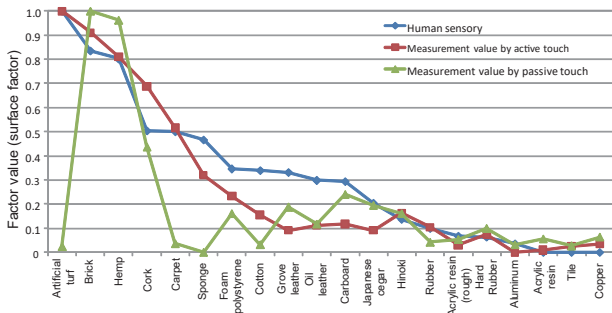


図5 表面状態因子の評価結果

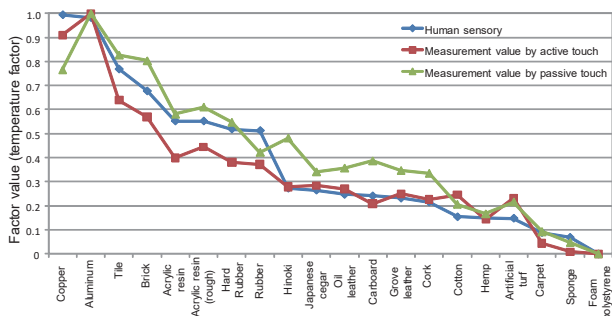


図6 温度因子の評価結果

6. ヒトの神経回路網の模擬

本研究では、神経回路網を模擬したニューラルネットワークを用いて材質認識を行っている。ニューラルネットワークは、シグモイド関数を用いた多層パーセプトロンを使用し、学習方法に誤差逆伝搬法を使用することとした。訓練データの構成としては、各質感因子（硬さ因子、表面状態因子、温度因子の三つ）のインパルス発火頻度を入力データ、試料名を教師データとした。教師データは、試料名という記号データを数値化するために、今回は別々のユニットに割り当てる方法を使用した。これは、判別可能である13種類の各試料名を別々のユニットに割り当ててそれぞれの出力値を1にする（評価試験の結果より同一評価が得られる試料は同じユニットに1を割り当てる）方法である。これには、

出力値が厳密に0や1でなくてもたとえば0.7程度でも1とみなせるので、学習誤差を大きめにすることができ、汎用性の高いニューラルネットワークを構築できる利点がある。式(1)により求められた各インパルス発火頻度を訓練データとして表3に示す。訓練データとして「銅、アルミニウム」、「アクリル、アクリル（傷）」、「杉、檜、オイルレザー」、「ゴム、硬質ゴム」、「発泡スチロール、段ボール、グローブ革」を質感が近いと分類した同一評価の試料である。また、ニューラルネットワークに与えた各値を表4に示す。

表3 ニューラルネットワーク訓練データ

	Hardness factor	Surface factor	Temperature factor
Aluminum	1.0000	0.0000	1.0000
Brick	0.9755	0.6595	0.9910
Acrylic resin	0.9724	0.0608	0.9571
Tile	0.9637	0.0658	0.9929
Acrylic resin (rough)	0.9597	0.0726	0.9608
Copper	0.9589	0.0746	0.9987
Hard rubber	0.9313	0.0785	0.9306
Hinoki	0.8596	0.2002	0.8013
Cardboard	0.8583	0.1560	0.2980
Japanese cedar	0.8208	0.1079	0.8988
Rubber	0.8071	0.1295	0.9052
Oil leather	0.7820	0.1541	0.6719
Grove leather	0.4713	0.0903	0.5984
Cork	0.4711	0.5525	0.3287
Hemp	0.4694	0.5653	0.3317
Foam polystyrene	0.4640	0.2130	0.2742
Carpet	0.0000	0.4230	0.2080
Cotton	0.0000	0.1865	0.5193
Artificial turf	0.0000	1.0000	0.2438
Sponge	0.0000	0.2601	0.0000

表4 ニューラルネットワーク設定値

Learn number	10000
Learn rate	0.04
Gain of sigmoid function α	1
Number of samples	20
Input element number	3
Hidden element number	80
Output element number	13

これらの値を用いて学習を行った結果、学習誤差は、0.031535に収束した。これは、教師データの特性を踏まえた上で調整した誤差であり、出力に対して十分な誤差を得ることができた。

構築したニューラルネットワークを用いて行ったシミュレーション結果を表5に示す。20種類中17種類の試料を判別できた。残りの判別できなかった試料（アクリル、アクリル（傷）、綿）に関しては、シミュレーションを行ったデータにばらつきがあったために、グローブ皮などに誤認してしまう結果となったが、能動的な触知覚動作が有益であることがわかる。

表5 材料認識結果

	Output value	False recognition	Output value
Tile	0.65		
Aluminum	0.98	Acrylic ressin, (rough)	0.21
Copper	0.80	Rubber, HardRubber	0.45
Brick	0.97	Cork	0.45
Acrylic ressin	0.00	Foam polystyrene	1.00
Acrylic ressin (rough)	0.00	Foam polystyrene	1.00
Japanese cedar	0.84	Tile	0.12
Hinoki	1.00	Cork	0.15
Oil leather	1.00		
Rubber	0.69	Tile	0.20
HardRubber	1.00	Acrylic ressin, (rough)	0.13
Cork	0.55	Hemp	0.17
Foam polystyrene	1.00	Hemp	0.08
Cardboard	0.89		
Glove Leather	0.90	Tile	0.12
Hemp	1.00	Carpet	0.12
Carpet	0.92		
Cotton	0.40	Rubber,HardRubber	0.92
Artificialturf	0.98		
Sponge	0.98		

7. 結 言

本研究では、空気圧ロボットを対象とした人工指のリアルタイムに識別できる材質認識システムを開発した。

具体的には、

- 能動的な触知覚動作を、空気圧アクチュエータを用いた人工指へ導入することによって、ヒトの触覚感性データにより近い質感因子データを

測定により得ることができた。

- ヒトの触覚感性データから大まかに分類した試料を判別し、測定動作中リアルタイムに識別できる認識システムを構築した。

能動的な触知覚動作は、ヒトの感覚情報、運動指令を用いて行っている過程を模擬して動作を構築した。これによって、受動的な触知覚動作では解決できないヒトの質感因子との違いが発生してしまう問題を解決することができた。またリアルタイムな認識システムも構築した。

能動的な触知覚動作は、ヒトの感覚情報、運動指令を用いて行っている過程を模擬して動作を構築した。これによって、受動的な触知覚動作では解決できないヒトの質感因子との違いが発生してしまう問題を解決することができた。またリアルタイムな認識システムも構築した。本システムをFPGAやマイコン等に移植することで独立した材質認識システムを構築することも可能であり、活動電位変換、ニューラルネットワークを独立したチップに集約して同期させることで処理時間を短縮することも可能と考える。

参考文献

- 田中由浩, 田中真美, 長南征二: 手触り感計測用センサシステムを用いた触覚感性計測, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 73, No. 727, p. 169-176 (2007)
- 元尾幸平, 新井史人, 福田敏男: 構造の弾性・粘性変化を利用した圧電振動型触覚センサ, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 3, p. 408-415 (2006)
- 井野秀一, 泉隆, 高橋誠, 伊福部達: 物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質触覚ディスプレイ方式の提案—感覚フィードバック型ハンドのための基礎的研究, 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 3, p. 345-351 (1994)
- 田中由浩, 佐野明人, 藤本英雄, 田中真美, 長南征二: 人間の触覚と調和する触覚センサおよびデバイスの開発, 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 107, No. 332, p. 97-102 (2007)
- 木村竜司, 内山孝憲, 前野隆司: 把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発 (十字状ひずみゲージ配列を有する球面状センサによる任意方向把持力制御), 日本機械学会論文集. C編, Vol. 70, No. 689, p. 83-88 (2004)
- 染谷隆夫: 有機トランジスタを利用したフレキシブル触覚センサとその応用, トライボロジスト, Vol. 51, No. 10, p. 725-730 (2006)
- 大岡昌博, 小林弘明, 高田純平, 三矢保永: 半球形光学式三輪触覚センサの開発, 日本機械学会論文集. C編, Vol. 74, No. 742, p. 1477-1484 (2008)

(原稿受付: 2023年12月20日)

解説

繊細ハプティックデバイスの実現を目指した MR流体デバイスとその評価法の開発

著者紹介



きくち たけひと
菊池 武士

大分大学理工学部
〒870-1192 大分県大分市旦那野原700
E-mail: t-kikuchi@oita-u.ac.jp

2003年大阪大学大学院博士前期課程修了，大阪府立産業技術総合研究所，大阪大学大学院工学研究科助手，山形大学大学院理工学研究科准教授，大分大学理工学部准教授を経て，同教授。機能性流体を用いたメカトロニクス技術に関する研究開発やリハビリテーションロボティクスへの応用研究に従事。IEEE，日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

筆者はこれまで機能性材料（機能性流体，機能性エラストマーなど）の応用研究を進めてきた¹⁻²⁾。その中でも近年，Magneto-Rheological Fluid（以下，MR流体³⁾を活用した医療・福祉ロボットの開発に注力している。本学会誌においても，繊細な力フィードバックが可能な遠隔手術ロボットを実現するためのMR流体デバイスについて紹介したところである⁴⁾。MR流体の高速・可逆的なレオロジー特性変化は，適切なデバイス設計によって繊細ハプティック（力触覚）デバイスに活用可能である。しかしながらその性能評価法については確立されたものはなく，研究者ごとに異なる項目，異なる装置で評価，分析が行われているのが現状である。本稿では，筆者がこれまで行ってきたMR流体，およびMR流体デバイスの性能評価において，特にハプティックデバイスの開発に関連する項目について紹介し，測定方法や既存のデータを使う際の注意点（難しさ）について解説する。

2. MR流体の磁気レオロジー特性の評価

2.1 基礎特性（フローカーブ）

MR流体は油系媒質と磁性体微粒子を混合した固液混合材料であり，無磁場時は分散粒子が自由に流動するために流動抵抗が小さいが，磁場印可時には粒子がクラスターを形成して大きな流動抵抗を発現

する⁵⁾。その流動特性は非ニュートン的であり，媒質粘度 η と磁場印加（磁束密度 B ）によって制御可能な降伏せん断応力 τ_{MR} （MR効果）を用いて，式(1)に示すビンガム流動モデルで近似することができる。ここで τ はMR流体が発現するせん断応力， $\dot{\gamma}$ はせん断速度を表す。この式を用いて各種MR流体の流動特性をモデル化し，デバイス設計に応用することができる。

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_{MR}(B) \quad (1)$$

ここで磁束密度 B およびせん断速度 $\dot{\gamma}$ は空間的に変化する値であることから，詳細のデバイス設計には流速と磁場の分布を知る必要があり，何らかの仮定もしくはシミュレーションが必要となる。また， τ_{MR} に関しては粒子の磁場に対する挙動と媒質との相互作用が関係しており，実用レベルのモデル化が困難であることから，磁場印加可能なレオメータによる実測が必要となる。

ところで，われわれはLORD社から入手可能な3種の流体（122EG，132DG，および140CG）に対して，市販のレオメータ（Thermofisher RS-6000，HAAKE）を用いて無磁場の流動特性を計測した⁶⁾。図1に140CGの測定結果を示す。環境温度は20℃に制御され，直径35mmのコンプレートが用いられた。メーカーによるカタログ値（40℃）も併記した。この結果からわかるように，無磁場状態であっても降伏せん断応力が確認されビンガム流動性を示している。また，測定温度によってもその特性が異なる。われ

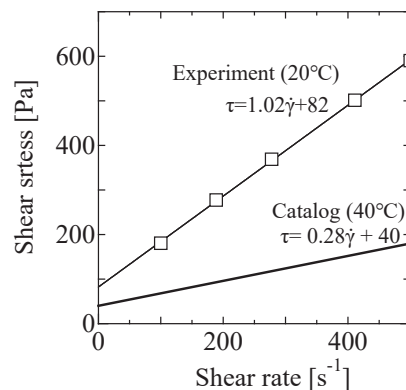


図1 140CGの基底粘性

われが行った高温環境下における計測⁷⁾では、MR効果の温度依存性についても評価している。一般的に流体粘度は温度が高くなるほど低くなるが、MR効果も同様に温度の上昇によって低下する結果となっている。

つぎにわれわれは、MR効果 τ_{MR} を測定するために円筒型MR流体試験機（図2）を開発した⁸⁾。試験機は大きく分けてヨーク部とシリンダ部に分かれており、これらは同軸回りに回転することができる。せん断応力はヨーク部を回転させたときにシリンダに伝達されるトルクより算出する。コイル電流と磁束密度の関係は、事前のシミュレーションで得る。

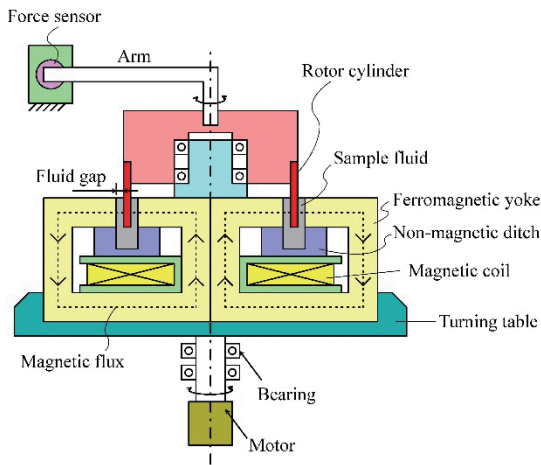


図2 円筒型MR流体試験機の構造（断面）（文献⁸⁾を改変）

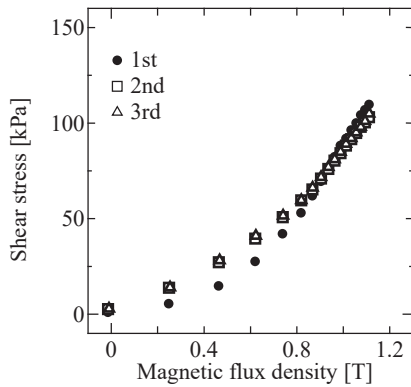


図3 132DGの測定結果（充填直後）

図3に、この装置で計測した132DGのせん断応力を示す。円筒側面の流体ギャップは0.5mmとした。横軸はシミュレーションで得られた印加磁束密度 B である。磁束密度はゼロから最大約1Tまで段階的に印加し、これを1セットとして3セットの測定を行った。流体充填直後の計測（1st）ではやや低い値を示すが、その後の計測では安定した値を示した。メーカーカタログによると、1T程度印加時に50kPa程度で飽和することとなっているが、われわれの計

測では高磁場印加時には100kPaを超えるせん断応力を示している。図2の装置では、測定部である円筒側面以外にも下部の流体だまりなど磁性体粒子が存在しており、高磁場環境下においてこれらの粒子が測定部に移動することで粒子密度が局所的に高くなったと予測される。われわれが別に開発したV溝構造を有する試験装置⁹⁾においては、余分な粒子の存在を排除する構造を採用しており、カタログ値に近いせん断応力を確認している。このような周囲粒子の存在やその挙動は流体特性の予測を困難にしているが、その影響を有効活用することでデバイス性能を向上させることが可能と考えている。少なくとも、想定するデバイスの形状に合わせたレオメータ（特性データ）の選択が必要となる。

2.2 沈降特性

MR流体は比重が約1の油系媒質と鉄を主成分とする強磁性体粒子の混合物であることから、通常重力下においては短時間で粒子の沈降が起こる。そこで界面活性剤やチキソトロピー剤を充填し、粒子の再分散性を向上させる改質が行われている。

われわれが既報¹⁰⁾で確認した細径チューブを用いた沈降試験においては、自然重力下では沈降速度は非常に緩慢であった。これはチキソトロピー剤の影響のほか、狭小ギャップにおける壁面の効果も考えられる。図2の装置を用いた測定において、流体充填後1日および7日の放置期間後の測定結果（図4, 5）を見ても、1日目の第一セットの計測（図3の1st）のような応力低下は確認されず、安定した特性を示した。0.5mm以下の微小ギャップを用いたデバイスの場合、粒子沈降の影響は小さいことが予測される。

2.3 長期耐久性

高いせん断応力を受けた状態で使用し続けた場合のMR流体の寿命について単位体積当たりの散逸エネルギーで評価されており、5MJ/mLとの報告¹¹⁾もあるが、材料の組成や粒子濃度などの構成、外部環境に

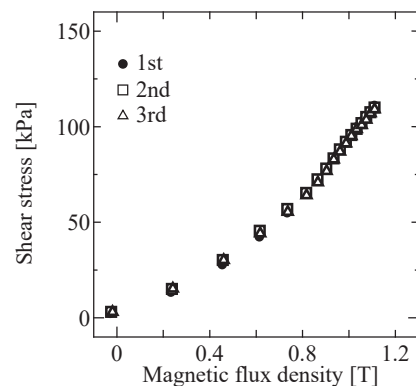


図4 132DGの測定結果（1日放置）

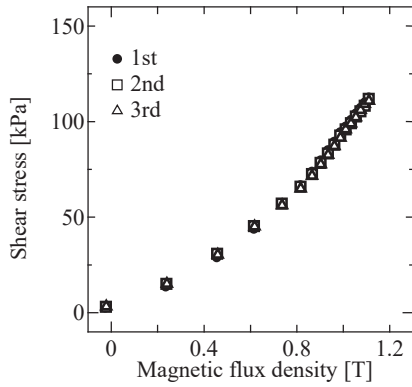


図5 132DGの測定結果 (7日放置)

よっても数値は大きく変化する⁹⁾。特に外気と触れることで媒質が揮発、劣化することがMR流体の性能低下の最大要因と考えられ、デバイス設計においては流体を適切にシールすることが要求される。近年では、サブミクロンオーダーの鉄粒子を用いた耐久性の高い新しいMR流体の開発も進められている¹²⁾。

3. MR流体デバイスのトルク特性の評価

3.1 静的特性 (ダイナミックレンジ)

本稿では、回転型デバイス (トルク制御デバイス) に限定して議論する。2.1節で述べたように、MR流体の流動特性はビンガム流動として扱われ、その降伏応力が外部磁場によって制御可能と考えてデバイスを設計する。繊細な力触覚を提示するデバイスにMR流体を応用する観点から、制御可能なトルク範囲と制御できない摩擦トルクの比 (ダイナミックレンジ) が重要な性能となる。

回転型のMR流体デバイスが発現する出力トルク T_{all} には、流体せん断応力によって発揮されるトルクとシール抵抗等の機械摩擦トルク T_{fric} がある。さらに流体が発揮するトルクには、制御できない基底トルク T_{off} とMR効果による制御可能なトルク T_{MR} がある (式(2))。ここで τ_{y0} は無磁場の降伏せん断応力である (図1参照)。このとき、ダイナミックレンジは式(3)の A で定義できる。 B_{max} は制御可能な最大磁束密度 (分布) である。

$$T_{all} = T_{off}(\eta\dot{\gamma} + \tau_{y0}) + T_{MR}(\tau_{MR}(B)) + T_{fric} \quad (2)$$

$$A \equiv \frac{T_{MR}(B_{max})}{T_{off} + T_{fric}} \quad (3)$$

このダイナミックレンジを最大化することが繊細な力制御を目的としたMRデバイスの設計指針となる。われわれは既報⁶⁾において、低摩擦でMR流体の漏れを防止するリップシールを独自に開発している (図6)。 T_{fric} の低減はダイナミックレンジの増加に大きく寄与する。

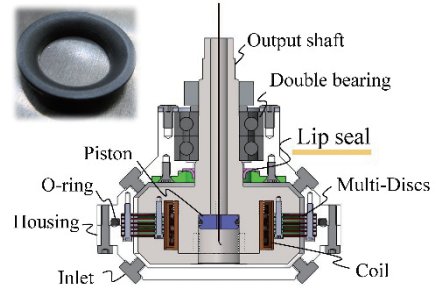


図6 MR流体デバイスとリップシール

3.2 動的特性 (応答性)

MR効果の応答時定数は1ms未満と言われている¹³⁾。しかしながら、デバイスレベルの応答速度は電源回路の応答遅れ、磁場応答遅れ、MR効果の応答遅れの総和である。繊細ハプティックデバイスの実現には各要素の遅れを検討することが必須である。特に電源回路の応答はデバイス性能やその評価に大きく影響する。開発したMR流体デバイスの性能評価には、応答周波数が数kHz以上の電流サーボアンプを用い、電流ステップ応答を測定する。この際、出力トルクのみならず、電流応答も計測することが望ましい (図7)。ハプティックデバイスで用いるような0.1Nm~数NmクラスのMR流体デバイスであれば、時定数で5~10ms程度のトルク応答を実現することができる。

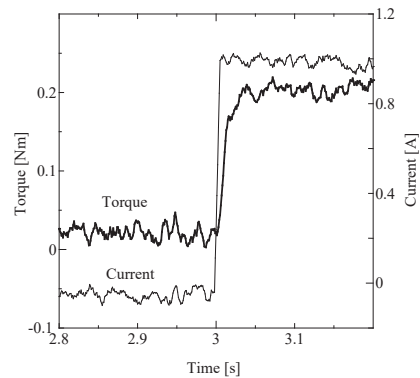


図7 MR流体デバイスの応答特性の例

3.3 ヒステリシス特性

MR流体デバイスのコア材料としては、電磁軟鉄のような軟磁性体が用いられる。コア材料のヒステリシス特性はMR流体デバイスのトルク応答に直接影響する (図8)。ヒステリシスの小さいコア材料の利用は特性改善に有効であるが、入手性や費用対効果を考えた場合に選択肢はそれほど多くない。

3.4 繰り返し性能 (変動係数)

図7のようなステップ応答を長時間繰り返し、トルクの変動係数を確認することで繰り返し性能を評

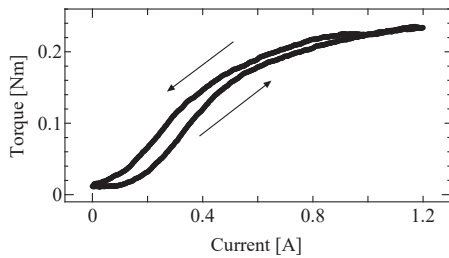


図8 MR流体デバイスのヒステリシス特性の例

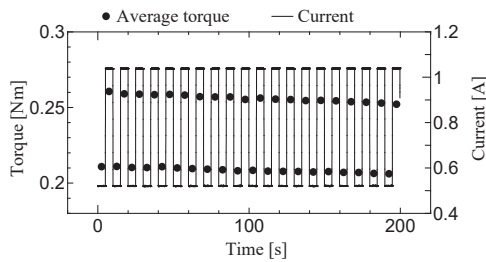


図9 MR流体デバイスの繰り返し性能の例

価することができる。ただし、2.2節に示したように、温度の影響もあるため、デバイス温度の計測は必須であり、環境温度の制御が望ましい。図9は繰り返し試験の例であり、印加電流0.5Aと1.0Aを5秒ごとに繰り返した際の各5秒間のトルクをプロットしている。温度上昇に伴ってトルクの減少がみられる¹⁴⁾。

4. おわりに

本稿では、MR流体、およびMR流体デバイスの性能評価において、特にハプティックデバイスの開発に関連する項目について解説した。デバイス性能については、回転型デバイス（トルク制御デバイス）に限定して議論した。MR流体は開発・応用が始まってから長い歴史があるが、その評価法については確立されたものは無い。その大きな要因の一つは、流れ場と磁場の複合場における粒子の複雑な挙動にある。デバイスの種類と形状に合わせて、評価項目の適切な選択が必要と思われる。

謝辞

本研究はJST大学発新産業創出基金事業 可能性検証 (JPMJSF23DW)、公益財団法人日立財団 倉田奨励金、および大分大学学長裁量経費 (戦略的重点研究推進) の助成を得て実施している。ここに記

して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 菊池武士, 電気粘性流体を援用した選択的研磨, 砥粒加工学会誌, 56(5), 299-302, 2012.
- 2) 菊池武士, 機能性流体デバイスの最適設計と医療・福祉ロボットへの応用, 設計工学, 55(10), 585-590, 2020.
- 3) 菊池武士, MR流体のロボティクス・メカトロニクスへの応用方法, 日本ロボット学会誌, 31(5), 23-26, 2013.
- 4) 菊池武士, 池田旭花, 高野哲仁, MR流体を用いた繊細ハプティックデバイスの開発と医療ロボットへの挑戦, フルードパワーシステム, 54(3), 129-132, 2023.
- 5) J. David Carlson, Mark R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices, Mechatronics, 10(4-5), 555-569, 2000.
- 6) T. Kikuchi, I. Abe, T. Nagata, A. Yamaguchi, T. Takano, Twin-Driven Actuator with Multi-layered Disc MR Fluid Clutches for Haptics, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 32(12), 1326-1335, 2021.
- 7) T. Kikuchi, I. Abe, A. Inoue, A. Iwasaki, K. Okada, Characteristics of a magnetorheological fluid in high shear rate, Smart Materials and Structures, 25(11), doi:10.1088/0964-1726/25/11/115021, 2016.
- 8) 小林慧吾, 菊池武士, 田中利昌, 増田恭伸, 水戸部和久, 円筒型MR流体試験機の開発および各種MR流体の特性評価, 第58回レオロジー討論会講演要旨集, 188-189, 2010.
- 9) I. Abe, T. Kikuchi, J. Noma, Durability Test Device for MR Fluids with Permanent Magnet & V-shaped Groove, Smart Materials and Structures, 26(5), doi:10.1088/1361-665X/aa6065, 2017.
- 10) 熊谷尚也, 阿部功, 菊池武士, 遠心分離機を用いたMR流体の沈降特性評価, 2016年度日本機械学会年次大会, S0510301, 2016.
- 11) J.P. Bigué, A. Landry-Blais, A. Pin, R. Pilon, J.S. Plante, X. Chen, M. Andrews, On the relation between the Mason number and the durability of MR fluids. Smart Mater. Struct., 28, 094003, 2019.
- 12) T. Kikuchi, I. Abe, Y. Ueshima, S. Akaiwa, H. Tsuji, Development of Durability Test Device for Magnetorheological Fluids with Two Types of Rotors and Their Long-term Torque Characteristics, Actuators, 11(142), doi.org/10.3390/act11060142, 2022.
- 13) M. Kubík, K. Šebesta, Z. Strecker, F. Jeniš, J. Goldasz, I. Mazúrek; Hydrodynamic response time of magnetorheological fluid in valve mode: model and experimental verification. Smart. Mater. Struct, 30(12), doi: 10.1088/1361-665X/ac3437, 2021.
- 14) 松下涼音, 池田旭花, 阿部功, 菊池武士, 力覚提示性能に着目したMR流体の特性評価方法の提案, 第41回日本ロボット学会学術講演会学術講演会予稿集, 2C1-02, 2023.

(原稿受付：2023年11月3日)

解説

力触覚技術とその土木分野へ応用

著者紹介



の ぎき たか ひろ
野 崎 貴 裕
 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1
 E-mail : nozaki@sd.keio.ac.jp

2014年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。横浜国立大学大学院工学研究院研究教員、マサチューセッツ工科大学客員研究員、慶應義塾大学理工学部助教、専任講師を経て、2022年より同大学准教授。ロボット工学、制御工学、電力工学の研究に従事。博士（工学）。

人間は、現実世界を五感で知覚

動作



図1 感覚技術の実用化

1. はじめに

本稿では、力触覚技術である「リアルハプティクス」の概要についてご紹介をしたのち、その土木分野における活用の可能性について述べる。われわれ人間は、図1に示す五つの感覚（＝五感）によって、この現実世界を知覚している。中でも、何かを製造したり、加工したりといった動作においては「視覚、聴覚、触覚」の三つの感覚が重要となる。それらのうち、視覚や聴覚に関する感覚情報技術はすでに実用化に至っており、映像や音声を伝送したり、記録、再現をしたりすることが可能となっている。一方で、触覚に関する技術は未だ実用化に至っておらず、視覚や聴覚に次ぐ第三の感覚技術として今後の発展と実用化が期待されている。五つしかない感覚の中の一つであるというだけでも、触覚の重要性は明らかであるが、さらに、触覚は他の感覚にはない極めて特異な性質を有する。例えば、図2に示すハンバー



図2 状況を変え得る触覚技術

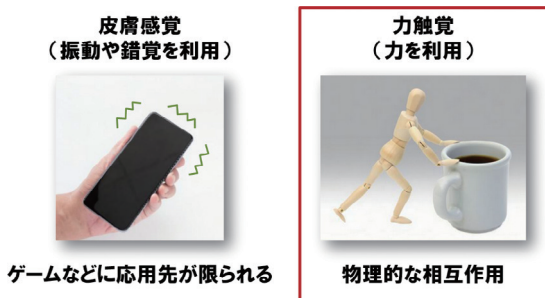


図3 触覚に関する学問領域＝ハプティクス

ガーや炭酸飲料を前にしたとき、これらの色や形を見たり、あるいはシュワシュワと泡がはじける音を聞いたりしても状況は一切変わらない。しかし、実際に手に取ることで、場所を移動させたり口に運んだりということが可能となる。つまり、触覚というのは、人間が持つ五つの感覚の中で唯一、能動的に外部の状況を物理的に変えることができる感覚なのである。

2. 力触覚の重要性

触覚に関する学問領域はハプティクスと呼ばれており、二種類に大別をすることができる（図3）。一つ目が、振動や錯覚を利用した皮膚感覚に関するハプティクスである。スマートフォンが着信を通知する際に生じる振動は、この皮膚感覚に関するハプティクスに該当する。振動や錯覚を用いた皮膚感覚に基づくハプティクスは、実装が容易であり、普及が進んでいる。しかし、何かを加工したり、動かしたりということではできず、ゲームなどに応用先が限



図4 力触覚の必要性

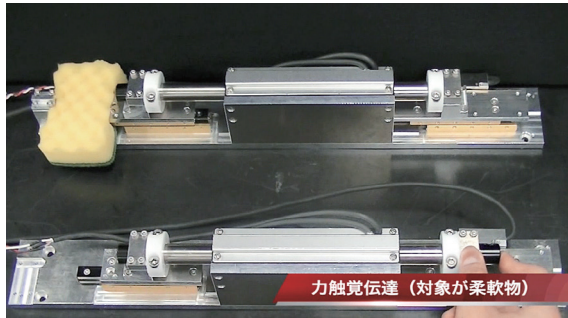


図5 リアルハプティクスによる力触覚の伝送



図6 リアルハプティクスを搭載した双腕ロボット

られる。もう一つのハプティクスとは、図3の右に示す、力を利用した力触覚に基づくものである。この力触覚を用いると、対象物を加工したり運んだりといった物理的な相互作用を操ることが可能となる。弊学では、産業応用における重要性の観点から、この力触覚技術に関する研究開発を行う拠点としてハプティクス研究センターを設置し、社会実装を進めている。図4に、われわれが開発したロボットハンドを示す。力触覚技術を用いない場合には、指先と対象物との接触や加えている力を把握することができないため、対象物を潰したり傷つけたりしてしまう危険がある。しかし、力触覚技術を用いる場合には、対象物を適切な力加減で優しくつかむことが可能となる。このように、対象物に柔軟に適応し、人間のように器用で高度な作業を実現するためには力触覚が大変重要となる。

3. 力触覚伝送技術「リアルハプティクス」

弊学ハプティクス研究センターでは図5に示す力触覚伝送技術を有している。図5の下部に示される

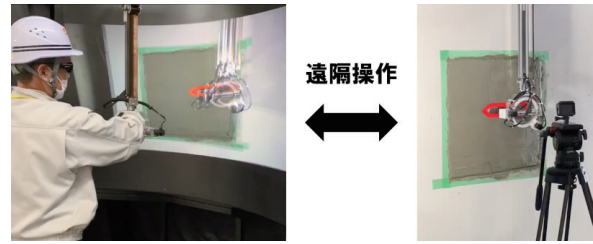


図7 リアルハプティクスによって実現された遠隔左官作業

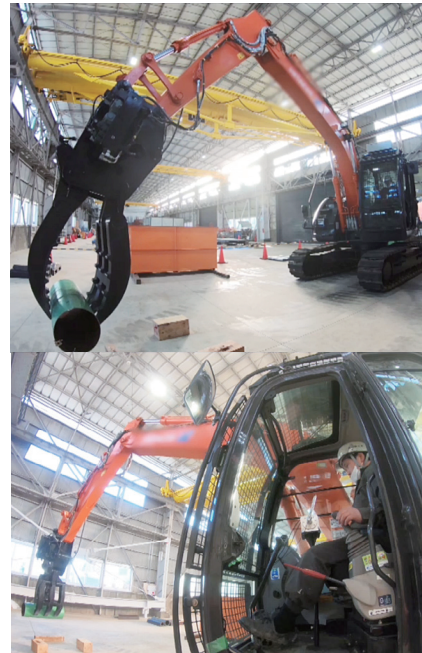


図8 リアルハプティクスを搭載した油圧駆動建設重機

装置を動かすと、上の装置が連動して動き、図5の上部に示される装置が何らかの物体に触れると、その硬さや柔らかさが手元に伝わってくる。スポンジであれば、ポヨンとした柔らかな弾力が感じられ、金属ブロックであれば、カッンとした硬い反発が感じられる。このように、実際の物体の硬さが伝わる力触覚伝送技術とその応用技術をリアルハプティクスと呼称し研究開発を進めている。

4. リアルハプティクスによる作業の遠隔化

このリアルハプティクスを搭載した双腕ロボットを図6に示す¹⁾。操作者は、ロボットが見ている映像、あるいはロボットが聞いている音声を感じながら作業をすることができ、それに加えてロボットが触れた物体の硬さや柔らかさ、あるいは抵抗感といった力触覚を感じながら作業をすることができる。これによって、人間の感覚や経験を活用し、器用で柔軟な作業を実現することが可能となる。双腕ロボットで得られた研究開発成果を実作業に応用した例として図7に示す左官作業システムが挙げられる²⁾。こ



図9 リアルハプティクスを活用した山岳トンネル掘削作業用自動火薬装填システム

のシステムを用いることで、操作者である職人は遠隔地に居ながらにして、壁の硬さや抵抗力を感じ取り、コテによって滑らかな壁面を作ることが可能となる。本研究開発においては、東日本（埼玉県川越市）と西日本（大阪府枚方市）とを商用のインターネットによって接続し、遠隔地からであっても通常と同等の滑らかかつ平坦な壁面を作り上げられることが実証された。また、本システムを用い、遠隔操作の際に送受信される情報を取得することで、職人の動作データを記録することにも成功した。

5. リアルハプティクスによる動作のネットワーク化と編集

弊センターが目指すのは、あらゆる動作情報がデータ化され、共有され、そしていつでもどこでも好きな時に好きな動作を活用できる社会である。今や、映像や音声といった感覚情報はインターネットを介して共有され、自由に視聴をすることが可能となっている。よって、第三の感覚情報である力触覚についても、インターネット上で共有され、自由に活用できる時代が来るものと考えられる。上述した力触覚伝送技術を用いると、触覚が伝送され遠隔地からでも器用な作業を実現することが可能となるばかりか、さらに、伝送される情報を保存することで、人の動作や対象物の特性を数値として記録することが可能となる。そして、一度数値として記録さ

れた特性情報は、任意に編集や加工を施すことができ、それを再度ロボットに供給することで、人間のよう器用に柔軟な動作を人工的に再現することすらも可能となる。また、人の動作をそのまま伝えるだけではなく、これを拡大縮小して伝えることも可能である。動作を拡大した場合には土木作業や災害救助、縮小した場合には医療や細胞操作における活用が期待される。

6. フルードパワーへ応用

動作を拡大する例として、図8にリアルハプティクスを油圧駆動の建設重機に実装したシステムを示す³⁾。これは大手総合建設会社のO社との共同研究開発の成果であり、建設重機が対象物をつかむ力が操作者のグローブに伝送される。これにより変形、あるいは傷つきやすい対象物であっても適切な力加減で優しくつかみ運ぶことに成功した。リアルハプティクスの技術はアクチュエータが生み出す力を高精度に制御し柔軟で適応的な動きを実現するものであり、電動アクチュエータのみならず、油圧や空気圧を用いたアクチュエータに対しても広く適用をすることが可能である。

7. 産官学の連携で進む社会実装

現在もっとも注力をしている研究開発の一つが、リアルハプティクスの山岳トンネル工事への応用である。山岳トンネル工事における大半の工程がすでに機械化されているが、発破に必要な火薬の装填作業は、装薬孔に対して込め棒を挿入し、さらに適切な力加減で押し込むという作業の難易度の高さから、機械化が困難であり、いまだ人手によって行われている。しかしながら、切羽は表面に露出して間もない地山であることから不安定であり、岩石の落下等による労働災害が頻発している。したがって、労働災害防止の観点から、切羽近傍の無人化が喫緊の課題となっている。この課題を解決するため、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「官民による若手研究者発掘支援事業」の一環として、O社と共同で山岳トンネル掘削作業用自動火薬装填システムを開発した⁴⁾。図9における右側（「リモコン側」と記載）のロボットを作業者が動かすと、その動きに連動して左側（「ロボット側」と記載）の装置が動く。リアルハプティクスを搭載することで、作業者は左側の装置が切羽や装薬孔、火薬に触れた際の力加減を鮮明に感じ取ることができ、これによって、切羽における高度な作業を遠隔地から適切に行うことが可能となる。さらに、作業時の動作データを記録し、再現することで、火薬装填作

業を自動化することにも成功している。

8. 結 言

リアルハプティクスを用いることで人間動作の伝送、記録、編集、再現が可能となり、これによって油圧重機をはじめとするさまざまなシステムの飛躍的な高機能化や人手作業の機械化・自動化が実現される。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 慶應義塾大学: 身体感覚を伝送する双腕型ロボットの開発に成功—世界初の高精度力触覚技術を搭載—, プレスリリース, 2017年9月28日, <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/9/28/28-24437/>
- 2) 大林組, 慶應義塾大学: リアルハプティクスを利用した建設技能作業再現システムを開発—遠隔での左官作業における性能や作業性を実証しました—, プレスリリース, 2021年3月24日, https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210324_1.html
- 3) 大林組, 慶應義塾大学: 油圧駆動の建設重機で力触覚技術を利用するシステムを実証しました—2種類の操作装置を開発し, 実機での性能や作業性を確認—, プレスリリース, 2019年10月10日, https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20191010_1.html
- 4) NEDO, 慶應義塾大学, 大林組: 山岳トンネル掘削作業における自動火薬装填システムの開発—遠隔で力触覚を再現する技術の応用で掘削作業の安全性と生産性を向上—, プレスリリース, 2023年9月12日, https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230912_1.html

(原稿受付: 2023年12月15日)

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

第23回機素潤滑設計部門講演会

主 催: 一般社団法人日本機械学会 機素潤滑設計部門
開 催 日: 2024年4月22日(月)~4月23日(火)
会 場: オンライン開催
U R L: <https://www.jsme.or.jp/conference/mdtconf24/>

ロボティクス・メカトロニクス講演会2024 (ROBOMECH 2024 in Utsunomiya)

主 催: 一般社団法人日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門
開 催 日: 2024年5月29日(水)~6月1日(土)
会 場: ライトキューブ宇都宮 (栃木県宇都宮市宮みらい1-20)
U R L: <https://robomech.org/2024/>

日本混相流学会 混相流シンポジウム2024

主 催: 日本混相流学会
開 催 日: 2024年9月4日(水)~9月6日(金)
会 場: 富山大学五福キャンパス (富山県富山市五福3190)
U R L: <http://www.jsmf.gr.jp/mfsymp2024/>

IFPEX2024 第27回油圧・空気圧・水圧国際見本市

主 催: 一般社団法人 日本フルードパワー工業会, 産経新聞社
開 催 日: 2024年9月18日(水)~9月20日(金)
会 場: 東京ビッグサイト東2, 3ホール (東京都江東区有明3-11-1)
U R L: <https://www.ifpex.jp/2024/>

Grinding Technology Japan 2025/SiC, GaN加工技術展

主 催: 日本工業出版株式会社, 株式会社産経新聞社
開 催 日: 2025年3月5日(水)~3月7日(金)
会 場: 幕張メッセ (千葉県千葉市美浜区中瀬2-1)
U R L: <https://gtj-expo.jp/2025/jp/>

各行事の最新情報は、主催者のホームページまたは各行事のURLからご確認ください。

解説

建設重機の臨場感のある遠隔操作の実現を目指して

著者紹介



こう ざわ みち か
江 沢 迪 和

株式会社大林組技術本部技術研究所生産技術研究部
〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640
E-mail: kozawa.michika@obayashi.co.jp

2016年東京工業大学大学院総合理工学研究科
博士前期課程修了。2016年株式会社大林組入社。
施工管理や施工計画業務を経て、技術研究所の
研究員として従事。専門は電気工学、応用物理
工学。

1. はじめに

作業員不足や災害復旧への対応等の観点から、建設業では臨場感のある遠隔操作技術が求められている。近年、開発が進められている建設重機の遠隔操作の操作対象はブーム、ショベルのほか、カッター、グラブプルといったアタッチメント等、多岐に渡る。

これら进行操作する時に、オペレーターはレバーを前後に動かしたり、ペダルを踏みこんだりするが、建設重機による作業（土砂を掘る、部材を掴（つか）む等）の反力、触覚を感じることができない。

建設重機のオペレーターが、この反力、力触覚を感じることができれば、視覚だけの操作より臨場感を得られるため、作業効率を上げられると考えられる。

そこで、当社では慶應義塾大学と共同で建設重機の遠隔操作に対して、「リアルハプティクス技術」の活用を検討している。

リアルハプティクス技術とは、「操作器（以下：リーダ）と作業装置（以下：フォロワ）」からなる機械の制御において、現実の物体や周辺環境との接触情報を双方向で伝送し、力触覚を再現する力触覚伝送技術¹⁾である。力触覚には、接触対象の硬さや軟らかさ、弾力などが含まれる。本技術を遠隔操作に適用することで、直接触れている力触覚を伝送することができ、高度な操作が可能となる。さらに、触覚を単に伝送するだけでなく、拡張または、縮小して伝送することも可能である。

力触覚伝送の概念図を図1²⁾に示す。リアルハプティクス技術では、人が加える作用力、作用力により生じる位置変動、接触物体から得られる反作用力を合成することにより得られる力触覚を一對のリー

ダ、フォロワ間で双方向に伝送する。これは、従来機械が作用力と位置変動の伝送のみであったのと対照的である。

本技術を適用した例を写真1に示す。左側のリーダの動きに右側のフォロワが同期動作し、フォロワがスポンジに接触するとリーダに接触情報が伝送される。弾力、粘性、ざらつきなどの力触覚を伝送することができ、直接物体に触れているような感覚が得られる。

2. 油圧駆動機構へのリアルハプティクス技術の適用

2.1 油圧システム的设计, 製作

多くの工事現場では、建設重機を使用しているため、建設重機をフォロワとする力触覚伝送システムの開発が求められる。しかし、これまで開発が進められ、ロボットハンド等に活用されているリアルハプティクス技術は、リーダとフォロワが共に電動駆動機構で構成されている。電動駆動機構と油圧駆動機構のように、応答性の異なる駆動機構間での力触

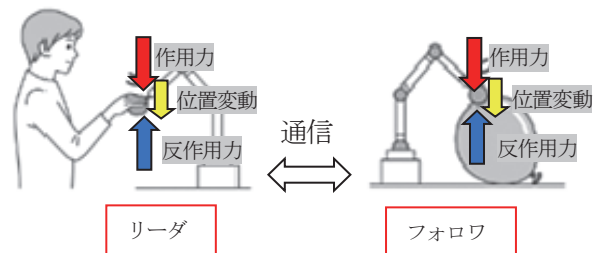


図1 力触覚伝送の概念図²⁾

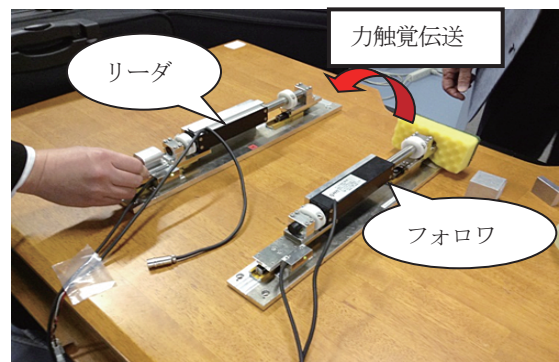


写真1 リアルハプティクス技術の適用例

覚伝送を行うためには、新たな工夫が必要であった。

そこで、当社は慶應義塾大学と共同で、油圧駆動機構内にエンコーダ、圧力計、PIC演算用PLCを組込むことにより、油圧と電動の駆動機構間で力触覚を伝送させるシステムを試作した。まずはフォローとして、小型の油圧駆動機構を用いた力触覚伝送システム(写真2、図2)を製作し、油圧駆動機構に対するリアルハプティクス技術の適用性を検討した。

2.2 油圧駆動機構をフォローとした基礎実験

2.2.1 位置の同期性の検証

電動駆動機構は油圧駆動機構よりも位置応答が速い。電動駆動機構のリーダを高速動作させた場合、その動きに油圧駆動機構であるフォローが同期しない可能性が考えられた。そこで、リーダを正弦波振動させ、位置の同期性(リーダ、フォロー間の振幅ゲイン)を検証した。実験条件を以下に示す。

- ・振幅比(フォロー/リーダ)：2(リーダの振幅が1cmならば、フォローの振幅は2cm)
- ・正弦波振動の周波数(Hz)：0.1, 0.2, 0.333, 0.5, 1
(1Hz時のリーダの最高速度は62.8mm/sec, フォロワの最高速度は125.6mm/sec)
- ・油圧シリンダの種類：両軸シリンダ, 片軸シリンダの2種類
- ・油供給部のバルブの種類：サーボバルブ, 電磁比例バルブの2種類

実験結果を図3に示す。本実験では、振幅比(フォロー/リーダ)を2としたため、リーダ、フォロー間の振幅ゲインが2で一定になることが望まし

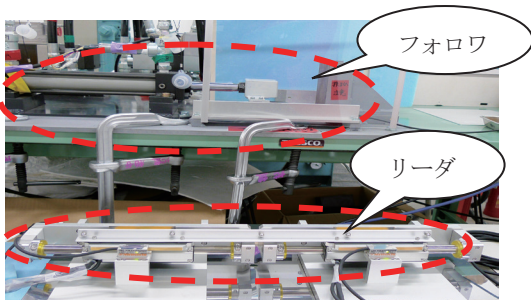


写真2 製作した力触覚伝送システム

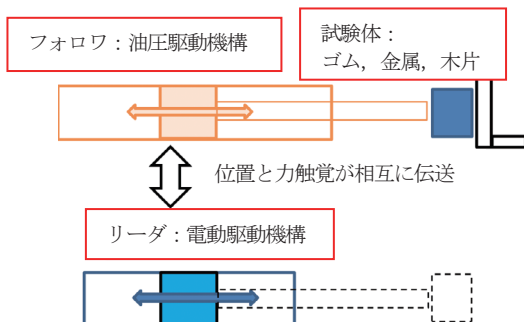


図2 力触覚伝送システムの動作概念図

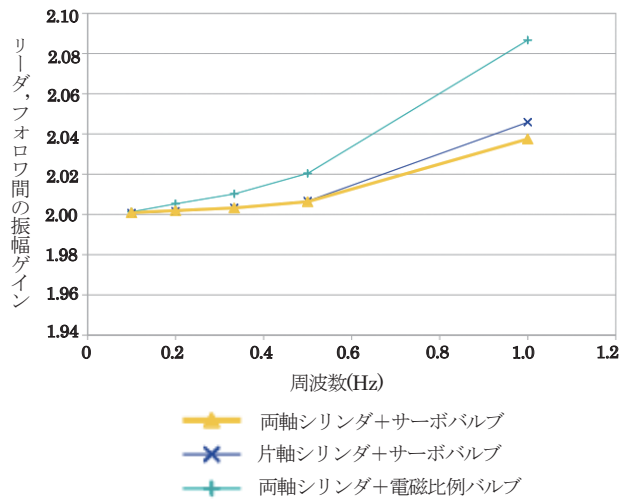


図3 位置の同期性

い。しかし、いずれの条件でも周波数が大きくなるにつれて、振幅ゲイン値も大きくなった。これは、リーダの変位が振幅値に達し、逆方向に動き出しても、フォローはリーダの動きに同期せず、そのまま振幅方向に少し余分に移動してしまうことを示している(振動方向の切替がリーダに対し、遅れる)。

実験の結果、「両軸シリンダ+サーボバルブ」の組み合わせの応答性がもっとも良かった。両軸シリンダはシリンダの内部構造が左右対称である。そのため、シリンダが伸びる場合と縮む場合において、油の供給制御が同一となり、制御アルゴリズムが単純で高応答となることが考えられる。また、サーボバルブはスプール構造を有し、電磁比例弁と比べ、油の流量制御を精密に行える。この結果により、「両軸シリンダ+サーボバルブ」の組み合わせを選定し、実験を進めることとした。

2.2.2 力触覚の伝送性の検証

リーダとフォローの駆動機構が異なる場合、力触覚を伝送させるためには、フォローの駆動力(油圧変化)をリーダの駆動力(電圧)に遅延なく変換しなくてはならない。力触覚の伝送性を検証するために、フォローに各部材を押し当てた状態でリーダを正弦波駆動させた。実験条件を以下に示す。

- ・正弦波振動の周波数(Hz)：0.2
(位置の同期性の検証時にほぼ遅延がなかった周波数とした。)
- ・正弦波の波形：オフセット6N, 振幅(0-peak)6N
(すなわち、0~12Nまで変化する波形)
- ・フォローに生じる力はリーダの200倍

柔軟性の高い材料であるCR45(クロロプレンゴム)に対しての実験結果を図4に示す。また、剛性の高い材料である鉄鋼に対しての実験結果を図5に示す。いずれの材料に対しても時間軸(横軸)に対し、対称な波形が得られており力の作用、反作用則が遅延

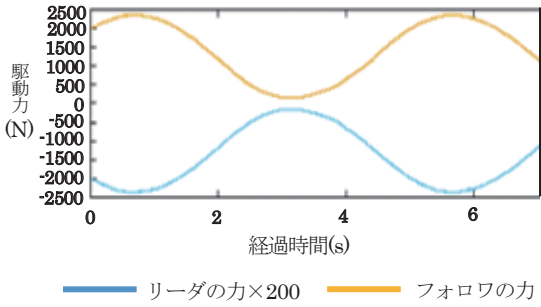


図4 クロロプレンゴムでの力触覚伝送実験

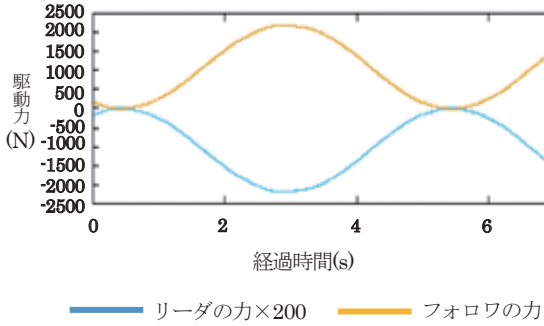


図5 鉄鋼での力触覚伝送実験

なく、正確に伝送されていることが確認できる。
 以上から、0.2 (Hz) ほどの低周波の条件では、フォロワはリーダの動きに遅延なく同期し、力触覚も正確に伝送されることを確認した。この結果をもって、建設重機を用いての実験に移行することとした。

3. 建設重機を用いた実験

3.1 実験対象の選定

今回、リアルハプティクス技術を適用する対象として、油圧ショベルのグラップルを選定した。グラップルは油圧ショベルの先端に取り付けられるアタッチメントの一つ(写真3)で、物を掴む機能により、構造物の解体や、建設現場での部材の移動などに使用される。

現状、グラップルの操作時にオペレーターは力触覚を感じる事ができない。掴む部材が硬くても、軟らかくても操作感は同一である。操作感が同一であることの問題点として、部材を強く掴み、破損させる可能性が考えられる。また、破損回避のため、必要以上に慎重に操作し、作業効率が低下することも考えられる。

リアルハプティクス技術をこのグラップルの操作に適用し、オペレーターが掴む部材の性状を感じながらの操作が可能になれば、上述した課題を解決できる。

実験では丸太、ゴムロールなど性状の異なる部材を掴み、力触覚の違いを感じる度合いを評価し、作業性について検証した。

3.2 実験設備概要

図6に示すように、油圧ショベルの先端にフォロワとなるグラップルを取り付けた。リーダとなる操作器はレバータイプのものと同タイプのものを使用した。レバータイプのは、建設重機に標準装備されている機器と同様の感覚で操作できる。それに対して、ハンドタイプのもものでは、指の動きとグラップルの開閉が同期するため、普段建設重機を運転しない人でも直感的に操作できることが期待される。これら二つの操作器で実験して、操作性を評価した。

3.3 実験結果

写真4にレバータイプでの実験の状況、写真5にハンドタイプでの実験の状況を示す。レバータイプのリーダは重機作業に慣れた建設作業員が操作し、ハンドタイプのリーダは建設会社社員が操作した。



写真3 グラップル

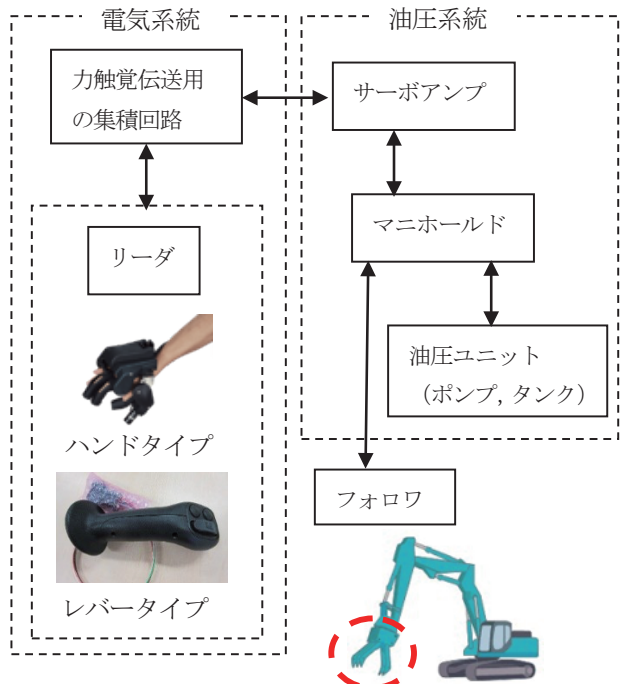


図6 実験設備概要



写真4 レバータイプでの実験の状況



写真5 ハンドタイプでの実験の状況

リアルハプティクス技術では力触覚を拡大，縮小して伝送することができる。そこで，本実験において，レバータイプでは，リーダとフォロワの位置のスケール比は3.1倍，力のスケール比は0.00004倍とした（リーダの位置変化 (rad) = 3.1 (rad/m) × フォロワの位置変化 (m)，リーダのトルク (N × m) = 0.00004 (m) × フォロワの力 (N)）。

それに対し，ハンドタイプは，グラップルと位置と力の単位が合う構造（スケール比は無次元）とし，位置のスケール比は0.0625倍，力のスケール比は0.0005倍とした。

このような位置と力のスケール比をシステムに設定した結果，リーダとフォロワの位置は同期し，フォロワの接触情報はリーダへ円滑に伝送された。レバータイプでグラップルを操作し，丸太を掴んだ時の位置と時間の関係を図7，力と時間の関係を図8に示す。それぞれのグラフにおいて，リーダとフォロワを示す線が一致しており，位置と力が同期している。そして，どちらのグラフにおいても，経過時間が1 (s) ~ 1.5 (s) 付近までは，傾きが滑らかになっている。これは，1 (s) 付近でフォロワが丸太に接触し，その接触情報を感じた建設作業員がレバーの動きを止めたことを示している。その後の1.5 (s) ~ 2 (s) において，力応答のグラフの傾きは変化しているが，位置応答のグラフの傾きは滑らかである。これは，建設作業員がレバーを動かし，丸太を掴んだことを示している。

力触覚を伝送させることにより，壊れやすい薄肉鋼管も遠隔で掴むことができた。そして，性状の異なる部材を掴んだ時の力触覚の違いを識別すること

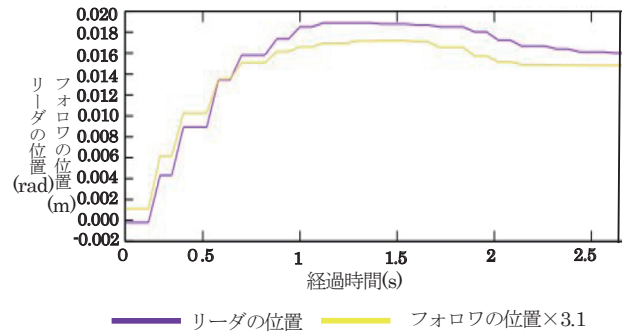


図7 リーダとフォロワの位置応答

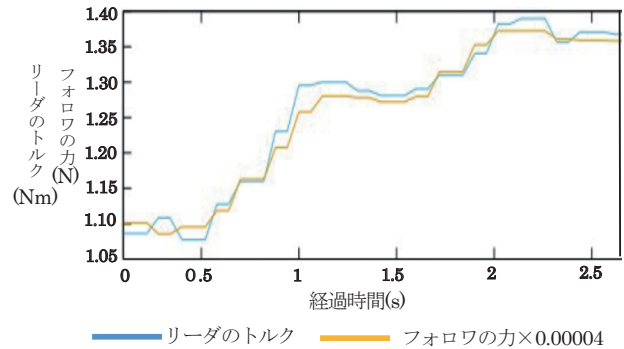


図8 リーダとフォロワの力応答

ができ，本実験の範囲においては，良好な結果が得られた。

4. おわりに

油圧駆動機構へのリアルハプティクス技術を適用するため，小型の油圧駆動機構を用いた力触覚伝送システムを設計，製作し，能力を評価した。その後，建設重機への適用実験を行い，その可能性を確認した。今後はブームを操作するアーム型装置の開発など，建設重機全体を操作できる力触覚伝送システムの実用化を目指す。そして，建設重機の遠隔操作への適用を図り，より効率的で安全な建設現場の実現に貢献したい。

謝辞

慶應義塾大学理工学部野崎貴裕准教授，およびハプティクス研究センターの皆様には，温かいご指導ご鞭撻（べんたつ）を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田中一行，関雅代，黒田聡，大西公平，溝口貴弘，第63回自動制御連合講演会セッションID：113-5，2020
- 2) モーションリブ株式会社ホームページ，<https://www.motionlib.com/technology/>，2023/11/28

(原稿受付：2023年11月29日)

解説

VR/AR空間におけるフルードパワーを用いたウェアラブルな全身型力覚提示システム

著者紹介



さわ はし りゅうの すけ
澤 橋 龍之介

中央大学理工学研究科
〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27
E-mail : r_sawahashi@bio.mech.chuo-u.ac.jp

2022年中央大学理工学部精密子工学専攻博士前期課程修了。VR空間における空気圧アクチュエータとMR流体を用いた可変粘弾性を有する力覚装置による人間の認知の研究に従事。修士(工学)、日本学術振興会特別研究員DC2。



なか むら た ろう
中 村 太 郎

中央大学理工学部
〒112-855 東京都文京区春日 1-13-27
E-mail : nakamura@mech.chuo-u.ac.jp

2003年信州大学大学院博士課程修了。博士(工学)。1999年秋田県立大学助手。2004年中央大学理工学部専任講師。2006年同大学准教授。2012年スイス連邦工科大学ローザンヌ校 Visiting Professor。2013年より中央大学教授。2017年株式会社ソラリス設立。同社技術顧問。現在に至る。人工筋肉を用いたソフトロボットおよび生物型ロボットの開発と応用に従事。

1. はじめに

力覚提示装置はロボットの遠隔操作、歩行支援やリハビリテーション、トレーニングのフィードバックやエンターテインメントの分野におけるVR環境の現実感や臨場感の向上を目的として多くの装置が開発されている。

一般的な力覚提示装置はTouch (3D System) や Omega (Force Dimension) に代表されるような卓上型の装置である。卓上型の装置は机などに置いて使用するため、ユーザに提示する力以外の負荷が加わらず、違和感の少ない力覚提示ができる。しかし、装置を固定するため、ユーザの移動が制限される。一方で、装着型の装置は移動しながら力覚提示が可能である。装着型装置はアクチュエータとしてモータと減速機を用いた装置¹⁾が主流である。このような装置は制御により弾性、摩擦や粘性などの多様な力覚提示が可能だが、減速機の搭載に伴う装置の高重量化やバックドライバビリティが低いため無負荷状態の提示が困難である。また、モータの誤作動に

より過剰な力を装着者に与える可能性があり、安全性に課題がある。

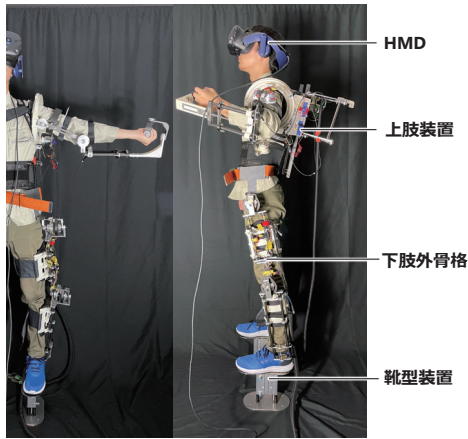
モータに代わる手法として、空気圧人工筋肉を用いた力覚提示装置が開発されている²⁾。このような装置は人工筋肉の構造上、自然な弾性力を提示できる。しかし、空気圧駆動に起因する応答速度の遅さにより、応用先がリハビリテーションのアシストなど装着者の動作が比較的低速の状況に限られる。

また、機能性流体のER (Electrorheological) 流体や MR (Magnetorheological) 流体をブレーキやクラッチとして用いた力覚提示装置³⁾⁴⁾は、高いバックドライバビリティを有し⁵⁾、応答性が高く、連続的にトルク制御が可能である。また、これらの装置はパッシブに力を提示するため機構的に安全である。しかし、パッシブな提示のみだと、環境側から身体にアクティブにかかる力の提示ができない。

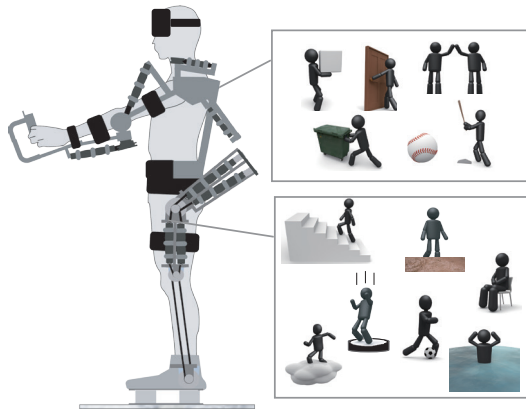
そこで著者らは、空気圧人工筋肉とMR流体ブレーキを組み合わせた可変粘弾性特性を有する全身型力覚提示システム開発を目指し、力覚提示装置の開発を進めている。本稿では、その装着型装置について提示対象の身体部位ごとに装置概要と応用したVRコンテンツを紹介する。

2. コンセプト

図1に示した全身型力覚提示システムは上肢スーツと下肢スーツから構成され、下肢スーツは外骨格と靴型装置に細分化される。上肢装置は主に、手で仮想物体に触れたり、物体を押ししたり挟んだりするようなインタラクションにおける反力提示に使用される。下肢スーツは足底部分と外骨格部分に分かれており、下肢に装着することで自由に歩き回ることができる。外骨格はユーザの脚関節に負荷トルクを発生させる機構を持ち、ユーザの脚全体に抵抗力を与えることで「水中を歩く」「物体を足で引きずる」「ボールを蹴る」「階段を昇降する」などの感覚提示を可能にする。足底装置は主に上下動することにより、「地面環境に起因する感覚」、「落下感覚」や「昇降感覚」などの重力が作用する感覚の提示を可能にする。



(a)装着した様子



(b)コンセプト

図1 全身型力覚提示システム

3. アクチュエータ

3.1 磁気粘性流体ブレーキ

磁気粘性流体ブレーキ（以下、MRブレーキ）は高出力密度、高いバックドライバビリティ、数十ミリ秒単位の速い応答性⁶⁾という特徴を持つ。層状型MRブレーキの外観と内部構造を図2に示す。MRブレーキは内部に磁気粘性流体を封入し、内部コアと連動して回転するディスクと、磁場を発生させるコイルで構成される。電流を印可すると磁場が発生し、ディスクの回転方向とは垂直に磁性粒子のクラスタが形成される。ディスクの回転によりクラスタが切断され、このとき生じるせん断応力が制動トルクとして出力される。

3.2 軸方向繊維強化型人工筋肉

本研究で使用する軸方向繊維強化型人工筋肉を図3に示す。本人工筋肉は炭素繊維シートを天然ラテックスゴムで内包された構造になっており、炭素繊維シートの繊維方向が軸方向のみに配置されている。印加する空気圧により剛性が変化の上、収縮力が人工筋肉の中でも大きいため力覚提示に適している。

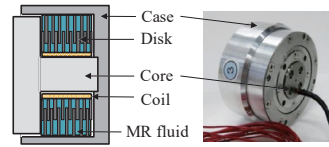


図2 MR流体ブレーキの外観と内部構造⁷⁾

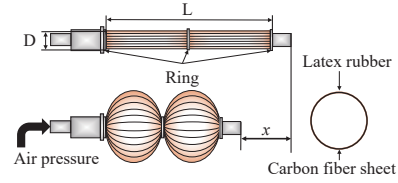


図3 軸方向繊維強化型人工筋肉

表1 力覚提示手法⁸⁾

Target force	No load	Elasticity	Friction / Viscosity
Schematic diagram			
Artificial muscle	—	Variable stiffness	—
MR brake	Minimum torque	Variable torque	Variable torque

3.3 力覚提示手法

可変粘弾性を持つ駆動軸の力覚提示手法について、関節部の構造を表1に示す。人工筋肉に印加する空気圧とMRブレーキのブレーキトルクのON/OFFの切り替えにより、力覚提示の有無を切り替える。それぞれのアクチュエータの弾性係数や粘性係数を直接制御できるため簡素な仕組みで力覚提示している。力を提示しない無負荷状態を提示する場合、人工筋肉に空気圧を印加せず、MRブレーキにブレーキトルクを入力しない。弾性力を提示する場合、人工筋肉とMRブレーキには目標値に応じた空気圧とブレーキトルクをそれぞれ入力する。摩擦力、粘性力を提示するときは、人工筋肉には空気圧を印加せず、MRブレーキに目標値に応じたブレーキを入力する。

3.4 制御システム

図4にVR空間を含めた全体のシステムを示す。本装置のシステムはVR PCと制御PCの二つから構成される。VR PCでは身体に取り付けたトラックと、HMDからユーザの姿勢を取得する。そして3DCGソフトウェア（Unity）を使用して現実世界の身体の動きと同期したVRの映像をレンダリングする。このとき、身体と仮想物体との接触を計算し、接触があった場合には接触判定がVR PCから制御PCに送信される。制御PC側では各関節トルクの制御を行う。

4. VR空間での力覚提示

4.1 上肢

図5に示す双腕装着型力覚提示装置⁷⁾はMRブレーキと人工筋肉を組み合わせた各腕4自由度の装置である。本装置は固定された空間だけでなく移動を含めた動作に対応でき、弾性、粘性、摩擦力をフィードフォワード制御によるシンプルな制御で提示することが可能である。また、弾性力と粘性力とを組み合わせ、図7に示すようなVR空間で空気圧ボールを押し込むような動作を再現することができる。

図6に示す傘歯組込型装置¹⁰⁾は肩部に駆動軸を集約することで可動域の拡張と肩先の重量を軽量化した装置である。図8に示すようなVR空間において移動しながら粘性物体とインタラクションしたときの力覚提示の影響を検証した。その結果、移動を伴う力覚提示により、VR酔いの抑制効果および臨場感が向上することが示唆された¹⁰⁾。

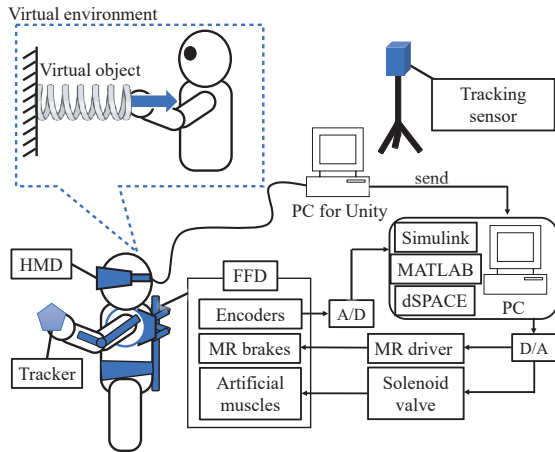


図4 全身型力覚提示装置の実験環境

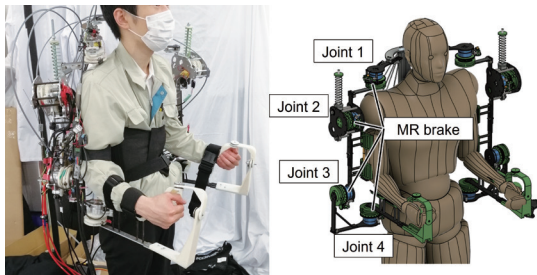


図5 双腕装着型力覚提示装置⁷⁾

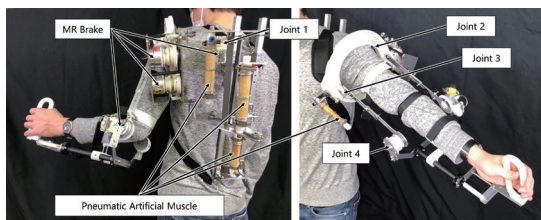
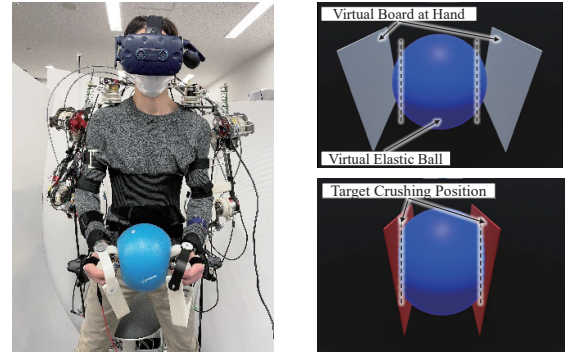


図6 傘歯組込型上肢力覚提示装置⁹⁾



(a) 双腕型装置でボールを押しつぶすイメージ (b) VR空間のボールの変形

図7 双腕型装置による粘弾性ボールとのインタラクション⁷⁾



図8 移動しながら物体とインタラクションする様子

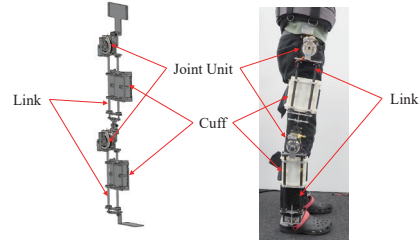


図9 下肢装着型外骨格¹¹⁾

4.2 外骨格

下肢に対する力覚提示は、地面環境に伴った上下方向の相互作用力の提示や重力に起因した感覚が重要となる。また足底に提示する靴型装置の場合、ユーザの自重を支持する必要がある。このような感覚を装置によって実現することにより、落下や溺水の危険が伴う作業を扱うVR職業訓練のようなコンテンツで、より高い現実感や臨場感が得られる。その結果、VR空間における危険予測訓練の効果を高めることが期待できる。

図9に示す外骨格は膝と股関節部にMRブレーキと減速機で構成した駆動軸を配置している。現在は水中動作感覚と撃力の提示が可能である。水中動作感覚提示は、図10に示すような水槽で下肢を揺らしたときの水から受ける抗力を再現することで水とインタラクションする現実感を向上させた¹²⁾。撃力提示はボールキック時の撃力の力積に着目し、比較的小さいトルクを実際より長い時間提示することで

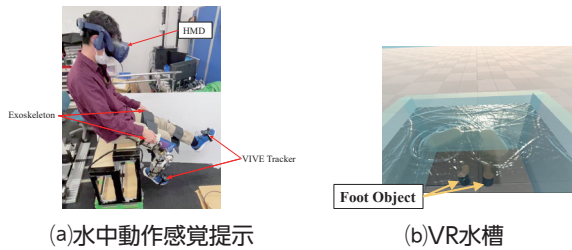
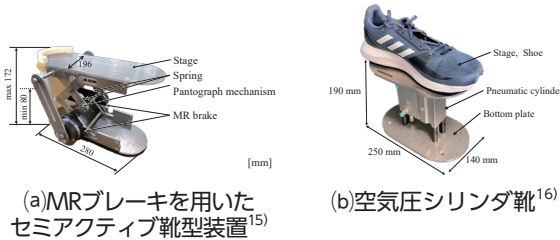
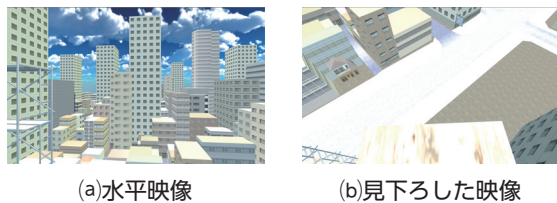
図10 VR空間での外骨格によるインタラクション¹²⁾

図11 下肢靴型装置

図12 落下体験VR¹⁶⁾

提示する¹³⁾。

4.3 靴装置

靴装置ではヒトが足底から受ける力を再現する。著者らは今まで、足底における変化量の大きい動作となる落下感覚を主眼に研究を進めてきた。歩行性能や安全性を考慮すると、足底の駆動距離をできる限り低くしながら可変的な落下距離に対応する必要がある。そこで、著者らは落下の変化点となる落下直後と着地する瞬間だけ装置で重力加速度の1/10程度の下向きの加速度を提示した落下感覚提示手法を提案した¹⁴⁾。本手法はベクション効果という錯覚現象も利用している。その落下コンセプトを基に足底サイズに落とし込んだ装置を開発している。

装置としては図11(a)に示すMRブレーキを用いたセミアクティブシューズ¹⁵⁾や図11(b)に示す空気圧シリンダを用いた装置¹⁶⁾がある。セミアクティブシューズはMRブレーキのブレーキ力で足底の高さを維持し、図12に示すようなVR映像に合わせてブレーキを開放することで装着者に下向きの加速度を与える。空気圧シリンダ靴は出力重量比の高い空気圧を用いることで落下の安定性を高めた装置である。落下直後と着地の瞬間で下向きの加速度を与える2段階落下の効果検証を行い、2段階落下における現実感が1段階落下条件よりも有意に高まることが明

らかになった。

また、VRコンテストIVRC2022において、外骨格装置と靴型装置を合体した下肢スーツを用いて複数の感覚提示を行うエンターテインメントVRの構築を試みた¹⁷⁾。結果として、子供を含めた幅広い年代の方に落下感覚やジャンプする感覚を提示することを確認した。

5. おわりに

本論文では、全身型力覚提示システムについて、システム構成と上肢、下肢外骨格、下肢足底それぞれの装置の概要を解説した。本構想が実現すると、その延長線上に身体認知の仕組みを解明するような認知科学分野への展開や、VRを活用した効果的なOJTや災害訓練への応用が見込まれる。

謝辞

本論文は科研費JP19H01127の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) X. Cui, *et al.*, "Design of a 7-DOF Cable-Driven Arm Exoskeleton (CAREX-7) and a Controller for Dexterous Motion Training or Assistance," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.22, No.1, pp. 161-172, doi:10.1109/TMECH.2016.2618888 (2017)
- 2) H. Li, *et al.*, "Achieving haptic perception in forceps' manipulator using pneumatic artificial muscle," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 74-85 (2013)
- 3) H. Son, *et al.*, "RealWalk: Haptic Shoes Using Actuated MR Fluid for Walking in VR," 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 241-246, doi:10.1109/WHC.2019.8816165 (2019)
- 4) Jong-Seok Oh, *et al.*, "A 4-DOF haptic master using ER fluid for minimally invasive surgery system application," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 22, No. 4, 045004, doi:10.1088/0964-1726/22/4/045004 (2013)
- 5) M. Okui, *et al.*, "Variable Viscoelastic Joint System and Its Application to Exoskeleton," 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3897-3902 (2017)
- 6) B.J. Park, *et al.*, "Core-Shell Typed Polymer Coated-Carbonyl Iron Suspension and Their Magnetorheology," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 149, No. 1, pp. 1-5, doi:10.1088/1742-6596/149/1/012078 (2009)
- 7) R. Sawahashi, *et al.*, "Development of a Bimanual Wearable Force Feedback Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR Fluid Brakes and Sensibility Evaluation by Pushing Motion," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 35, No. 1, pp. 180-193, doi:10.20965/jrm.2023. p0180 (2023)
- 8) R. Sawahashi, *et al.*, "Development of a Wearable Four-Degrees-of-Freedom Force Feedback Device with a Clutch Mechanism Using Artificial Muscle Contraction," 22nd IEEE International Conference on

- Industrial Technology, pp. 47-54, doi: 10.1109/ICIT46573.2021.9453574 (2021)
- 9) J. Komatsu, *et al.*, "Development of Shoulder Mechanism for a Wearable Upper Limb Force-Feedback Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR Brakes", 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, doi:10.1109/SII55687.2023.10039212 (2023)
 - 10) 澤橋龍之介ら, "MR 流体ブレーキを用いた装着型上肢力覚提示装置による直進移動下の力覚提示", ロボティクス・メカトロニクス講演会2023, 2P1-I23 (2023)
 - 11) T. Masuda, *et al.*, "Prototype of an exoskeletal lower limb force-feedback device for moving extensively in VR space", Proc. of the 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2022), SS30_1 (2022)
 - 12) R. Sawahashi, *et al.*, "Presentation of Underwater Sensation by Drag in Knee Motion with a Lower Limb Exoskeleton Using MR Fluid Brakes," Proc. of the 32nd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2023), Helsinki, Finland, ISIE23-000226 (2023)
 - 13) 清水大雅ら, "MR流体ブレーキを用いた下肢外骨格型力覚提示装置による撃力提示—ボールキックにおける撃力感覚の提示手法—", ロボティクス・メカトロニクス講演会2023, 2A1-C03 (2023)
 - 14) T. Tanaka, *et al.*, "Influence of Vertical Acceleration for Inducing Sensation of Dropping by Lower Limb Force Feedback Device," in Proc. of 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2020), Italy, pp. 1-6 (2020)
 - 15) R. Sawahashi, *et al.*, "Development of Semi-active Force Feedback Shoes with MR Brake Rendering a Falling Sensation and Descent Acceleration Measurement", in Proc. of the 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2022), SS30_1 (2022)
 - 16) Y. Ishida, R. Sawahashi, R. Nishihama, T. Nakamura, "Shoe-Type-Force-Feedback Device and Falling Sensation with Two-Step Dropping," in the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2023), Hawaii, USA (2023)
 - 17) 澤橋龍之介ら, "Vivid Ground Generator —VR空間を足から堪能するハプティクス—", 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会, 1A3-08 (2022)

(原稿受付：2024年1月22日)

会議報告

日本機械学会2023年度年次大会における
フルードパワー技術研究

著者紹介

よし だ かず ひろ
吉田和弘東京工業大学科学技術創成研究院
未来産業技術研究所
〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259-R2-42
E-mail: yoshida@pi.titech.ac.jp1989年東京工業大学大学院博士課程修了，同
大学助手，助教授（准教授）を経て2015年4月
教授。2008年10月～2009年3月米国UCSB客員
研究員，2015年7月～9月米国MIT客員研究員。
機能性流体，パワーマイクロロボットの研究に
従事。JFPS，JSME，IEEEなどの会員，工学博士。

1. まえがき

日本機械学会2023年度年次大会は，9月3日～6日に，東京都立大学南大沢キャンパス（東京都八王子市南大沢1-1）において，「機械工学の英知を結集しゼロエミッション社会を拓く「安全安心」，「グリーン&デジタル」，「共生社会」を大会テーマとして開催された。本講演会は国内最大の機械工学に関する学術講演会であり，発表はポスター会場を含め合計36室で行われた。1日目には一般開放行事が行われ，2～4日目に特別講演1件，基調講演16件，ワークショップ15件，先端技術フォーラム20件，オーガナイズドセッション64件，ポスターセッション47件，および技術展示3件が行われた。

フルードパワー技術関連では，油圧関連1件，水圧関連1件，空気圧関連10件，機能性流体関連6件，合計18件の発表があった。以下では，各発表について概観する。なお，プラズマアクチュエータ関連で15件の発表があったが，紙数の関係もあり，ここでは割愛させていただく。

本講演会では発表資料として参加者のみに公開される予稿集（Web版）が会期中に配布された。講演会后，一般に公開される講演論文集が発行される予定である。本稿では，著者が利用できた予稿集に基づき報告させていただく。

2. フルードパワー技術関連の発表の概要

2.1 油圧関連および水圧関連の発表

油圧関連ではポンプ1件，水圧関連ではアクチュ

エータ1件の発表があった。

野島ら¹⁾は，ラジアルピストンポンプのスリッパの最適設計のため，ピストン・スリッパの動作環境を再現する試験装置を試作し，入力軸の回転速度，供給圧力などを変えたときのピストン姿勢および入力軸のトルクの挙動を実験的に明らかにしている。

難波江²⁾は，細径McKibben型人工筋肉の圧力制御のため，固体高分子型燃料電池と同様の構造をもつ柔軟なチューブを開発して人工筋肉と一体化し，水の電気分解／合成の電圧制御でガス圧制御を行う手法を提案し，その有効性を実証している。

2.2 空気圧関連の発表

空気圧関連では，ソフトアクチュエータ6件，システム3件，マイクロポンプ1件，合計10件の発表があった。

脇元³⁾は，ゴムチューブの繊維強化で任意の変形を実現する空気圧ソフトアクチュエータを組紐（ひも）製造技術で実現することを提案し，センサとなる光ファイバ，形状記憶ポリマー繊維などを複合したアクチュエータを試作し，その有効性を確認している。

山口⁴⁾は，軽量で機械的強度などが優れたポリイミドの溶着技術を開発し，2枚のポリイミドフィルムを閉曲線パターンで溶着した収縮型人工筋肉を試作し，その特性を実験的に明らかにしている。

齋藤⁵⁾は，McKibben型人工筋肉のゴムチューブを非伸縮性エアバッグに置き換え，その外側にエアバッグを配置した構造で，人工筋肉内外の圧力制御でヒステリシスを除去する手法を開発している。

山口ら⁶⁾は，シリコンゴムシートにレーザ彫刻加工により深い凹部と浅い凹部を形成し，これにシリコンゴムシートを貼り合わせ密閉したゴム製ソフトアクチュエータを提案，開発している。

渡邊ら⁷⁾は，人の重量物支持を支援する装着型制動装置のため，平紐とゴム部品をはさみゴムチューブに収めた構造で，負圧により制動力を発生するフレキシブルリニアブレーキを提案，開発している。

本多・遠藤⁸⁾は，半ベローズ型空気圧アクチュエータ4本で切り紙細工を施した天板を4方に引っ張り天板中央の開口部を拡大，縮小させ，ここで物

体を把持するソフトグリッパを提案、開発している。

須郷ら⁹⁾は、厳密なモデルの構築が困難なソフトマニピュレータのため、機械学習を用いた姿勢推定モデルを提案し、5本の人工筋肉を組み合わせたソフトマニピュレータにより有効性を検証している。

谷口ら¹⁰⁾は、細径McKibben型人工筋肉を用いた小児用動力義手について、小児の義手ユーザを対象として日常生活の動作を行う評価試験を行い、その結果を基に改良を加え、その機能性を確認している。

高岩・白瀬¹¹⁾は、ゴムパッキンでシールされた汎用型空気圧アクチュエータの高精度位置決めのため、新しい補償器を提案し、実験によりその有効性を確認し、可変剛性による精密はめ合いを実現している。

久保ら¹²⁾は、シート状弁体の浮揚動作により弁閉時の漏れが小さく弁閉時の圧力損失が小さいマイクロシートバルブをチェック弁として用いた高出力空気圧マイクロポンプを提案、開発している。

2.3 機能性流体関連の発表

機能性流体関連では、電界で粘度が変化するERF関連1件、磁界で粘度が変化するMRF関連2件、磁界に吸引される磁性流体関連2件、導電性のあるイオン液体関連1件、合計6件の発表があった。

松永ら¹³⁾は、流動によって誘起される配向欠陥構造と液晶粘度についてITO電極を用い電圧印加と流動状態の偏光顕微鏡観察が可能な回転式レオメータを用いて測定し、その特性を明らかにしている。

福山ら¹⁴⁾は、フェイルセーフな生活支援ロボットのため、永久磁石を用い、電源オフ時につなげ、電源オン時に切ることができるMRクラッチを提案、試作し、実験によりその特性を明らかにしている。

福田ら¹⁵⁾は、選択的吸着特性を用い安定に分散させた鉄粒子のみのMRFと銅粒子も混合したMRFの熱伝導特性を測定し、磁場印加で前者の方が熱伝達率が大きく向上することなどを明らかにしている。

森ら¹⁶⁾は、強磁性ナノ粒子を冷凍機油に添加した磁性ナノオイルと冷媒の混合物について、冷媒溶解度および印加磁場に対する粘度、比誘電率などの物性の変化を実験的に明らかにしている。

栄ら¹⁷⁾は、温度により磁化が大きく変化する強磁性体微粒子を分散させた感温性磁性流体を用いた熱輸送装置の冷却性能向上のため、非磁性多孔体を設置したときの特性を実験的に明らかにしている。

川原田・高奈¹⁸⁾は、化石燃料と水素を混合し用いた自動車の排出CO₂を回収するため、CO₂が溶解しやすいイオン液体を静電噴霧する手法を提案し、その実現可能性について検討している。

3. あとがき

日本機械学会2023年度年次大会で発表されたフ

ルードパワー技術関連の発表について概観した。

2024年度年次大会は9月8日～11日に愛媛大学で開催される予定である。多くのフルードパワー技術関連の発表が行われるものと期待される。

参考文献

- 1) 野島優樹, 草野雄介, 竹本翔一, 風間俊治, ラジアルピストンポンプのピストン・スリッパ挙動の実験解析(試行計測), 機学2023年度年次大会予稿集(Web), S114-31, (2023)
- 2) 難波江裕之, 水の電気分解/合成を用いた電気駆動細径McKibben型人工筋肉, 同上, F111-2, (2023)
- 3) 脇元修一, 組紐製造技術で実現する空気圧ソフトアクチュエータ, 同上, K111, (2023)
- 4) 山口大介, ポリイミドフィルムを用いた収縮型人工筋肉の紹介, 同上, F111-3, (2023)
- 5) 齋藤直樹, 伸縮特性を改良した空気圧人工筋肉, 同上, F111-4, (2023)
- 6) 山口大介, 川口智也, 脇元修一, 神田岳文, レーザ彫刻加工によるゴム製ソフトアクチュエータの製作, 同上, J111-04, (2023)
- 7) 渡邊匠海, 佐々木大輔, 原田魁星, 大槻尚太郎, 門脇惇, 八瀬快人, 装着型制動装置のための空圧式フレキシブルリアブレーキ, 同上, J111p-09, (2023)
- 8) 本多佑希, 遠藤洋史, ベローズ型複数アームに追従する切り紙式ソフトグリッパーの拡張動作, 同上, J111p-04, (2023)
- 9) 須郷賢, 吉本依史, 脇元修一, 浮田貴宏, 山口大介, 神田岳文, 機械学習の導入による空気圧ソフトマニピュレータの姿勢推定精度の向上, 同上, J111p-06, (2023)
- 10) 谷口浩成, 八上廉, 森永浩介, 脇元修一, 日常生活での使用を目指した空気圧駆動式小児用動力義手の開発, 同上, J111-03, (2023)
- 11) 高岩昌弘, 白瀬左京, 汎用型空気圧アクチュエータの高精度位置決め技術と産業応用展開の可能性, 同上, J111-06, (2023)
- 12) 久保隆顕, 吉田和弘, 金俊完, マイクロシートバルブを用いた高出力空気圧マイクロポンプに関する研究, 同上, J111-01, (2023)
- 13) 松永悠萌香, 辻知宏, 蝶野成臣, 流動によって誘起される配向欠陥構造が液晶粘度に及ぼす影響, 同上, S053p-04, (2023)
- 14) 福山理大, 阿部功, 菊池武士, 電磁石と永久磁石を併用したfail-safe型MR流体デバイスの開発, 同上, J112p-09, (2023)
- 15) 福田啓人, 包原有紗, 岩本悠宏, 井門康司, 選択的吸着特性を用いたMR流体の熱伝導異方性, 同上, S052-03, (2023)
- 16) 森大和, 本澤政明, 福田充宏, Rakpakdee Wannarat, PAOベース磁性流体の冷媒混合時における物性変化および磁場印加による影響, 同上, S052-02, (2023)
- 17) 栄中武, 岩本悠宏, 井門康司, 三谷敦己, 小林亮平, 非磁性多孔体を流動する磁気駆動感温性磁性流体の熱伝達特性, 同上, S053-04, (2023)
- 18) 川原田光典, 高奈秀匡, イオン液体の静電噴霧による車載式CO₂回収デバイスのコンセプト, 同上, S052-06, (2023)

(原稿受付: 2023年12月5日)

トピックス

学生さんへ、先輩が語る 一過去の経験が今につながる一

著者紹介



しずく よしのり
栗 奉 憲

SMC株式会社

〒300-2493 茨城県つくばみらい市絹の台4-2-2

E-mail : shizuku.yoshinori@smcjp.co.jp

2017年明治大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年SMC株式会社に入社。入社から現在に至るまで弊社の中で主にエレクトロニクス製品の設計・開発を行う部署でソフトウェアの設計・開発業務を担当。



図2 産業用無線製品の一例

1. はじめに

1.1 自己紹介

私の大学時の専攻は電気でしたが、配属された制御工学の研究室が弊社と委託研究をおこなっていたため、空気圧については学生時代から知識があり身近な存在であった。大学院に進学後も空気圧機器の制御に関する研究を続け、その中で空気圧制御の難しさにぶつかりながらもやりがいを感じていた。就職活動で弊社の製品の知識を深めたり企業研究を進めたりする中で、さまざまな空気圧制御機器（図1）で世界を支えている点にとっても魅力を感じ、自身の研究で学んできた経験を元に製造業に貢献したいと思いSMC株式会社へ入社した。入社当時から産業用無線製品（図2）の設計・開発に携わり、現在は工場内の上位ネットワークと生産設備機器とのデータを無線通信により制御する、無線ベースと呼ぶ製品のソフトウェアの設計を主に行っている。

1.2 会社紹介

SMC株式会社は空気圧をはじめとする自動制御機器の総合メーカーであり、世界のモノづくりの現場でFA（ファクトリー・オートメーション）・自動化に貢献している。また研究開発から生産、販売、アフターフォローまでの一貫した体制を世界規模で整えてサポートしている。

1.3 職場紹介

弊社の主な開発拠点は茨城県つくばみらい市にある筑波技術センター（図3）であり、約1,200名の技術者が勤務している。北米、欧州、アジアの海外研究部門と連携を取りながら、研究開発部門の中心拠点として世界各国の営業拠点に対するサポート、顧客要望を満たす設計開発などを進めている。私が所属する開発5部では、主にセンサ、スイッチ、産業用通信機器などのエレクトロニクス製品の設計・開発を行っている。



図1 空気圧制御機器の一例



図3 筑波技術センター

2. 学生時代を振り返って

大学で制御工学の研究室に配属されたことで、前期課程修了まで制御について学び研究してきた。研究としては指導教授からむだ時間プロセスを持つ積分器に対する制御を目的としたテーマをもらい、他の論文を理解しながら制御理論の改善、改良を行った。私の研究は現代制御理論を用いて制御対象物の内部状態を正確に表現する数学的な制御であった。この数学的な部分の答えを導き出すことが非常に難しく苦労した。特に苦労したことは研究で導き出した推論を実際の制御機器に適用して動かす実機実験である。ありがたいことに、私の研究室には当時弊社から委託研究でお借りしていた空気圧機器があったため実機動作のノウハウはあった。求めた理論をプログラムで制御器を表現し、制御器の操作量と空気圧機器の出力から安定性、速応性、定常性を確認する。特に制御が難しいのが空気圧機器に機械的・電気的外乱などの外的要因やむだ時間などの内的要因が入った場合である。これらの改善などでさらに研究が必要になるため、制御工学には終わりがないと感じた。

技術者として現在の開発業務も改善、改良の繰り返しであると感じている。ただし当時との違いは市場要求に答え優位性がある製品を決められた期間で開発することである。またIoTが進む産業界では新しい技術が日々生み出され規格化されている。私たちは新しい技術を製品に取り入れる必要があり勉強や研究に終わりがないと感じている。

3. 業務紹介と今後について

3.1 業務紹介

私が所属するグループでは、産業用無線製品の開発を行っている。産業用無線製品は従来のワイヤー配線製品が主流であったFA環境において、配線材コストや施工工数の削減などで優位性がある。

無線製品は主に工場内の上位ネットワークと通信する無線ベース（親機）と、生産設備のデータを上位（無線ベース）へ伝達する無線リモート（子機）がある。私はこの無線ベースのソフトウェア設計を担当し、ソフトウェア仕様構想、プログラム作成、ソフト評価を行っている。開発業務では、まず市場のニーズに合った仕様の構想が重要である。実際に使用する製造現場で設定をしやすいようにするにはどうすればよいか。製品でトラブルが起きた際に原因がすぐ解明でき対策が行えるか。ユーザーが使いやすい製品機能を組み込むことは今まで培った経験、知識が必要であり、時には第三者の意見を参考にす

るべくチーム内でのディスカッションを行い、より洗練された製品を作る取り組みを行っている。つぎに重要なことは構想したソフトウェア仕様を基に、品質の高いプログラムを設計することである。期限までにソフトウェアを完成させることは当然だが、バグのない製品開発業務が重要な役割となっている。また他の製品に同じ機能を入れることができる流用性を意識したプログラムのモジュラー設計も重要である。これらの作業が今後の製品開発スピードの向上につながる。

3.2 海外との業務連携

弊社はBCP（事業継続計画）と呼ぶ、いかなる非常事態に対しても平時から備えを固め、有事の際にも事業活動を停止しない体制、仮に停止した場合にも速やかに再開できる体制を構築する計画を推し進めている。その一環として海外技術センターと共同で製品開発を行っている。私のグループでは海外技術センターの現地技術者と連携して、ソフトウェアの仕様構想から設計までを協業している。そのため毎週オンラインによる打合せやメールなどで、製品仕様やソフト設計仕様に関しての情報交換を行いながら設計を進めている。時には自分が出張し、海外技術センターの技術者と作業を進めたり、海外技術センターから日本に出張して業務を行ったりすることも多い。このような過程を経て仕様の認識違いを修正しソフトウェアの課題を共有することで、お互いの知識やプログラミング技術が向上し、品質の高いソフトウェアが完成する。一つのプロジェクトが完了し製品が発売されるとお互いに達成感を味わうことができるのがこの仕事の醍醐味である。

3.3 業務で心がけていることと今後について

私が業務で心がけていることは二つある。一つは「顧客目線での製品開発」である。仕様構想の時点でどの機能を入れるかを考える必要がある。開発者から見れば機能が多ければ優れた製品だと感じるが、実際に使用する生産設備の技術者にとっては多すぎる機能は混乱を招いてしまう。そのためいかにわかりやすく、すべての顧客が満足するような製品を作るか日々模索している。

もう一つは「読み手を意識したプログラム記述」である。自分が作成した仕様書やソフトウェアのコードを他の技術者が見た際、読んだだけでは理解できず直接質問されることが多々ある。この時点でお互いに業務の効率が落ちてしまっている。文書を作ることが目的ではなく、その先自分以外の人たちがいかに理解しやすいかを意識して記述しなければならない。

こうした心がけが製品開発に活かされていると感

じている。例として私のグループでは今後の産業界のIoT化や省エネ化などに対応するための、エアマネジメントシステム（図4）と呼ぶ製品の開発を行った。これは生産設備の稼働状況を判定し、むだなエア消費を抑えることにより、圧縮空気を生成するコンプレッサの稼働を削減するシステムを搭載した無線製品である。私は上位通信タイプ（無線ベース）のメインシーケンスと無線通信部との内部通信処理ソフトウェアを担当した。その時の設計方針は素早く無線リモートと無線通信を行うために最低限の処理で動作させることと、別の無線ユニットへの移植をしやすいことであった。この方針により電源起動から無線接続までが、今まで開発してきた産業用無線製品と比べ早くなった。またこの時並行して開発を行っていた単独動作タイプ（無線リモート）に私のソフトウェアを共有した。詳細なソフトウェアの仕様書を残し、移植しやすいソフトウェアを設計したおかげで、単独動作タイプの開発効率の向上につながった。



図4 エアマネジメントシステム搭載無線製品

4. 終わりに

私の学生時代や業務の心がけなど紹介させていただいた。就職活動の際に世界で活躍するエンジニアになりたいと考えていた。弊社に入社してから現在に至るまで少しずつではあるがこの目標に近づいていると感じている。今後の目標は、グローバルに製品開発をけん引できるようなソフトウェアエンジニアになることである。エレクトロニクス製品の技術は日々進歩していくため、最新の技術動向に目を向け、世の中になく新しい画期的な製品開発に携わっていききたい。そのために海外技術センターのエンジニアと積極的に意見交換を行い、ソフトウェア設計能力を高め、技術知識を広げ、自分で考えだす力をつけていく必要があると考えている。学生時代には思いもよらなかった経験を社会人になって積んでいる。本稿が今後の社会人生活を想像する際の参考になればありがたい。

（原稿受付：2023年12月5日）

トピックス

笑顔で活躍—お仕事フルードパワー便—
—これまでの進学選択を振り返って—

著者紹介

わた なべ ゆ き
渡 邊 悠 希立命館大学大学院理工学研究科
ヒューマノイドシステム研究室
〒525-0058 滋賀県草津市野路東1-1-1
E-mail: rr0113kk@ed.ritsumeai.ac.jp2022年3月立命館大学工学部ロボティクス
学科卒業、2024年3月立命館大学理工学研究科
機械システム専攻修了予定、その後、東京大学
大学院システム情報理工学研究科後期課程に進
学予定。

1. はじめに

私は高校までを茨城県で過ごし、縁あって滋賀県にある立命館大学工学部ロボティクス学科に進学した。学部時代はロボットに関する知識を座学や演習で広く学び、サークルでもNHK学生ロボコンやその他のロボット大会に出場するためのロボットを設計・開発していた。研究は、流体圧駆動（油圧・空気圧・水圧）のロボットの制御を主とする。学部4回生では油圧駆動の等身大双腕ロボットの圧力制御性能について研究を行い、修士課程では空気圧源で動かす水圧駆動ロボットアームの制御と状態推定に関する研究を行っている。2024年3月に立命館大学理工学研究科の修士課程を修了し、4月から東京大学大学院システム情報理工学研究科後期課程にてさらに流体圧駆動システムの状態推定と計算能力に関する研究を行う予定である。

現在所属する大学と研究室について簡単に紹介する。立命館大学工学部があるびわこ・くさつキャンパスは琵琶湖（びわこ）が見える丘の上に位置し、東京ドーム約13個分の広さを誇る。個人的に特筆したい特徴は(1)専門知識だけでなく教養や外国語の学習にも力を入れている点、(2)学生が自由に使える工作ラボ“AIOL”がある点である。所属するヒューマノイドシステム研究室は、主に液圧駆動ロボットの設計・制御について研究が行われている。古くからさまざまな分野で使用されている油圧駆動を用いた実用的なロボットを設計して制御し、そこで得ら

れた知見をヒントに新たなメカニズムや制御アルゴリズムを考案ならびに検証している。

2. 理系進学という選択

自身の通う高校では、高校2年生の段階で理系か文系かを選択する必要があった。私は特段迷わず理系を選択した。モノを作るのが好きだったことに加え、両親がどちらも理系の職種についていたからである。私のもっとも根底にある興味関心は「人間がどのようなプロセスで思考し行動するのか」についてなので、人間科学や経済学などにも興味があったが、自分の将来の仕事にどうつなげていくのか明確にイメージできなかった。よって、何らかの形で（たとえばプログラムや構成要素の分析によって）人間の動きを記述できれば理解できたと言えるのではないかと考えて、より仕事としてのイメージのしやすい理系に進んだ。この時点で一番身近の理系女子である母を無意識にロールモデルとしていたのかもしれない。

高校3年生では大学での専攻を決める必要がある。ここではかなり迷走した。漠然とモノを作ったり、人間について理解を深めたりすれば楽しいだろうとしか考えていなかったからだ。最終的に、理工学部ロボティクス学科に進学することになった。決め手はロボティクスというのが広い分野を網羅した学問であることだ。どこか興味のある狭い分野を究める際にロボティクスの広い知識があれば面白い発想ができると思った。今思い返すと、小学生の時のあるクリスマスに親からもらった“茶運びカラクリ人形の組み立てセット”は非常に面白く気に入っていたので、ロボティクスを選んだのは必然だったと言えるのかもしれない。

3. 理系大学生としての進路選択

3.1 学部生活と研究室選択

かくして進学したロボティクス学科はロボットを作り活かすための知識、つまり、四大力学やロボット機構学、電気電子回路などのロボットハードウェア知識から、制御工学、情報処理などのロボットソ

フトウェア知識までを広く学ぶ学科である。課外活動としては趣味のギターやテコンドーのほかに、ロボット技術研究会というさまざまなタイプのロボットを製作して大会に出場するサークルに所属した。大学進学前はロボットを一から開発したことが無かったため、まずは先輩を質問攻めにしながら床の線に沿って走る小さなロボット、いわゆる“ライントレースカー”を作った。一度作ると反省点やアップデートしたい部分が見えてくるもので、どっぴりとロボット沼に浸かった。

研究室は、制御工学の内容を実践でき、自分が心躍るロボットが作れそうかどうかという基準で選んだ。油圧駆動のアクチュエータは建機やバス、遊園地など広い分野で使用されているが、ロボットとなるとその普及度は低い。しかし、油圧駆動はパワー密度が高く（質量に対して発揮できるパワーが大き）、アクチュエータと実際に駆動する部分を離して配置できる。よって、軽い手先で重たいものを持ち上げる必要のあるヒューマノイドのようなロボットへさらに応用できると感じ、配属希望を出した。3回生の授業でTA（Teaching Assistant）を担当してくれた優秀な先輩が所属する研究室だったことも一因である。

所属していた理工学部の女子比率は1割で、学部時代のどのタイミングでも周りに女性は少なかった。女子が少ないことで周囲が気を使ってくれることに対して少し申し訳なく感じることはある。しかし、女子が少ないことで感じる不便といわれると、体の不調の愚痴を素直に言える相手がないこと位で、特に苦労はなかった。逆に良かったことを挙げようとしても、女子同士でより結束できたことと、目立つので名前を覚えてもらいやすかったこと位である。

3.2 大学院への進学

振り返ると、修士課程への進学に迷いはなかった。学部4回生で行った研究活動は、どちらかというところ“研究”という活動の一連の流れを理解することが主目的であった。よって、本当の意味で研究活動をして結果を出したいと願うなら進学は必須だった。結果、修士課程への進学で非常に実りある2年を過ごせている。研究内容は油圧駆動から水圧駆動にシフトし、これからの社会で必要になると信じる、水圧駆動ロボットの耐故障性の向上と状態推定の性能向上を図っている。学部4回生時の研究を基に新たなセンサの試作も行って非常に充実した日々を過ごしている。

一方、博士課程への進学についての決断には非常に長い期間を費やした。博士課程に進学することで、

自身の興味や仮説に基づいて試行錯誤を繰り返す充実した日々を過ごしながら、専門分野への理解をより深めることができる。加えて、社会へのアンテナの高さや企画力、管理力、発信力など研究以外の自分が求める総合的なスキルをも高めることができる。しかし、博士は修士と違って参考となるロールモデルが少なく、社会に出るタイミングが遅くなる上、その後のさまざまな人生のイベントにも影響が出る。さらに、自分の目指す将来像に博士課程への進学が最適かどうかも確証はない。自分の研究者としての適性に対する不安も勿論ある。社会人ドクターという選択肢もあるが、志望する業界での数は少なく、時間的にも精神的にも非常に厳しいと聞く。

就職活動も行って内定辞退期限ギリギリまで悩み通した。結局、“やらない後悔よりやる後悔”を選び、博士課程への進学を決めた。立命館は“Be the first penguin.挑戦を、失敗を、恐れるな。”というキャッチコピーを掲げている。ファーストペンギンは仲間を押し出されただけという指摘もあるだろうが、私も先例に頼らず挑戦することにした。この選択が正しかったと思えるかどうかはまだ分からない。しかし、これから数年の自分の行動がそれを決めるのだから、今は精一杯できることをしようと思う。

4. おわりに

先日、私がアルバイトをしている学内の工作ラボに進路選択前の女子高校生が見学に来た。工作機械や展示されているロボットなどをキラキラとした目で眺めていた彼女に進路を聞くと『文系かなあ』と答える。理由を聞くと『お母さんが文系にしときなさい』と言っているからだそうだ。「主体性がない」「自分の人生だから自分で決める」と思う人もいるかもしれないが、現実、彼女のような高校生は少なくない。私も今思えば、「理系にしときなさい」とは言われなかったが、両親が理系だったことに影響を受けていると感じる。私見になるが、理系女子を一朝一夕で増加させるための秘策など存在しないように思う。周りに理工系で活躍している女性がいなければ子供も大人も不安に思うのは当然だ。だからこそ、一人でも多く後進のロールモデルとなる人物が活躍し、先人の理系女性がしてくれたように働きやすい社会を一步ずつ形作る必要がある。

私も母のように仕事の現場でも家庭でも明るく活躍できる人物になれるよう日々研さんを重ねたい。

（原稿受付：2023年12月5日）

企画行事

2023年度オートムセミナー開催報告 「環境負荷の低減を進める空気圧システム」

著者紹介



いいだともよし
飯田 知良

CKD株式会社

〒485-8551 愛知県小牧市応時二丁目250番地

E-mail: tomo-iida@ckd.co.jp

1990年CKD株式会社入社，技術部門で流体制御バルブの設計開発に従事，現在は企画・管理部門に所属，日本フルードパワーシステム学会の会員。



2023年度オートムセミナー 環境負荷の低減を進める空気圧システム

2023年11月9日（木）13:00～17:00

13:00 - 13:05	開会のあいさつ	
13:05 - 13:50	空気圧縮機におけるカーボンニュートラルの取り組みについて	株式会社日立産機システム 加藤亮太 様
13:50 - 14:35	圧縮空気供給設備の最適制御による省エネルギーへのアプローチ	アズビル株式会社 山口幸博 様
14:35 - 15:20	空気圧システムのCO ₂ 排出量削減の取組み	S M C株式会社 奥平宏行 様
15:20 - 15:25	休憩	
15:25 - 16:10	真空吸着搬送におけるCO ₂ 排出量削減検討	株式会社コガネイ 藤井隆太 様
16:10 - 16:55	カーボンニュートラルに向けて空気圧機器が貢献できること	CKD株式会社 水上和哉 様
16:55 - 17:00	閉会のあいさつ	

図1 オートムセミナープログラム

1. はじめに

2023年度オートムセミナー「環境負荷の低減を進める空気圧システム」を，2023年11月9日に完全オンラインで開催した。本稿では，本セミナーの開催の様子および当日行われた講演内容の概要について報告する。

2. セミナーの概要

カーボンニュートラルの実現が国際社会における必須の課題となってきたことは周知の事実であり，空気圧業界においても例外ではない。本セミナーでは省エネ・省資源だけでなく，CO₂排出抑制や環境汚染予防の視点などから環境負荷の低減を進める空気圧システムの取り組みについて取り上げ，5件のテーマで各テーマ45分の講演が行われた（図1）。

本セミナーは完全オンラインで行われ，個人参加20名，団体参加6団体，講師5名の参加で開催された。また団体参加ではアンケート結果より70名の方に聴講いただいた。

3. 講演内容

3.1 空気圧縮機におけるカーボンニュートラルの取り組みについて

最初に株式会社日立産機システムの加藤亮太氏により，「空気圧縮機におけるカーボンニュートラルの取り組みについて」という題目で講演をいただいた。本セミナー最初の講演ということもあり，導入部分でカーボンニュートラルを取り巻く状況を詳しくご説明いただいたことで，本セミナーの重要性を参加者が再認識することができた。

生産現場における空気圧縮機は生産インフラとして欠かせない要素であるとともに，工場で発生する

CO₂の20～25%が空気圧縮機によるものであるため，空気圧縮機による改善により多くのCO₂排出量削減効果が期待できる。そのため空気圧縮機に対する市場ニーズも従来の「コスト，省エネ，サービス」から，環境への意識の高まりを受ける形で「CO₂排出量削減（実際の排出量の把握～効果確認）」へと変化しつつある。CO₂排出量を削減してカーボンニュートラルを達成するための新たな取り組み事例としてCO₂排出量を削減する装置，オイルフリーなど環境に配慮した装置，複数台のコンプレッサを必要最低限だけ稼働させることによりCO₂排出量を削減する制御方式，空気圧縮機の廃熱を回収して再利用する取り組みなどについて講演いただいた。

講演の最後には，省エネを実現するための最適制御に欠かせない負荷状況の把握や予防保全の手段として「計測診断」，「監視システム」の事例をご紹介いただいた。

3.2 圧縮空気供給設備の最適制御による省エネルギーへのアプローチ

アズビル株式会社の山口幸博氏より，「圧縮空気供給設備の最適制御による省エネルギーへのアプローチ」という題目で講演をいただいた。

空気圧縮機単体だけではなく，既存設備を対象にした圧縮空気供給設備の制御改善による省エネルギー施策の検討・実施・実施後評価などの取り組みについて講演いただいた。

空気圧縮機の最適制御の施策として，高効率機優先運転，分散設置された設備の統合制御，吐出圧の低圧化による動力削減などを活用した統合最適制御と，以下に記す省エネ施策について講演いただいた。

- ・圧縮空気系統ごとに減圧調節弁を用いて必要最低圧力のみを供給、または必要な時のみ送気するなどの制御により圧縮空気の使用量を削減
- ・圧縮空気の生成工程および供給工程の連携制御による省エネ化（末端圧力の変動をエア供給側で即座に調整）
- ・圧縮空気需要予測に応じた最適運転組み合わせによる総合効率の改善（現場の要求量に応じた空気圧縮機運転指令により最も効率的な運転の組み合わせを選択）

最後に、省エネ施策の実行可能性評価について、現状運転状況の把握～施工後運転状況シミュレーション～省エネ効果算出までの流れを講演いただいた。

3.3 空気圧システムのCO₂排出量削減の取り組み

SMC株式会社の奥平宏行氏より、「空気圧システムのCO₂排出量削減の取り組み」という題目で講演をいただいた。

環境負荷低減の取り組みはサステナブルな社会を築くために企業の社会的責任において不可欠な要素である。製品設計における取り組みとしては、トポロジー最適化設計により製品の小型化・軽量化を進めることで原材料・素材の使用量を削減し、同時に製品製造時に使用する電力・エアの使用量も削減することで空気圧機器を製造する際に発生するCO₂排出量の削減に努めている。同機能を有する製品の削減事例としてエアシリンダ、電磁弁、無線システムなどの機器を紹介いただいた。

つぎに、お客様が使用する際に発生するCO₂排出量の削減事例として、高ピーク圧ブロー機器、省エネ電磁弁などの機器を紹介いただいた。

空気圧機器単体による削減だけではなく、エア消費量の削減（必要最低限の圧力で自動で制御）や最適制御の実現（流量・圧力・温度の可視化）、無線技術による省配線化など、これらを可能とするシステムを紹介いただいた。

最後に、コンプレッサエアの5～15%がエア漏れでむだになっているとも言われているため、工場エア漏れを簡単に発見できる手法として、エア漏れの可視化技術を紹介いただいた。実際の動画で講演いただき、興味深い内容であった。

3.4 真空吸着搬送におけるCO₂排出量削減検討

株式会社コガネイの藤井陸太氏より、「真空吸着搬送におけるCO₂排出量削減検討」という題目で講演をいただいた。

真空吸着搬送はエジェクタや真空ポンプを用いて大気圧より低い真空圧を発生させ、それにより生じる力によってワークを吸着する搬送方法である。工場の生産設備で多く使用される真空吸着搬送の工程での取り組みについて、エア配管の削減、機器作動時間の削減、真空源の変更の三つの観点で講義いただいた。

真空吸着搬送の工程において一番改善効果が大きい要素は機器の作動時間削減である。真空吸着の状態を保持するときに、機器を動かしている場合と、機器を停止して真空吸着を保持する場合ではCO₂排

出量に大きな差が出て来る。このため作動時間削減により大きな効果が望めるが、実際に制御を行なう場合は真空破壊に至らないように真空度管理と真空供給機器を制御する必要がある。

エア配管については真空が必要となるのはパッド部分だけであるため配管が長いほど捨てている真空があることになり、改善の余地がある。真空源についても真空供給機器の性能により改善効果が期待できる。

最後に、これらの改善を実現する真空機器として、ユニット機器を紹介いただいた。

3.5 カーボンニュートラルに向けて空気圧機器が貢献できること

CKD株式会社の水上和哉氏より、「カーボンニュートラルに向けて空気圧機器が貢献できること」という題目で講演をいただいた。

自社が排出するCO₂の削減に向けた取り組みに加え、空気圧機器メーカーとして社会全体に貢献できる技術革新や製品開発を目指す取り組みについて講演いただいた。

先に講演いただいた同じ空気圧機器メーカーのSMC株式会社の取り組みと重なる部分があったが、その中でも長寿命、見える化、有効活用のキーワードで取り組みについて言及された。

空気圧機器の長寿命化はお客様の買い替えコスト削減に直結するだけでなく、廃棄物の削減や新規製造時に発生するCO₂排出量の削減に貢献する。見える化への取り組みは予知保全や最適制御を実現する手段として他の講演でも触れられているが、廃棄物削減や省エネへの貢献が期待できる。機器の使用条件や用途によっては空気圧アクチュエータ機器と電動アクチュエータ機器を最適に選定することでエネルギーの有効活用ができる事例を紹介いただいた。

最後に、一般的に工場で使用されている空気圧機器とは一線を画するが、空気圧機器の技術を応用してフードロス削減することにより食料の生産工程やごみ処理過程などで発生するCO₂を削減し、社会全体に貢献する技術を紹介いただいた。

4. おわりに

今回、前回に引き続き完全オンラインでのセミナー開催となったが、多くの方にご参加いただき、質疑応答も予定時間いっぱいまで行われ、空気圧システムの環境への取り組みに対しての関心の高さがうかがわれた。

講演内容も空気圧機器から、装置、システムと幅広い企業の取り組みをバランス良く聞くことができたと思う。今回のセミナーが日本のフルードパワー技術発展の一助となれば幸いである。

最後にご多忙の中、講演を引き受けていただいた講師の皆様、ならびに本セミナー開催にあたりご協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げます。

（原稿受付：2023年11月21日）

企画行事

2024年度企画行事紹介

著者紹介



さくら い やす お
桜井 康雄

足利大学工学部
〒326-8558 栃木県足利市大前町268-1
E-mail : sakurai.yasuo@g.ashikaga.ac.jp

1986年上智大学大学院理工学研究科博士前期課程機械工学専攻修了。富士重工業(株)、上智大学助手等を経て2000年足利工業大学講師、2001年同大学助教授、2007年同大准教授、2009年同大教授、2018年足利大学教授、現在に至る。博士(工学)。



こ ばやし わたる
小林 亘

岡山理科大学情報理工学部
〒700-0005 岡山市北区理大町1-1
E-mail : w-kobayashi@ous.ac.jp

2015年芝浦工業大学大学院理工学研究科博士課程機能制御システム専攻修了。同大学ポストドク研究員、2016年岡山理科大学助教を経て、2018年同大学講師、現在に至る。日本フルードパワーシステム学会、計測自動制御学会などの会員。博士(工学)。

1. はじめに

企画委員会は、委員長 桜井康雄(足利大)、副委員長 兵藤訓一(東京計器(株))、幹事 小林亘(岡山理大)を含め、学校側委員18名、企業側委員17名および学会事務局で構成されている。本委員会は、講演会およびセミナー等の学会の集会事業の企画立案および実施を担当する。

本稿では、2023年度の事業についてまとめるとともに、未確定な部分もあるが2024年度実施予定の企画行事の内容を紹介する。

2. 2023年度行事まとめ

2.1 春季フルードパワーシステム講演会

2023年の春季フルードパワーシステム講演会は、主査を趙委員(岡山理大)とし、2023年5月25日(木)、26日(金)に機械振興会館(東京都)にて実施された。45件の講演が行われ、参加者は105名(個人申込103名、団体申込2件)であった。対面形式での開催であったが、オンラインでの配信も行い、個人103名の参加に加えて2件の団体申し込み

があり盛会裏に終わられた。

2.2 春季講演会併設セミナー

2023年の春季講演会併設セミナーは、主査を落合委員(協立機電工業(株))とし、春季講演会の1日目となる2023年5月25日(木)に開催された。「フルードパワーとハイブリッド」というテーマで講師4名による講演が行われ、参加者は47名(個人45名、団体2件)であった。

2.3 秋季フルードパワーシステム講演会

2023年の秋季フルードパワーシステム講演会は、主査を下岡委員(岡山大)とし、2023年11月30日(木)、12月1日(金)に岡山理科大学50周年記念館(岡山県)にて実施された。47件の講演が行われ、参加者は108名(個人105名、団体3件)であった。特別講演では「面白い恐竜学をめざして：発掘とコラボの現場から」と題して、岡山理科大学恐竜学博物館館長の石垣先生よりご講演いただいた。

2.4 オータムセミナー

2023年度のオータムセミナーは、主査を飯田委員(CKD(株))としたWGで、11月9日(木)にオンライン開催(Zoom)にて開催された。「環境負荷の低減を進める空気圧システム」というテーマで5件の講演が行われ、参加者は26名(個人20名、団体6件)であった。

2.5 ウィンターセミナー

2023年度のウィンターセミナーは、主査を高岩委員(徳島大)としたWGで、2024年3月にオンライン開催(Zoom)にて準備を進めている。学会誌5月号「医療福祉技術を支えるフルードパワー」を基に実施する予定となっている。

3. 2024年度行事予定

3.1 春季フルードパワーシステム講演会

2024年の春季講演会は、主査を桜井委員長としたWGで具体案を検討している。6月20日(木)、21日(金)に機械振興会館において開催することを予定している。

3.2 春季講演会併設セミナー

2024年の春季講演会併設セミナーは、学会の企

画事業を担当する企画委員会と学会誌の作成を担当する編集委員会との合同企画である。当該年度の本セミナーは企画委員会が主導で特集号を作成することになっている。本セミナーは主査を兵藤副委員長としたWGで、春季講演会の1日目となる20日(木)に機械振興会館を会場として「触覚技術と応用技術」というテーマで実施する予定となっている。

3.3 秋季フルードパワーシステム講演会

2024年は本学会主催の国際シンポジウム（開催地：広島，開催日：10月23日(水)～25日(金)）が開催される年であるため、秋季講演会は実施しないことに決まっている。2025年の秋季講演会に期待していただきたい。

3.4 オータムセミナー

2024年度のオータムセミナーは、10月または11月の実施を予定している。内容については企画検討段階であるためご紹介できないが、学会誌7月号の会告から本セミナーの案内を開始する予定であり、ご期待いただきたい。

3.5 ウィンターセミナー

2024年度のウィンターセミナーは、2025年2月から3月の間に実施を予定している。内容については企画検討段階であるためご紹介できないが、学会誌11月号の会告から本セミナーの案内を開始する予定であり、ご期待いただきたい。

4. おわりに

本稿では2023年度に実施した企画事業のまとめと、2024年度に予定している企画事業について述べた。本稿を執筆した時期により、未確定な部分が多々あることはご容赦願いたい。

企画委員会では、今後もますます会員の方々に満足いただける企画事業になるよう改善していきたいと考えており、開催方法やセミナーのテーマ希望等があれば学会事務局までご連絡していただくようお願いし、本稿の結びとする。

(原稿受付：2023年12月5日)

会 告

〈理事会・委員会日程〉

12月21日	企画委員会
1月10日	基盤強化委員
1月25日	理事会
1月29日	編集委員会

〈理事会報告〉

2023年度第5回理事会

1月25日 15:00～17:00

機械振興会館 B 3-6, ハイブリッド開催 (参加者20名)

- (1) 国際シンポジウム広島2024開催準備状況
- (2) 2023年秋季講演会開催報告
- (3) 2024年春季講演会開催準備状況
- (4) 2023年学会賞各賞の選考状況
- (5) 2024年度フェロー候補者の推薦状況
- (6) 次期会長予定者選挙結果報告
- (7) 会員の推移
- (8) 各委員会からの報告
- (9) その他

〈委員会報告〉

2023年度第4回企画委員会

12月21日 15:00～17:00

Web開催 (参加者21名)

- (1) 2023年秋季講演会開催報告
- (2) 2023年度オースタムセミナー開催報
- (3) 2023年度ウィンターセミナー開催準備状況
- (4) 2024年春季講演会併設セミナー開催準備状況
- (5) 2024年春季講演会開催準備状況
- (6) 日中若手研究者交流事業
- (7) その他

2023年度第3回基盤強化委員

1月10日 16:00～17:00

Web開催 (参加者12名)

- (1) 2023年度キャリア支援セミナー企画について
- (2) 学会パンフレットの更新
- (3) 学会フェロー推薦
- (4) IFPEX2024について
- (5) 研究者リストの更新について
- (6) その他

2023年度第5回編集委員会

1月29日 15:00～16:30

Web開催 (参加者19名)

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.55 No.2「触覚技術と応用技術」
 - 2) Vol.55 No.3「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」
 - 3) Vol.55 No.4「フルードパワーシステムにおけるMDB活用」
 - 4) Vol.55 No.E1「緑陰特集」
 - 5) Vol.55 No.5「電動フルードパワー技術(仮)」
 - 6) Vol.55 No.6「機械工学を学ぶ皆さんへーフルードパワーのすすめー」
- (2) その他
 - 1) 会議報告
 - 2) 今後の特集について

2023年度第3回情報システム委員会

2月14日 14:00～14:40

Web開催 (参加者12名)

- (1) 学会HPの更新状況確認
- (2) 理事会・委員長会議報告
- (3) 会議報告(担当者, 執筆者選定)
- (4) HP内容の更新
- (5) その他

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正会員	海外会員	学生会員	賛助会員
会員数 (2月10日現在)	807	8	121	124
差引き増減	-1	±0	+1	+1

正会員の内訳 名誉員17名・シニア員73名・ジュニア員74名・その他正会員643名

〈新入会員〉

賛助会員

株式会社ブリヂストン

正会員

望月 法一 (日本アキュムレータ株式会社)

杉村 健 (日本アキュムレータ株式会社)

増田 勇貴 (株式会社栗本鐵工所)

学生会員

竹本 翔一 (室蘭工業大学)

会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp/>) をご覧ください。

2024年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー

「触覚技術と応用技術」

開催日時：2024年6月20日 (木)

2024年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナーを2024年6月20日 (木) に機械振興会館 (東京都港区) で開催いたします。

本セミナーでは、人が感じる触覚のデータ化および触覚技術の紹介とフルードパワーへの活用事例などを紹介します。

詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。

なお、日本フルードパワーシステム学会誌55巻2号 (2024年3月号) が当日の講演資料となりますので、各自ご持参いただけますようお願いいたします。

皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp/>) をご覧ください。

2024年春季フルードパワーシステム講演会併設企画

「製品・技術紹介セッション」

開催日時：2024年6月21日 (金)

春季フルードパワーシステム講演会の中で、企業関係の方々に製品・技術の紹介をしていただく「製品・技術紹介セッション」を企画しました。本企画は、製品に係る技術や課題等を学会主要行事の一つである講演会で発表していただき、会員間で問題意識を共有し会員相互の研究・技術の促進を図ろうとする

ものです。また、本セッションの講演は「最優秀講演賞」社会人部門の審査対象です。なお、最大6件の講演枠を準備しています。この枠が埋まってしまった場合、ご容赦いただけますようお願い申し上げます。企業関係の会員皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております。

編集室

次号予告

—特集「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」—

【巻頭言】「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」発行にあたって	加藤 友規
【解説】	
空気圧サーボを用いて回転数制御される切削工具の損耗推定	大坪 樹
超精密加工機における高速応答レギュレータの適用検討	福田 将彦
空気圧機器のIO-Link対応	三浦 克輝
空圧式アクティブ除振台の除振・制振技術	篠原雄一郎
エアパワーメータを活用した空気圧システムの省エネルギー診断	小林 敏也
圧力監視による空気圧機器の状態見える化	近藤 健元
【トピックス】	
学生さんへ、先輩が語る—学生時代に得た経験を今につなぐ—	下岡 綜
研究室紹介	川瀬 利弘
【企画行事】	
2023年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告	下岡 綜

2023年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)	委 員 中 野 政 身 (㈱SmartTECH Lab.)
副委員長 山 田 宏 尚 (岐阜大学)	中 山 晃 (日立建機㈱)
委 員 飯 尾 昭 一 郎 (信州大学)	藤 田 壽 憲 (東京電機大学)
飯 田 武 郎 (コマツ)	丸 田 和 弘 (コマツ)
加 藤 友 規 (福岡工業大学)	水 上 和 哉 (CKD㈱)
北 村 剛 (油研工業㈱)	村 岡 裕 之 (㈱コガネイ)
窪 田 友 夫 (カヤバ㈱)	山 本 久 嗣 (富山高等専門学校)
五 嶋 裕 之 (㈱工苑)	吉 見 浩 司 (川崎重工業㈱)
齋 藤 直 樹 (秋田県立大学)	吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)
佐々木 大 輔 (香川大学)	担当理事 伊 藤 隆 (カヤバ㈱)
佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)	学会事務局 成 田 晋
妹 尾 満 (SMC㈱)	編集事務局 竹 内 留 美 (勝美印刷㈱)
谷 口 浩 成 (大阪工業大学)	

(あいうえお 順)

会 告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写してください。ただし(公社)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。したがって、社外頒布用の複写は許諾が必要です。

権利委託先：(一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接本会へご連絡ください。

〒105
0011東京都港区芝公園三丁目五十一番二機械振興会館別館一〇二一 電話(〇三三)三四三三一八四四一 FAX(〇三三)三四三三一八四四二
編集兼発行人 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇一〇一〇一三一三三三六九〇東京都文京区白山一―二三―七 アクア白山ビル五階
印刷所 勝美印刷株式会社