

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

Jan. 2023 Vol. 54 No. 1

特集「フルードパワーとソフトロボティクス」

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

【挨拶】

新年のご挨拶	早川 恭弘	4
年頭に当たって	川上 幸男	5

特集「フルードパワーとソフトロボティクス」

【巻頭言】

「フルードパワーとソフトロボティクス」発刊にあたって	谷口 浩成	6
----------------------------	-------	---

【解説】

ソフトロボティクスにおけるフルードパワー	鈴森 康一	7
ラバーアクチュエータを活用したソフトロボットハンド	大野 信吾	12
ソフトロボット技術を用いた蠕動運動機構の事業化	梅田 清, 中村 太郎	16
減圧駆動式ソフトグリッパの動作原理と応用例	波多野 至	21
物体操作を学習するロボットアームの空気圧駆動可変剛性手首	田中 一敏	25
質量・体積可変な水駆動ソフトロボットのロコモーション	田熊 隆史	28
ソフトロボットのアクチュエーションとセンシング（電界共役流体と光導波路の導入）	竹村研治郎	32
外骨格を使用しない空圧式パワーアシストウェアとその周辺機器の開発	佐々木大輔	35

【会議報告】

日本機械学会2022年度年次大会におけるフルードパワー技術研究	脇元 修一	38
---------------------------------	-------	----

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る ― 自分が感じたフルードパワーの魅力について ―	横田 雅司	40
--------------------------------------	-------	----

【研究室紹介】

徳島大学 高岩研究室	高岩 昌弘	43
------------	-------	----

【会告】

会員移動	24
2022年度ウィンターセミナー「機械学習の基礎とフルードパワーシステムへの応用」	24
〈新企画〉日本フルードパワーシステム学会キャリア支援セミナー開催のお知らせ	20
理事会・委員会報告	46
共催・協賛行事のお知らせ	47
2023年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	48
2023年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー「フルードパワーとハイブリッド」	48
2023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」	48
日本フルードパワーシステム学会論文集53巻（2022）抄録	49
一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 賛助会員一覧表	51
次回予告	52

■表紙デザイン：浅賀 美希 勝美印刷(株)

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

[Greeting Message]

New Year Greetings from the President	Yasuhiro HAYAKAWA	4
Greetings of New Year from the Vice President	Yukio KAWAKAMI	5

Special Issue "Fluid Power and Soft Robotics"

[Preface]

On the Special Issue "Fluid Power and Soft Robotics"	Hironari TANIGUCHI	6
--	--------------------	---

[Review]

Fluid Power in Soft Robotics	Koichi SUZUMORI	7
Soft Robot Hand Using Curling-Type Rubber Actuator	Shingo OHNO	12
Commercialization of Peristaltic Mechanism Using Soft Robot Technology	Kiyoshi UMEDA, Taro NAKAMURA	16
Operating Mechanism of Soft Gripper with Decompression Driven System and Applications	Itaru HATANO	21
Pneumatic Variable-Stiffness Cable-Driven Wrist for Robotic Arms Learning Manipulation	Kazutoshi TANAKA	25
Locomotion of Mass- and Volume-Variable Soft Robot Driven by Water	Takashi TAKUMA	28
Actuation and Sensing of Soft Robots	Kenjiro TAKEMURA	32
Development of Endoskeleton Type Pneumatic Power Assist Wear and Peripheral Devices	Daisuke SASAKI	35

[Conference Report]

Researches on Fluid Power Technologies in Mechanical Engineering Congress, 2022 Japan	Shuichi WAKIMOTO	38
---	------------------	----

[Topics]

Seniors talk to students- About what I like about Fluid Power -	Masashi YOKOTA	40
---	----------------	----

[Laboratory Tour]

Introduction of Takaiwa Laboratory in Tokushima University	Masahiro TAKAIWA	43
--	------------------	----

[JFPS News]

20, 24, 46, 47, 48, 49, 51, 52

挨拶

新年のご挨拶

著者紹介

はや かわ やす ひろ
早川 恭弘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独立行政法人国立高等専門学校機構奈良工業
高等専門学校電子制御工学科嘱託教授、福祉・
介護ロボットの研究に従事、社会福祉法人天寿
会理事、博士（工学）

謹んで新年のお慶びを申し上げます。

2020年からの新型コロナウイルス感染症の流行により、社会が大きく変わりました。学会の行事に関しましても、2022年春季フルードパワーシステム講演会まで、リモート方式での講演会やセミナーが続いていましたが、昨年の夏以降、社会活動の規制も大幅に緩和され、人の流れが活発になってきました。他学会の講演会もオンライン形式から対面での開催が増えています。当学会におきましても、海峡メッセ下関で開催しました2022年秋季フルードパワーシステム講演会からは、対面方式での実施としました。また、賛助会員企業の社員の方々に対しては、リモート方式での団体視聴参加登録も可能としました。

今後も継続して、コロナ禍における対応として始まったリモート方式と対面方式を組み合わせることにより、より参加しやすい講演会・セミナーを開催していきたいと思います。皆様方の積極的なご参加をお願いいたします。

2023年春季フルードパワーシステム講演会は、対面開催を予定しています。また、2021年に創立50周年記念式典をリモート形式で開催しましたが、記念祝賀パーティ（記念技術懇談会）が延期されております。そこで、大変遅くなりましたが、2023年春季フルードパワーシステム講演会開催に合わせて創立50周年記念祝賀パーティを開催したいと思います。開催が決定しましたらご案内させていただきますので、ご参加のほど、何卒よろしくお願い申し上げます。

学会の基盤強化に関しましては、今年度からの新たな取り組みとして、無料での学生会員向けキャリア教育を検討しています。この取り組みは、フルードパワー関連の研究室に所属している学生と、賛助会員企業の社員様との交流の場を設けることにより、

相互の情報共有を図ることを目的としています。基盤強化委員会が中心となり新たな取り組みを実施していきますので、ご協力のほど何卒よろしくお願いいたします。

産学連携に関しましては、日本フルードパワー工業会様との情報共有を積極的に行っています。特に、2022年秋季フルードパワーシステム講演会において開催した特別講演会および名刺交換会に関して、当学会賛助会員企業様と日本フルードパワー工業会会員企業様を無料でご招待させていただきました。また、日本フルードパワー工業会様から工業会会員企業様へ、2022年秋季フルードパワーシステム講演会のアナウンスをしていただきました。さらに、日本フルードパワー工業会 西日本支部総会・懇談会のご案内が当学会事務局より関西地区の教員の皆様に送付されていると思います。産学連携の観点から、積極的にご参加をお願いいたします。今後も、日本フルードパワー工業会様との情報共有と連携を積極的に行って参りたいと考えております。

2021年に開催されたJFPS国際シンポジウム函館2020における講演論文の中から推薦された論文が当学会の英文論文集（JFPS International Journal of Fluid Power System）に掲載されています。英文論文集は、J-Stageで発行されておりますので（<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jfpsij>）、ご覧いただきましたら幸いです。

また、当学会英文論文集のOA（Open Access）ジャーナルとしての認知度を高めるために、オープンアクセス学術誌とその論文を掲載するウェブサイトであるDOAJ（Directory of Open Access Journals）への採録をめざしてJST（Japan Science and Technology Agency：科学技術振興機構）によるJ-Stage登録誌向けジャーナルコンサルティングに応募し採択されました。現在、関連する作業を論文集委員会が中心となり行なっています。英文論文集のさらなる充実を図るために、会員の皆様方の英文論文集“JFPS International Journal of Fluid Power System”への積極的な投稿をお願いいたします。

最後になりましたが、本年も継続して、フルードパワー技術の発展をめざし、会員の皆様および事務局の方々のご支援を頂戴しながら、当学会運営に微力ながら最大限努力していく所存であります。本年も会員の皆様のご理解とご支援ご協力を賜りますようお願い申し上げます。

（原稿受付：2022年10月28日）

挨拶

年頭に当たって

著者紹介

かわ かみ ゆき お
川上 幸男

E-mail : kawakami@shibaura-it.ac.jp

1991年早稲田大学大学院工学研究科博士課程単位取得満期退学。1992年芝浦工業大学助手、講師、助教授を経て、2004年同大学システム工学部教授、現在に至る。空気圧システム制御の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

新年あけましておめでとうございます。昨年の総会で奈良工業高等専門学校 早川恭弘先生が新しく会長に就任されました。副会長として、法政大学 田中豊先生、川崎重工業株式会社 嶋村英彦様に加え、私の3名で新会長をバックアップする体制となりました。2023年の年頭にあたり、副会長を代表して私の方からご挨拶をさせていただきます。

2. 学会主要行事

コロナ禍の影響によりフルードパワーシステム講演会は2021、2022年の春季はオンラインでの開催、2021年の秋季は国際シンポジウムのため開催されませんでしたが、2022年の秋季は11月に山口県下関市にて久々の対面での開催となりました。講演発表は45件にのぼり、多くの学生会員による発表もあり、活発な討論が行われました。また、新しい試みとして名刺交換会が実施されました。日本フルードパワー工業会会員企業からも多くの参加者があり、本学会との対面での交流をようやく再開することができました。有効な感染対策を講じられるようになってきており、2023年はまだ開催できていない学会創立50周年記念パーティーを春季講演会のときにぜひとも開催し、会員の皆様とともに祝賀できることを楽しみにしています。

2022年12月にはオータムセミナー「フルードパワーシステムにおけるMBD活用」がオンライン形式で開催されました。セミナーでは毎回タイムリーなテーマを取り上げて、参加者から好評を得ています。また、オンライン形式での開催は、距離的、時間的なハードルを下げ、気軽に参加できるといった効果もあり、今後も引き続き計画されています。

3. 基盤強化事業

新たな基盤強化事業としては、賛助会員企業からフルードパワー関連研究室に所属する学生会員向けの情報発信を目的とした「キャリア支援セミナー」企画が始まります。第1回は2023年1月13日に賛助会員企業3社から担当者を選出し、学生達に向けて講演していただきます。学生達はこれら企業との交流により、実際のフルードパワー技術の活用例、社会での働き方・生活など、学生目線で就職後のキャリアイメージが形成できるようなセミナーをめざしています。第2回以降も毎回3社程度の賛助会員企業の担当者に講演をお願いし、定期的にセミナーを開催することを計画しています。

大学・高専教員による賛助会員企業への出前講座、フルードパワー工業会との産学連携企画なども基盤強化事業として順次計画していきますので、ご要望などがあれば奮ってお寄せください。

4. 英文論文誌

2023年から学会英文論文誌「JFPS International Journal of Fluid Power System」は学術オープンアクセスジャーナルとして、掲載される論文にクリエイティブ・コモンズ・ライセンス (<https://creativecommons.jp/licenses/>) のCC BY-NC-NDが付与されることになります。クリエイティブ・コモンズ・ライセンスとは論文の再利用条件を示す国際的ルールであり、近年のオープンアクセス化の流れを受けて本誌でも採用することになりました。ご理解のほど、よろしくお願いいたします。

5. 国際シンポジウム

次回の国際シンポジウムは2024年10月23日～25日の日程で広島国際会議場にて開催できるよう実行委員会を組織して準備を進めています。国内外から多くの参加者が久しぶりに対面形式で一堂に会し、国際交流を深められることを願っています。

6. おわりに

2023年も会員の皆様のご協力をいただきながら、さまざまな事業を進めて参ります。会員の皆様にとって良い年となりますことを祈念し新年のご挨拶といたします。

(原稿受付：2022年11月27日)

巻頭言

「フルードパワーとソフトロボティクス」発刊にあたって

著者紹介



谷口 浩成

大阪工業大学
ロボティクス&デザイン工学部 ロボット工学科
〒530-8568 大阪府大阪市北区茶屋町1-45
E-mail : hironari.taniguchi@oit.ac.jp

2003年東京農工大学大学院博士後期課程修了、
津山工業高等専門学校准教授を経て、2017年大
阪工業大学R&D工学部准教授、現在に至る。ソ
フトロボティクスの研究に従事。日本フルード
パワーシステム学会、日本機械学会、日本ロ
ボット学会、IEEEなどの会員。博士（工学）。

ソフトロボティクスは、やわらかさを積極的に取り入れたロボットや装置、アクチュエータなどに関する学術および研究分野であり、近年盛んに研究され、実用化も進んでいる。そのソフトロボティクスの駆動源として多く用いられているのが、フルードパワーである。油圧、空気圧、水圧、機能性流体など流体に基づく駆動源は、ソフトロボティクスとの相性が高く、ソフトロボティクスの発展を支えているといっても過言ではない。

そこで本特集では、各種フルードパワーに関連するソフトアクチュエータやアプリケーションについて、第一線でご活躍中の技術者・研究者の皆様から研究開発および実用化の事例を紹介いただいた。

はじめに、鈴木康一教授（東京工業大学）には、フルードパワーを利用した代表的なアクチュエータであるラバーアクチュエータの構造、圧力源、制御法、フルードパワーが創るロボット構造体について解説いただいた。また、ソフトロボティクスの今後についても述べていただき、ソフトロボティクスにおけるフルードパワーを総説いただいた。

続いて、大野信吾氏（株式会社ブリヂストン）には、McKibben型ラバーアクチュエータの構造と特徴、空圧駆動および油圧駆動による湾曲型ラバーアクチュエータの特性、湾曲型ラバーアクチュエータを用いたソフトロボットハンドについて解説いただいた。

梅田清氏（株式会社ソラリス）および、中村太郎教授（中央大学）には、ミミズを規範とした蠕動運

動型移動ロボットの開発と、その実用化および事業化についての応用事例を解説いただいた。

波多野至氏（ニッタ株式会社）には、真空を利用した粉体レスグリッパの構成、動作原理、応用例および導入事例について解説いただいた。

田中一敏氏（オムロンサイニックス株式会社）には、部品組立ロボットへの社会的需要を踏まえたロボット技術、物体操作を学習するロボットアームの柔軟手首について解説いただいた。

田熊隆史教授（大阪工業大学）には、伸縮性のある風船状のチャンバに水を注入することで、体積だけでなく質量も自在に操作できるソフトロボットの構造、駆動原理、そしてこのようなやわらかいロボットに適したセンサについて解説いただいた。

竹村研治郎教授（慶応義塾大学）には、ソフトロボットハンドやシャクトリムシ型ロボットを例に、電界共役流体を用いたアクチュエーションと光導波路を用いたセンシングについて解説いただいた。

佐々木大輔教授（香川大学）には、空気圧ソフトアクチュエータを使用した内骨格型のパワーアシストウェア、容積可変タンクを使用した空気圧供給システムについて解説いただいた。

ソフトロボティクスの市場規模は、2027年までに34億米ドルとの予想もあり、今後多くの分野での実用が期待されている。その中で、フルードパワー技術が大きく寄与していくことは、想像に難くない。今後、フルードパワー技術のますますの発展に期待したい。本特集号を通じて、読者の皆様に新たなフルードパワー技術の可能性を感じていただければ幸いである。なお本特集号は、栗林直樹氏（川崎重工業株式会社）とともに、企画させていただいた。

最後に、ご多忙の中をご寄稿いただきました執筆者の皆様、および本特集号の発刊にあたりご尽力いただきました編集委員各位に、深く感謝するとともに、心より厚く御礼を申し上げる。

（原稿受付：2022年10月28日）

解説

ソフトロボティクスにおけるフルードパワー

著者紹介



すず もり こう いち
鈴 森 康 一

東京工業大学工学院
〒152-8550 目黒区大岡山2-12-1

1984年横浜国立大学大学院修士課程修了。1984年-2001年株式会社東芝勤務。この間、1990年、横浜国立大学大学院博士課程修了。1999-2001年財団法人マイクロマシンセンター。2001年-2014年岡山大学教授。2014年より東京工業大学教授。現在、株式会社s-muscleおよび株式会社H-MUSCLEの代表取締役、ならびに新学術領域「ソフトロボティクス」領域代表兼務、日本フルードパワーシステム学会会員、日本機械学会フェロー、日本ロボット学会フェロー、工学博士。

1. はじめに

ソフトロボティクスとフルードパワーについて考えるとき、私には「固体と流体の関係」が「硬いロボットとソフトロボットの関係」に重なって見えてくる。ソフトロボティクスとフルードパワーは相性がよい。

ミクロに見れば、硬い固体、やわらかい固体、液体、気体の違いは、それらを形作る原子や分子の相対位置の拘束の程度に帰着される。図1にそれぞれの模式図を示す。

従来の硬いロボットを形作る金属や硬質プラス

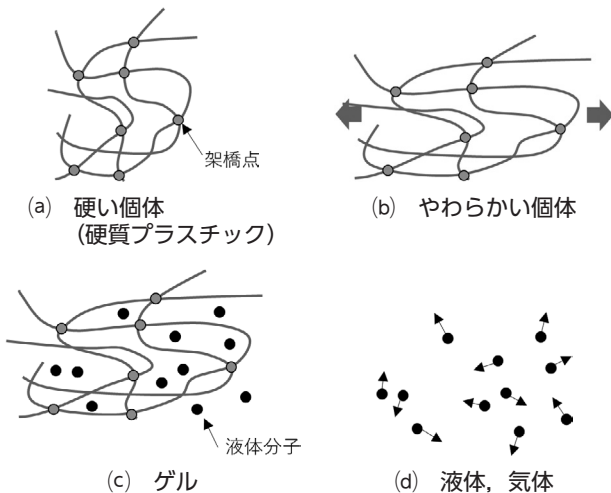


図1 各材料の分子状態の模式図

チックなどの変形しづらい固体では、原子や分子間の相対位置関係はほとんど固定され、確定的で自由度の低い系が形成される（図1(a)）。従来の硬いロボットではこのような低自由度の材料を用いることで、高剛性のモータや硬い身体を作り、確定的な作業を実現してきた。

ソフトロボットを構成するゴムなどのやわらかい固体（エラストマー）は鎖状の高分子が多数絡み合った架橋構造を持ち、分子間のトポロジカルな位置関係は変わらないもののその相対位置は変化し、全体として大きく変形する（図1(b)）。

一歩進んだソフトロボットではゲルが使われることもある。ゲルの内部は水などの分子が含有され流動する状態なので、さらに自由度の高い系を構成することになる（図1(c)）。

流体はさらに自由度の高い系といえる。分子は反発しあい、相対位置を変化させ（図1(d)）、環境や対象物に合わせて形を変える。しかもパスカルが示した通り接触圧は均一に分散する。

このように考えると、流体は究極のソフトロボットといえるかもしれない。ただし、そのままでは流体はどんどん拡散してゆきロボットとして体を成さないのが、やわらかな材料で封じ込める。こうしてでき上がるのが、後述する流体ラバーアクチュエータととらえることができる。

硬い固体、エラストマー、ゲル、液体、気体の順に材料の自由度と流動性が増す。自由度の高い材料を使うことによって、外界への適応性が高いロボットが形作られる。本稿ではこのような視点から通常とは少し違った切り口でソフトロボティクスについて考えてみたい。

なお、本学会や関係学会の学会誌等においてソフトロボティクスやフルードパワーに関する解説をすでにいくつか行っている¹⁻⁶⁾ので、個々の技術の説明を望まれる方はそれらもご参照いただければ幸いです。

表1 代表的なソフトアクチュエータの例と比較

アクチュエータの種類		代表例	動作原理	特徴	最大応力 (参考値)	最大歪 (参考値)
流体ラバー アクチュエータ	空圧ラバーアクチュエータ (PAM)	マッキベン型 ワルシャワ型 ジャバラ型 FMA	空圧	軽量 高コンプライアンス 空圧源、送着ホースが必要	0.7MPa	~25%
	液圧ラバーアクチュエータ (HAM)	油圧マッキベン型 人工筋	液圧	大発生力 ポンプ、ホースが必要	5 MPa	~25%
ポリマー (EAP) 電場応答性	イオン導電性アクチュエータ	IPMC	電気浸透によるゲル内の溶媒分子の移動	湾曲型	0.5MPa程度	1~10%
	誘電エラストマーアクチュエータ (DEA)	シリコン アクリル樹脂	静電気力	高応答 高電圧駆動	0.5MPa程度	10%~30% (面垂直方向) ~100% (面方向)
熱駆動 アクチュエータ	ポリマー	鈎糸人工筋	エントロピー弾性	細径 応答性がよくない	1 MPa程度	10~50% (コイル状)
	形状記憶合金	細線、コイル状	結晶構造の相転移	細径 応答性がよくない	100MPa程度 (線材)	~数% (線材) ~100% (コイル状)

2. 各種ソフトアクチュエータの比較

まず、アクチュエータについて考えよう。フルードパワーによるソフトアクチュエータの特徴を明らかにするために、表1に代表的なソフトアクチュエータとその特徴を大まかにまとめた。ただし、表に記す最大応力と最大歪は参考値ととらえていただきたい。これらの値は複数の文献や私自身の経験をもとにまとめたものだが、想定するアクチュエータの形式や条件によってかなり異なり、統一的な視点で客観的な値を示すのは現段階では難しいからである。たとえば一般に公表されている情報には、研究段階のチャンピオンデータと、耐久性も考慮した現実的なデータが混在していて整理が難しい。また、ソフトアクチュエータでは、発生応力と歪は互いに大きく依存するので、ここで記す最大応力と最大歪みを同時に実現できるという意味ではない点も注意いただきたい。

流体ラバーアクチュエータは、簡単な構造で大きな力と動作範囲を容易に得られる反面、圧力源とホースが必要となり自立したソフトロボットを創る際にネックとなる。空圧駆動の場合は軽量と高コンプライアンスが、液圧駆動の場合は大きな発生力の特徴となる。

電場応答性ポリマー (EAP) アクチュエータは、両面に薄い電極を形成したシート状のポリマーからなる。電極に加える電気エネルギーで直接駆動できる点が魅力であるが、流体ラバーアクチュエータと比較すると、現時点では発生応力、変形量とも劣る。温度により材料内部の原子や分子の状態を変化させることで動作するアクチュエータとして、鈎糸人工

筋と形状記憶合金ワイヤが挙げられる。ソフトロボットでは、細い筋肉のように用いられる。形状記憶合金は、線材としては大きな発生応力を持つが変位は小さい。コイル状に成形すると変位は増大するが発生力は低下する。

鈎糸人工筋と形状記憶合金とも熱を使うため、応答性やエネルギー効率は必ずしも良くない。

以下、流体ラバーアクチュエータ、圧力源、電場応答性ポリマーについて、フルードパワーの視点から述べる。

3. 流体ラバーアクチュエータ

流体ラバーアクチュエータは、内部に空間 (圧力室と呼ぶ) を有する構造体をやわらかい固体材料 (図1(b)) で成形し、圧力室に封入した流体の圧力によって構造体を変形することで動作する。ゴムの代わりに非伸張性の薄い樹脂膜を使う場合もある。作動流体として空気が、構造体としてゴムが用いられることが多く、その場合は空圧ラバーアクチュエータと呼ばれる⁶⁾。中でも特に筋肉状の形を持つものは、pneumatic artificial muscle (PAM) あるいはhydraulic artificial muscle (HAM) と呼ばれる。代表的な流体ラバーアクチュエータとして、マッキベン型人工筋肉、ワルシャワ型人工筋肉、ジャバラ型アクチュエータ、フレキシブルマイクロアクチュエータ (FMA) が挙げられる²⁾⁶⁾。

構造体自体がやわらかいので接する相手の形状に沿って変形動作する。作動流体 (図1(d)) は圧力室内の全領域で圧力が一定になるように流動するので均一な接触応力が得られる。空圧駆動の場合はその圧縮性のため高いコンプライアンスを示す。液圧

駆動の場合も圧力室の形状が変化することにより、外界との接触点においてコンプライアンスを示す。液压駆動の場合は、高い圧力が使用できるので、パワーソフトロボット⁷⁾の実現も期待されている。

やわらかい固体(図1(b))には、固体を形成する分子間に隙間が存在するので、長時間駆動すると作動流体が外界に漏れる。作動流体が液体の場合も液体の一部が気化し、抜けていくことが多い。

流体ラバーアクチュエータは古くから研究が進められ、すでにロボットハンドや医用器具などの実用化も進んでいる。中でももっともソフトロボットらしいと思うのは、バルーンカテーテルやイレウスチューブ⁸⁾といった医療器具である。イレウスチューブは、腸閉塞の治療に用いられるチューブで、経鼻で小腸へ挿入し、腸液の吸引や閉塞の解除に用いられる。

図2に示すイレウスチューブは、チューブ先端のステアリングに用いる2つの樹脂製バルーン(先端可動用バルーン1, 2)と、小腸内で膨らませることで腸の蠕動(ぜんどう)運動を利用してチューブを腸内の奥に誘導する蠕動用バルーンからなる。図に示すように片側の先端可動用バルーンに空気を挿入するとバルーンが膨らみチューブが湾曲する。蠕動用バルーンの駆動は蒸留水で行われる。まさしく、流体ラバーアクチュエータのシンプルな構造、大きな動作、適切な発生力、周囲(腸管壁)を傷つけないやわらかさ、応力分散、形状適応といった特徴を發揮した実用段階にある流体ラバーアクチュエータである。空気および水の加圧は外部からシリンジで行われ、もともと外部とつながったソフトロボットであるので、ホースが必要といった流体アクチュエータの欠点も問題にならない。

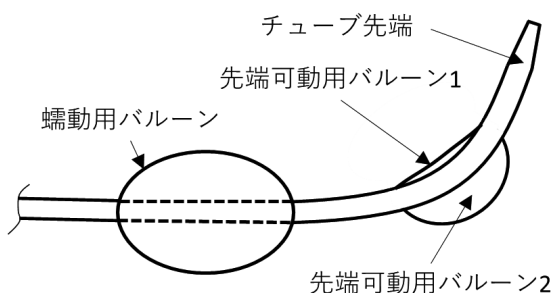


図2 イレウスチューブにおけるフルードパワー

4. やわらかな流体圧力源

イレウスチューブのように有索状のソフトロボットでは大きな問題にならないが、自立したソフトロボットを流体ラバーアクチュエータで作るときは、圧力源・制御バルブ・送気ホースが大きなネックと

なる。電気アクチュエータでも、電源・トランジスタ・電線が必要なので構成はまったく同じであるが、流体ラバーアクチュエータの要素は現状ではどれも大きいのである。

小型で高効率の圧力源とその制御法は、まさに本学会の研究者や技術者に期待される領域である。これまでに研究されている代表的な例を動作原理ごとに下記にあげる。

- ① 相変化を利用するもの。アルコールの気液相変化を温度で制御⁹⁾など。
- ② 化学反応を利用するもの。イオン交換膜を介して水の分解/合成を電流で制御¹⁰⁾、過酸化水素水の分解による酸素発生を触媒で制御¹¹⁾など。
- ③ 機能性流体を利用するもの。電界共役流体のジェット流¹²⁾、EHD(electro hydraulic dynamics)流¹³⁾、ER流体(electrorheological fluid)、MR流体(magnetorheological fluid)など。
- ④ 水素吸蔵合金の水素吸蔵/放出を温度で制御するもの¹⁴⁾など。

このほかにも多くの研究が進められているが、いずれもまだ実用段階に達しているとはいえない。しかし、小型、高効率の圧力源が実現できれば、流体ラバーアクチュエータの適用範囲は格段に広がる。

5. 電場応答性ポリマーアクチュエータ

電場応答性ポリマーアクチュエータ(EPA)は、フルードパワーの立場から議論されることは通常ないが、少しだけ視野を広げるとフルードパワー技術が貢献すべき重要な研究領域であることに気づく。

イオン導電性アクチュエータ¹⁵⁾の主体は薄板状のゲルである。ゲルの内部にはイオンと水分子が含まれている(図1(c))。ゲルの両面に成膜した電極に数ボルトの電圧を印加すると、ゲル内部でイオンとともに水分子が移動してゲルの片側が膨潤し、湾曲変形する。

誘電エラストマーアクチュエータ(DEA)は、シート状の誘電エラストマーの両面に薄膜電極を成膜した構造を持つ。数k~数10kボルトの電圧を加えることで静電気力によってエラストマーが変形動作する。この誘電エラストマーの代わりに、誘電率の高い流体を使っても類似した動作が得られる。薄膜電極を形成したエラストマー製バルーン内部に誘電流体を封入して動作させるソフトアクチュエータ¹⁶⁾やポンプ¹⁷⁾が開発されている。

両者のEPAで見られる動作の仕組みは、まさしく電気による流体の直接駆動である。前述の圧力源の研究とも結びつきながら研究が進むとおもしろいと私は期待している。

6. フルードパワーが創るロボット構造体

ソフトロボティクスにおける、フルードパワーを用いた特徴的な構造物として、インフレータブル構造とジャミング構造について紹介する。

インフレータブルロボット¹⁸⁾とは、空気で膨らませた薄い樹脂膜の袋を身体としたロボットの構造体である。ゴム風船とは違って素材自身は伸びず、空気を入れて樹脂膜がピンと張った状態にすることで、ある程度しっかりした形を保った構造体を実現される。軽量で、ある程度の剛性を持ちつつも、外界と接した場合に表面が相手の形状に沿って変形する柔らかさを持つ。植物の根のように分岐しながら成長するインフレータブルロボットも開発されている¹⁹⁾。

ソフトロボットの身体はいつもやわらかければよい、という訳ではない。状況に応じて、身体のやわらかさと硬さをうまく切り替えることは有用な機能である。ソフトロボットにおいて身体の硬さ・やわらかさを切り変える方法で有名なのは空気圧を使ったジャミング転移現象を使う方法である。一例を紹介する²⁰⁾。

塩化ビニルの樹脂袋の中に数mmの発泡スチロール粒子をたくさん入れておく。この粒子は普段は袋の中で自由に動くので、袋はやわらかく変形するが、真空ポンプを使って袋の中の空気を抜くと、袋はつぶれて真空パック状態になり、中の粒子は互いに摩擦で動かなくなって袋全体が硬くなる。袋を曲げた状態で空気を抜けばその形を保ったまま硬くなり、空気を入れれば粒子が自由に動くようになりまたやわらかな袋に戻る。

7. 高自由度の材料が創り出す自律運動

自由度の高い材料から構成される力学系は、一見知的にも見えるリミットサイクル運動を実現することがある。有名な例は、死んだマスが泳ぐ²¹⁾という実験である。カルマン渦が発生する流れ場にマスの死

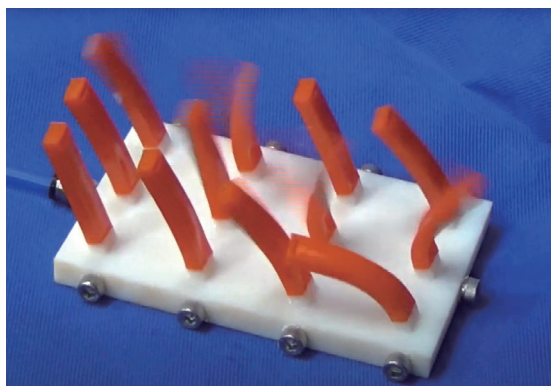


図3 ゴムと空気の連成により動作する繊毛型アクチュエータ

体を置くと、あたかも生きて泳いでいるかのような挙動を示すことがある。水流とやわらかな弾性体の力学連成によって発現するリミットサイクルである。

一般に自由度の高い系ほど多様な力学挙動が存在しうるので、複雑なリミットサイクルが発現する可能性が高まる。やわらかい固体と流体からなるソフトロボットはその条件に当てはまり、材料の特性に基づいた自律的な運動を起こすロボットの実現が期待できる。

たとえば難波江らは、直方体のゴム構造体内部に空気を送り込むことにより、空気の流れとゴム構造の弾性変形が連成し、繊毛のような自律動作を行うソフトアクチュエータ群を実現している²²⁾(図3)。

8. ソフトロボティクスの先

文科省新学術領域「ソフトロボット学」(2018年度～2022年度)²³⁾²⁴⁾の領域代表を務めている関係で、ソフトロボット学(=ソフトロボティクス)の先にな何を据えているか?という質問をしばしば受けることがある。

いろいろな答え方があるが、もっとも遠くに私が見据えているのは「生き物」である。もともとロボティクスの大きなモチベーションのひとつは生物模倣であった。表2に示すように、硬い材料からなる従来のロボティクスから、柔軟材料を用いたソフトロボティクスへ向かうベクトルは、さらに生体組織を材料として用いるバイオロボティクスを経て「生き物」に向かっている。ゲルや生体組織など水を含む材料を用いるロボティクスはウェットロボティクスと呼ばれることもある²⁵⁾。

そしてこの流れに沿って、使われる材料は低自由度から高自由度へ、すなわち、安定から不安定へ、あるいは固体から流体へと移ってゆき、それに伴って外界への適応性、順応性が増大してくる(表2)。実際、人間の身体は60%程度が水であり、そのコントロールは生命維持に直結する。

身体内の水分のコントロールも含めて、ウェットロボティクスにフルードパワーの知見を展開していけないかと最近私は考えている。これについてはまた別の機会に紹介させていただきたい。

表2 従来ロボットと生き物の間におけるソフトロボット

	従来のロボット	ソフトロボット (従来のソフトロボット)	バイオロボット (広義のソフトロボット)	生き物
材料	硬い固体 (金属, プラスチック)	柔らかい固体 (エラストマ, ゲル)	生きている 細胞, 生体組織	細胞 遺伝子
機能	力, 速度, 精度 効率, 確実性	受動的適応・順応	自己修復 自己改変による 適応・順応	恒常性 自己修復・自己改変 増殖 変異・進化

不変・安定 → 変化・順応

9. おわりに

実はソフトロボティクスの基本的な考え方はいまから50年以上前のロボット発祥当初からすでに垣間見られる²⁹⁾。マッキベン型人工筋肉は1960年頃にはすでにいまでいうウェアラブルロボットに応用されていた。1980年代のわが国ではフルードパワーを利用したさまざまなソフトロボットの研究が世界に先駆けて進められていた。

従来の「ホースで作動流体を送り込んで駆動する」方式に限定せず少し視野を広げることで、ソフトロボティクスにおけるさまざまな課題解決や新たな学術展開にフルードパワーが大きく寄与できる可能性があると考えられている。

ソフトロボティクスの研究が世界的に盛んになって10年以上がたつ。まだ発展途上ではあるが、ソフトロボティクスの現状をまとめた書籍が近年いくつか出版されている²⁶⁻³⁰⁾。これらも参考にしていただきたい。

参考文献

- 1) 鈴森康一，脇元修一：流体駆動ソフトメカニズムの設計，日本ロボット学会誌，Vol. 29, No. 6, pp. 484-487, (2011).
- 2) 鈴森康一：アクチュエータ技術から見たソフトロボティクス，日本ロボット学会誌，Vol. 37, No. 1, pp. 26-29, (2019).
- 3) 鈴森康一：細径人工筋が切り拓くソフトロボティクス，計測と制御，第56巻，第4号，(2017).
- 4) 鈴森康一：細径人工筋肉の研究と実用化，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol. 48, No. 3, pp. 48-51, (2017).
- 5) 鈴森康一：フルードパワーが拓く新しいロボティクス，計測と制御，Vol. 57, No. 11, pp. 759-764, (2018).
- 6) 鈴森康一：空圧ラバーアクチュエータ，計測と制御，Vol. 58, No. 10, pp. 755-760, (2019).
- 7) 鈴森康一：「強いロボット」を実現する油圧技術，計測と制御，第60巻，第4号，pp. 296-300, (2021).
- 8) 鈴森康一：アクチュエータ工学入門，ブルーバックス，講談社，p. 200, (2014).
- 9) Aslan Miriyev, Kenneth Stack & Hod Lipson : Soft material for soft actuators, Nature Communications volume 8, Article number: 596 (2017)
- 10) 鈴森康一，和田晃：気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol. 48, No. 1, pp. 21-25, (2017).
- 11) Michael Wehner, Ryan L. Truby, Daniel J. Fitzgerald, Bobak Mosadegh, George M. Whitesides, Jennifer A. Lewis & Robert J. Wood : An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots, Nature volume 536, pages 451-455 (2016)
- 12) 横田眞一：機能性流体ECFを利用したマイクロ液圧システム，精密工学会誌，77巻9号 pp. 823-827, (2011).
- 13) Vito Cacucciolo, Jun Shintake, Yu Kuwajima, Shingo Maeda, Dario Floreano & Herbert Shea : Stretchable pumps for soft machines, Nature volume 572, pages 516-519 (2019).
- 14) 北川能，呉海帆，塚越秀行，朴聖煥：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システム学会論文集，36巻6号 pp. 158-164, (2005).
- 15) 安積欣志，イオン導電性タイプの機能性高分子材料開発の動向，計測と制御，54巻1号 p. 5-12, (2015).
- 16) E. Acome, S.K. Mitchell, T.G. Morrissey, M.B. Emmett, C. Benjamin, M. King, M. Radakovitz, C. Keplinger1, : Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance, Science 359, 61-65 (2018).
- 17) R.S. DITEESAWAT, T. HELPS, M. TAGHAVI HTT, J. ROSSITER : Electro-pneumatic pumps for soft robotics, 17, Vol 6, Issue 51, (2021).
- 18) 西岡靖貴：空気圧ソフトロボットアーム，日本ロボット学会誌 33巻9号 pp. 664-667, (2015).
- 19) 多田隈建二郎，古川英光：トラス駆動型の究極の柔軟ロボット機構を創造する，日本機械学会誌122巻1205号 pp. 25-27, (2019).
- 20) 満田隆，久下幸子，若林将人，川村貞夫：粒子内蔵型機械拘束要素の開発と身体装着型力覚呈示装置への応用，計測自動制御学会論文集，37巻12号 p. 1134-1139, (2001).
- 21) James C Liao : Neuromuscular control of trout swimming in a vortex street: implications for energy economy during the Karman gait, J Exp Biol. 207 (Pt 20): 3495-506, (2004).
- 22) Kosuke Tani, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori : Pneumatic Soft Actuator Using Self-Excitation Based on Automatic-Jet-Switching-Structure, IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, VOL. 5, NO. 3, (2020).
- 23) Koichi Suzumori : Overview of the Kakenhi Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas : Science of Soft Robots, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 34, No. 2, pp. 195-201, (2022).
- 24) 鈴森康一：ソフトロボット学がめざすもの（〈特集〉ソフトロボット学），日本機械学会誌，Vol. 122, No. 1205, pp. 4-6, (2019).
- 25) 森島圭祐：バイオアクチュエータ誕生から，生命機械融合ウェットロボティクス創成に挑戦，計測と制御，58巻10号 p. 777-780, (2019).
- 26) 鈴森康一：いいかげんなロボット ソフトロボットが創るしなやかな未来，化学同人，(2021).
- 27) 新山龍馬：やわらかいロボット，金子出版，(2018).
- 28) 細田耕：柔らかくヒューマノイドロボットが知能の謎を解き明かす一，化学同人，(2016).
- 29) 鈴森康一，中嶋浩平，新山龍馬，舩屋賢 編：ソフトロボット学入門—基本構成と柔軟物体の数理—，オーム社，(2023).
- 30) Koichi Suzumori, Ryuma Niiyama, Kenjiro Fukuda, Kohei, Nakajima Eds., : Science of Soft Robots, Springer, (2023出版予定).

(原稿受付：2022年9月30日)

ラバーアクチュエータを活用したソフトロボットハンド

著者紹介



おおの しんご
大野 信吾

株式会社ブリヂストン
〒187-8531 東京都小平市小川東町 3-1-1
E-mail: shingo.oono@bridgestone.com

1995年東京工業大学制御工学専攻修士課程修了、同年株式会社ブリヂストン入社。2008年青山学院大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。日本フルードパワーシステム学会、応用物理学会の会員。博士（理学）。

1. はじめに

ソフトロボティクスを担う一分野であるソフトアクチュエータとして、さまざまな構造のアクチュエータが検討されている¹⁻³⁾。特にシリコンなどの弾性材料で作られたベローズ状の構造に圧力をかけることで変形させる方式が広く研究されているが、これらは一般的に大きな圧力をかけると弾性材料が異常拡張してしまうため高圧での使用が難しいという課題がある。フルードパワーを利用するアクチュエータが発生する力は一般的に印加圧力に比例するので使用圧力が低いと大きな力を出すことが難しい。一方McKibben型ラバーアクチュエータはゴムチューブの外側を伸長しない糸で作られたスリーブが覆っているためゴムチューブに高い圧力を印加してもゴムチューブが大きな応力を受けることがないのでゴムチューブが異常拡張して破壊することがない。そのため大きな力を出すことができるとともに、高い信頼性を有しており実用に適したソフトアクチュエータであるといえる。われわれは空圧だけでなく油圧駆動の超高出力なMcKibben型ラバーアクチュエータの開発を行ってきた⁴⁾。油圧駆動というソフトなイメージはないかもしれないが、McKibben構造においては柔らかいゴムチューブと繊維からなるスリーブで構成されていることと、外力を受けた時にゴム材料の変形により体積変化を許容できるため一定のバネ特性を有することからソフトアクチュエータといっても良いと考える。また従来の収縮型ラバーアクチュエータを改良した湾曲型

ラバーアクチュエータについても開発を進めている⁵⁾⁶⁾。本稿では従来のMcKibben構造をベースとした湾曲型ラバーアクチュエータの特性について説明するとともに、湾曲型ラバーアクチュエータを用いて作製したソフトロボットハンドについて紹介する。

2. McKibben型ラバーアクチュエータの構造と特徴

2.1 収縮型ラバーアクチュエータの構造

収縮型ラバーアクチュエータの構造を写真1に示す。ゴムチューブと繊維で編まれたスリーブにより構成されており、両端は流体を導入するポートを備えた端末で封止されている。導入ポートから流体を注入し加圧することでゴムチューブが径方向に膨らむが、その時にスリーブの糸の角度がパンタグラフ的に変化し軸方向に収縮力を発生する。

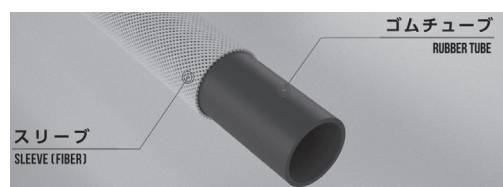


写真1 収縮型ラバーアクチュエータの構造

2.2 湾曲型ラバーアクチュエータの構造

写真2に湾曲型収縮型ラバーアクチュエータの構造を示す。

2.1で示した収縮型ラバーアクチュエータのチューブとスリーブの間に板バネとなる金属板を挿入した構造となっている。収縮型ラバーアクチュエータと同様に導入ポートから流体を注入し加圧するとスリーブの糸の角度が変化し軸方向に収縮しようとするが、周方向の一部に配置された板バネ部分は収縮することができない。板バネのない部分は収縮することから板バネ部分を背中側にして全体が湾曲する。また流体の圧力を解放すると板バネの復元力により元通りまっすぐな状態に戻ることができる。

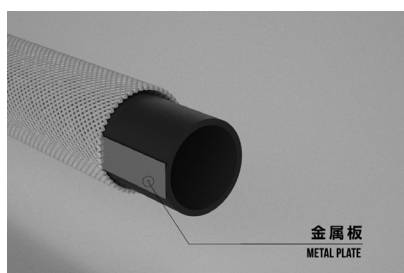


写真2 湾曲型ラバーアクチュエータの構造

2.3 McKibben型ラバーアクチュエータの特徴

収縮型、湾曲型ともにMcKibben型ラバーアクチュエータの主な特徴は以下のとおりである。

- ① シンプルな構造：収縮型はゴムチューブとスリーブと末端のみ、湾曲型の場合でも板バネが加わるだけのきわめてシンプルな構造である。
- ② 軽量高出力：主な構造物がゴムと繊維であり、湾曲型でも薄い板バネが加わるだけであるためきわめて軽く作ることができる。またゴムチューブの周りをスリーブが覆っているため高い圧力を印加してもゴムチューブが伸びて破損することがない。空圧駆動ラバーアクチュエータでも0.5MPa以上の圧力印加が可能であり、油圧駆動ラバーアクチュエータにおいては5MPaの圧力を印加しても破損することがない。McKibben型ラバーアクチュエータの優れた構造と耐圧性の高さから軽量でありながらきわめて大きな力を発生することができる。
- ③ 構造の柔軟性：ゴムや繊維といった柔らかい部材から構成されており構造自体が柔らかい。また湾曲型に使用する板バネも薄く柔軟であり曲げ方向に柔らかいバネ特性を示す。
- ④ 衝撃に強い：ラバーアクチュエータに外力が加わった場合にラバーアクチュエータが変形して内容積を変化させることができることから、外力に対してバネ的な特性を示す。さらに空圧駆動の場合は空気の圧縮性により空気バネとしても働くので、きわめて柔らかい動作となり衝撃に強い。
- ⑤ ダイナミックレンジが広い：シール部材を必要としない構造からシール部のしゅう動抵抗が存在しないため、スティックスリップを生じることがなくきわめて小さな変位や力の制御が可能である。一方で高い圧力を印加することで大きな力を発生することもできることからきわめて大きなダイナミックレンジを取ることができる。
- ⑥ 水中での使用が可能：ラバーアクチュエータ

は密閉構造であり、シール構造を持たないことから水中で使用することも可能である。

ここに示したとおりラバーアクチュエータはソフトだけでなく力強い動作も可能で、ダイナミックレンジも広いことから、実使用を考えた時にさまざまなソフトロボティクス用途に期待されるラバーアクチュエータであると考えている。

3. 湾曲型ラバーアクチュエータの特性

3.1 空圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータの特性

収縮型ラバーアクチュエータの収縮力については、式(1)のシュルツの式が有名である。

$$F = \frac{\pi D_0^2 P}{4} \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \{3(1 - \varepsilon)^2 \cos^2 \theta_0 - 1\} \quad (1)$$

収縮力 F は収縮率 ε と印加圧力 P によりあらわされる。一方で湾曲型ラバーアクチュエータの曲げ方向の力については、収縮力を曲げ方向に変換している構造から曲率と印加圧力の関数となることが予想される。さらに板バネの曲げ剛性も影響する。一例として実際に作製した湾曲型ラバーアクチュエータの印加圧力に対する曲げ方向の力の関係を示す。本検討で作製した湾曲型ラバーアクチュエータはゴムチューブ外径11mm、スリーブ編角30°、湾曲部分（スリーブが露出している部分）の長さ100mmのものである。重量は45gであった。

写真3は曲げ方向の力計測の様子を示している。秤の表面に接触しないように湾曲型ラバーアクチュエータを水平に固定する。この時圧力印加に伴い湾曲する方向が下方になるようにし、加圧により湾曲した時の力を計測する。



写真3 力計測方法

図1の横軸はラバーアクチュエータに印加した圧力、縦軸は計測された曲げ方向の力を示している。曲げ方向の力は印加圧力に比例している。またおよそ0.6MPaまで印加可能でありMcKibben構造の耐圧性の高さが確認できる。曲げ方向の力については20Nを超えていた。

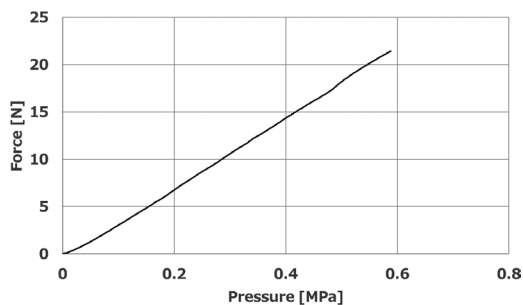


図1 空圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータの印加圧力と曲げ方向の力の関係

3.2 油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータの特性

写真4は油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータに印加する圧力を変えた時の変形形状を示している。使用した湾曲型ラバーアクチュエータはチューブ外径16.3mm、スリーブ編角25°、湾曲部長さ200mmのものである。変形はきれいな円弧上をしており、圧力の増加に伴い湾曲角度が大きくなり5MPa印加で最大148°となった。空圧駆動のおよそ10倍となる5MPaの圧力を印加してもラバーアクチュエータが破損することなく、McKibben構造の高い耐

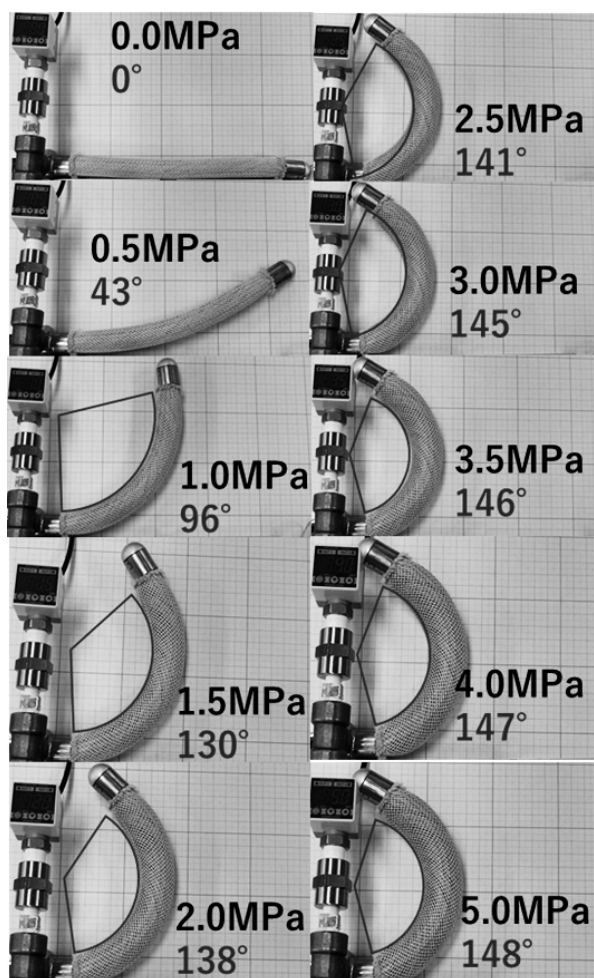


写真4 油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータの印加圧力と変形形状

圧性を確認できた。

写真5に示す構成で油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータの曲げ方向の力を計測した。圧力の印加によりラバーアクチュエータの先端部が写真上側に曲がろうとするのに対して、先端部とロードセルをワイヤを介して接続することで曲げ方向の力を計測した。

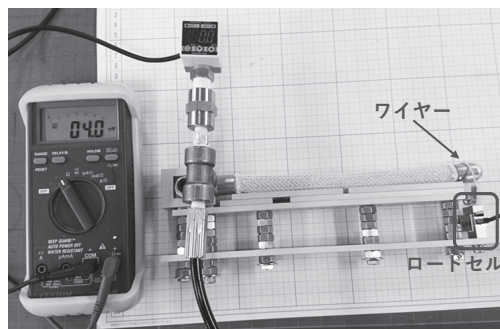


写真5 油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータの印加圧力に対する曲げ方向の力の計測

図2は印加圧力に対する曲げ方向の力を示している。計測した油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータは、チューブ外径が11mm、16.3mm、20mmのもので、スリーブ編角はすべて25°、湾曲部の長さはすべて200mmのものである。空圧駆動の場合と同様に印加圧力に対して曲げ方向の力は比例しているが、空圧駆動に比べ大幅に高い圧力を印加できるため油圧駆動とすることできわめて大きな曲げの力を発生させることができる。

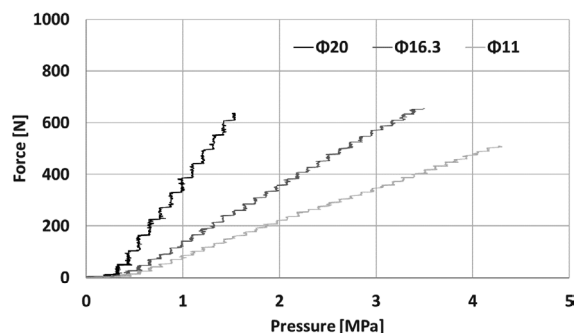


図2 油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータの印加圧力に対する曲げ方向の力

4. 湾曲型ラバーアクチュエータを用いたソフトロボットハンド

4.1 空圧駆動ソフトロボットハンド

3.1で示した空圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータを3本用意し、平面上に120°間隔で均等に中心に向かって湾曲するように配置したロボットハンドを作製した。写真6は本ロボットハンドで5kgの

鉄球を持ち上げている様子を示している。この時の印加圧力は0.6MPaであった。

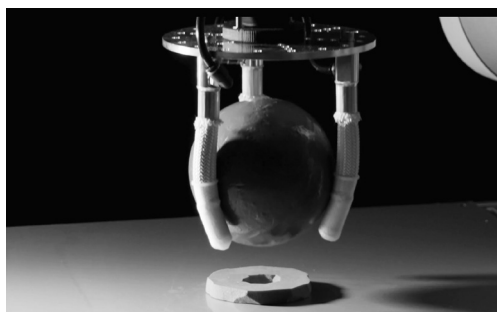


写真6 空圧駆動ソフトロボットハンドで5kgの鉄球を把持している様子

写真7は同じハンドを用いて、ミニトマトや半分に切ったゆで卵をつぶすことなく持ち上げている様子を示している。この時の印加圧力は0.10～0.15MPa程度である。本結果から印加圧力を変えるだけで柔らかい対象から硬く重い対象まで、幅広く把持可能であることが確認できた。

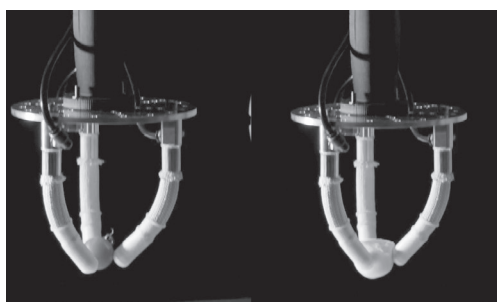


写真7 空圧駆動ソフトロボットハンドでミニトマト（左）、ゆで卵（右）を把持している様子

4.2 油圧駆動ソフトロボットハンド

写真8は3.2で示した外径20mmの油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータを3本用いたロボットハンドを示している。

持ち上げているのは12.9kgのバーベルでこの時の印加圧力は2.0MPaである。3章で示したとおり油圧駆動湾曲型ラバーアクチュエータは5MPaの圧力印加も可能なのでより大きな力も発揮できるが、本検討ではこれ以上重い負荷を準備できなかった。

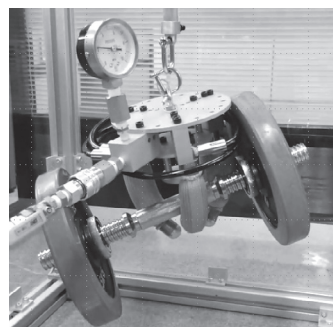


写真8 油圧駆動湾曲型ソフトロボットハンドで12.9kgのバーベルを把持している様子

5. おわりに

本稿ではMcKibben構造を用いることで高い圧力に耐えられる湾曲型ラバーアクチュエータの特性と、きわめて小さな力から大きな力まで広いレンジで動作できるソフトロボットハンドについて紹介した。筆者らは真にソフトロボティクスが実用化されていくためには柔らかさと力強さの両立が重要であると考えている。本稿で紹介したラバーアクチュエータやソフトロボットハンドがその一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 鈴森康一：フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究（第1報、3自由度アクチュエータの静特性）、日本機械学会論文集（C編）、Vol. 55, No. 518, pp. 2547-2552（1989）
- 2) 佐々木大輔・則次俊郎・山本裕司・高岩昌弘：空気圧ゴム人工筋肉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、Vol. 24, No. 5, pp. 640-646（2006）
- 3) 大城竣・高嶋一登・則次俊郎・向井利春：“形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋肉の湾曲角度制御”，計測自動制御学会SI部門講演会SICE-SI2018予稿集，pp. 1790-1795（2018）
- 4) 大野信吾：油圧駆動の高出力ゴム人工筋肉，計測と制御，Vol. 57, No. 11, pp. 799-802（2018）
- 5) 大野信吾・他：湾曲型ゴム人工筋肉の提案とその特性評価，第20回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（SI2019）
- 6) 大野信吾・他：油圧駆動ハイパワー湾曲型ゴム人工筋肉の特性評価，第21回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（SI2020）

（原稿受付：2022年10月6日）

ソフトロボット技術を用いた蠕動運動機構の事業化^{ぜん}

著者紹介



うめだ きよし
梅田 清

株式会社ソラリス
〒112-0002 東京都文京区小石川2-23-12
E-mail: umeda@solaris-inc.com

1997年 岡山大学大学院工学研究科修了。
1997年 キヤノン株式会社、2015年 同社設計室長、
2018年 Kyoto Robotics株式会社 開発部長、
2020年 株式会社ソラリスに参画、
2021年 同社代表取締役就任。



なかむら たろう
中村 太郎

中央大学
〒112-8551 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後期課程修了。
1999年秋田県立大学助手、2004年中央大学専任講師、2006年同大学准教授を経て、2013年同大学理工学部教授。この間スイス連邦工科大学ローザンヌ校Visiting Prof. 2017年に株式会社ソラリスを設立し、現在取締役会長。人工筋肉、生物型ソフトロボットの研究に従事。IEEE等の会員。博士（工学）。

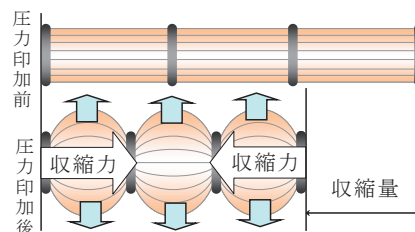


図1 軸方向繊維強化型人工筋肉の駆動原理

「腸管構造を模した蠕動運動型ミキシングポンプ」を開発してきた。これらのロボットによる蠕動運動は、筆者らにより開発された「軸方向繊維強化型人工筋肉（図1）」⁵⁾によって駆動する。

本人工筋肉は空気圧により軸方向に収縮し半径方向に膨張するため、蠕動運動を特長づける縦走筋と環状筋の2種類の平滑筋による柔軟な運動を再現することができる。

上述の2種類のロボットは空気圧駆動によるソフトロボットとして以下のような共通した特長を持つ。

- ・複雑で時間変化を伴うような環境に対して、高度な制御や多数のセンサを使用することなく、適応的に対応可能
- ・構造が簡単で部品点数が少なく、同形状のユニットが複数接続された構造体を有することから対故障性や拡張性が容易

このような特長により、蠕動運動によるソフトロボットは、単なる学術的なロボットとしての枠を超えて、宇宙開発やインフラ設備、化学・食品工場等のさまざまなフィールドにおけるニーズに答えられるような実用性の高いシーズとして注目を浴びている。

本解説では、蠕動運動による2種類のソフトロボットに関する駆動原理とその実用化・事業化にむけた応用事例について紹介していく。

2. ミミズを規範とした蠕動運動型移動ロボット

2.1 ミミズの移動方法とロボットの構造

ミミズの移動方法は、ユニークで有用性の高い機能を多数有している。本運動方法について以下の5つの特長を示す⁶⁾。

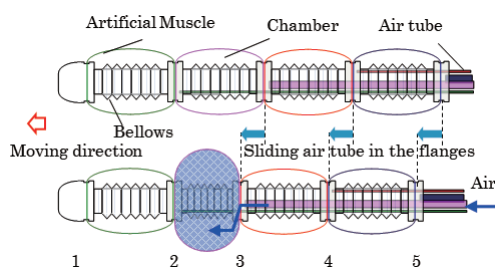
1. はじめに

本稿では、フルードパワーによるソフトロボット技術として、蠕動（ぜんどう）運動機構を用いたロボット開発とその実用化・事業化に関して解説する。

蠕動運動とは、生物の消化器官系や軟体動物に見られるような環状形体における非骨格系の運動様式であり、主に軸方向への伸縮と半径方向への膨張・収縮によって誘発される移動や搬送の方法を指す¹⁾²⁾。この運動機構の大きな特長を以下に示す。

- ・環状形体そのものが平滑筋のみによって形成された「非骨格系」であるため、骨格（リンク）のような高剛性な支持機構を有しない³⁾。
- ・筋肉の活性や外部刺激によりその形状が適応的に変化しうる柔軟構造を有している。
- ・感覚神経と運動神経が構造体全体にわたって分散されており、運動制御系が1か所に集中していない自律分散制御系である⁴⁾。

筆者らは、蠕動運動によるソフトロボットとして「ミミズを規範とした蠕動運動型移動ロボット」や

図2 蠕動運動型移動ロボットの概要⁶⁾

- ①移動に必要な空間がきわめて小さい。
- ②周辺環境に対して大きな接地面積を確保できるため、安定した移動機能と大きな牽引力が得られる。
- ③ミミズは食道や腸などの穴が貫通した中空構造である。したがって、その空洞部に既存のカメラやメンテナンス装置などを出し入れ可能となる。
- ④柔軟な構造であるため特別な制御を必要とすることなく分岐管や曲管を移動できる。
- ⑤同構造の繰返しであり、ユニット化が可能となる。

以上より、ミミズの移動方法を規範としたソフトロボットを開発することによって、従来は困難であった「細く」「曲管が多数」「長距離」な配管内部の検査や清掃を可能とするロボットの開発ができる。

図2に本ロボットの構造について説明する。本ロボットは図1で示した人工筋肉を直列方向に複数配置し、各ユニットの「太く短い」変形を後方に伝播することによって前進する。各ユニットは、外側の人工筋肉と内側のベローズによる2重構造によってチャンバを構成している。ベローズ内側から通された空気圧チューブによって、それぞれのユニットのチャンバに独立した空気圧を印加できる。またベローズ内の空間を利用してカメラやメンテナンス機器などを搭載することができる。

2.2 応用例

2.2.1 インフラ配管の非破壊検査

既知のように、1970年代の高度成長期に日本全国に設置された上下水道、ガス導管といったインフラ配管は、埋設から50年を経過し、老朽化により各地で事故が相次いでいる。例として水道管に言及すると、厚生労働省によれば⁹⁾、全管路延長(721,873km)に占める法定耐用年数(40年)を超えた延長の割合は、17.6%(2018年度)となっている。法定耐用年数を超えた管路約13万kmを今後20年間(2019～2038年度)で更新する場合、年度あたり必要な更新延長は約6千km、更新率は0.88%となるが、近年の更新率は0.7%前後で推移しており目標に達していない。その結果、水道管の事故は2019年度に約2万件が報告され、その他下水道やガス導管も含めて深刻な社会課題となっている。

このような状況に対して、筆者らはミミズ型管内走行ロボットを利用した課題解決に取り組んでいる。

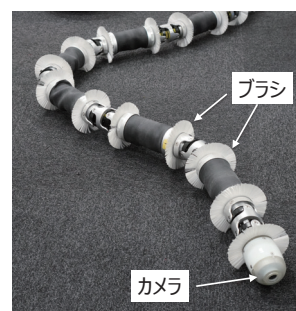


図3 筆者らが開発したミミズ型管内走行ロボット

図3は、筆者らが開発したミミズ型管内走行ロボットである。同写真は100A管を約40m走行可能なモデルとなっており、埋設管であっても管内からの非破壊検査が可能である。

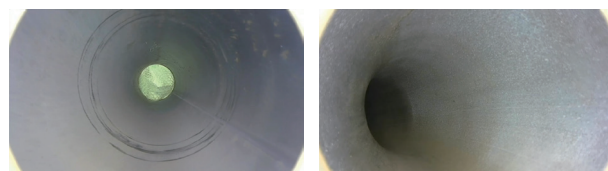


図4 実際の鋳鉄管内撮影画像

図4は実際にロボット先端部のカメラで撮影した画像を示している。Full HD(1920×1080)画質で鮮明に確認することができる。また、図3に示すように、同ロボットには複数のブラシが取り付けられており、該ブラシを使って管内の簡易清掃を実施することもできる。配管検査ロボットとして同ロボットを利用する利点は、以下が挙げられる。

- ・Φ100mm以下の細管内を自立走行可能なため、特別な操作が不要で、少人数で点検実施が可能
- ・駆動部分に電気を利用しておらず、一部が水が溜まっても走行可能
- ・最小限の道路掘削量にて非破壊検査ができるため、事故原因か所を特定するための時間やコスト削減が期待できる

配管の老朽化は、同じ時期に設置したとしても環境によって劣化進度が異なるため、タイムベースマネジメントでは適切な更新判断が困難である。たとえば、毎年必ず実施する配管更新時に、更進か所の前後に同ロボットを投入して管内状況を把握することにより、埋設期間と環境、および老朽化進度の相関を求めることができ、コンディションベースの適切なマネジメントへと移行することが望まれる。

2.2.2 製造工場のダクト内清掃

さまざまな製造工場で、鉄粉や木くずなどを集塵する配管が存在し、該配管内に粉塵（じん：ちり）が積層することが多い。放っておくと粉塵爆発を起こしたり、詰まりを引き起こしたり、あるいは積層した塊がダクト下方に落下して設備を壊す問題も発生している。このような配管のうち、特に内径が100mmを下回る細管においては、定期的に配管をばらし、人手で清掃する場合が多かった。また配管の設置位置によっては危険な高所作業にもなり、足場設置のためのコスト増も招いており、低コストで安全に自動清掃するための技術が望まれていた。このような課題に対して、ミミズ型管内走行ロボットは有効に作用する。

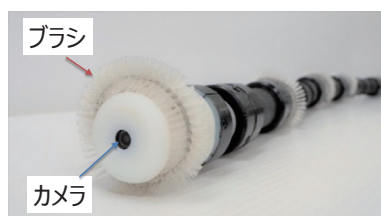


図5 ミミズ型管内走行ロボットの50A対応モデル

図5は、筆者らが開発した50A配管を走行するロボットであり、管内に20～30m侵入することが可能である。集塵ダクトにはさまざまなサイズのものが存在するが、50Aも頻出する管径であり、該モデルは有効である。

方法としては、清掃したい配管の入口・出口のフランジを2か所外して、片方から同ロボットを投入し、片方に集塵袋を設置して、粉塵を押し出すように動作する。あるいは、出口側に集塵機を設置してもよい。高所であっても配管をばらさずに清掃でき、人的工数削減や危険な高所作業の削減が期待できる。

3. 腸管構造を模した蠕動運動型ミキシングポンプ

3.1 腸管構造の運動とミキシングポンプの概要

腸管の断面図を図6(a)に示す。腸管は環状筋と縦走筋という2種類の筋層で構成されている^{1), 4)}。これら2種類の筋肉が収縮とし緩を繰り返すことで蠕動運動を発生させる。腸管の蠕動運動の様子を図6(b)に示す。腸管は食塊の接触により、環状筋が収縮することで食塊を押し出す。収縮後はし緩し、元の状態に戻る。この動作を繰り返し伝播することで、高粘度・固液混相流である食塊を「柔らかく・揉むように」効率よく混合運搬する。

本ミキシングポンプは空気圧で駆動する図7(a)の

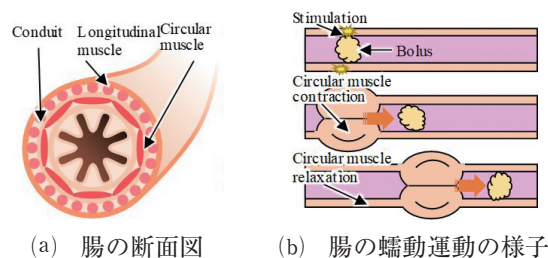


図6 腸管構造と蠕動運動の様子

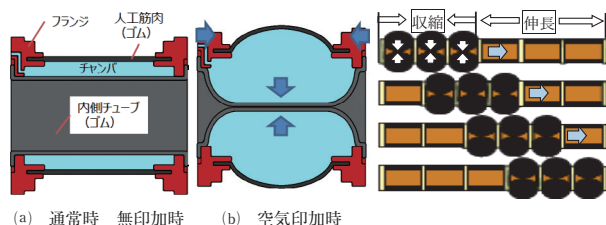


図7 ユニットの断面と挙動 図8 蠕動運動の様子

ようなユニットを直列に複数配置することで構成される⁷⁾。このユニットは外側に人工筋肉、内側にゴムチューブを配置した構造であり、図7(b)のようにチャンバに空気を印加するとゴムチューブは内側に膨張し、外側の人工筋肉は軸方向に収縮する^(※1)。図8示すように内側チューブの膨張と人工筋肉による軸方向の収縮により「柔らかく・揉みあげる」大腸のような蠕動運動が再現される⁸⁾。この運動は管内に楕円運動を誘発させ、より効率的な高粘度・固液混相流・粉体の水平垂直搬送や混合が可能となる。

3.2 応用事例

筆者らは当該デバイスの開発を進めており、図9はそのラインナップを示している。現状、内径が2インチと4インチの2つのラインナップが存在し、顧客の流量要件に応じて選択する。なお、筆者らはさらに大型のサイズについても開発中である。

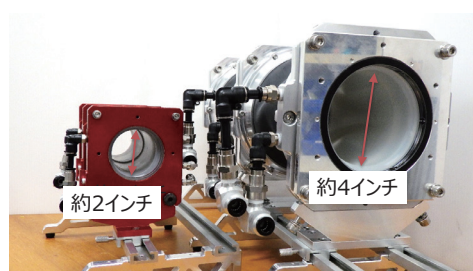


図9 蠕動運動型ミキシングポンプ

3.2.1 製造現場における人工程の削減

たとえば食品や医薬品、化学品等の製造工場においては近年オートメーション化が進んでいるが、いまだ一部工程においては人手に頼る作業が残存している。それは、既存のポンプやコンベヤでは搬送が困難であり、搬送できてもその後の清掃に多くの工

数が必要な工程である。表1にそのような事例を記載するが、同表のような工程において、蠕動運動型ミキシングポンプは有効に作用する。

同表①は、本ポンプを駆動させる空気の印加圧力が0.06MPa程度と非常に低いことで、固体へのダメージを少なく搬送することができる。また、②は本ポンプが備える負圧制御システムにより、腸管内部に材料を引き込みながら搬送することができる。なお負圧制御システムとは、図7に示したチャンバ領域に供給した空気を負圧吸引することで、閉塞した内ゴムチューブを強制的に閉塞解除することを意味する。また、③④については本ポンプの機構の原理から、内側チューブの内面積がすべて材料に接して搬送するため、空気の印加圧力が低圧であっても、当該材料の搬送が可能となる。⑤については、蠕動運動機構自体が電気を利用しないため、発火要因が存在しないことによる利点である。最後に⑥は、カーボンナノチューブ分散液のように静置するとゲル化して粘度上昇するような流体に対して、蠕動運動で搬送しつつ、同時に攪拌効果が得られるという利点がある。上記利点により、各工程における人手作業を、蠕動運動型ミキシングポンプに置き換えることで、すでに顕在化している製造現場における人手不足に対応することが期待される。

表1 腸管型ポンプの適用例

カテゴリ	具体例
①具が大きい固液混合流体	いちごジャム、たまごこんにゃく、ごぼうの千切り
②液体成分が少ない固液混合流体	たまねぎのみじん切り、もずく、めかぶ
③超高粘度流体（数百 Pa・S）	チーズ、ジャム、トマトベース、味噌、ファンデーション
④しゅう動部に影響があるスラリ	土砂、コンクリート、汚泥
⑤危険物（火薬、引火性液体）	ロケット固体推進薬、アルコール、防爆エリアへの設置
⑥搬送と混練・攪拌が同時に必要	カーボンナノチューブ分散液

3.2.2 詰まりの予防・解消

つぎに、腸管型ポンプロボットを用いた配管に関する新たなイノベーションについて解説する。それは、配管の詰まり解消である。筆者らには、配管にまつわる課題として詰まりに関する悩みも多く寄せられている。たとえば、上述した油汚れによる詰まりの他に、製紙工場においては、パルプと水、珪藻土が混じった材料を搬送する際に、一部で配管詰まりを引き起こす場合がある。また、特に男性用トイレの排水管では尿石が、また空調のドレン排水管で

はそのぬめりが蓄積して詰まりを引き起こす。一度詰まりが発生するとその影響は大きく、原因か所の特定を行った後、フランジを外して配管をばらし、専用の治具を使って詰まりを解消することになるが、その多くは人手作業となっており、根本的な解決が求められている。

そこで蠕動運動型ミキシングポンプの出番である。図10は当該ポンプを用いた詰まり解消のイメージ図である。同図左側の丸印の領域は、配管経路の中でもよく詰まりが発生するか所を示している。同領域に着目し、当該ポンプを丸印領域の上流位置に設置する。詰まりが発生した場合には、当該ポンプが、蠕動運動による衝撃波を詰まりか所に対して一定時間与え続けることにより、詰まりを解除できる可能性がある。従来人手によって多くの時間をかけていた作業が、蠕動運動型ミキシングポンプの動作ボタンを押下するのみとなり、誰でも簡単に行える作業に転換することができる。さまざまな現場で配管の詰まりに悩んでいる状況があれば、ぜひ筆者らに相談いただきたい。

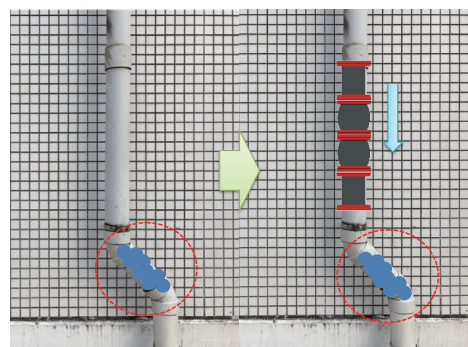


図10 腸管型ポンプロボットによる詰まり解消

4. 今後の事業展開について

以上述べたように、空気圧で動作する特殊な人工筋肉を利用することで、生物の動きや機能を規範としたソフトロボットを開発し、さまざまな社会課題を解決できる可能性があることを示した。以降では、

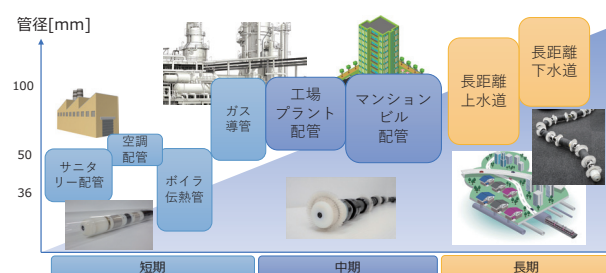


図11 ミミズ型管内走行ロボットのロードマップ

各デバイスの今後の展望について述べる。

図11に、ミミズ型管内走行ロボットのロードマップを示す。横軸は時間軸であり、縦軸は対応する管径を示している。現在の計画では、まずは短期において、比較的小型（管径が1.5インチ～50A程度）のロボットを、サニタリー配管点検や空調配管清掃、あるいはボイラ伝熱管やガス導管点検などに展開する。中期においては100A管まで大型化を図り、工場・プラントにおける各種配管の自動点検や、老朽化が進むマンション・ビル配管の点検・清掃に応用していく。さらに長期においては、より長距離走行が必要となるモデルを開発し、下水道圧送管や上水道に展開していくことをめざす。

また、蠕動運動型ミキシングポンプにおいても、表1に示したカテゴリの材料を取り扱う企業より相談を受け、現在共同研究やテスト搬送を多数実施している。同ポンプは、各社の製造現場に導入される設備となるため、まずはそれぞれの現場に適した仕様を確定し、該仕様に基づきデバイスを試作製造し、入念な試験に基づく導入判定テストを実施するといった中長期計画に基づいて、現場への実導入をめざしている。以上が、各デバイスの今後の展望である。

ソフトロボティクスという分野は新技術領域であり、該分野で今後日本が世界をリードしていくために、さまざまなオープンイノベーションを通じて新価値を創造してゆきたい。

※1 株式会社LIXIL（旧株式会社INAX）と中央大学との共同研究による特許技術に基づく

参考文献

- 1) W. A. A. Kunze and J. B. Furness: The enteric nervous system and regulation of intestinal motility, *Annual review of physiology*, Vol. 61, No. 1, p. 117-125 (1999)
- 2) 梅谷陽二, 伊能教夫: 蠕動運動の研究の現状—腸管モデルを中心にして—, *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 3, No. 1, p. 1-8 (1979)
- 3) H. Sugi: *Evolution of muscle motion*, The University of Tokyo Press, (1977)
- 4) J. B. Furness, C. Jones, K. Nurgali, N. Clerc: Intrinsic primary afferent neurons and nerve circuits within the intestine, *Prog. Neurobiol.*, Vol. 72, No. 2, p. 143-150 (2014)
- 5) Taro Nakamura and Hitomi Shinohara: Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 4361-4366 (2007)
- 6) 中村太郎, 伊藤文臣: ミミズの動きを規範とした蠕動運動型ロボットとその実用化—伸縮運動によるソフトロボット索状体—, *日本ロボット学会誌*, Vol. 40, No. 4, p. 38-43 (2022)
- 7) 中村太郎: やさしく混ぜながら運ぶ! 腸管構造を模した柔軟な蠕動運動型ポンプ (ソフトマターによるソフトロボット技術の社会実装への挑戦), *日本設計工学会誌*, Vol. 56, No. 9, p. 439-444 (2021)
- 8) K. Suzuki, T. Nakamura: Development of a peristaltic pump based on bowel peristalsis using for artificial rubber muscle, *Proc. 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, p. 3085-91 (2010)
- 9) 水道行政の最近の動向等について, 厚生労働省, 医薬・生活衛生局, 水道課 (2021)

(原稿受付: 2022年10月14日)

会 告

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

〈新企画〉

日本フルードパワーシステム学会 キャリア支援セミナー開催のお知らせ

2024年度卒業・修了予定の学生の皆さんを対象として、学生と賛助会員企業の若手技術者との交流を目的とした企業セミナーを月1回程度の頻度の下記の日程でリモート形式により開催します。

第1回: 2023年1月13日(金) 17:00～18:30

第2回: 2023年2月10日(金) 17:00～18:30

第3回: 2023年3月17日(金) 17:00～18:30
いずれの回も、3社程度の企業からの説明を予定しております。参加費用は無料です。詳しくは学会HP をご覧ください。

基盤強化委員会

解説

減圧駆動式ソフトグリッパの動作原理と応用例

著者紹介



はたの 波多野 いたる 至

ニッタ株式会社
〒518-0494 三重県名張市八幡1300-45
E-mail: it_hatano@nitta.co.jp

ニッタ・ムーア事業部技術部技術3課。2006年岡山大学大学院自然科学研究科分子生物科学専攻修了（修士）。同年ニッタ株式会社入社。現在はソフトロボティクス関連の開発・研究に従事。

1. はじめに

製造業の工程は多くの人手作業によって支えられているが、少子高齢化や働き方のニーズ変化によって人手不足が深刻化している。一方で、顧客要求の多様化が進み、顧客のこだわりを反映した市場要求になっていくと考えられる。このように製造業では広く大きく強くなる市場要求に対して必要な労働力が確保できないミスマッチした状況が顕在化してきている。人手不足の有効な対策のひとつとしてロボットを利用した工程の自動化に期待が寄せられている。近年は従来の慣例から脱却した新しいワークスタイルが模索されており、業務変革に向けたさまざまな取り組みが活発に進められている。さらに、新型コロナウイルスの影響によって、新しい働き方への取り組みはより一層加速され、その重要性を増している。このような状況を踏まえると、ロボットの活用を含めた自動化に取り組む意味は非常に大きいと言える。しかし、自動化にあたっての技術課題は非常に多いのが現状となっている。

ロボットでさまざまなワークを把持する技術は、工程自動化における大きな技術障壁のひとつに挙げられる。特に柔らかい、壊れやすい、バラバラと言った特性を有するワーク（e.g. 包装前の食品）を把持することの難易度は高いことが知られている。これまでもロボットの進化にあわせて、さまざまな吸着パッドや多指ハンドを用いた研究が報告されている。その中で、近年大きく認知され始めた「ソフトロボティクス」からは、さまざまな新しい把持技

術が提案されている¹⁾。この「ソフトロボティクス」と弊社コア技術であるゴム・樹脂の成形加工および評価技術、空圧製品の設計・評価技術の親和性の高さを活かして、食品に代表される把持が困難なワークを把持することを目的としたロボットハンドの開発に着手した。

開発にあたっては、食品現場の人手作業を想定した。食品現場での「バラバラ」「不定形」「こわれやすい」という特徴を有するワークに関するさまざまな人手作業を見学したところ、「つまむ」と「包む」という把持動作に大別できることがわかった。そこで、把持形態として「優しくつまむ」と「包むように持つ」ことを開発目標として設定した。2015年、粉体のJamming現象に着目した試作から開発に着手して、紆余曲折の後に粉体レス方式を用いたロボットハンドSOFTmatics™グリッパ（以下、粉体レスグリッパと呼称する）の製造販売を2019年に開始した（写真1）²⁾。本稿では、粉体レスグリッパの構成、動作原理、応用例、最後に導入事例を紹介する。



写真1 粉体レスグリッパ外観

2. 粉体レスグリッパの構成と動作原理

2.1 構成

粉体レスグリッパは、グリッパとインターフェースで構成される（図1）。インターフェースはロボット（設備）とグリッパを接続、分離する機能を

有している。インターフェースには、弊社カプラーの設計を流用している。ボールロック機構を用いたカプラーで油空圧の業界ですでにさまざまな使用実績を有している。手動でスリーブを動かすのみでカプラーとニップルを着脱可能であることから、ツールレスで簡単に洗浄や交換などの段替え作業を衛生的かつ効率的に実施できる。

グリッパは対象ワークを把持する機能を有しており、大別すると、把持部（グリッパボディ）、ケーシング（アセンブリボディ）で構成されており内部は空洞になっている。アセンブリボディはグリッパボディの保持、およびロボットとの接続を担っており、中央に後述する流路と接続される貫通穴を有する。ボディ材質は、軽可搬協調ロボットとの使用を想定して軽量のアルミ材を採用した。異物混入対策の観点からメッキ、表面処理はしていない。グリッパボディの材質には弾性、伸び、そして耐摩耗性を含めた機械的特性に優れた特殊な熱硬化性ウレタンエラストマーを採用しており、食品衛生法370号に適合している。色調は万が一の異物混入における視認性向上のために、一般的なニトリル手袋と同等の水色としている。グリッパボディは、掌部と掌部の周囲に設けられた複数の指部を有する一体成形品で、衛生管理の観点から液溜まりしにくく清掃しやすいように、角部を極力廃して曲面を設けた形状としている。指部は中実となっている。

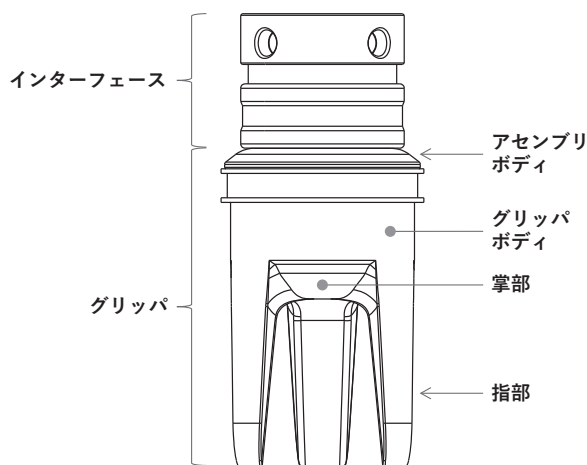


図1 粉体レスグリッパ構造概略図

2.2 動作原理

粉体レスグリッパは駆動源として真空系の空圧を使用する。グリッパの内部を減圧するとアセンブリボディに設けられた貫通穴に吸い込まれるように掌部が厚さ方向へ変形する。掌部が厚さ方向へ変形するに伴い、指部が掌部の中心へ引っ張られてワークを把持する方向に弾性変形する。この時に、アセ

ンブリボディがグリッパボディの形状保持とあわせて、指部が倒れるための支点として働く。この支点が存在することで、掌部は圧力に依存して連続的に変形することができる。（図2）。すなわち、グリッパ内の圧力が低くなるほど指の変形量は大きくなる（倒れる）ので、ワークを強い力で把持することができる。また、グリッパ内を減圧する速さ、すなわち真空エジェクタや真空ポンプの吸い込み流量が大きくなるほど指の動きは速くなる。このように、グリッパ内の圧力を制御することで指部を直感的に操作して、食品を含めたさまざまなワークを把持することができる⁴⁾⁵⁾。

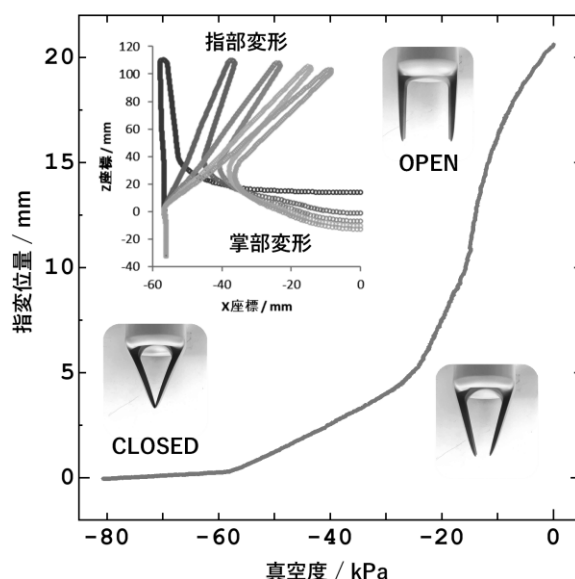


図2 グリッパの真空度に対する指部と掌部の変形量の相関³⁾

2.3 配管例

代表的な真空源の1つとして真空エジェクタが挙げられる。真空エジェクタは、圧縮空気を利用して負圧を発生させる装置で、流入、排出および吸引ポートを有している。流入ポートからノズル、ディフューザを介して排出ポートに接続されており、吸引ポートはノズルの出口に接続されている。

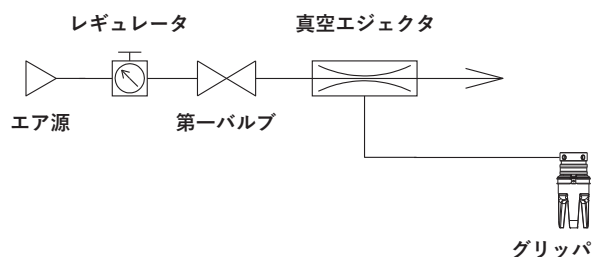


図3 標準配管図

図3に示した配管例では、流入ポートにチューブの一端が接続され、他端はエア源に接続されており、

さらに他端側にはレギュレータ、第一バルブ（e.g. 2ポート電磁弁）が設けられている。レギュレータで圧力が調整された空気は、第一バルブが開いている時に流入ポートへ送り込まれる。排出ポートは大気に開放されている。吸引ポートにはチューブの一端が接続されており、他端はインターフェースに接続されている。流入ポートに送り込まれた空気は、ノズルによって流れが加速されて高速噴流となってディフューザに流入し、排気ポートから大気へ放出される。高速噴流によってノズルの出口空間の空気の圧力が低下する（真空が発生する）ので、グリッパ内の圧力は減圧される（この時、グリッパは密閉されているので、グリッパ内部の圧力がノズル出口の圧力と等しくなったら空気の流れはなくなる）。

流入ポートへ送り込まれた空気の圧力が高いほどノズルから空気が速く放出されるようになり、吸引ポートの圧力は低くなる。真空エジェクタに供給される空気の圧力をあらかじめレギュレータで調節しておいた状態で第一バルブを開けば、真空エジェクタによってグリッパ内が設定圧力まで減圧されて、グリッパの指が圧力に対応して倒れる。すなわち、第一バルブの開閉の制御がグリッパの開閉の制御に対応する。

この時、グリッパ内の圧力をプログラムなどで都度制御することができれば、掌部に対する指の開き具合を制御することができるので、グリッパの用途はより広がり、使い勝手が増すであろう。グリッパ内の圧力を制御する方法のひとつとして、レギュレータの代わりに比例制御弁を利用する方法が挙げられるが⁶⁾、ここでは比例制御弁を用いずに圧力を簡便に制御する方法例を紹介する。

図4に簡易指制御向けの配管図を示す。図3との違いは、吸引ポートとグリッパの間に設けられた第二バルブ（e.g. 2ポート電磁弁）の有無であり、第二バルブを閉じることでグリッパ内はエジェクタからの流路を遮断して密閉状態にすることができる。第一バルブを開くと指部は設定した圧力になるまで掌が凹み倒れていく。この途中で第二バルブを閉じることでグリッパ内が密閉されて圧力が一定に維持されるので、指部の動きは止まる。反対に、指が閉じた状態から第一バルブを閉じると、排出ポートから流入した空気によってグリッパ内が加圧され、それに伴い指が開く。この途中で第二バルブを閉めることでも同様に指の動きを止めることができる。このようにして、第二バルブの開閉を加えることで指部の開き具合を簡単に制御することが可能となる。

また、第二バルブには、電磁弁の代わりに逆止弁を利用することもできる。この場合、第一バルブの

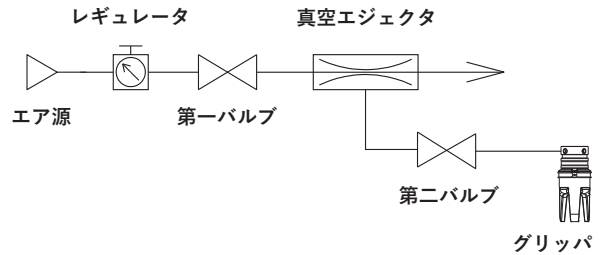


図4 簡易指制御向け配管図

開閉のタイミングに合わせて逆止弁が作動して指の動作を停止させることができる。ただし、指を開くために大気開放の流路とバルブを設けて操作する必要があることに注意されたい。

3. 粉体レスグリッパの導入事例

これまでの導入実績例として包装机へ直掴みした食品ワークを投入する工程が挙げられる。ここでは、福田屋製菓（本社静岡県沼津市）の直径約35 mmのバームクーヘンを包装机へ投入する工程に対して粉体レスグリッパを導入した事例を紹介させていただきたいと思う。

福田屋製菓のカットしたバームクーヘンにクリームを注入し包装机に投入する工程においては、エアシリンダで稼働する金属製の3爪チャックを用いたスカロボットがすでに稼働していた。バームクーヘンは繰り返し焼くという製造過程であることから、直径のバラツキを避けることが難しい。エアシリンダを利用したチャック方式では動作ストロークが厳密に決まることから、ワークサイズのバラツキに追従できない場合があった。その場合、把持できなかったワークによって製造ラインが停止してしまうという問題があった。この問題対策のためにチャックを粉体レスグリッパに差替えた（写真2）。粉体レスグリッパへの差替え後のワーク把持率は100%で製造ライン停止の問題を解決することができた。



写真2 バームクーヘンの把持状況

ワークのサイズと取り出し位置のバラツキの両者に対してグリッパの吸収代が大きいという点はセットアップにあたっての負担を大きく減らすことへの貢献が期待される。

4. おわりに

ソフトロボティクスを利用したさまざまな把持技術によって、これまで把持することが困難とされてきたワークを把持できる可能性が見出されている。ゴムや樹脂の特有の材料特性や機械的構造の組み合わせによってさまざまな特徴を発現できる点はソフトロボティクスの大きな魅力のひとつと言えるだろう。剛体には持ち合わせていない“曖昧さ”を逆手にとって利用できる点も見逃せない。

本稿では「バラバラ」「不定形」「こわれやすい」という特徴を有するワークを「優しくつまむ」または「包むように持つ」ことを目的として開発した減圧駆動式粉体レスグリッパを紹介した。製造工程の

自動化に向けては、まだまだ多くの課題が残されている。その課題解決のためにグリッパ自身の改良はもちろん、さまざまなソフトロボティクスとのコラボレーションも含めて、ロボット、周辺機器そしてシステム全体との連携をさらに活発化していくことが重要だと考える。

参考文献

- 1) 鈴森康一：新学術領域研究「ソフトロボット学」，日本ロボット学会誌，Vol. 37，No. 1，p. 53-56（2019）
- 2) 波多野至：食品ハンドリング向けロボットの開発，Fooma技術ジャーナル，Vol. 13，No. 1，p. 15-20（2018）
- 3) 波多野至：ロボットハンド「SOFTmatics」の原理と特徴，活用事例，Vol. 66，No. 3，p. 54-57（2022）
- 4) <https://youtu.be/Ch-9eA3scvM>（動作原理）
- 5) <https://youtu.be/H6jACZDgigE>（圧力設定）
- 6) 波多野至：食品把持向け空圧駆動樹脂製ソフトグリッパの原理と応用，月刊ソフトマター，No. 34，p. 13-15（2021）

（原稿受付：2022年10月3日）

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 (12月10日現在)	829	8	116	127
差引き増減	+3	±0	+1	±0

正会員の内訳 名誉員16名・シニア員68名・ジュニア員80名・その他正会員665名

〈新入会員〉

正会員

山田 裕樹（東北特殊鋼株式会社）
森口 肇（職業能力開発総合大学校）

森岡 侃純（株式会社クボタ）

学生会員

Lim Wen Chiang（徳島大学）

2022年度ウィンターセミナー 「機械学習の基礎とフルードパワーシステムへの応用」

機械学習に関する技術は近年ますます重要な役割を担っており、今後も多くの分野での活用が期待されています。

本セミナーでは、フルードパワーシステムへの機械学習の導入を検討している方、あるいはこれから学びたいと考えている方を対象に、機械学習の基本的な仕組みと、実際にフルードパ

ワーシステムへ適用した事例について講師の方々にご紹介いただきます。本セミナーはオンラインでの開催を予定しております（※会場での開催はございません）。日程、内容などの詳細につきましては学会ホームページに随時掲載いたします。皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております。

解説

物体操作を学習するロボットアームの 空気圧腱駆動可変剛性手首

著者紹介

た な か か ず と し
田 中 一 敏オムロン サイニックス株式会社
〒113-0033 東京都文京区本郷 5-24-5
E-mail: kazutoshi.tanaka@sinicx.com

2017年東京大学情報理工学系研究科博士課程修了。2017年から2019年まで同大学研究員。2019年からオムロン サイニックス エックス 株式会社でシニアリサーチャー。ソフトロボットの設計と制御学習の研究に従事。日本ロボット学会、日本機械学会会員。博士（情報理工学）。

1. はじめに

物体操作を学習するロボットアームの空気圧腱駆動可変剛性手首について解説する。まず、研究の社会的、学術的背景について述べる。つぎに、手首の設計指針を紹介する。それから、手首の実装について説明する。そして、手首を使った物体操作学習の研究事例を紹介する。最後に、今後の展望を述べる。技術的な詳細は原著論文¹⁾を、背景の詳細は技術報告²⁾を参照されたい。

2. 背景

2.1 部品組立ロボットへの社会需要

産業革命以降、大量の製品を効率よく製造するため、工場では機械が使われてきた。製造では、製造する製品の変更や製造過程の変更が生じる。製造にロボットを用いれば、これらの変更に対して、製造ラインに機械的な変更を加えることなくソフトウェアの変更のみで対応できるためコストを抑えられる。このため、ロボットは製品の製造に使われてきた。現在でも、技術者がロボットの動作を作成し、ロボットは動作を反復して、人間の代わりに工場で製造作業を行っている。

かつて、消費者は同じ製品を同じように欲していた。20世紀の後半から、消費者の価値観は多様になり、さまざまな消費者が異なる製品を欲するようになった。その結果、製品の製造には、同種大量生産だけでなく変種変量生産が求められるようになった。

た。同一の製品を大量に生産するのではなく、さまざまな製品を製造する工場では、より小さい労力で動作を変更できるロボットが求められる。

いまだ、製品の製造には、人間の行う作業が数多く残っている。人手で行う作業は、現在の技術ではロボットに代替させるコストに見合わないため、人間が行っている。もしもロボットが、人間の作業員のように簡単な指示で作業を理解できたなら、あるいは技術者がロボットの動作を作成することなしに、ロボット自身が動作を自ら生み出せたなら、ロボットを使うコストが下がり、現在人間が行っている手作業をロボットが代わるようになり、より生産効率を高められる。

以上のように、より簡単に使える、自ら動作を生み出すロボットが求められている。

2.2 変種変量生産のためのロボット技術

変種変量生産を求める産業界の需要を受け、知能ロボットの研究者は、簡単にロボットの動作を作る方法や、ロボットが人間の作業を見てまねる方法を探求してきた。人間のようにセル生産するロボットを作ることも試みられた。

ロボットが新しい作業を自動で獲得する方法として、強化学習などの機械学習が用いられてきた。近年、画像や音声の認識、自然言語処理の技術が向上した。ロボットも、機械学習を用いた物体操作技術の向上が期待されている。

2.3 物理的柔軟さを活用したロボット部品組立

ソフトロボットと呼ばれる、身体の柔らかさを活かして作業を行うロボットの研究が加速している。工場では、柔軟なグリップがピックアップ作業に使われ始めている。ソフトロボットは柔らかさで衝突の衝撃や接触の負荷を軽減できるため、運動学習への貢献が期待されている。

柔軟機構の代表例に手首がある。Remote Center Complianceと呼ばれる柔軟手首が1977年に開発され、この技術を引き継ぐ手首は現在でも実用されている。柔軟手首は、手首に搭載した柔軟部品の変形によって、操作物体の位置ズレを補償する。

以上のように、簡単に使えるロボットの実現に機

械学習が貢献すること、および機械学習にソフトロボットが貢献することが期待されており、柔軟機構の代表例に手首がある。それゆえ私たちの研究グループは、物体操作を学習するロボットアームの柔軟手首を開発した。

3. 設計指針

従来の柔軟手首は構造化された環境で、人間が想定し、設計した運動を行っていた。すなわち、操作対象物体と作業内容を想定し、ロボットの動作を設計して、ロボットと物体が当たらない開かれた場所を用意していた。このため、どのような原因で誤差が生じ、操作対象物体の位置や方向のどの成分に、どの程度の誤差が生じるかも想定できた。ロボットシステムの設計者は、想定された誤差を補償するのに十分な、柔軟手首が変位する自由度や、変位の大きさを計算できた。設計者は、計算に合う手首を決めてロボットに取り付けて使っていた。

対して、本研究では、ロボットが作業に合う動作を自ら獲得する。ロボットが作業を学習する時、ロボットの身体で実行できる運動をロボットが発見して獲得する。ロボットは手首の限られた変位と弾性を最大限に活用して、物体の位置や方向を操作する。どのような運動が獲得されるか、学習においてどのような運動が試されるかは、学習するまでわからない。これは、手首をつけたロボットアームが行う動作と作業を、設計時には想定できないことを意味する。すなわち、本研究の手首の設計では、事前にロボットの運動、作業、対象物体を想定できない。

想定の問題に関連して、ロボットが作業する空間が狭い場合もある。たとえば、部品を組み上げる時には、作業対象物体の周りに他の部品が多く存在する。周りに部品がある時、対象物体ではない他の部品に手首がぶつからない、干渉しないように、できるだけ手首の占める容積は小さいことが望しい。

さらに、できるだけ多くの方向に大きく変位するように、関節の数を増やし、大きくしてしまうと、機構が複雑化してしまい、容積が増えるだけでなく、重量が増え、製造や管理コストも増加してしまう。手首の重量が増加すれば、アームの可搬重量は限られているため、手首の重量分、ロボットが運べる物体の重量が減ってしまう。このため、手首の機構は単純で、小型、軽量であるのが望ましい。

他にも、柔軟な手首は、アームの運動時に振動してしまう。この振動によって、グリッパが揺れ、指が滑り、運んでいる物体を落とす恐れがある。それゆえ、移動中の振動を抑える、固定状態になる機能が必要である。加えて、固定状態からもっとも剛性

が低い状態まで、連続的に剛性を変化できれば、作業に応じて剛性を調整できる。

以上のように、物体操作を学習するロボットの柔軟手首として、アームに後付けで取り付けられ、軽量小型で、単純な機構と、固定を含む可変剛性機構を備えた手首を開発した。

4. 実装と評価

開発した手首の外観と構成を図1に示す。手首は、重量0.5kg、長さ60mm、直径75mmである。協働ロボットアーム（UR5, Universal Robot）に取り付けて使用した。

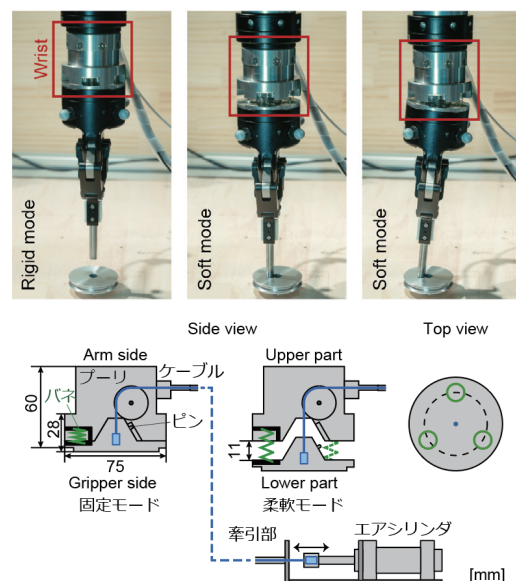


図1 手首の外観と構成

手首は小型で、単純な機構を備える。腱駆動機構を採用した。腱駆動機構によって、手首からアクチュエータを取り除き、手首の外から駆動することで、最大限に機構を単純化し、小型軽量化した。ケーブルが引かれると、内部のピンと部品がはめあい、固定される。ケーブルが緩むと、バネが押し出し、解放され、柔軟になる。解放時、グリッパの把持する物体とそれに接する物体との間に生まれる接触力によってバネが押され、6自由度方向に変位する。

変位を生む柔軟部品にゴムや樹脂を用いれば、金属よりも軽量にできる。しかし、代わりに疲労が早くなってしまう。繰り返し寿命を伸ばすため、ステンレス製のバネを用いた。

プリーによって、ケーブルの牽引方向を変化させる。プリーの半径は小さいほど、容積が小さくなるが、疲労が増すことに留意して設計した。ケーブルはボデーケーブルであり、アウターチューブの中をインナーケーブルが通る。アウターチューブを通過した

ケーブルは、ベースにあるけん引部でけん引される。

けん引部では、ロボットアームのコントローラから電圧で指令を5ポートバルブ(SY5240-5LOZE-02, SMC)に送り、エアシリンダ(CM2B40-100Z, SMC)の圧力を制御した。コンプレッサ(ACP-39SLA, Takagi)で0.8MPaの圧縮空気を生成し、レギュレータで0.2MPaに降圧して利用した。給気のチューブは内径6mmである。

空気圧制御には、細かい位置制御をせずとも、最大けん引し、過剰な変位は空気の弾性が吸収する利点がある。アームの最大可搬重量と手首の使うバネのバネ定数から、ケーブルの最大荷重を計算し、最大荷重とケーブルの移動量から、エアシリンダの直径とストローク、使用圧力を決定した。

手首にはセンサは載っておらず、光学式モーションキャプチャカメラ(Flex 13, OptiTrack)を用いてグリッパの姿勢を計測した。手首の内部、上部と下部の間にカメラや近接覚センサを搭載すれば、内部からグリッパの姿勢を推定できる。

本研究では、5ポートバルブを用いてオンオフで空気圧を制御したため、手首は固定と解放の2状態であった。エアシリンダを最大限にけん引する固定モードになる圧力以下の圧力を連続的に制御して与えれば、連続的に手首の剛性を制御できる。

5. 物体操作学習の応用例

手首の柔軟性を活かした制御学習を紹介する。より詳細な解説は解説記事³⁾を参照されたい。

柔軟な手首は位置ズレに対して過剰な力が生じるのを防ぐため、失敗の試行を安全に行いやすい。この特性を利用して、教示に失敗と成功の両方を含み、失敗と成功の両方から作業を学ぶ挿入作業の教示学習手法を提案した⁴⁾。

柔軟な手首は、人間とロボットとの安全な接触を可能にする。この特性を利用して、学習の前半にお

いてロボットの作業を人間がグリッパを押して助け、後半で作業を学んだロボットを人間が邪魔することで、計測誤差やモデル化誤差に対して頑健な挿入作業の制御則を獲得する手法を開発した⁵⁾。

6. 今後の展望

物体操作の学習を助けるロボットの柔軟な身体は、手首だけではない。アームの全体に柔軟性を有し、積極的な試行を行って学習できる設計を探究する。ほかに、さまざまな指令を受けてさまざまな運動を行える、柔らかさと硬さを備えたグリッパの設計を探究する。同時に、柔軟手首を駆使した作業の学習手法を部品挿入作業などの部品組立作業に対して発展させるとともに、他の作業へと展開する予定である。

参考文献

- 1) Tanaka, K., Drigalski, F., Hamaya, M., Lee, R., Nakashima, C., Shibata, Y., Ijiri, Y.: A Compact, Cable-driven, Activatable Soft Wrist with Six Degrees of Freedom for Assembly Tasks, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 8752-8757 (2020)
- 2) 田中一敏：人のようにしなやかなロボット：ソフトロボット, OMRON Technics：オムロングループ技術論文誌, Vol. 53, No. 2, p. 164-169 (2021)
- 3) 濱屋政志：ヒトの教示やインタラクションを活用したロボット学習, OMRON Technics：オムロングループ技術論文誌, Vol. 53, No. 2, p. 217-223 (2021)
- 4) Hamaya, M., Tanaka, K., Shibata, Y., Drigalski, F., Lee, R., Nakashima, C., Ijiri, Y.: Learning soft robotic assembly strategies from successful and failed demonstrations, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 8309-8315 (2020)
- 5) Hamaya, M., Tanaka, K., Shibata, Y., Drigalski, F., Nakashima, C., Ijiri, Y.: Robotic learning from advisory and adversarial interactions using a soft wrist, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 6, No. 2, p. 3878-3885 (2021)

(原稿受付：2022年10月5日)

解説

質量・体積可変な水駆動ソフトロボットのロコモーション

著者紹介

た く ま た か し
田 熊 隆 史大阪工業大学
〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1
E-mail: takashi.takuma@oit.ac.jp

2005年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。同大学特任研究員を経て2008年大阪工業大学講師、同大学准教授を経て2021年同大学教授。現在に至る。流体駆動ソフトアクチュエータ、脚ロボットの研究に従事。ロボット学会他会員、IEEEメンバー。

1. はじめに

近年、アクチュエータやフレームが柔軟なソフトロボットに注目が集まっている。関節や機体そのものに柔らかさを持たせることで、従来の「固い」要素で構成されるロボットでは困難であった、衝突により発生する衝撃の吸収や、狭いか所に自在に潜り込むことが可能となった。筆者はこれまでマッキベン型空気圧アクチュエータを用いてロボットの歩行¹⁾²⁾や跳躍³⁾⁴⁾に取り組んできたが、現在、伸縮性のある風船状のチャンバに水を注入させることで、体積だけでなく質量も自在に操作できるソフトロボットを開発している⁵⁾。ロボットが運動を生成するにあたり、体積と質量は重要な要素となる。ロボットの移動（ロコモーション）においてはロボットに質量を持たせることで重力により路面に力を加え、体積を変えることで路面との接触面積を変化させる。これにより、路面と接触したか所に摩擦を発生させることができ、滑らずに移動が可能となる。本解説では試作した水駆動ロボットが適切なタイミングで適切なか所に摩擦が発生するよう体積と質量を変化させてロコモーションを行う方法について説明する。またこのような柔らかいロボットに適したセンサについて紹介する。

2. 水駆動ソフトロボット

図1に試作した水駆動ロボット、図2にその構成を示す。ロボットは2つの風船（チャンバ）で構成されており、一方はゴム製、もう一方はセンサを埋

め込んだシリコン製のチャンバである。2つのチャンバは体幹と呼ぶパーツでつながれている。本稿ではゴム製のチャンバを後肢、シリコン製のチャンバを前肢と呼ぶことにする。

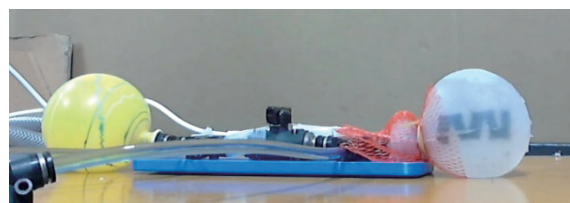


図1 試作した水駆動ロボット

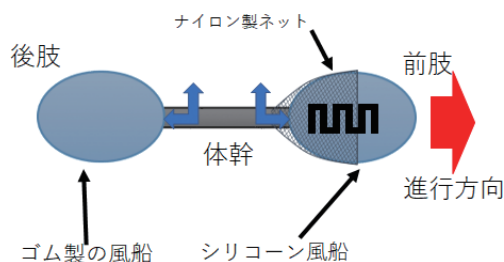


図2 ロボットの構成

図3に各チャンバに給排水するための配管を示す。図中ポンプIで水をくみ上げ、弁A（後肢に接続）もしくはB（前肢に接続）を開けることで接続されたチャンバに給水される。このときチャンバは膨張し、体積と質量が増加する。排水時も同様に弁A、Bを開けて排水用のポンプIIを駆動することで、チャンバから水がなくなり体積と質量が減少する。なお排水用のポンプ近くにある弁Cは、給水時は閉じてポンプIIからタンクに水が逆流するのを防止するものである。

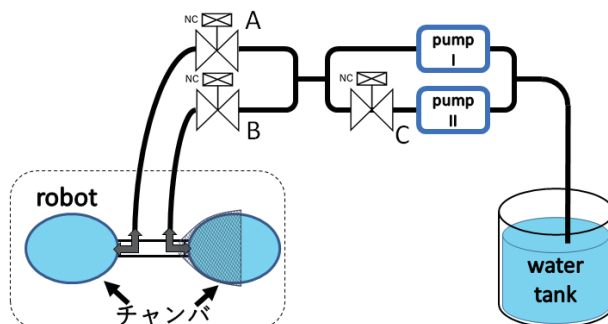


図3 給排水のための配管

図4左に前肢の構成を示す。前肢は3Dプリンタで作成した型にシリコンを流し込んで作成する。図のようにシリコンは2層の構造となっており、2つの層の間に導電性を有する布をセンサとして埋め込んでいる。完成したものを図4右に示す。

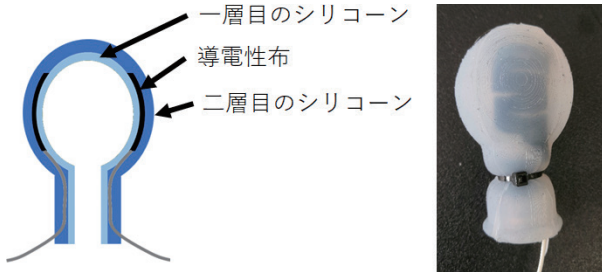


図4 前肢の構成

3. ソフトロボットによるロコモーション

3.1 局所的な体積と質量変化によるロコモーション

ロコモーションのためにロボットの前肢・後肢に給排水の様子を図5に示す。ロコモーションは前肢後肢に水がない状態（図中1）から後肢に給水（同2）、前肢に給水（同3）、後肢から排水（同4）、前肢から排水（同1）の4状態を経て1周期となる。それぞれの給排水による体積と質量変化の効果について説明する。

状態1→2：後肢に給水することでチャンバの体積が増加して路面と接触する。前肢は給水されていないため質量はゼロであり、前肢と路面の間は摩擦が発生しない。一方で後肢は体積膨張にあわせて質量も増加し、路面との接触か所に摩擦が発生する。その結果、膨張した分ロボットは前方に移動する。

状態2→3：前肢に給水し、前肢を膨張させる。このとき後肢は体積と質量を有するため摩擦が発生し、前肢膨張による後方に下がる力を打ち消す。ただし前肢膨張による力は大きいため、少し後方に下がってしまう。そこで前肢にはチャンバの周りにナイロンのネットを取り付け、ネット内でチャンバが膨張するようにした。これにより膨張時チャンバは路面と接触しないため、後方への力が発生しない。一方で膨張により前肢も質量が発生するため、前肢のナイロンネットと路面の間には摩擦が発生する。

状態3→4：後肢から排水する。後肢の収縮に伴い、後方への力が発生する。しかし前肢と路面間に摩擦が発生しているため、後方に下がる力が打ち消され、ロボットはその場にとどまる。

状態4→1：前肢から排水する。前肢は収縮し、

前方への力が発生する。後肢は排水され摩擦が発生しないため、ロボットは前方に移動する。このように前肢後肢に適切なタイミングで局所的に体積と質量を変化させることで、路面接触と摩擦の有無を切り替えながらロボットは前方に移動する。

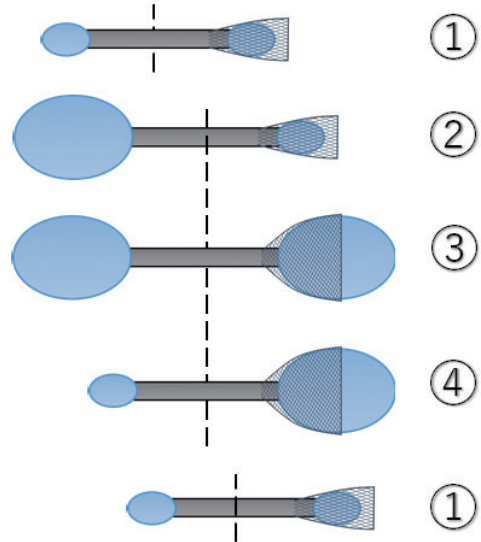


図5 ロコモーションのための給排水手順

3.2 チャンバ変形による狭所くぐり抜け

先に述べたロコモーションの手順により、ロボットは狭所への潜り込みも可能となる。前肢を排水して体積を小さくし（図5の1の状態）、後肢を給水することで前肢を狭所に差し込む（同図2の状態）。この後前肢に給水すると前肢は膨張して狭所の天井に接触するが、チャンバは柔軟性を有するため天井および路面の形状に応じて変形する。狭所侵入の様子を図6に示す。侵入後も先の給排水の手順で狭所内を移動し、くぐり抜けることが可能である。

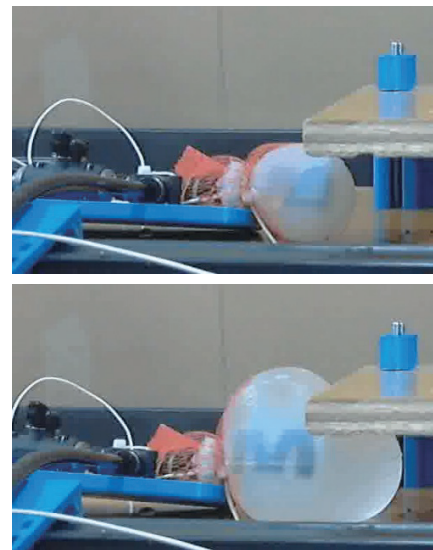


図6 狭所への侵入

3.3 柔軟なセンサによるセンシング

ソフトロボットの課題のひとつは、ロボットの変形を妨げない柔軟なセンサの開発である。筆者は現在、導電性布（株式会社三機コンシス製）をセンサとして用い、ロボットの状態を測定している。この導電性布は表面に銀を織り込んだ布であり、柔軟性を有する。ただし伸縮性はほぼ無いため、布に切り込みを入れる。また布自身はほつれやすいため、補強用の布を貼り付ける。図7にセンサの構成と布への切り込み、実際のセンサの写真を示す。センサは進展するとその静電容量が大きくなる。ロボットに埋め込まれたセンサはチャンバが膨張すると伸展するため、静電容量が大きくなる。この静電容量をPIC（16F1847）で測定する。PICでは静電容量そのものではなく、一定時間内に繰り返す充放電回数を記録する。静電容量が大きいと充放電に時間がかかるため、充放電回数は少なくなる。

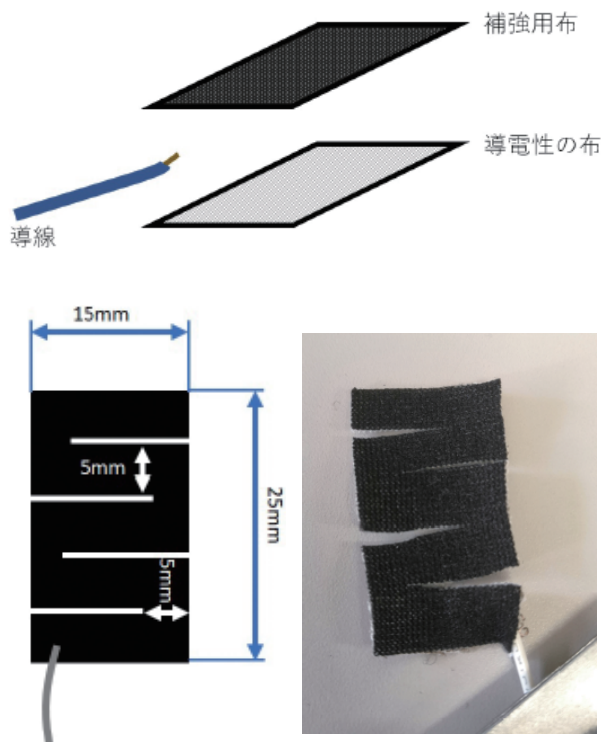


図7 導電性を有する布によるセンサ

このセンサを埋め込んだチャンバを図8のようにさまざまな高さ（30mm～60mm）の狭所の中に置き、給水した際の静電容量の変化（充放電回数の変化）を記録した。その結果を図9に示す。この実験ではロボットは移動せず、チャンバに給水のみ行ったことに注意されたい。図のように幅が狭い30mmのときに静電容量は大きく変化していることが分かる。これは狭いところでチャンバが膨張すると、チャンバが大きく変形してセンサがより伸展されるためである。

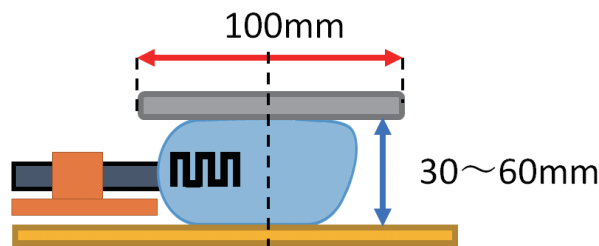


図8 実験設定

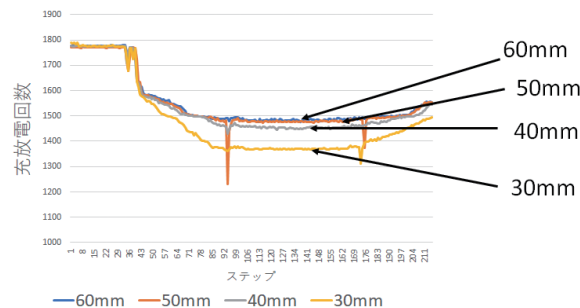


図9 高さの異なる隙間で給水した際のセンサ値の変化

本研究で扱うセンサを埋め込んだロボットが100mmの隙間を移動したときのセンサの変化（一定時間中の充放電回数、すなわち導電性布の静電容量は1サイクル中のチャンバ膨張・縮小に合わせて変化する。図中小さい値のときは、前肢のチャンバが膨張してセンサが伸展している（静電容量が増加している）状態を表している。図中点線の枠囲みのレンジは、給水中の前肢チャンバが床と天井に挟まれ大きく膨張しているときのものである。

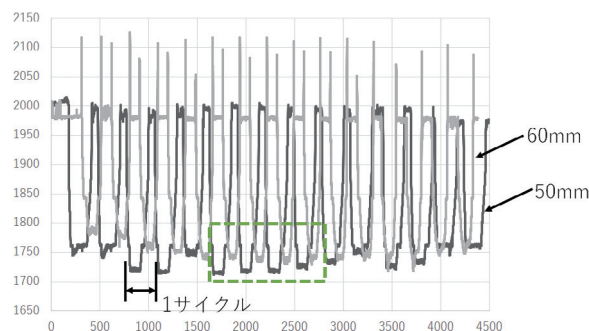


図10 隙間を移動するロボットのチャンバのセンサ値

図10の点線枠囲み部分を拡大したものが図11である。図のように、高さ50mmの隙間のほうが高さ60mmよりも充放電回数が少なくなっている。すなわち、高さ50mmのときはチャンバ膨張時に大きく押しつぶされて導電性布が伸展して静電容量が大きくなっていることがわかる。このことから、静電容量の変化を毎サイクルつなぎ合わせることで、ロボットがこういった形状の隙間を移動していったかが「スキャン」することが可能である。ただしこの

方法ではロボットの滑りなどによる各サイクルでの移動距離が正確に把握できず、各サイクルでのロボットの形状を単純につなぎ合わせても歪んだスキニングとなる。今後、ソフトロボットの「目」に相当するセンサが開発され、正確に移動距離を推定することで、接触により得られる隙間の形状を移動距離に応じてつなぎ合わせることで正確な隙間の「地図」が作成できることが期待できる。

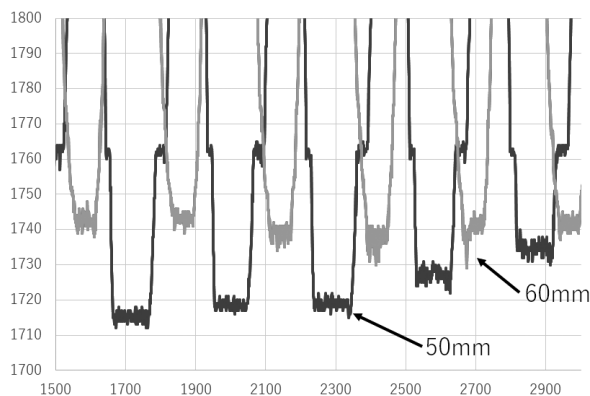


図11 図10の点線部拡大

4. おわりに

本解説では、著者が近年取り組んでいる水駆動ソフトロボットを説明した。水駆動ロボットは体積だけでなく質量を局所的に変化することによって、摩擦が発生するか所を意図的に操作したロコモーションが可能である。また解説の後半では、ソフトロボットの大きな課題であるセンシングについて説明した。

ソフトロボットは自身の持つ柔軟性をいかして、本解説で扱うような隙間への潜り込みだけでなく、跳躍や走行といった大きな衝撃が発生する運動での衝撃吸収など、現在の「固い」ロボットでは実現が難しいタスクを実現できる可能性がある。ソフトロボットは2000年頃に立ち上がった比較的新しい分野で、移動⁶⁾⁷⁾だけでなく物体の把持⁸⁾⁹⁾など、現在はロボットが持つ「ポテンシャル」を示している段階と筆者は考えている。今後ソフトロボットの運動理解の段階になればダイナミクスを扱うことになり、また実用化に向けては再現性のある安定した運動の実現が求められる。ダイナミクスを扱うためには質量や体積の概念が必要となり、ロボットを安定して駆動させるにはセンシングの技術が必要となる。前者については質量や体積が可変な流体の特性を活かすことで、これまでのロボットでは「定数」としてい

た質量や体積も操作可能なパラメータのひとつにすることができる。後者についてはマテリアルの分野と密接に関わる課題で、測定対象に適した材料を選定する必要がある。流体駆動のソフトロボットはこれまでのロボットと一線を画するものであり、今後もこのロボットならではの課題に取り組んでいきたい。

謝辞

本研究はJST, CREST, JPMJCR18A1, JSPS19H04193の支援を受けた。

参考文献

- 1) K. Hosoda, T. Takuma, A. Nakamoto, S. Hayashi, "Biped Robot Design Powered by Antagonistic Pneumatic Actuators for Multi-Modal Locomotion", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 56, No. 1, pp. 46-53 (2008)
- 2) R. Onishi, R. Kitamura, T. Takuma and W. Kase, "Effect of Arm Swinging and Trunk Twisting on Bipedal Locomotion", *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 799-804 (2019)
- 3) K. Hosoda, Y. Sakaguchi, H. Takayama and T. Takuma, "Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure", *Autonomous Robots*, Vol. 28, No. 3, pp. 307-316 (2010)
- 4) S. Omae, T. Takuma, and W. Kase, "Arrangement of biarticular muscles for robust landing of single-legged robot driven by antagonistic pneumatic actuators", *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2063-2068 (2018)
- 5) T. Takuma, K. Haruno, K. Yamada, H. Sumioka, T. Minato and M. Shiomi, "Stretchable Multi-modal Sensor using Capacitive Cloth for Soft Mobile Robot Passing through Gap", *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, ID : 231 (2021)
- 6) M. Calisti, G. Picardi and C. Laschi, "Fundamentals of soft robot locomotion", *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 14 Issue 130 (2017)
- 7) K. Isaka, K. Tsumura, T. Watanabe, W. Toyama, M. Sugawara, Y. Yamada, H. Yoshida and T. Nakamura, "Development of Underwater Drilling Robot based on Earthworm Locomotion," *IEEE Access* (2019)
- 8) Y. Wang and Q. Xu, "Design of a New Soft Robot Hand for Grasping and Sorting Operation", *2020 10th Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 163-168 (2020)
- 9) C. Choi, W. Schwarting, J. DelPreto and D. Rus, "Learning Object Grasping for Soft Robot Hands," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 2370-2377 (2018)

(原稿受付：2022年10月3日)

ソフトロボットのアクチュエーションとセンシング (電界共役流体と光導波路の導入)

著者紹介



たけ むら けん じ ろ う
竹 村 研治郎

慶應義塾大学

〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1

E-mail: takemura@mech.keio.ac.jp

2002年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。同大学助手(有期)、東京工業大学助手、助教を経て、2008年慶應義塾大学理工学部専任講師、現在教授。機能性流体、ソフトロボティクスなどの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士(工学)。

1. はじめに

ソフトロボディクスは柔軟な構造、しなやかな動き、柔軟な知能を持ったロボットシステムを研究対象としているが、構造的な柔軟性に関する設計論が、大きな研究トピックであることに疑う余地はない。特に、柔軟な構造でいかにアクチュエーションとセンシングを実現するかは大きな課題である。

従来のロボットの設計論では、アクチュエータやセンサといった機能要素として、電磁モータやエンコーダが一般に用いられ、高精度、高剛性に動作を繰り返すシステムが良いとされてきた。ソフトロボットはこれと対局にある概念であり、構造と機能要素が一体となった柔軟構造の実現が求められる。

本稿では、ソフトロボットの機能要素の設計に焦点を当て、電界共役流体を用いたアクチュエーションと光導波路を用いたセンシングを紹介する。

2. フレキシブルアクチュエータ

2.1 ソフトロボットハンドの駆動

柔軟な構造を持つソフトロボットを構成する場合、高分子フィルムやゴムのような屈曲性あるいは収縮性に優れた材料が使われる場合が多い。たとえば、ソフトロボットハンドを構成する場合を考えると、シリコンゴムなどを成形して柔らかいハンドを製作できる。課題はどう動かすか?である。関節にピンジョイントを配してモータ駆動しては、柔軟性の特徴が半減されてしまう。誘電エラストマーアクチュエータのような柔軟なアクチュエータの導入も

ソフトロボットの駆動に有効と考えられるが、フルードパワーを用いたアクチュエーションはソフトロボットに親和性が高いといえる。なかでも、筆者らは電圧の印加で活発に流動する電界共役流体を用いたソフトロボットハンド¹⁾⁻³⁾を提案している。

図1は電界共役流体の流動を用いて駆動される7自由度のソフトロボットハンド¹⁾である。手掌部がタンクであり、各指は繊維強化された湾曲アクチュエータとして構成され、手掌内部には揺動アクチュエータが配置されている。各アクチュエータを電界共役流体に発生する流動により圧力駆動するために、各アクチュエータに対応した電極対が配置され、ポンプとして動作する。すなわち、このソフトロボットハンドは液圧駆動ハンドであるにもかかわらず、タンク、ポンプ、アクチュエータを内蔵して構成されている。また、手掌部の内外転運動の2自由度を実現したことにより、5指5自由度との組み合わせで多くの把持姿勢を達成できることを示した。

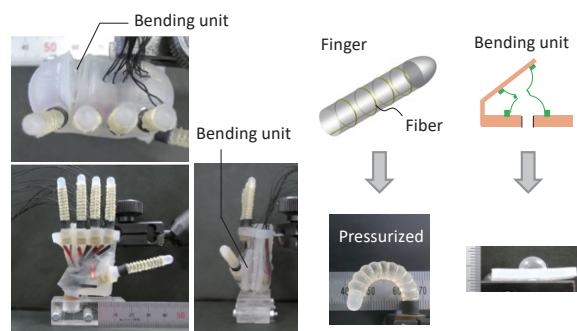


図1 電界共役流体に発生する流動を用いて駆動される5指7自由度ソフトロボットハンド

図2は図1と同様に5指のソフトロボットハンド³⁾であるが、自由度は1である。手掌部がタンクであり、そこに電極対が1対配置されている。電極対への電圧印加によって発生する流動により各指から手掌部タンクに液体が移動し、フィンガ内部が減圧されることによって指が湾曲する。高さが約35mmと比較的小型に構成されているため、1自由度に限定した。ソフトロボットによる物体の握力把握であれば、構造的な柔軟性というメリットにより各指を独立に

駆動することなく、比較的ロバストな把握が可能である。

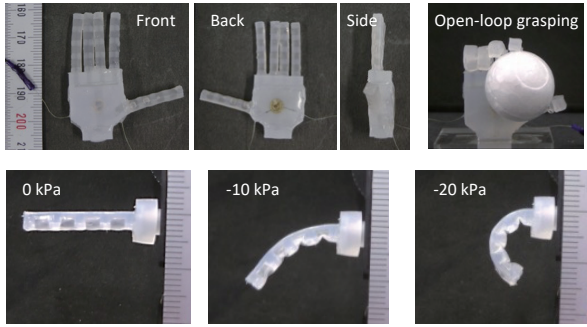


図2 電界共役流体に発生する流動を用いて駆動される5指1自由度ソフトロボットハンド

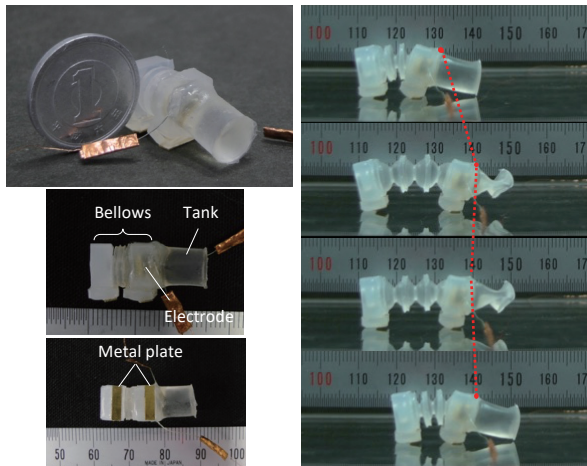


図3 電界共役流体に発生する流動を用いて駆動されるシャクトリムシ型ソフトロボット

2.2 シャクトリムシ型ロボットの駆動

上記のロボットハンドは、ヒトの手指を模倣したものであることは言うまでもない。模倣元である手指が内骨格構造であるにもかかわらず、骨格構造のないソフトロボットハンドを作ってみると言うのはいささか矛盾をはらんでいるようにも感じる。一方で、自然界にも骨格構造がない柔軟生物が存在する。

図3はシャクトリムシを模倣したソフトロボットである⁴⁾。電界共役流体の流動で駆動される本ロボットは進行方向前方にフレキシブルタンクがあり、胴体となるベローズアクチュエータとの間に電極対が配置されている。このため、電圧の印加によってベローズアクチュエータが伸長する。ここで、ベローズアクチュエータは柔軟で、接地点に対してモーメントを発生することを利用すれば、図4に示すように伸長時に上に凸に変形し、収縮時には下に凸に変形する。この時、接地足の前方の摩擦係数を後方のそれに比べて低くしておけば（図3に示した金属

板)、ベローズアクチュエータの単純な伸長収縮運動によってシャクトリムシ型ロボットは前進する。

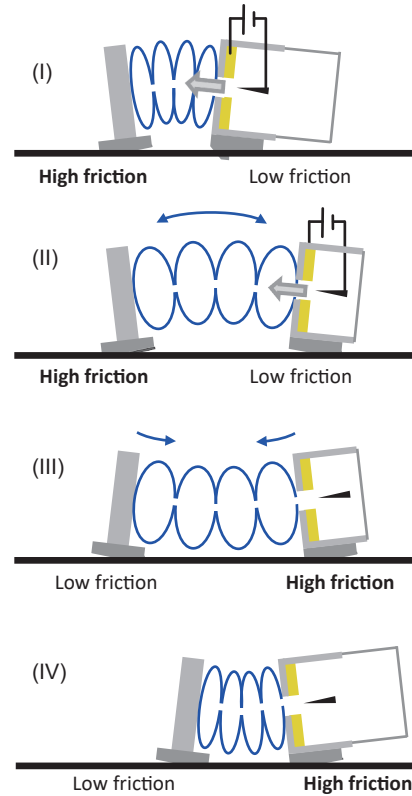


図4 シャクトリムシ型ソフトロボットの駆動原理

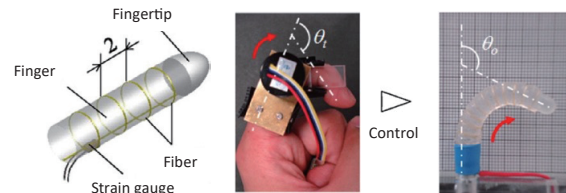


図5 歪みゲージを用いたソフトロボットフィンガの角度検出

3. フレキシブルセンシング

2.1節で指摘したように、ソフトロボットハンドの特徴のひとつは構造的な柔軟性を活かしたロバストな物体把持の可能性と言える。把持対象の形状や剛性、接触点での反力などを精度良く取得することなく、なんとなく物体を把持できる。とはいえ、ソフトロボットハンドの姿勢や動作を知ることは、把持以外のたとえばジェスチャーなどの動作には必要である。筆者らは、2.1節で紹介したソフトロボットハンド¹⁾²⁾のフィンガの根元に図5のように歪みゲージを配置して、フィンガ先端部の湾曲角度を制御可能なフィードバック系を構築した⁵⁾。しかし、元来歪みゲージはソフトロボットのためのセンシング要素として想定されているものではなく、構造の

柔軟性という意味で必ずしもソフトロボットと親和性が高いとは言えない。

こうした課題を解決するひとつの方法は、シリコンゴムで形成される柔軟な光導波路を用いたセンサである⁶⁾。図6は筆者らが開発した半分割光導波路を用いた柔軟な光学式歪みセンサ⁷⁾である。図6aに示すように、センサは中心に光透過性の高いシリコンゴムで形成された光導波路があり、その両端には光源であるLEDと受光素子であるフォトトランジスタが2つ配置されている。光導波路の断面は半分ほど分割されており、双方のコアの間で光のやり取りが可能である。センサが初期形状（直線）の際、光は光導波路に沿って減衰を伴いつつ全反射して進む。センサに伸長、局所変形、ねじり、曲げといった変形がもたらされると、図6bに示すように2つのフォトトランジスタでの受光量が変化することになる。図7はこのセンサをダミーフィンガに実装し、変形させた際の実験結果の一例である。ダミーフィンガを90°曲げた際、および 2π ねじった際に特徴的な信号の変化が見られ、これらを組み合わせる際にはそれぞれの特徴が複合された波形が計測されている。

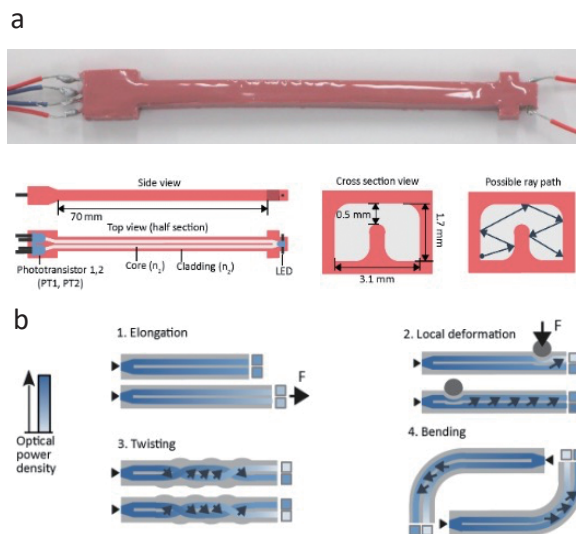


図6 フレキシブル光導波路を用いた光学式歪みセンサ

4. おわりに

本稿では、ソフトロボットの機能要素であるフレキシブルアクチュエータとフレキシブルセンサに着目し、電界共役流体の流動および柔軟な光導波路が

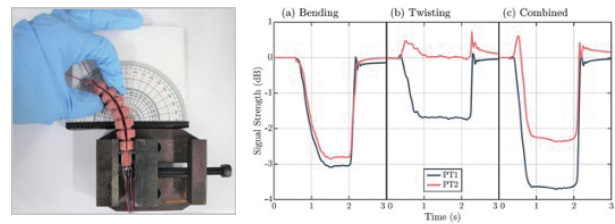


図7 光学式フレキシブル歪みセンサの出力（センサを実装したダミーフィンガの曲げ、ねじり、およびそれらの組み合わせ）

ソフトロボットと親和性の高い機能要素となり得る例を紹介した。1章で述べたように、ソフトロボットは従来型のロボットシステムの設計論からの転換が大きな課題である。ソフトロボットと親和性の高い機能要素の充実はこうした設計論の転換をサポートする重要な研究課題であり、今後、選択肢が増えることを期待する。

参考文献

- 1) Yamaguchi, A., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K. : A Robot Hand Using Electro-conjugate Fluid, *Sensors & Actuators A - physical*, Vol. 170, p. 139-146 (2011)
- 2) Yamaguchi, A., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K. : A Robot Hand Using Electro-conjugate Fluid : Grasping experiment with balloon actuators inducing a palm motion of robot hand, *Sensors & Actuators A - Physical*, Vol. 174, p. 181-188 (2012)
- 3) Ueno, S., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K. : Micro Flexible Robot Hand using Electro-conjugate Fluid, *Proceedings of SPIE*, Vol. 8923, Micro/Nano Materials, Devices, and Systems, 89234U-1 (2013)
- 4) Ueno, S., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K. : Micro Inchworm Robot using Electro-conjugate Fluid, *Sensors & Actuators A - Physical*, Vol. 216, p. 36-42 (2014)
- 5) Mori, K., Yamaguchi, A., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K. : Control of a Novel Flexible Finger using Electro-conjugate Fluid with Built-in Angle Sensor, *Sensors & Actuators A - Physical*, Vol. 183, p. 75-83 (2012)
- 6) Zhao, H., O'Brien, K., Li, S., Shepherd, R.F. : Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides, *Science Robotics*, Vol. 1, No. 1, eaai7529 (2016)
- 7) Krauss, H., Takemura, K. : Stretchable Optical Waveguide Sensor Capable of Two-Degree-of-Freedom Strain Sensing Mediated by a Semi-Divided Optical Core, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 27, No. 4, p. 2151-2157 (2022)

(原稿受付：2022年10月3日)

解説

外骨格を使用しない空圧式パワーアシストウェアとその周辺機器の開発

著者紹介



さ さ き だ い す け
佐々木 大 輔

香川大学創造工学部
〒761-0396 香川県高松市林町2217-20
E-mail: sasaki.daisuke@kagawa-u.ac.jp

2003年岡山大学大学院博士後期課程中退、同大学助手、助教を経て、2015年香川大学工学部講師、2016年同准教授、2021年同教授、現在に至る。空気圧ソフトアクチュエータを使ったウェアラブルロボットの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、IEEE、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

昨今種々のパワーアシストロボットが研究開発されており、実用化に至るものも多い。本研究で取り組むパワーアシストウェアは、衣服と同程度の着用性をもつ機構とすることで装着時の拘束感の低減をめざしている。

この目標を実現するため開発したパワーアシストウェアの駆動には、布材料およびゴム風船から構成される空気圧ソフトアクチュエータを使用している。ソフトアクチュエータを衣服に配置することで、通常の衣服と同様の外観と装着性でありながら動作補助が可能な内骨格型のパワーアシストウェアを実現している。

また、上記のパワーアシストウェアを日常生活で使用するためには、空気圧供給システムにも携帯性が求められる。本ウェアには、筆者らが独自に開発した容積可変タンクを使用した空気圧供給システムならびに軽量のエアバルブを使用している。

以下では、パワーアシストウェアならびに小型空気圧供給システムについて紹介する。

2. パワーアシストウェアの構造と外観

図1に開発したパワーアシストウェアの外観を示す。本ウェアはアクチュエータ、張力伝達用布材、上着、インナーウェア、アウターウェア、靴から構成されている。使用した空気圧ソフトアクチュエータの外観を図2に示す。本アクチュエータはゴム風船を布で覆ったバルーンアクチュエータと円環状アクチュエータか

ら構成される。円環状アクチュエータは、曲面形状の膝関節に同じく曲面形状のバルーンアクチュエータを安定に固定する目的で使用する的同时に、膝とアクチュエータの接触面積を増やすことで、アクチュエータから加わる身体への圧迫力を分散している。

膝関節前面、大腿・下腿背面の3か所に配置したソフトアクチュエータの膨張力を、張力伝達用布材により身体に伝達する。この張力伝達用布材は、腰部背面を始点に、膝関節前面を経由し踵部が終点となる二重らせん状に取り付けており、膝関節および股関節の伸展、足首関節底屈を補助できる。

3. パワーアシストウェア用エアオペレートバルブ

本バルブの構造を図3に示す。本バルブはシリコンチューブ（内径4[mm]、外径6[mm]）、ウレタン製ボディ、ABS・PLA製部品、ソフトアクチュエータ（樹脂ベローズ）、圧縮ばね、Oリングによって構成されている。チューブを除いた本体寸法は、最外径28[mm]、長さ65.5[mm]、本体重量

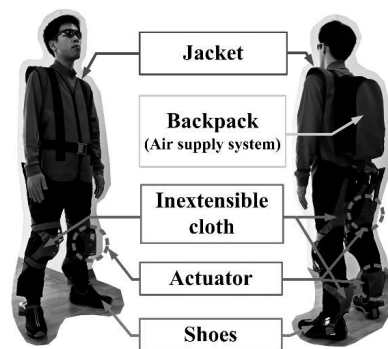
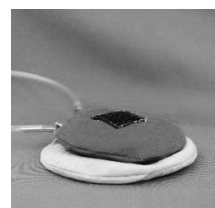


図1 パワーアシストウェアの外観と構造



(a) 無加圧状態



(b) 加圧状態

図2 ソフトアクチュエータの外観

は約19 [g] である。樹脂ベローズが伸長することで、シリコンチューブを閉止しているニードルを押出し、管路を開放させるN.C.の2ポートエアオペレートバルブである。チューブそのものを管路に使用することで、開放時に良好な流量特性を得ることができる。また、配管を直線状に配置したことで管路の曲がりによる損失の低減も期待できる。図4に示すように、ベローズ供給圧が増加するほど管路の有効断面積が増加し、35 [kPa] 以上で一定となる。樹脂ベローズによるエアオペレートバルブとすることで、同等の有効断面積の電磁弁と比べ軽量となる。

4. 小型空気圧供給システム

4.1 構成要素のエネルギー特性の検討

本システムを構築するにあたり、指標として利用するエアパワー¹⁾および空気圧エネルギー²⁾を指標とする。空気圧エネルギーとは、大気圧の温度や圧力を基準として、圧縮された状態の空気が持つエネルギーを表しており、圧縮空気から取り出すことが可能なエネルギーである。

消費エネルギーの大半は、アクチュエータの駆動に要している。図2に示すアクチュエータのうち、円環状アクチュエータは加圧を維持したままでもパワーアシストウェアの駆動に支障はない。そこで、バルーンアクチュエータの消費エネルギーを測定し、供給システムの重量・供給可能なエネルギー性能を勘案しバルーンアクチュエータの使用数を決定した。実験から求めた空気圧エネルギーと圧力の関係を図

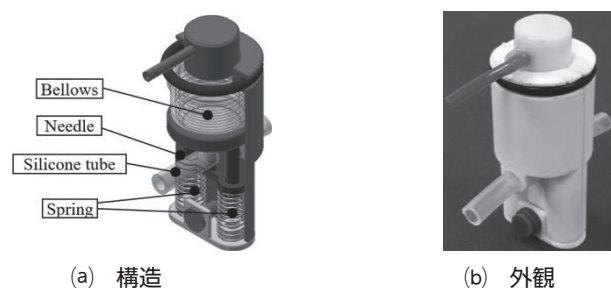


図3 ソフトアクチュエータ駆動エアオペレートバルブの構造

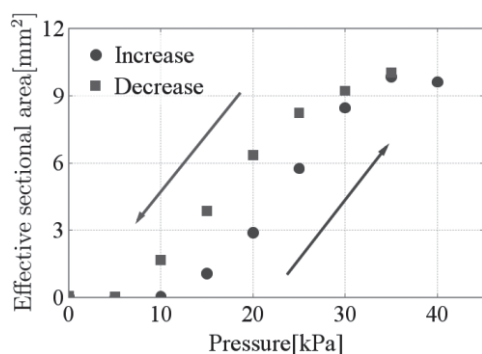


図4 エアオペレートバルブの有効断面積特性

5に示す。駆動圧力を5～20 [kPa] の範囲とするとウェアで使用するバルーンアクチュエータ1個が消費するエネルギーは1.4 [J] であることがわかる。

消費電力および吐出圧力に基づき選定したエアポンプの負荷となる出口側圧力を変化させた場合の出力エアパワー特性を図6に示す。実験結果からわかるように使用したエアポンプの最大エアパワーは50 [kPa] の時に1.31 [W] である。また、40～60 [kPa] 間でエアパワーが最大出力近傍となるため、エアポンプを同圧力帯で使用することとした。

構築する空気圧供給システムの重要な構成要素は、前述のエアオペレートバルブならびに容積可変タンクである。容積可変タンクは図7に示すようにゴム材料で構成する中空球殻であり、内圧の上昇により容積が増加する。これにより、圧縮空気の蓄積および放出時におけるタンク内の圧力変動を緩和することが可能である。この特性を利用し上記エアポンプの最大出力圧力帯である40～60 [kPa] の範囲にタンク圧の変動をとどめることで、システムの消費電力低減およびそれに伴うバッテリー数削減によりシステム全体の小型化・軽量化が可能となる。

構築する空気圧供給システムには2個の容積可変タンクを使用しており、2個使用時における空気圧エネルギーと圧力の関係を図8に示す。実験結果からわかるように、流入・流出時ともにエアポンプの最大出力圧力帯で圧力変動を緩和できている。また、外部に約2.4 [J] のエネルギーが出力された時

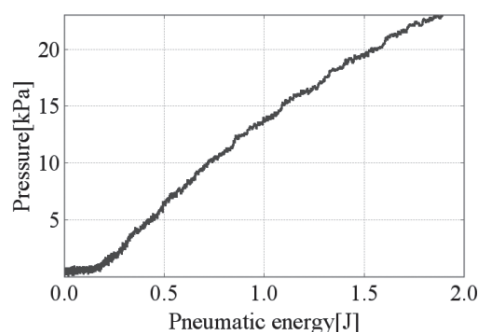


図5 バルーンアクチュエータの消費エネルギー特性

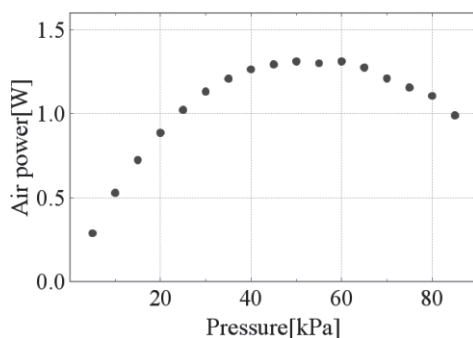


図6 エアポンプの出力特性

にタンク圧は60[kPa] から40[kPa] まで降下することがわかる。つまり、タンク2個使用時にエアポンプの最大出力圧力帯を維持可能なタンクからのエネルギー放出量は約2.4[J] となる。

これらの結果を踏まえ、バルーンアクチュエータは左右の膝前面の2個のみ給排気を繰り返すものとし、歩行周期を2[s] とすると供給システム側からは1[s] ごとに空気をアクチュエータに供給することになる。よって、1.4[W] の出力が必要となり最低でも2台のエアポンプを搭載する必要がある。

本研究で開発した空気圧供給システムの構成を図9に示す。本システムはエアポンプ、球殻型容積可変タンク、給排気用2ポートバルブ、AVRマイコン、バッテリー、圧力センサで構成される。圧力センサをタンクとアクチュエータに取り付け、マイコンを用いてエアポンプや給排気用2ポートバルブを制御し任意の圧力に調圧する。上記の各種構成要素の性能から供給システムにはエアポンプを4台、容積可変タンクを2個搭載する。システムの総重量は約2.2[kg] となり、装着可能な重量に抑制することができた。アクチュエータまでのエネルギー損失や若干の性能の余裕を持たせるため、ポンプ台数を想定した2倍となる4台搭載している。

システム総重量2.2[kg] のうち、主要構成要素（ポンプ、タンク、バルブ、バッテリー）の重量は約1.3[kg]、そのうちバッテリー（3台）の総重

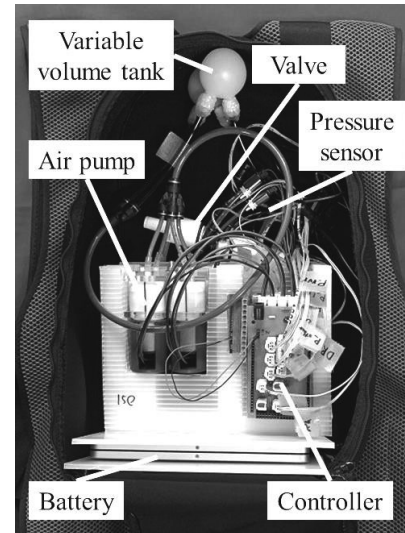


図9 供給システムの外観

量が約0.75[kg] であることから、今回開発した構成要素による軽量化効果を確認できた。

支援動作時においても供給システムが十分な性能を有しているか確認するために、ウェアを装着し片足1[s]の2[s]周期で直線状に歩行した。その結果より容積可変タンクの圧力は40[kPa]以上を維持し、次の圧縮空気供給までの1[s]の間に60[kPa]まで回復可能であった。また、左右の膝に取り付けられたアクチュエータは加圧・減圧状態を繰り返しているが、想定した加圧時の圧力20[kPa]、減圧時の圧力5[kPa]程度を実現できることを確認した。

5. おわりに

本稿では、これまでに開発した空圧駆動のパワーアシストウェアについて紹介するとともに、パワーアシストウェア用空気圧供給システムおよびその構成要素に関して述べた。

筆者らがこれまでに構築した小型空気圧供給システムに関する知見を基に本システムを構築することで、軽量なシステムを構築できた。

今後は、現在開発に取り組んでいる種々のパワーアシストロボットおよびその駆動要素の携帯型動力源に得られた知見を応用していきたい。

参考文献

- 1) 蔡, 藤田, 香川: 空気圧駆動システムにおけるエネルギー消費とその評価, 日本油圧学会論文集, Vol. 32, No. 10, p. 118-123 (2001)
- 2) 佐々木, 高岩, 瀧: 空気圧駆動ウェアラブルデバイスのための小型空気圧供給システムの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 7, p. 490-496 (2015)

(原稿受付: 2022年10月10日)

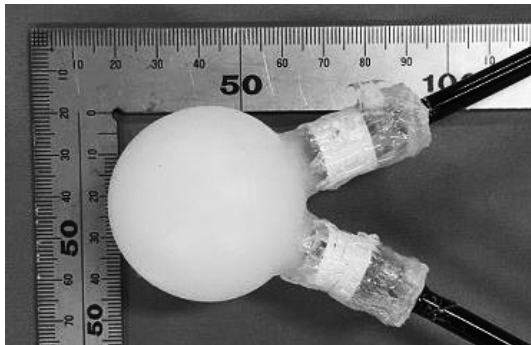


図7 球殻型容積可変タンクの外観

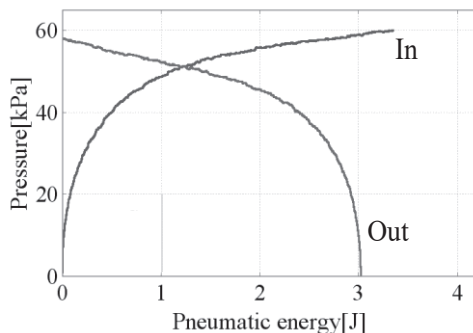


図8 容積可変タンクのエネルギー特性

会議報告

日本機械学会2022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



わきもと しゅういち
脇元 修一

岡山大学学術研究院自然科学学域
〒700-8530 岡山県岡山市中区津島中3-1-1
E-mail: wakimoto@okayama-u.ac.jp

2007年岡山大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同大学助教を経て、2011年同大学准教授。現在に至る。空気圧ソフトアクチュエータの開発とその応用に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

日本機械学会2022年度年次大会が、富山大学 五福キャンパスにて、9月11日～9月14日の日程で対面形式により開催された。新型コロナウイルスの感染状況をみながらのオンライン形式、対面形式の判断、対面形式で決定した後の感染対策など、今大会の運営には大変な苦勞があったであろうと、大会実行関係の方々に頭の下がる思いで参加させていただいた。大会キャッチフレーズは、「シンギュラリティがもたらす機械工学の未来」であった。また、大会テーマとして、「アフターコロナにおける機械工学」、「DXによる機械技術の革新」、「SDGsへの対応」が掲げられた。

本大会は、日本機械学会の全部門が係わる大規模な講演会であり、25の講演室とポスター会場に分かれて研究発表が行われた。論文検索機能にあるフリーワード検索によって、フルードパワーに関連する用語を検索すると、空気圧（空圧）8件、油圧3件、水圧2件、液圧2件、機能性流体3件となった。検索した用語では該当しないフルードパワー関連研究もあるため、全体では、多くのフルードパワー関連研究が報告されていることが推察できる。しかしながら、多数のセッション・企画が並行して行われるため、聴講できる発表には限りがあった。このため本稿では、機素潤滑設計部門企画の「卒業研究コンテスト」、機素潤滑設計部門とロボティクス・メカトロニクス部門の合同セッション・企画であるオーガナイズドセッション「次世代アクチュエータシステム」、基調講演「フルー

ドパワーシステム、人間支援のための空圧要素技術の開発」、先端技術フォーラム「人とともにあるアクチュエータとは」で、筆者が聴講したフルードパワー関連研究の紹介に留まることをご容赦いただきたい。

2. 研究紹介

2.1 空気圧関連

石井らは、フィルムを貼り合わせて、その内部に空気圧を印加することで、膨張変形を発生させる空気圧ソフトアクチュエータを開発している。このアクチュエータを複数重ねることで、扇状の変形を生じさせており、この運動を利用した肘関節用リハビリ装置を実現している。10人の被験者に対して試験を実施し、回内回外運動の他動運動が可能であることを確認している¹⁾。

近藤らは、3Dプリンタにより、負のポアソン比を発現することが可能なAuxetic構造を有する柔軟な構造体を製作し、ベローズ型の空気圧アクチュエータの外周に配置している。3種類のAuxetic構造を実現し、ベローズの動作に伴う構造の変形特性を計測している。また、ラチェット路面上において、アクチュエータの自走実験を実施し、3種類の中でもDAH（Double Arrowhead Honeycomb）構造を用いた際に自走速度が高くなることを確認している²⁾。

本多らは、蛇腹状構造と板状構造から構成され、内部に空気圧を印加することで駆動する半ベローズ型アームを3Dプリンタで製作している。4本の半ベローズアームを配置し、それらの先端を矩形枠によって拘束して駆動することで、3次元的な拡張運動が実現されることを実験で確認している³⁾。

今澤らは、粒子群を内包した柔軟構造体の内部空気の排出により剛性が可変となるジャミング機構に対して、4本の形状記憶合金ワイヤを内挿している。形状記憶合金ワイヤとジャミング転移現象を組み合わせることにより、異なる4つの剛性状態が実現できる。形状記憶合金ワイヤの温度変化、およびジャミング機構の状態変化によって、剛性が可変であること、変形状態での形状が固定できることを確認している⁴⁾。

中野らは、内視鏡に多段階の湾曲性能を付与する

ための空気圧駆動の機構を提案している。らせん状の形状記憶ポリマーを3Dプリンタで製作し、空気圧人工筋肉を集積した柔軟なステアリング機構と組み合わせている。形状記憶ポリマーの形状固定性を利用することで、ステアリング機構による湾曲姿勢を胴中部で保持することが可能となっている。巻き数の異なるらせん形状記憶ポリマーを製作し、実験的に特性を評価している⁵⁾。

竹田らは、手指の効果的なリハビリテーションを実現するための力覚提示デバイスを提案している。本デバイスは、アクティブな力覚提示、パッシブな力覚提示の双方が実現できる構成となっている。アクティブ要素として空気圧駆動のバルーンアクチュエータを、パッシブ要素としてEAG (Electro Adhesive Gel) を利用している。指モデルの屈曲角度を曲げセンサで計測し、バルーンアクチュエータの内圧を制御することで、円筒形VR物体の把持判定を実施している⁶⁾。

栗田は、運動支援のためのウェアラブルなアクチュエータとして、一般的な空気圧人工筋肉と比べて、低圧駆動が可能な空気圧人工筋肉PGM (Pneumatic Gel Muscle) を利用している。軽量で高い動作性をもつPGMを身体に着用することで、軽労化にとどまらず、スポーツ能力の向上、VR体験、ニューロリハビリテーションなど多様な応用可能性があることを示しており、手軽にアシストを実現するウェアラブルアクチュエータ技術の重要性を述べている⁷⁾。

佐々木は、携帯性のある空気圧供給システムを実現するため、容積可変型タンクや小型エアオペレートバルブを開発している。前者は、ゴム材料から構成され、内圧によってタンク容積が可変となる。これと小型コンプレッサを組み合わせることで、圧縮空気の供給・回生機能をもつ小型の空気圧システムを実現している。後者は、樹脂ベローズによってニードルを駆動し、空気供給用チューブ自体を開閉する2ポートエアオペレートバルブであり、軽量、小型、高い有効断面積比が特徴である⁸⁾。

2.2 機能性流体関連

滑川らは、磁気粘性流体MRF (Magnetorheological Fluid) と永久磁石を用いることで、構造の簡素化が実現されるトラクションドライブ機構を研究している。ローラー間、ディスク間でのMRFを用いた動力伝達性能を調査するため、ローラー型と2つのディスク型(非磁性体ディスク型、強磁性体ディスク型)の機構を製作し、それぞれの動力伝達効率と最大伝達トルクを計測している。実験の結果、ローラー型と比較し、ディスク型の特性が優れていることを確認している⁹⁾。

早川らは、複数のアクチュエータを有し、狭あい

空間で作業を行うパワーマイクロロボットのための交流圧力源システムを開発している。電気粘性流体ERF (Electro-rheological Fluid) を応用したERバルブによって、交流圧力源による交番流れを同期整流することで、多自由度システムの配管スペース問題を軽減する方法を提案している。高速な完全遮断が可能な粒子分散系ERFを用いたERバルブや、ベローズ型ソフトアクチュエータなどで構成される駆動システムのシミュレーションモデル、および、実機システムを構築している。シミュレーションと実験において、提案システムを用いたベローズ型ソフトアクチュエータの駆動特性が一致することを示している¹⁰⁾。

3. おわりに

本稿では、日本機械学会2022年度年次大会で、筆者が聴講したフルードパワー技術に関する研究概要を報告させていただいた。

来年度の日本機械学会年次大会は、2023年9月3日～6日の日程で東京都立大学 南大沢キャンパスにて開催される予定である。

参考文献

- 1) 石井大湖, 谷口浩成, 空気圧ソフトアクチュエータによる肘関節運動装置の試作と動作試験, 日本機械学会2022年度年次大会, S115-12 (2022)
- 2) 近藤駿太郎, 田代将英, 遠藤洋史, Auxetic構造とベローズ型チューブ一体化によるソフトシリンダーの特異的変形特性, 日本機械学会2022年度年次大会, J111p-03 (2022)
- 3) 本多佑希, 一口翔, 田代将英, 遠藤洋史, 次元拡張型メカニカルメタマテリアルの設計, 日本機械学会2022年度年次大会, J111p-04 (2022)
- 4) 今澤俊貴, 高嶋一登, 長弘基, 形状記憶合金とジャミング転移現象を用いた可変剛性リンクの特性評価, 日本機械学会2022年度年次大会, J111p-05 (2022)
- 5) 中野晴貴, 脇元修一, 神田岳文, 山口大介, 内視鏡ステアリング機構に搭載する形状記憶ポリマー製スリーブの3Dプリンタによる試作と構造検討, 日本機械学会2022年度年次大会, J111-02 (2022)
- 6) 竹田真之介, 小柳健一, 李豊羽, 塚越拓哉, 野田堅太郎, 大島徹, 指の曲げ状態を用いたハイブリッド型力覚提示グローブの制御系構築, 日本機械学会2022年度年次大会, J111-04 (2022)
- 7) 栗田雄一, ウェアラブルなアクチュエータによる力覚介入と運動拡張, 日本機械学会2022年度年次大会, F111-02 (2022)
- 8) 佐々木大輔, 人間支援のための空圧要素技術の開発, 日本機械学会2022年度年次大会, K111-01 (2022)
- 9) 滑川裕生, 佐藤恭一, 永久磁石界磁による磁気粘性流体を用いた二つの回転体間の動力伝達, 日本機械学会2022年度年次大会, S115-29 (2022)
- 10) 早川佳範, 吉田和弘, 金俊完, 粒子分散系ERFを用いた高機能交流圧力源システムに関する研究, 日本機械学会2022年度年次大会, J111-03 (2022)

(原稿受付: 2022年10月5日)

トピックス

学生さんへ，先輩が語る — 自分が感じたフルードパワーの魅力について—

著者紹介



よこ た ま さ し
横 田 雅 司

〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1
E-mail: m-yokota@ous.ac.jp

2019年静岡理科大学大学院システム工学専攻修士課程修了，2022年徳島大学大学院知的力学システム工学専攻博士後期課程修了，同年岡山理科大学助教，現在に至る。メカトロニクス機器，パワーアシスト装置の研究に従事，日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会などの会員，博士（工学）

人材育成拠点，そして社会の課題解決に資する知識・技術の創造拠点となるために活動している。



図1 岡山理科大学（岡山キャンパス）

1. はじめに

1.1 自己紹介

私は大阪府の茨木市で生まれ，ロボットコンテストなどを通じてロボット工学や機械工学を学びたい思いがあり，機械工学科に入学した．そこで幅広い分野のロボット・機械に関する知識を学ぶことができ，学部・修士課程の研究では電動アクチュエータを用いたロボットやメカトロニクス機器に関する研究に従事してきた．私がフルードパワー関連の研究に携わったのは博士後期課程の頃からであり，まだ携わって日が浅い．なお，本記事は主観的な感想が多く，名称や数字など，正確性に欠く点があるかもしれないことについては，ご容赦いただきたい．自分が感じたフルードパワーの魅力について述べ，学生の皆さんに少しでも伝わればと願うばかりである．

本稿では，職場やこれまでの研究，現在の活動について紹介する．私は2022年3月に徳島大学大学院で博士の学位を取得し，同年4月に岡山理科大学情報理工学部の助教として働いている．

1.2 大学・学科紹介

岡山理科大学¹⁾は，岡山県岡山市と愛媛県今治市の2キャンパスに7学部21学科1コース4研究科を構える私立大学であり（図1），「ひとりひとりの若人が持つ能力を最大限に引き出し技術者として社会人として社会に貢献できる人材を養成する」という理念に基づき，多様性と独創性に富む教育研究を行い，複雑な様相を呈する社会の変化に対応できる

本大学は研究にも力を入れており，2021年度の科学研究費補助金（科研費）が採択件数134件計2億1762万円で，件数・金額とも過去最高となった．また，2021年度 科研費の私大ランキングが1月26日付の教育学術新聞で公表され，採択された私立大学591大学のうち50位（前年度58位），中四国では採択件数・金額とも1位となった．本大学は，教育や研究にも力を入れている中国・四国地区の私立大学で最大の収容定員を擁する理工系総合大学である．私は2022年に新設された情報理工学部 情報理工学科に所属している²⁾．本学科は，5コースの専門分野に分かれており，情報技術を核として社会問題を分析し，新たな発見や情報システム開発，センサやロボット技術などを用いたシステム開発を行うことにより，人の可能性を広げて新たな価値を生み出すことのできる人材育成と研究活動を目標としている（図2）．

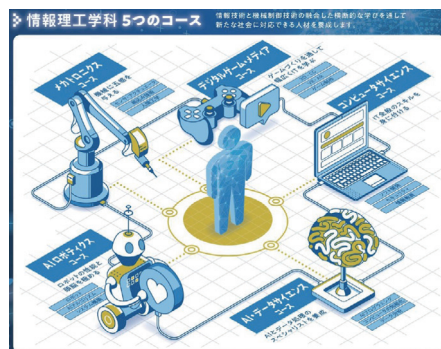


図2 情報理工学科5つのコース

2. これまでの研究

2.1 天井カメラを用いたロボットの誘導システム

学部4年の頃に、私は静岡理工科大学の益田先生の研究室（メカトロニクスシステム研究室）でロボット（AGV）の誘導システムに関する研究を行っていた。AGVで用いられる誘導線や反射テープを使用せず、経路変更の柔軟性を向上させるために天井カメラを用いた誘導システムを構築した。また、ロボット誘導経路作成ソフトも作成した（図3）。本研究を通して、研究の楽しさやシステム全体を構築する難しさを実感した。

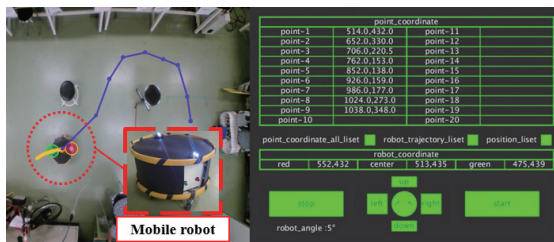


図3 ロボット誘導経路作成ソフト

2.2 前後輪二輪駆動電動バイクの制御システム

修士課程修了まで、私は静岡理工科大学の野崎先生の研究室（ヴィークル工学研究室）で前後輪二輪駆動電動バイクの制御システムに関する研究を行っていた（図4）。前後輪駆動バイクは、前後輪が駆動するため悪路走破性と登坂性、走行安定性、運動性など高い性能を持ち、農業や災害支援などでの活用が期待されている。当時はあまり前後輪二輪駆動電動バイクの制御に関する研究が行われていないこともあり、前後輪トラクション制御の研究を行っていた。本研究で、タイヤ間の摩擦やシミュレーション、電気アクチュエータについて学び、前後輪のインホイールモータ（500W）から出るノイズを除去するのに苦労した。本研究を通して、研究や技術に対する考え方や視野が大きく広がった。

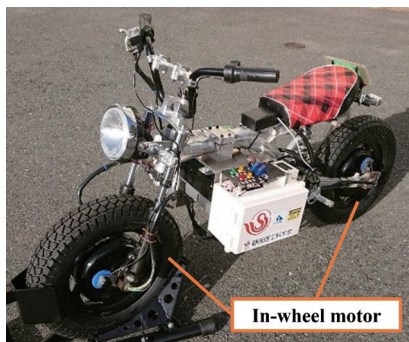


図4 前後輪二輪駆動電動バイク

2.3 免荷型空気式パワーアシスト装置の開発

博士後期課程の頃に、私は徳島大学の高岩先生の研究室（機械システム制御学研究室）で免荷型空気式パワーアシスト装置の開発³⁾と人間支援システムへの応用⁴⁾に関する研究を行っていた。この時に初めてフルードパワー関連の研究に携わった。本研究は、単純な持ち上げ動作の支援に着眼し、脇下から支援することでSquat法を阻害しにくい免荷型のアシスト装置の開発を進め、支援効果を定量的に検証している（図5）。また、筋電位センサによる直接的な評価に加えて筋骨格シミュレータを導入することで免荷型パワーアシスト装置の片脇支援に対する影響を調べている。アシスト装置の小型・軽量化を実現するためにピストンロッド部をワイヤーに置き換えた新たなワイヤー式空気圧シリンダーを開発した（図6）。一般に空気圧アクチュエータの動作は直動運動のものが多く、回転運動へ変換する複雑な機構を別途設ける必要がある。このアクチュエータはプーリのような単純な機構で回転運動へ変換することができ、高い出力/重量比を有し、内圧測定による負荷推定など制御器構成による高度化の可能性を有したアクチュエータである。本研究のアシスト装置とアクチュエータの機構で特許を出願している。本研究を通して、空気圧アクチュエータが有するバックドライブ特性や高い出力/重量比の特徴などを知り、フルードパワーに対して興味を持つようになった。また、アクチュエータを自作できることに個人的に魅力を感じた。本研究で新たなパワーアシスト装置や空気圧アクチュエータを開発でき、充実した博士後期課程3年間を送ることができた。

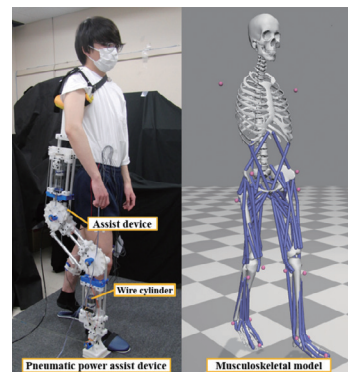


図5 免荷型アシスト装置と筋骨格シミュレータ

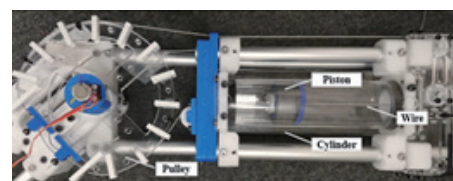


図6 ワイヤー式シリンダーと回転機構

3. 現在の活動

私は岡山理科大学 情報理工学部で研究室「ロボットアーキテクチャ研究室」⁵⁾を立ち上げ、研究室の学生の指導を行っている。研究室を立ち上げて間もないため、悪戦苦闘ながらも楽しい日々を過ごしている。授業はモノづくり科目や実習を中心に担当している。また、県内企業と共同で農業支援ロボットの開発を進めている。

研究室では、免荷型空気圧パワーアシスト装置に関する研究を続けている。空気圧アクチュエータは、空気の圧縮性に起因する低剛性特性が安全性として機能するので、人との直接的な接触を伴うパワーアシスト装置のアクチュエータとして適している。2022年のBath大学のBowen教授らの調査⁶⁾(図7)によれば、リハビリテーションやアシストにおけるソフトアクチュエータやロボット研究の33%に流体アクチュエータが用いられ、この分野の流体アクチュエータの有用性は認知されている。私はフルードパワーに可能性を感じており、免荷型パワーアシスト装置の実用化をめざして研究を進めている。

ほかに、犬用携帯型計測デバイスの開発を行っている。岡山理科大学では動物たちにやさしい医療や動物たちの健康づくりに向けて、獣医学部と情報理工学部の工学分野が共同で、デバイス開発に取り組んでいる。総合大学の強みを生かし、学部の枠を超えた“獣工連携”による獣医療の新しいスタイル「いきものQOL」⁷⁾で、動物とヒトの豊かな生活実現をめざし、研究を進めている(図8)。

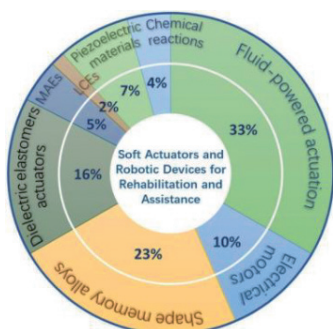


図7 Soft Actuators and Robotic Devices for Rehabilitation and Assistance (Adv. Intell. Syst. 2022, 4)



図8 獣工連携プロジェクト

4. おわりに

私は、ロボットの誘導システムに関する研究からはじまり、さまざまな経験を積むことができ、忙しくも楽しく充実した日々だったと感じている。また、博士後期課程でフルードパワー関連の研究に携わり、フルードパワーの魅力や可能性を知ることができたことは幸運だと思う。空気圧アクチュエータなどの流体アクチュエータは、小型・軽量・安全でさまざまな動作を実現することが可能であり、多岐の分野に応用されることが期待される。しかし、フルードパワーはさまざまな産業分野で利用されているにも関わらず、それを専門とする研究者・技術者は多くはない。本稿を読んでくださっている学生の皆さんには、フルードパワーに携わってほしいと願うばかりである。私は、今後もメカトロニクス機器の開発はもちろん、免荷型パワーアシスト装置や空気圧サーボの制御性能向上を目的とした圧力制御回路などフルードパワー関連の研究を進めていく所存である。また、共同研究など積極的に取り組んでいるので、興味あれば遠慮なく連絡いただけると幸いである。

参考文献

- 1) <https://www.ous.ac.jp/>
- 2) <https://www.ise.ous.ac.jp/>
- 3) M. Yokota and M. Takaiwa : Development of Non-Wearing Type Pneumatic Power Assist Device – Basic Concept and Performance Evaluation –, Journal of robotics and mechatronics, Vol. 32, No. 5, pp. 1052–1060, (2020)
- 4) M. Yokota and M. Takaiwa : Gait Rehabilitation System with a Non-Wearing Type Pneumatic Power Assist Device, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 4, pp. 927–934, (2021)
- 5) <https://www.ise.ous.ac.jp/laboratory/t-yokota.html>
- 6) M. Pan, C. Yuan, X. Liang, T. Dong, T. Liu, J. Zhang, J. Zou, H. Yang, and C. Bowen : Soft Actuators and Robotic Devices for Rehabilitation and Assistance, Advanced Intelligent Systems, (2021)
- 7) <https://www.ous.ac.jp/qol/>

(原稿受付：2022年10月15日)

研究室紹介

徳島大学 高岩研究室

著者紹介



たか いわ まさ ひろ
高 岩 昌 弘

徳島大学大学院社会産業理工学研究部
〒770-8506 徳島市南常三島町2-1
E-mail: takaiwa@tokushima-u.ac.jp

1992年岡山大学大学院工学研究科生産機械工学専攻修了。同年同大学助手、准教授を経て、2015年徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授。空気圧システムの高機能化に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

徳島大学理工学部は2016年4月に、総合科学部の理系学科と工学部の生物工学科以外の学科が統合して発足した。理工学部の統合前の工学部は、1922年に徳島工業学校として設置され、本年2022年にちょうど100周年を迎える。

筆者の所属する機械科学コース 機械システム制御学研究室は、2015年4月に岡山大学から転出した筆者が着任して活動を開始した。本年度は、博士前期課程8名、学部生3名、ならびに、10月より研究生として加わり、来年4月からドクターコースに進学予定のマレーシアからの留学生を含めた合計12名が在籍している。研究テーマは、岡山大学在職時より変わっておらず、「空気圧駆動システムの高機能化と人間支援システムへの応用」を標榜している。

周知のとおり、空気圧システムの特徴は動作媒体である空気の圧縮性である。本稿では、圧縮性の影



図1 集合写真（2020年度10月撮影）

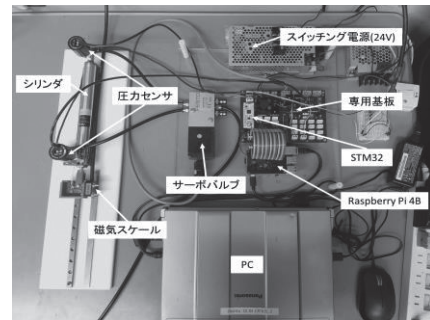


図2 ノートPCを用いた開発環境

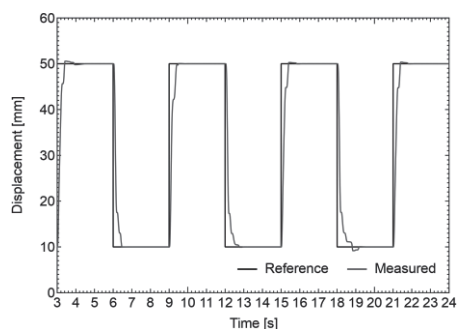
響を制御手法の工夫により低減し、運動制御性能を向上させることで産業分野に適用しようとする研究と、圧縮性の効果による柔軟性を積極的に活用し、人間支援システムへ応用しようとする研究の双方について、いくつかの研究テーマを紹介したい。

2. 研究テーマの紹介

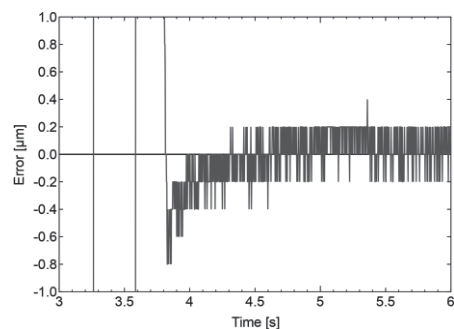
2.1 開発環境について

具体的な研究テーマを紹介する前に、研究の基盤技術となる開発環境について話したい。筆者はこれまでデスクトップPCに実時間Linuxを実装し、複数のインターフェースボードをPCIバスに挿入した構成で行ってきたが、ご存じのように昨今のマザーボードはPCIなどの拡張バススロットが少なく、新規の環境構築が難しくなってきた。また、本構成の場合、かなりのコストが生じることも問題であった。

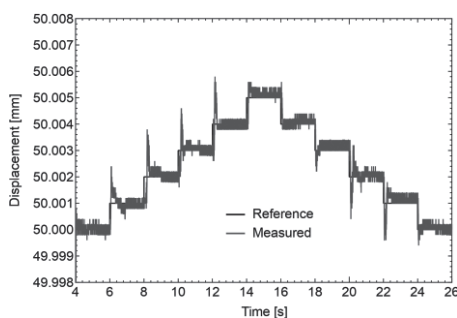
一方、近年、ノートPCは高性能なものでも比較的安価に入手できるようになり制御用PCとして魅力的であるが、残念ながら外部インターフェースがない。そこで、本研究室では、図2に示すように、独自開発したインターフェース基板を用いたノートPCによる計測制御環境を構築している。基板にはA/DおよびD/A変換IC、カウンタ用のSTMマイコンが実装され、RaspberryPi 4BとSPI通信によりデータ授受を行う。また、RaspberryPiとノートPC間はUDPソケット通信によりデータ送受信を行っている。実時間Linux（RTAI）をハードリアルタイムとして実装したノートPCでサンプリング周期を2msとした運動制御時であっても、上記の構成で十



(a) 矩形波に対するステップ応答



(b) 定常偏差



(c) 1 ミクロンステップ送り

図3 位置制御性能

分リアルタイム性が保証されていることを確認している。このように性能だけでなくPCを含めても10万円かからないコスパの良さも魅力であり、当研究室ではすべての研究テーマがこの方式に置き換わりつつある。

2.2 汎用型空気圧シリンダのサブミクロン位置決め

空気圧シリンダは、空気の高圧縮性に起因する低剛性特性のため、位置制御時に摩擦力の影響を受けやすく、高精度な位置決めには不向きである。そのため空気圧シリンダは製造現場において多用されているが、その用途は当て止め方式による単純な物体搬送作業が一般的である。任意点における高精度位置決め技術が確立されれば、空気圧アクチュエータの高機能化がもたらす産業界へのインパクトは大きい。

筆者らは、ゴムパッキンをシール部に持つ汎用型空気圧シリンダに対して、任意点における繰り返し位置決め精度（3σ値）が1ミクロン未満となる高

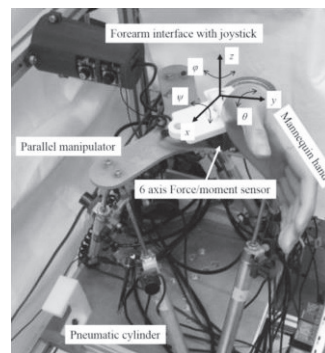


図4 手首リハビリ支援装置

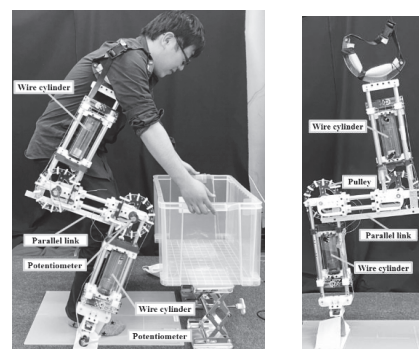


図5 免荷型パワーアシスト装置

精度位置決め技術を提案している。以下にその実験結果を一部紹介する。ここで、実験装置は図1に示したものと同じで、比較的摩擦特性の大きいエアシリンダと流量制御型サーボバルブを使用している。また、磁気式エンコーダである測長センサの分解能は0.2ミクロンである。

図3に位置制御性能を示す。同図(a)は目標値10mmと50mmを往復する矩形波信号に対するステップ応答を示し、その最初の定常状態を拡大したものを同図(b)に示す。測長センサの分解能である片側0.2ミクロンの誤差に収まっていることが確認できる。また、同図(c)は1ミクロンのステップ送りを実行した結果である。オーバーシュートは生じるがこのような超微細送り動作にも追従していることが見て取れる。提案アルゴリズムは、何かの制御理論に基づくコントローラではなく、補償入力であるため、任意のタイミングでのON/OFFが可能である。補償入力をOFFとすれば、従来の空気圧サーボ特有のバックドライブ特性や柔軟性を活かした動作が行え、補償入力をONにした瞬間にサーボ剛性が高まり、実験結果で示した精度が実現される。

このような作業内容に応じた可変剛性機能の産業応用について現在検討を進めている。

2.3 空気式パラレルマニピュレータを用いた手首リハビリテーション支援

空気圧シリンダで駆動されるパラレルマニピュ

レータを用いて、手首部のリハビリテーション支援装置を開発している。これまでは機械インピーダンス制御の制御モードを変更することで、種々のリハビリテーション手法を実施する方法¹⁾や、理学療法士が患者に対して施す徒手訓練動作をマニピュレータに修得させることで、患者に最適な徒手訓練動作を実行する手法²⁾を提案してきた。また、近年では図4に示すように理学療法士自身の技能向上を目的とし、マニピュレータに患者の手首特性を実装した患者シミュレータの構築に関する研究³⁾を進めている。

2.4 免荷型空気式パワーアシスト装置

出力/重量比の高い空気圧アクチュエータの特徴に着目し、軽量で着脱が容易なパワーアシスト装置を開発している。図5に示すように、下端部は装着者の靴側面に摂動可能で固定され地面と接しており、上端部は装具を介して脇下部と接している。身体の拘束が少ないことから、持ち上げ動作に推奨されているSquat法（膝を曲げてしゃがむ動作）を阻害しにくく、また、装置は免荷されているため、装置自体の重量（約5.0 [kg]）は装着者の直接的な負担にはならない。単純な重量物の持ち上げ動作における検証実験を行った結果、アシスト装置無しの場合に比べて、特に下半身の筋負担が大幅に軽減されることが定量的に確認されている⁴⁻⁵⁾。

2.5 パラレルスティックを用いた空気式手首・手指リハビリテーションデバイス

開発した手指・手首伸展リハビリ装置を図6に示す。2本の平行スティックはピニオンギア上に固定されており、その両側にラックギアが設置されている。各ラックギアの位置は空気圧シリンダで独立に駆動される。これにより平行スティックは並進と回転動作を任意に制御でき、理学療法士の徒手動作を模擬することで手指・手首の伸展動作を訓練する。患者ごとに異なる手の大きさに対応するために、同図右に示すように、USBカメラにより手の輪郭や指関節位置を検出する機能を実装している⁶⁾。また、近年はこのような機能とともに、スティック間距離の自動調整を行うことで、広いスティック間距離が望ましい手首伸展や、狭いスティック間距離を要する指先関節の伸展に対応している。

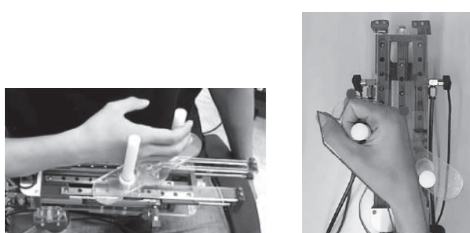


図6 空気式手首手指伸展リハビリ支援装置

3. おわりに

本稿では、まず、研究の基盤技術としての開発環境の構築について述べた。運動制御系を構築する上で、いかに高精度で安価なシステムを構築するかは大学の研究室や企業の開発部門においても興味がある問題と思われる。なお、インターフェース基板の製作を含めた本システムの構築は、本年3月に博士後期課程を修了し、現在岡山理科大学情報理工学部助教である横田雅司先生の貢献が大きい。感謝する次第である。

つぎに、空気圧システムの産業応用の観点から、汎用型エアシリンダを用いたサブミクロンオーダの位置決め結果について紹介した。従来、電動アクチュエータの独壇場であった精密作業への空圧アクチュエータ利用の可能性を示すものと期待できる。

最後に、人間支援分野への応用の観点から、パワーアシスト装置とリハビリテーションデバイスに関する研究を紹介した。このように空気圧駆動システムは、圧縮性の影響と効果にいかに向き合うかにより、種々の応用分野が考えられ、興味深い。今後も、空気圧システムが製造分野や人間支援分野に大きく貢献できるよう、研究をすすめていく所存である。

参考文献

- 1) 高岩昌弘, 則次俊郎, 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テーション支援装置の開発—多自由度リハビリ動作の実現—, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 6, pp. 745-753, 2006.9
- 2) 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テーション支援装置の開発—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. 1251-1258, 2007.11
- 3) M. Takaiwa, H. Imanaka, Wrist Rehabilitation Simulator for P.T. Using Pneumatic Parallel Manipulator -Regulation of Wrist Viscoelastic Property and Therapy Motion Evaluation-, Proc. of the 10th JFPS International Symposium on Fluid Power, 2 B12-16, 2017.2
- 4) M. Yokota, M. Takaiwa, Development of Non-Wearing Type Pneumatic Power Assist Device - Basic Concept and Performance Evaluation-, Journal of robotics and mechatronics, Vol. 32, No. 5, pp. 1052-1060, 2020
- 5) M. Yokota and M. Takaiwa, Gait rehabilitation system using a non-wearing type pneumatic power assist device, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 4, pp. 927-934, 2021.8
- 6) Y. Matsui, D. Hosomi, and M. Takaiwa: Development of Finger-Wrist Rehabilitation Device Using Pneumatically Driven Parallel Sticks, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 32, No. 5, pp. 1044-1051, 2020

(原稿受付：2022年10月8日)

会 告

〈理事会・委員会日程〉

10月13日～28日	論文集委員会
10月21日	情報システム委員会
11月8日	理事会
11月19日～30日	論文集委員会
11月22日	基盤強化委員会
12月6日	編集委員会
12月7日	企画委員会

〈理事会報告〉

2022年度第4回理事会

11月8日 15:00～17:00

Web開催（参加者18名）

- (1) 国際シンポジウム広島2024開催準備状況
- (2) 2022年秋季講演会開催準備状況
- (3) 2022年度学会賞・フェロー推薦受付状況
- (4) 会員の推移
- (5) 各委員会からの報告
- (6) その他

〈委員会報告〉

2022年度第5回論文集委員会

10月13日～28日

書面審議（参加者12名）

- (1) iThenticate (Similarity Check) の申請について
- (2) iThenticate (Similarity Check) の申請誌について
- (3) CCライセンスの導入について
- (4) Copyright Transfer Agreementおよび関連事項について
- (5) その他

2022年度第2回情報システム委員会

10月21日 11:00～12:00

Web開催（参加者6名）

- (1) 学会HPの更新状況
- (2) 会議報告について
- (3) 会員証の取り扱いについて
- (4) 公募情報の会員メーリングリストへの配信について
- (5) その他

2022年度第6回論文集委員会

11月19日～30日

書面審議（参加者12名）

- (1) 論文集J-Stege公開フロー（案）について
- (2) J-Stege Similarity Check利用の採択審査結果について
- (3) JSTジャーナルコンサルティング中間報告書の作成・提出について
- (4) EMの査読画面の英文併記について

2022年度第2回基盤強化委員会

11月22日 16:00～17:00

Web開催（参加者13名）

- (1) キャリア支援セミナー企画について
- (2) 賛助会員企業への出前講座について
- (3) 学会HPバーチャルミュージアムについて
- (4) FP道場14の延長企画対応について
- (5) 工業会との産学連携企画について
- (6) フェロー・技術開発賞の推薦について
- (7) その他

2022年度第3回編集委員会

12月5日 15:00～16:30

Web開催（参加者18名）

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.54 No.1「フルードパワーとソフトロボティクス」
 - 2) Vol.54 No.2「フルードパワーとハイブリッド」
 - 3) Vol.54 No.3「医療を支えるフルードパワー技術」
 - 4) Vol.54 No.4「フルードパワーの品質工学と最適化（仮）」
- (2) その他
 - 1) 会議報告
 - 2) EBSCO hostへの会誌記事情報の収録について
 - 3) 今後の特集について

2022年度第3回企画委員会

12月7日 15:00～17:00

Web開催（参加者20名）

- (1) 2022年秋季講演会開催報告について
- (2) オータムセミナーについて
- (3) ウィンターセミナーについて
- (4) 日中韓共同ワークショップについて
- (5) 2023年春季講演会開催準備状況について
- (6) その他

会
告

共催・協賛行事のお知らせ

共催・協賛行事

連携講習会（全4回）「機械—電気の統合モデルによるモデルベース開発」

主 催：一般社団法人 日本機械学会交通・物流部門

開 催 日：2022年12月9日(金)、2023年1月11日(水)、2月10日(金)、3月8日(水)

会 場：ハイブリッド開催（東京飯田橋、ZOOM）

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/22-80/

講習会「実務者のための騒音防止技術」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 関西支部

開 催 日：2023年1月24日(火)～1月25日(水)

会 場：オンライン開催（Webex）

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/22-108/

講習会「ソフトロボット学入門—基本構成と柔軟物体の数理—」

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：2023年1月26日(木)

会 場：オンライン開催（ZOOM）

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/22-108/

第4回世界エンジニアリングデー記念シンポジウム

主 催：公益社団法人 日本工学会

開 催 日：2023年3月4日(土)

会 場：オンライン開催

U R L：https://www.jfes.or.jp/

IIP2023 情報・知能・精密機器部門講演会

主 催：日本機械学会 情報・知能・精密機器部門

開 催 日：2023年3月6日(月)～3月7日(火)

会 場：九州工業大学（福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）・オンライン開催（ハイブリッド）

U R L：https://www.iip-conference.org/

Grinding Technology Japan 2023

企 画：日本工業出版株式会社、株式会社産経新聞社

開 催 日：2023年3月8日(水)～3月10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/2023/jp/

日本混相流学会混相流国際会議2023（ICMF2023）

主 催：日本混相流学会

開 催 日：2023年4月2日(日)～4月7日(金)

会 場：神戸国際会議場（兵庫県神戸市中央区港島中町6-9-1）

U R L：http://www.jsmf.gr.jp/icmf2022/

日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023（ROBOMECH2023 in Nagoya）

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：2023年6月28日(水)～7月1日(土)

会 場：名古屋国際会議場（愛知県名古屋市熱田区熱田西町1-1）

U R L：https://robomech.org/2023/

第51回可視化情報シンポジウム

主 催：一般社団法人 可視化情報学会
 開 催 日：2023年8月8日(火)～8月10日(木)
 会 場：グラントパーク小樽（北海道小樽市築港11-3）
 U R L：https://www.vsj.jp/symp2023/

EcoDesign2023 第13回環境調和型設計とインバースマニュファクチャリングに関する国際シンポジウム

主 催：エコデザイン学会連合
 開 催 日：2023年11月29日(水)～12月1日(金)
 会 場：奈良県コンベンションセンター（奈良県奈良市三条大路1-691-1）
 U R L：https://ecodenet.com/ed2023/

新型コロナウイルスの影響で協賛行事の開催予定が変更になっている場合があります。
 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。

会 告

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

2023年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ

開催日：2023年5月25日（木）、26日（金）

2023年春季フルードパワーシステム講演会は、機械振興会館（東京都港区）で開催いたします。本講演会では、一般講演に加えて、併設セミナー・製品技術紹介セッションを企画いたします。

- ・一般講演：2023年5月25日（木）、26日（金）
- ・併設セミナー：2023年5月25日（木）

- ・製品・技術紹介セッション：2023年5月26日（金）
- ・技術懇談会（50周年記念祝賀パーティ）：
2023年5月26日（金）

また、詳細は学会ホームページに随時掲載いたしますので、
 ご確認いただき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。

**2023年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー
「フルードパワーとハイブリッド」**

開催日：2023年5月25日（木）

2023年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナーを2023年5月25日（木）に機械振興会館（東京都港区）で開催いたします。

昨今、省エネルギー対応として、あらゆる産業分野でハイブリッド化が図られてきており、フルードパワーシステムにおいてもさまざまな形でハイブリッド化が進められてきています。

本セミナーでは、フルードパワーが他の動力源と結びついた

ことにより新たな付加価値が見いだされた活用事例を紹介します。

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54巻2号（2023年3月号）が当日の講演資料となりますので、各自ご持参いただき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。

**2023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：2023年5月26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、製品に係わる技術や検討課題などを学会主要行事のひと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となります。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。

日本フルードパワーシステム学会論文集53巻（2022）抄録

剛性可変指モジュールを用いた空気圧駆動高性能ロボットハンド
High Performance Pneumatic Robot Hand with
Variable Stiffness Finger Module

見上 慧, 只野 耕太郎

Kei MIKAMI, Kotaro TADANO

2022年53巻1号 p. 1-9 [DOI](https://doi.org/10.5739/jfps.53.1) https://doi.org/10.5739/jfps.53.1

A robot hand is required to generate a large grasping force. Furthermore, it is required that one finger should possess multiple degrees of freedom and the fingertips should be positioned freely to grasp and manipulate objects of various sizes and shapes. A function to adjust the stiffness is also required to control the force and realize stable grasping. The development of a hand with these functions at a high level is a technical problem. We propose a multi-degree-of-freedom finger module that uses pneumatic cylinders and a parallel link mechanism. The proposed hand has adjustable stiffness while maintaining high grasping force-to-weight ratio. In addition, the proposed hand was able to estimate the external force acting on the fingertip from the differential pressure and a kinematics model. By using the estimated external force for control, adjustable stiffness was realized without using a force sensor. This paper also describes the design method of the finger module. We experimentally confirmed that the proposed hand was able to satisfy various target specifications. In addition, it was able to realize multiple functions of a hand using a compact mechanism.

油圧アームのための同定入力の修正法と応用
Modification and Its Application of Identification Inputs for Hydraulic Arms

加藤 輝雄, 新井 遼, 酒井 悟

Teruo KATO, Ryo ARAI, Satoru SAKAI

2022年53巻1号 p. 10-17 [DOI](https://doi.org/10.5739/jfps.53.10) https://doi.org/10.5739/jfps.53.10

This paper discusses an identification input for nominal hydraulic arms. First, we focus on an input-output nonlinearity which exists even in the absence of nonlinear friction and prevents us from observing and measuring the input-output behaviors. Second, we propose a new identification input based on the physical parameters of hydraulic arms via the special nondimensionalization technique. Third, we show the effectiveness of the new identification input experimentally. Finally, we show an application of the proposed new identification input to observe and measure the input-output behaviors. Especially, in the frequency domain, we identify the uncertainty that was impossible for the conventional identification input.

**伝熱と摩擦を伴う空気圧管内定常流に関する研究
(モデル化と実験的検証)****A Study on pneumatic turbulent internal flow with heat transfer and friction
(Modeling and experimental validation)**

中野 和夫, 伊藤 陸, 村山 栄治, 川上 幸男

Kazuo NAKANO, Riku ITO, Eiji MURAYAMA, Yukio KAWAKAMI

2022年53巻2号 p. 19-27  <https://doi.org/10.5739/jfps.53.19>

The purpose of this research is a development of simulation models of pneumatic steady flow through straight uniform tubes with heat transfer and wall friction. Assuming that the tube wall temperature and the inlet air temperature are constant, the air temperature inside the tube approaches to the tube wall temperature along the flow direction and the effect of the heat transfer becomes negligibly small at the downstream region far from the entrance. We developed the two models which simulate the flow in the heat transfer region and in the adiabatic region respectively. They are serially connected to model the whole flow in the tube. We made use of feedback control techniques to solve the equations which described the two models. In the experiment the compressed air was supplied from the constant temperature tank to the copper tube which was set in the water jacket to adjust the wall temperature. The pressure at both ends of the tube and the mass flowrate were measured. The usefulness of the newly developed models was verified by comparing the simulation results with the experimental results.

EHDポンプを駆動源とした人工筋システムの開発**Development of artificial muscle system with EHD pump as a drive source**

武井 裕輔, 寺阪 澄孝, 下大川 丈晴, 三井 和幸

Yusuke TAKEI, Sumitaka TERASAKA, Takeharu SHIMOOKAWA, Kazuyuki MITSUI

2022年53巻2号 p. 28-35  <https://doi.org/10.5739/jfps.53.28>

The liquid inside the McKibben Artificial Muscle is extracted using the elasticity of the expanding body. Therefore, in order for the muscles to contract, a large pressure exceeding the elastic force of the expanding body is required. In addition, the calculation of the contractile force exerted by artificial muscles is extremely complicated and difficult to predict. In this study, we proposed and developed a new artificial muscle (The EHD artificial muscle) with an EHD pump driving source that can generate bi-directional flow by applying the EHD phenomenon. By using the EHD pump as the driving source, the muscle can be relaxed without the elasticity of the expanding body. In addition, the structure of the EHD artificial muscle is simpler than that of the McKibben type, and it is easier to calculate the contraction force to be output.

会 告

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会
賛助会員一覧表

(株)IH
(株)アイシン
(株)明石合銅
アズビル(株)藤沢テクノセンター
アズビルTACO(株)
(株)アドヴィックス
アネスト岩田(株)
イートン(株)
出光興産(株)
イナバゴム(株)
イハラサイエンス(株)
(株)インターナショナル・
サーボ・データー
(株)ウェーブフロント
(株)打江精機
(株)エムテック
エコ技術研究所 (合)
SMC(株)
SMC中国有限公司
(株)NF1
ENEOS(株) 潤滑油カンパニー
(株)荏原製作所
(株)大阪ジャッキ製作所
大瀧ジャッキ(株)
オカダイニングストリ(株)
鹿島通商(株)
(株)桂精機製作所
神威産業(株)
川崎重工業(株)精密機械・
ロボットカンパニー
川崎油工(株)
川重商事(株)
(株)神崎高級工機製作所
キャタピラー・ジャパン (合)
協和シール工業(株)
旭東ダイカスト(株)
(株)クボタ
KYB(株)
KYB-YS(株)
(株)工苑
甲南電機(株)
(株)古河製作所
(株)コガネイ
コスモ石油ブリカンツ(株)

(株)小松製作所開発本部
(株)小松製作所試験センタ
(株)小松製作所油機開発センタ
(株)阪上製作所
(株)鷺宮製作所
佐藤金属(株)
産経新聞 東京本社
三輪精機(株)
三和テック(株)
(株)ジェイテクト
(株)ジェイテクト
フルードパワーシステム
CKD(株)
(株)島津製作所
勝美印刷(株)
ジヤトコ(株)
新電元メカトロニクス(株)
住友建機(株)
住友重機械建機クレーン(株)
住友重機械工業(株)
制御機材(株)
第一電気(株)
ダイキン工業(株)
ダイキン・ザウアーダンフォース(株)
大生工業(株)
(株)TAIYO
タイヨー・インタナショナル(株)
ダイワ(株)
(株)タカコ
(株)タダノ
(株)都筑製作所
TMCシステム(株)
東京計器(株)
東京計器パワーシステム(株)
東京メータ(株)
東北特殊鋼(株)
東明工業(株)
東レエンジニアリング(株)
同和発條(株)
特許機器(株)
特許庁
TOHTO(株)
(株)豊田自動織機
長津工業(株)

中西商事(株)
長野計器(株)
中村工機(株)
ナブテスコ(株)
(株)南武
日新濾器工業(株)
日本アキュムレータ(株)
日本機材(株)
日本クエーカー・ケミカル(株)
日本工業出版(株)
日本精器(株)
日本製鉄(株)交通産機品カンパニー
日本電産トーンソク(株)
(一社)日本フルードパワー工業会
日本ムーグ(株)
(株)野村商店
(株)ハイダック
ピー・エス・シー(株)
日立建機(株)
(株)日立建機ティエラ
(株)日立製作所
廣瀬バルブ工業(株)
フエスト(株)
(株)フクダ
(株)不二越
二見屋工業(株)
ボッシュ・レックスロス(株)
昌富工業(株)
(株)増田製作所
マックス(株)
松巴鉄工(株)
三國機械工業(株)
三菱電線工業(株)
ヤマシンフィルタ(株)
ヤマハモーターハイドロリック
システム(株)
(株)山本金属製作所
油研工業(株)
(株)ユーテック
横河計測(株)
理研精機(株)
リバーフィールド(株)
(株)レンタルのニッケン

編集室

次号予告

—特集「フルードパワーとハイブリッド」—

【巻頭言】「フルードパワーとハイブリッド」発行にあたって

村岡 裕之

【総論】油圧ハイブリッド技術の最新動向

田中 豊

【解説】

油圧ポンプ回転数制御システムへの単純適応制御の適用

小川 恭右

ボンドグラフ法を用いた電空ハイブリッドアクチュエータのシステムモデル表現

肥後 寛

電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置

加藤 友規

空圧・電動ファクトリー

齋藤 悠

空気と水で動かす空水圧ハイブリッドロボット

玄 相昊

【会議報告】山梨講演会2022におけるフルードパワー技術研究

吉田 和弘

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る—今できることを精一杯やる—

畑中翔太郎

Youは日本をどう思う？第21回13年目での日本生活

李 晶

【企画行事】

2023年度企画行事紹介

桜井 康雄, 小林 亘

2022年度オースタムセミナー開催報告

名倉 忍

2022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 佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)

副委員長 山 田 宏 尚 (岐阜大学)

妹 尾 満 (SMC株)

委員 飯 尾 昭一郎 (信州大学)

谷 口 浩 成 (大阪工業大学)

飯 田 武 郎 (株小松製作所)

中 野 政 身 (東北大学)

岩 田 将 男 (CKD株)

中 山 晃 (日立建機株)

加 藤 友 規 (福岡工業大学)

藤 田 壽 憲 (東京電機大学)

北 村 剛 (油研工業株)

丸 田 和 弘 (株小松製作所)

窪 田 友 夫 (KYB株)

村 岡 裕 之 (株コガネイ)

栗 林 直 樹 (川崎重工業株)

吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)

五 嶋 裕 之 (株工苑)

担当理事 伊 藤 隆 (KYB株)

齋 藤 直 樹 (秋田県立大学)

学会事務局 成 田 晋

佐々木 大 輔 (香川大学)

編集事務局 竹 内 留 美 (勝美印刷株)

(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ないので、直接本会へご連絡ください。

個人会員各位

2023年 1月15日

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

2023年度会費納入のお願い

拝啓 時下益々ご清祥のこととお慶び申し上げます。

さて、2023年度（2023年4月1日～2024年3月31日）の会費を、下記の通りご納入賜わりたくお願い申し上げます。なお、すでにご納入くださいました場合は、なにとぞご容赦ください。

敬 具

記

2023年度 正会員会費 8,000円
(40歳未満で入会された方は、入会から5年間にかぎり4,000円となります。)
学生会員会費 2,000円

お 願 い

- ・2022年度以前の会費を未納の方は、新年度分（2023年度）とあわせてお振り込みくださいますようお願い申し上げます。
- ・会員名を必ずご記入ください。
- ・便利な自動振り込みは手数料が不要です。ご希望によりお申し込み書をお送りいたしますので、FAXまたはE-mailにてご一報いただきたく、よろしくお願い申し上げます。

以上

払 込 取 扱 票															払込票兼受領証																	
00		東京		口座番号 (右詰めにご記入ください)											金 額		千		百		十		万		千		百		十		円	
0		0		1		1		0		3				1		3		3		6		9		0								
加入者名				一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会											料 金				特殊													
通 信 欄				該当するものに○をつけ、お振込の内容をご記入ください。 1. () 年度 () 会費 企 業 名・[] 会 員 名・[] 2. () の代金																												
払込人住所氏名				(郵便番号)											受 付 局 日 附 印																	
				(電話番号 - -)																												
裏面の注意事項をお読みください。(郵政事業庁)(私製承認第23957号)																																

各票の※印欄は、払込において記載してください。

記載事項を訂正した場合は、その箇所に訂正印を押してください。

切り取らないで郵便局にお出しください。

払込票兼受領証	
口座番号	001103
右詰めにご記入ください	
	133690
加入者名	一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会
金 額	千 百 十 万 千 百 十 円
※	
払込人住所氏名	
料 金	(消費税込み) 受 付 局 日 附 印
	円
特殊取扱	

お振り込み先金融機関一覧

1. 郵便振替貯金 00110-3-133690

* 下の振替用紙をご利用いただけます。

(なお、この振替用紙は会費納入・資料購入・セミナー等受講料など総てにご利用いただけます。)

2. 三井住友銀行 日比谷支店 (普) 7611417

(注) * 口座名はいずれも「シャ) ニホンフルードパワーシステムガッカイ」です。

* 誠に恐れ入りますが、振り込み手数料はご負担くださいますようお願い申しあげます。

* 上記2をご利用の方で、会社名・大学名にてご送金の方は、個人名・内容・振込金融機関名を、FAXまたはE-mailで学会宛にご連絡くださいますよう、お願い申しあげます。

FAX : 03-3433-8442

E-mail : info@jfps.jp

この受領証は、郵便局で機械処理をした場合は郵便振替の払込みの証拠となるものですから大切に保存してください。

ご注意

この払込書は、機械で処理しますので、口座番号及び金額を記入する際は、枠内に丁寧に記入してください。

また、下部の欄(表面及び裏面)を汚したり、本票を折り曲げたりしないでください。

(日本郵政公社)

〒105-0011 東京都港区芝公園三丁目五-21 機械振興会館別館101 電話(03)3433-8441 FAX(03)3433-8442
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 東京00110-31233690

東京都文京区白山1-23-7 アクア白山ビル5階
印刷所 勝美印刷株式会社