

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN

FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

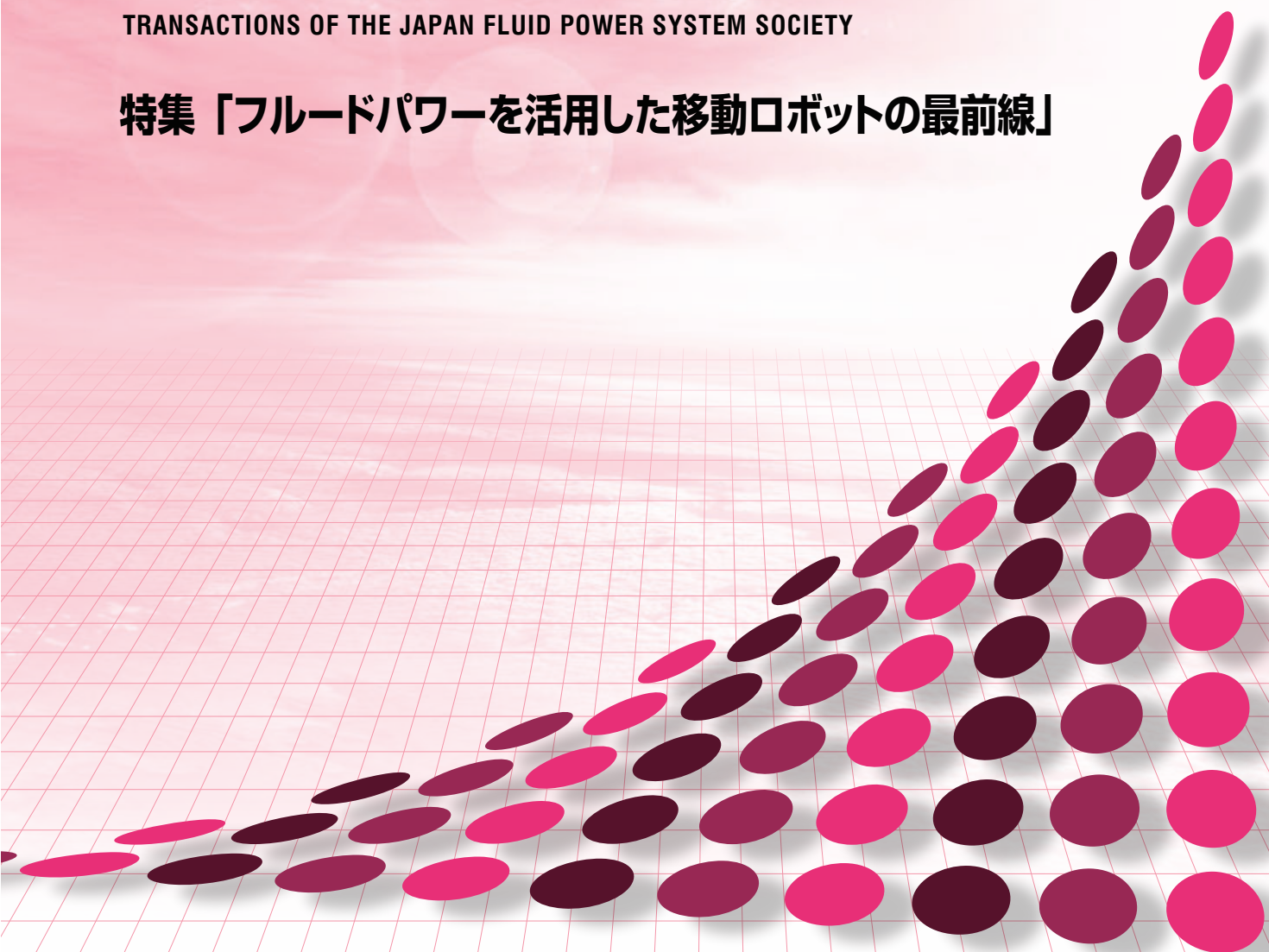
フルードパワー システム

Jan.2014 Vol.45 No.1

日本フルードパワーシステム学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」



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】

新年の挨拶	香川 利春	4
年頭にあって	築地 徹浩, 肥田 一雄, 北畠 多門	5

特集「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」

【巻頭言】

「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」発行にあたって	塚越 秀行	7
---------------------------------	-------	---

【解説】

空圧駆動によるヒューマノイド	細田 耕	8
高速かつ柔軟な油圧式2足歩行ロボット	玄 相昊	12
バブラアクチュエータの開発と内視鏡誘導への応用	鈴森 康一, 脇元 修一	16
電界共役流体を用いた小型壁面移動ロボット	竹村研治郎	20
柔軟袋状構造を利用した流体駆動型クローラ機構	木村 仁, 片岡木太郎, 伊能 教夫	24
先端成長動作による狭隘地形内の無摺動移動探索ロボット	塚越 秀行	28

【会議報告】

日本機械学会 2013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	32
第13回「運動と振動の制御」シンポジウム (MOVIC2013) 報告	村山 栄治	34

【トピックス】

ISO/TC131/SC9/WG1 ISO4413の改正	渋谷 文昭	36
タイ駐在員日記	栗田 敏行	39

【研究室紹介】

東京工業大学 香川・只野研究室紹介	金 寅, 矢島 拓実	42
-------------------	------------	----

【随想】

若いフルードパワー技術者に送る老いた電気屋フルードパワーファンの妄言	野見山紘一	44
------------------------------------	-------	----

【会告】

平成25年度 ウインターセミナーのお知らせ「大型機械と油圧技術」	47
触れて学べる！ 入門者向き実習講座「油空圧技術」	47
共催・協賛行事のお知らせ	47
平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー	
「フルードパワーに貢献する材料、加工、表面処理技術」のお知らせ	48
平成26年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	48
平成26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」のお知らせ	48
その他	35, 46, 49, 50

■表紙デザイン：山本 博勝 (株)豊島

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's Greetings	Toshiharu KAGAWA	4
A Letter of Greetings as an Inaugural Address from the Vice Presidents	Tetsuhiro TSUKIJI, Kazuo HIDA, Tamon KITABATAKE	5

Special Issue "Latest Information on Mobile Robots Using Fluid Power"

[Preface]

On the Special Issue "Latest Information on Mobile Robots Using Fluid Power"	Hideyuki TSUKAGOSHI	7
--	---------------------	---

[Review]

Humanoid Robots Powered by Pneumatics	Koh HOSODA	8
High-Speed and Compliant Hydraulic Biped Walking Robot	Sang-Ho HYON	12
Bubbler Actuators and their Application to Colonoscope Insertion	Koichi SUZUMORI, Shuichi WAKIMOTO	16
Wall Climbing Robot using Electro-conjugate Fluid	Kenjiro TAKEMURA	20
Fluid Power Flexible Crawler Mechanism Made of Flexible Bags	Hitoshi KIMURA, Mokutarou KATAOKA, Norio INOU	24
Tip Growing Motion and Its Mobile Probe Robot with No Friction inside Narrow Spaces	Hideyuki TSUKAGOSHI	28

[Conference Report]

Fluid Power Researches in JSME Mechanical Engineering Congress 2013	Shuichi WAKIMOTO	32
Report of the 13th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2013)	Eiji MURAYAMA	34

[Topics]

ISO/TC131/SC9/WG1 Revision of ISO4413	Fumiaki SHIBUYA	36
Diary of Expatriates in Thailand	Toshiyuki KURITA	39

[Laboratory Tour]

Laboratory Tour on Kagawa-Tadano Lab. in Tokyo Institute of Technology	In KIM, Takumi YAJIMA	42
--	-----------------------	----

[Essay]

A Letter from Old FLUID POWER FAN to Young Engineers	Koichi NOMIYAMA	44
--	-----------------	----

[JFPS News]

35, 46, 47, 48, 49, 50

挨拶

新年の挨拶

著者紹介

か がわ とし はる
香 川 利 春東京工業大学
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259
E-mail : kagawa.t.aa@m.titech.ac.jp1974年東京工業大学制御工学科卒業。精密工
学研究所およびメカノマイクロ工学専攻教授と
して自動制御・流体計測制御・生体計測の研究
に従事。また本学会会長、計測自動制御学会理
事、(社)日本機械学会フェロー。

1. 総 説

新年あけましておめでとうございます。本年が皆様にとって良い年になりますようにお祈りします。日本フルードパワーシステム学会では昨年より数々の改革を行ってきており、徐々に成果が上がって来ている状態です。会誌Vol. 44, No. 5にありますように、会員数では微増で賛助会員口数ではこの1年間で約2割の増加が達成できました。会員数でも大幅増で目標の1,000人を超えるはずでしたが、団塊世代技術者の退職に伴う多くの退会申し込みがあり、辛うじての増加となりました。改革や施策の詳細については副会長挨拶に記述がありますので、別な観点から学会の運営を紹介したいと考えます。

2. 産学連携

2.1 学会広報活動

日本フルードパワーシステム学会と工業会の産学連携委員会ではフルードパワー技術をできるだけ多くの初学者等に知ってもらおうとの趣旨でフルードパワーシステム紹介冊子を作成しています。全国の

工業高等専門学校他に無料で配布して、宣伝活動を行っています。現在社会の変改に合わせて改定作業を行っています。

2.2 産学連携出前講義

それぞれの分野の専門家がフルードパワーシステムの魅力を先方の組織で講演するもので、手間はかかりますが、好評を博しています。特に昨年から開始した企画に卓上実験装置を用いた出前講義が採用されました。日本フルードパワーシステム学会と工業会の共同で作成した、空気圧システムの真髄を学習するためのいくつかの装置です。これらは、等温化压力容器、空気圧シリンダのメータアウト速度制御装置とボルテックス浮揚実験装置です。

2.3 産学連携JIS原案作成

日本フルードパワー工業会に学会所属の多くの教員がJIS原案作成委員会に協力しています。産学連携により流量試験法の日本発ISO規約制定が成功したのは記憶に新しいですが、今後の省エネに関係したプロジェクトが期待されます。

3. 学会の展望

フルードパワーシステムを通して、ますます社会貢献のできるチャンスが広がることが考えられます。これらに対応するためには多くの若い人材にフルードパワーのことを知って貰うことが重要となっています。そのためには学会関係各位が鋭意努力する必要があります。と考える、皆様の協力をお願いし、新年の辞に代えます。

(原稿受付：2013年10月8日)

挨拶

年頭にあって

著者紹介



つき じ てつ ひろ
築 地 徹 浩

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

上智大学理工学部教授、大学院理工学研究科理工学専攻専攻主任、流体工学、油空圧工学、機能性流体の研究に従事。(一社)日本フルードパワーシステム学会副会長、日本機械学会、可視化情報学会、アメリカ機械学会などの会員、工学博士。



ひ だ かず お
肥 田 一 雄

川崎重工業株式会社 精密機械カンパニー
〒651-2239 神戸市西区栢谷町松本234番地
E-mail: hida_k@khi.co.jp

川崎重工業株式会社 執行役員、精密機械カンパニー 技術本部長、(一社)日本フルードパワーシステム学会副会長、日本機械学会会員。



きた ばたけ た もん
北 畠 多 門

SMC株式会社
〒101-0021 東京都千代田区外神田 4-14-1
(秋葉原UDX15F)
E-mail: tamon-kita@smcjp.co.jp

SMC株式会社常任顧問、日本フルードパワーシステム学会副会長、(一社)日本フルードパワー工業会副会長

1. はじめに

新年あけましておめでとうございます。年頭にあたり、平成24、25年度副会長を仰せつかりました私たちの連名でご挨拶を申し上げます。

日本フルードパワーシステム学会が一般社団法人へ移行した平成24年度より、新たな取り組みを香川会長の下、始めました。学会を運用するうえで、特に重要な目標は、財政基盤や学術基盤の強化などであります。

本学会にて意義ある活動、成果の上がる活動が継続的に行われ、それに意義、魅力を感じる正会員、賛助会員が多数活動に参画することが学会のさらなる発展につながると考えております。本ご挨拶では、そうしたさらなる発展を目指した新たな取り組みについて、これまでの成果と今後の努力目標を述べさ

せていただきます。

2. 学会内体制

平成24年度から会長副会長の4人で構成される会長副会長会議を発足させています。この会議の目的は、学会としての大きな方向付けの案を作成することです。さらに、各委員会から少なくとも一人の委員および会長と副会長が参加する基盤強化委員会で、学会の全体の委員会の活動状況を調整してきました。

3. 財政基盤強化の成果

これまでに、正会員と賛助会員の推移の分析や、会員増強のための諸準備を行い、それらの結果をもとに、正会員は勿論、特に賛助会員の入会に力を入れてまいりました。賛助会員の入会に関しては特に企業側の理事の皆様のご協力のお蔭で、2012年6月から2013年6月の間に、103社から124社に増加しました。今後も積極的に働き掛けを継続していく所存です。

4. 産学連携の強化

上述の会長副会長会議や基盤強化委員会等の会議により産学連携の強化策として、フルードパワー工業会との情報交換をこれまでに3回程度行いました。学会の活動を学会外、特に産業界に知っていただくことが重要と考え、その一環として新たに本学会の大学の教員の研究内容を紹介する『研究者リスト』の最新版を作成配布いたしました。

さらに、新たな研究委員会として「自動車の動力伝達・制御に関わるフルードパワー技術研究委員会」や「フルードパワーシステムにおける流体现象研究委員会」を発足させ、自動車関連や基礎流体工学研究分野の研究者や技術者の方々との交流を図る予定です。

5. 学会ホームページの更新

学会の活動内容がうまく学会内外に伝えられていない、それが会員増加の阻害要因になっているとい

うご意見が多く有ります。これまでに学会のホームページに関しても同様の多くのご意見をいただきまいりました。改善を図るため平成25年度の予算にホームページの更新費用を計上し、情報システム委員会の皆様のお陰で学会のホームページを一新いたしました。学会のホームページ<http://www.jfps.jp/>をご覧くださいご意見を頂ければ幸いです。

6. 学術基盤の強化

本学会として重要な基盤は、財政基盤とともに学術基盤です。学術基盤は、学会としての存在意義を持つために必要不可欠です。本学会の学術基盤として、春と秋の国内講演会および国際シンポジウムを開催しており、本学会主催で行われます。国内講演会において、春の講演会は総会とともに東京で行われますが、秋の講演会は東京以外で行われます。この秋の講演会が重要で、東京以外の地域の方々が本学会へ参加されやすいよい機会、学会の発展につながると考えられます。今年は、松江で国際シンポジウムが開催されます。

学会外の方も含め、講演会に多くの聴講者を集め

るために、講演内容予定を早く学会内外にアナウンスすることが重要と考え、取り組んでいます。

さらに、2013年1月から電子投稿に移行しましたフルードパワーシステム学会論文集を発行しています。今後、以上の講演会、国際シンポジウムおよび論文集の規模や質を高めていく必要があると思います。

7. 終わりに

以上述べてきましたように、今回は特に財政基盤の強化、産学連携の強化およびホームページの更新に力を注いでまいりました。今後、長期的視点や広い視点から、さらにこれらの内容の継続的な強化を行うとともに、学術基盤の強化も行うことが重要であると存じます。フルードパワー技術の発展を目指し微力ながら最大限の努力していく所存であります。

会員の皆様のご理解・関心とご協力をよろしくお願い申し上げます。

(原稿受付：2013年9月24日)

巻頭言

特集「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」 発行にあたって

著者紹介



つか 越 秀 行

東京工業大学大学院

〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 S5-19

E-mail: htsuka@cm.ctrl.titech.ac.jp

1998年東京工業大学大学院工学研究科博士課程修了。同大学助手を経て、2004年同大学工学部助教授、准教授、現在に至る。レスキューロボット、流体アクチュエータの研究に従事。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）。

1920年チェコの作家カレル・チャペックの戯曲で、人間に仕える奴隷として“ロボット”という言葉が初めて登場して以来、100年の歳月を迎えようとしている。この間、産業用ロボットに端を発し、さまざまなロボットが社会で実働し始めている。つぎの100年の間に、ロボットはどのように活躍の場を広げてゆくのだろうか？

1つの注目すべき兆候として、移動機能を備えたロボットが我々の生活圏で稼働し始めたことが挙げられる。たとえば、車輪式の掃除ロボットや警備ロボット、ヘリコプタ式農薬散布ロボット、クローラ式の床下点検ロボット、…など。これらの移動形態に着目すると、そのほとんどが電動モータで駆動される無限回転運動ばかりである。この背景には、電動モータの優れた応答性・制御性ととも、回転駆動系の簡便性・堅牢性・安全性などの理由が潜む。

その一方で、上記駆動系を凌駕する高いモビリティの出現も待ち望まれている。原発事故現場に投入されたクローラ型ロボットは、がれき凹凸面の移動やはしごの昇降動作への限界を露呈した。人間のように手足を駆使した移動や、跳躍と着地を安定にこなせるロボットが実現すれば、作業領域の拡大につながる。ネズミや蛇のように、体幹より幅の狭い間隙を潜り抜けながら縦横無尽に移動できるロボットの出現も待ち遠しい。

これらの実現には、外界を判断する知覚センサ・信号処理・多自由度の運動制御・柔軟構造材などの要素技術の進化に加えて、各々の移動形態に適したアクチュエータの創製が不可欠となる。

そもそも生物の筋肉には、電気モータに不向きな2つの特性が存在する。i) 対地適応性を向上させるバックドライバビリティ（外力で受動的に動くこと）。このお陰で凹凸に順応しながらの歩行が可能となる。ii) 高い筋肉率（＝全体重に占める筋肉の重さの割合で、成人男性の場合30～40%、タコは90%といわれる）で構成された剛性可変の体幹構造。生物的動作の体現に不可欠なこれらの特性は、フルードパワーアクチュエータの得意とする領域と考えられる。

そこで本特集号では、「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」と題し、当該分野で最先端の研究を展開されている大学研究者のみなさまより、最新の研究情報をご提供いただくことにした。

細田耕氏（大阪大学）には、空気圧人工筋を用いたヒューマノイドロボットをご紹介いただき、歩行制御の観点からみた空気圧人工筋のさまざまな優位性について解説いただいた。玄相晃氏（立命館大学）には、油圧式2足歩行ロボットをご紹介いただき、高出力を得やすい油圧駆動系の長所と力制御による柔軟運動の生成について解説いただいた。鈴森康一氏ら（岡山大学）には、バブラアクチュエータをご紹介いただき、薄肉ゴムチューブに弾性進行波が生成する原理と、その大腸内視鏡への応用について解説いただいた。竹村研治郎氏（慶応大学）には、電界共役流体を用いた小型壁面移動ロボットをご紹介いただき、ECFにより吸盤に吸着力を生成する原理とその応用について解説いただいた。木村仁氏ら（東工大）には、袋状構造を利用した柔軟な流体駆動型クローラ機構をご紹介いただき、剛性可変のアクチュエータによる移動原理を解説いただいた。塚越秀行（東工大）より、空気圧で生成される先端成長動作の原理とその無摺動移動探索ロボットへの応用について紹介させていただいた。

末筆ながら、ご多忙のなかご寄稿いただいた執筆者のみなさまに厚く御礼申し上げます。本特集号が、フルードパワーによる移動ロボットに関する最新情報の提供に資すれば、望外の喜びである。

（原稿受付：2013年11月7日）

解説

空圧駆動によるヒューマノイド

著者紹介



ほそ だ こう
細 田 耕

大阪大学大学院情報科学研究科
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
E-mail : koh.hosoda@ist.osaka-u.ac.jp

1993年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。大阪大学工学部助手、同大学大学院工学研究科准教授を経て、2010年同大学大学院情報科学研究科教授、現在に至る。生物型ロボットの研究に従事。日本ロボット学会、日本機械学会、IEEEなどの会員。博士（工学）。



図1 マッキベン型空気圧人工筋

1. はじめに

ヒューマノイドロボットとは、ヒトに類似の形態を持つロボットである。ヒトと同じような形であることによって、たとえば、人間と同じ環境で作業したり、人間と自然なコミュニケーションをしたり、あるいはヒトの身体構造の理解のための研究に使われるなどの目的に使用される。

本稿では、空圧駆動によって実現されるヒューマノイドロボットの移動に焦点を絞って解説する。ヒューマノイドロボットの移動様式は、二足による歩行、走行、跳躍である。これらを実現するために、著者らは、空気圧によって駆動される人工筋を用いてきた。

2. マッキベン型空気圧人工筋

まず、本解説で紹介されるヒューマノイドに使われている、マッキベン型空気圧人工筋（図1）について触れておく。この人工筋は、ゴムチューブが、ナイロン繊維で包まれた構造をしており、空気を供給すると、ゴムチューブが膨らむ力が、ナイロン繊維によって長手方向に変換される。サイズや構造によって異なるが、たとえば、著者らの研究グループで作成しているものについては、7気圧程度の圧縮空気を供給することによって、およそ20～30パーセントの収縮率、800N程度の力を出すことができる。

マッキベン型空気圧人工筋の、もっとも特筆すべき性質は、その柔軟性である。作動流体である空気の圧縮性と、ゴムチューブがもたらす弾性によって、

この人工筋は、外部からの力に応じて弾性変形する。この弾性が、ある程度、生体の筋肉に似た特性であり、後述するように、二足移動を実現するために重要な役割を果たす。

マッキベン型空気圧人工筋は、生体の筋肉のように、細長い形をしていて、長手引っ張り方向のみに力を発生することができる。このような性質を利用すると、ヒトに類似した骨格構造のロボットを作り、人工筋を付加することによって、ヒトの筋骨格構造をある程度再現したロボットを作ることができる。ヒトの筋骨格構造が、行動とどのような関係にあるのか、まだ生物学やスポーツ力学でも解明されていない点が多数存在しており、このようなヒト型のロボットを作ることによって、その行動原理や、背後に存在する力学的原理が明らかになることも期待されている。

これまでに開発されてきたヒューマノイドロボットの多くは、電気モータによって駆動されている。モータを用いることで、各軸について精密な制御を適用することができるからである。これに比べると、マッキベン型空気圧人工筋は、摩擦によるヒステリシスなどの非線形性が強く、流体による作動のための時間遅れが大きいなど、制御性という意味では電気モータの後塵を拝する。しかし、電気モータは、それを制御するコンピュータとともに、排熱が大きな問題となっている。空気圧人工筋の場合、このようなオーバーヒートの問題がなく、ヒューマノイド

のように、人間と同じ環境内で、長時間駆動する必要がある場合には、有利である。また、前述のように本質的に柔軟なので、衝突や衝撃に強く、衝突時に過大な力を生じにくい。それ以外にも、主要な部品を誘電性のない素材で作ることができるため、誘電が問題となる局面に使用しやすく、動作による電磁ノイズも発生しにくいなどの利点もある。

3. 空気圧人工筋を用いた歩行

3.1 受動歩行と空気圧人工筋

電気モータを使って、二足歩行を実現する場合、モータが出力することができるトルクが小さいため、歯車やハーモニックドライブなどで減速し、各軸を駆動することがほとんどである。その場合、減速機には大きな摩擦が生じるため、各リンクにかかる力によって逆にモータを動かすことは難しい（バックドライブバリティが低い）。このような制御対象の場合には、歩行を実現するために、あらかじめ（あるいはオンラインで）重心移動を計算しておき、それを実現するための各軸の目標軌道を計画、これに各モータが追従するような制御則を適用するケースがほとんどである。こういった制御則に基づいてロボットを動かすと、各モータへの軌道追従制御や、バランス制御、あるいは地面と衝突した時の力制御の計算量が莫大になり、しかもロボットがバランスを崩さないためには、非常に速い処理が必要となる。

一方で、各関節の軌道追従ではなく、ロボット自体の動特性、つまりリンクが受ける重力と慣性力によって、軸からの駆動を受けずに、緩やかな斜面を下る受動歩行と呼ばれる歩行が、McGeerらによって提案されている¹⁾。受動歩行は、重力と慣性力のみでロボットが駆動されるため、斜面を下ることしかできないが、これに駆動力を加えることによって、平面や上り坂でも歩行させることができる。この時に使われる駆動様式には、さまざまな方法が考えられるが、空気圧人工筋を使うと、純粋に重力のみによって動く相と、人工筋によって駆動力を加えられている相を作りやすい。このような考え方に基づいて、オランダ、デルフト大学のWisseらは、二足歩行ロボット「Mike」²⁾、「Max」³⁾、「Denise」³⁾を、筆者らの研究グループでは、空気圧人工筋駆動二足ロボット「空脚」⁴⁾、「Pneuman」⁵⁾、「Pneumat-BT」⁶⁾などを開発した（図2）。

これらの研究の中でも、特に興味深いのは、空気圧人工筋の特性を利用した、拮抗の変化による速度の調整⁷⁾である。これまでの二足歩行ロボットの歩行速度を変化させるためには、重心の速度を定義し、その動きにしたがった、幾何学的計算から、各関節



図2 空気圧人工筋駆動二足ロボットPneumat-BT⁶⁾

の軌道を算出、これに各モータを追従させることによって実現していた。しかし、空脚の場合、駆動するための人工筋と拮抗関係にあるもう一本の筋肉が発生する力を調整することによって、直接的ではなく、間接的にロボットの歩行速度を変化させることができる⁷⁾。

なお、著者が知る限り、空気圧人工筋によって動く二足歩行ロボットには、これら以外にブリュッセル自由大学のVerrelstらによる「Lucy」⁸⁾があるが、このロボットの場合、ロボットの動きから各関節の動きを設計し、空気圧人工筋を使った追従制御を適用するという、従来の電気モータによる制御と大差ない制御則を使っている。電気モータを用いた人工筋を使って歩行ロボットを作る研究もあるが、フルードパワーの範疇から外れるため、ここでは割愛する。

3.2 空気圧人工筋による下肢筋骨格構造の実現

一つの回転関節を動かすには、二本の空気圧人工筋を拮抗に配置すればよい。矢状面内（足を振り出す方向を含む面内）を運動する下肢を作るためには、腰、ひざ、足首の三関節が必要なので、計6本の人工筋が最低限必要となる。しかし、ヒトの場合には、これ以外にも二つの関節をまたがる二関節筋と呼ばれる筋肉が存在し、関節間の力の伝達や連動をつかさどっていると言われている。空気圧人工筋はヒトの筋肉のような形状をしているため、このような二関節筋を含む冗長な筋骨格系を、工学的に再現し、その機能を詳細に調べることができる。このような設計思想に基づいて、片足当たり5対9筋の構造を持つ二足ロボット「Pneumat-BB」⁹⁾（図3）、「Pneumat-BR」¹⁰⁾を開発した。二関節筋の強度（＝空気量）を調整することによって、関節間の連動、とくにひざと足首の連動を変化させることができ、ひざを曲げるこ

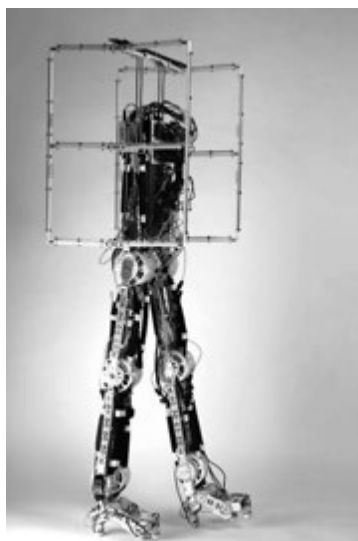


図3 ヒトと類似の筋骨格構造を持つ空気圧人工筋駆動二足ロボットPneumat-BB⁹⁾

とによって、足首を自動的に背屈（つま先を上にあげる方向に曲げる）させることができる。各関節の軌道を詳細に設計し、制御する必要がなくなるという意味で、非常に興味深く、また実際の生物でも同様のことが起こっているのではないかと重要な知見を得ることができた。

4. 空気圧人工筋を用いた跳躍・走行

4.1 関節の柔らかさと跳躍・走行

各関節が、電気モータと減速器によって駆動されるロボットによって、跳躍や走行を実現するためには、着地時の衝撃力を瞬時に計測し、それに対する各関節の応答を計算、計算された軌道に沿って各モータを制御するという、非常に計算コストの高い方法を使わざるを得ない。また、過大な衝撃力がかかった時には、モータや減速器が破損するという危険性もある。

空気圧人工筋は、本質的にやわらかいため、外力に対して計算コストなしに、ばねのような応答を示すことができる上、用いられているナイロン繊維の強度は、大きい衝撃力でも破断することはない。そして、このような空気圧人工筋を、各関節に拮抗に配置し、あらかじめ適度な弾性を持たせておくことによって、ロボットに跳躍や走行をさせることができる。このような考え方に基づいて、二足ロボット「空脚R」（図4）を設計し、関節が持つ弾性と、歩行、走行、跳躍などの移動様式の関係について明らかにした¹¹⁾。

ここでの問題点は、走行、跳躍を実現するために、各人工筋の駆動のための弁操作をどのように設計するかである。著者らのグループでは、ロボットの自



図4 空気圧人工筋駆動ロボット 空脚R¹¹⁾

立性を確保するために、各人工筋の駆動には、体積と重量が大きくなってしまふ比例弁や圧力弁ではなく、ON/OFF弁を用いている。各人工筋への給気は、流体による作動の遅れなどがあり、数百ミリ秒の時間遅れが生じる。このような遅れにもかかわらず、ロボットを走行、跳躍させるためには、各弁を開閉するタイミングを設計する必要があるが、結果的に速度の速いフィードバックなしの制御則でも走行が可能なのは、人工筋の拮抗構造からもたらされる柔軟性のおかげである。

4.2 ヒトに似た下肢筋骨格構造と跳躍

空脚Rは、各関節の連動を、弁の開閉タイミングの詳細なプログラムによって生み出すことで、跳躍、走行することはできたが、そのような連動を、前述したような、二関節筋を含む複雑な筋骨格系で実現できないか、という問題に取り組んだのが、次に紹介する「空脚K」である（図5）。歩行について研究した経緯と同様に、各関節に拮抗する二本の筋を配置しただけの空脚Rに、関節間の連動を生み出すために、二関節筋を付け加えたような構造を作った¹²⁾。歩行のためのロボットと同様に、このロボットにも5対9筋と呼ばれる、ヒトの下肢が持っている基本的な筋構造と同等の構造を持たせた。各関節の連動タイミングは、二関節筋に、あらかじめある程度の空気を供給しておき、これが自動的に生み出す連動を利用する。

図6に、二関節筋の一つ、腓腹筋（図5の#9の筋）の強度を変化させたときの、跳躍方向の変化についての実験結果を示す。実際のロボットの動きを、モーションキャプチャで観察した。下のグラフほど、腓腹筋に空気を供給する弁を開ける時間を長く、つまりより腓腹筋を緊張させたときの実験結果である。腓腹筋が緊張することにより、ひざと足首の間には

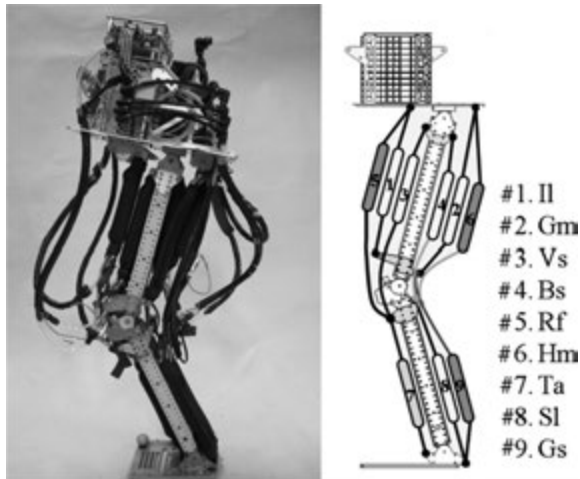


図5 空気圧人工筋駆動ロボット の空脚K¹²⁾のと筋配置

強い連動が起こる。その結果、跳躍姿勢が変化していることが、この実験結果の重要な点である。跳躍するためのエネルギーは、ほかの筋のよって供給され、しかも、それらについての弁の操作は変化しないにもかかわらず、腓腹筋の強度のみを変化させることによって、跳躍方向を変えることができるということは、これまでのロボットのように、跳躍方向を変えるためには、それをもたらす各軸の軌道を再計算し、追従するための各軸制御を適用する、という方法論とはまったく異なる。

5. おわりに

マッキベン空気圧人工筋は、材料に起因する柔軟性を持ったフルードアクチュエータであり、制御しにくい特性にもかかわらず、ヒューマノイドの歩行、跳躍、走行といったさまざまな移動様式を実現するために有効であることが、これらの実験結果から理解いただけたのではないかと思います。また、科学的にも興味深いのは、ヒトに似た筋骨格系を持つロボットを作ることにより、各筋の機能に関する知見を得られることである。

参考文献

- 1) McGeer, T.: Passive Dynamic Walking, The International Journal of Robotics Research, Vol.9, No.2, p.62-68 (1990)
- 2) Wisse M., van Frankenhuyzen, J.: Design and Construction of MIKE; a 2D autonomous biped based on passive dynamics walking, Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (2003)
- 3) Wisse, M.: Three additions to passive dynamic walking: actuation, an upper body, and 3D stability, IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (2004)

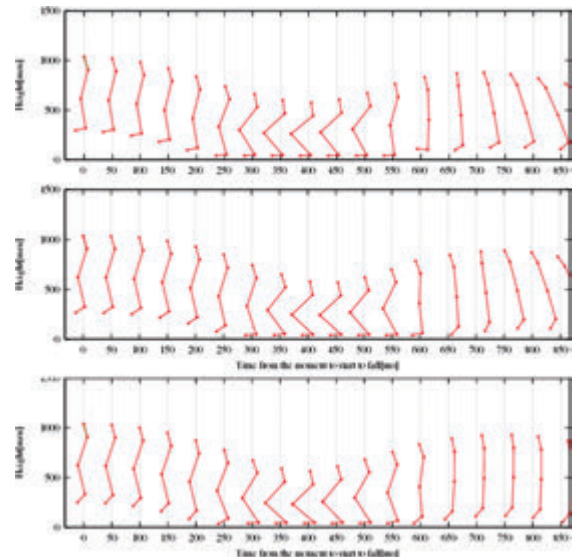


図6 腓腹筋の強度を変えたときの空脚Kの跳躍姿勢の変化¹¹⁾。下の方がより腓腹筋の強度が高い。

- 4) Takuma, T., Hosoda K.: Controlling the Walking Period of a Pneumatic Muscle Walker, International Journal of Robotics Research, Vol.25, No.9, p.861-866 (2006)
- 5) Hosoda, K., Takuma, T., Ishikawa, M.: Design and Control of a 3D Biped Robot Actuated by Antagonistic Pairs of Pneumatic Muscles", Proceedings of 3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines (2005)
- 6) Narioka, K., Hosoda, K.: Designing Synergistic Walking of a Whole-Body Humanoid Driven by Pneumatic Artificial Muscles: An Empirical Study, Advanced Robotics, Vol.22, No.10, p.1107-1123 (2008)
- 7) Takuma, T., Hosoda, K.: Controlling Walking Behavior of Passive Dynamic Walker Utilizing Passive Joint Compliance, 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p.2975-2980, (2007)
- 8) Verrelst, B. et al.: The Pneumatic Biped "Lucy" Actuated with Pleated Pneumatic Artificial Muscles, Autonomous Robots, 18, p.201-213 (2005)
- 9) Narioka, K., Homma, K., Hosoda, K.: Roll-over shapes of musculoskeletal biped walker, AT - Automatisierungstechnik, Vol. 61, No. 1, p.4-14 (2013)
- 10) 細田耕：発見的バイオロボティクスアプローチと適応的2足歩行, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, p.479-484 (2010)
- 11) Hosoda, K., Takuma, T., Nakamoto, A., Hayashi, S.: Biped robot design powered by antagonistic pneumatic actuators for multi-modal locomotion, Robotics and Autonomous Systems, Vol.56, No.1, p.46-53, (2008)
- 12) Hosoda, K., Sakaguchi, Y., Takayama, H., Takuma, T.: Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure, Autonomous Robots, Vol.28, Issue 3, p.307-316 (2010)

(原稿受付：2013年9月19日)

解説

高速かつ柔軟な油圧式2足歩行ロボット

著者紹介

げん そう こう
玄 相 昊立命館大学理工学部ロボティクス学科・准教授
〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1
E-mail: gen@fc.ritsumeai.ac.jp1998年早稲田大学大学院修士課程修了。
2002年東京工業大学大学院博士後期課程修了。
同年東北大学大学院工学研究科助手、講師を
経て2005年ATR脳情報研究所研究員。
2010年4月 立命館大学理工学部ロボティクス
学科准教授、現在に至る。博士（工学）。

1. はじめに

工場はもちろん、建設、医療、福祉、宇宙など、さまざまな作業現場で人と協調しながら複雑な作業を行う高性能ロボットが求められている。現状、過酷な環境で大きな力を出して作業できる強靱な機械は、油圧ショベルだけといっても過言ではない。油圧ショベルは東日本大震災における原発事故の現場でも用いられ、がれき撤去や除染作業にも大いに活躍した。また、油圧ショベルが危険な場所で作業を行えるよう、遠隔で機械の位置を把握し自動的に運転を行うシステムの開発が、すでに大手建機メーカーを中心に進められている。

しかし、強い不整地や、狭い屋内、重量制限のある崩れやすい斜面など、どうしても建機や車両が侵入しにくい場所で、単にカメラで情報収集するに留まらず、一定の力を発揮する力作業が求められることがある。人が道具を持って行けば解決できるのに、命の危険があるためにそれ以上は先に行けず悔しい思いをさせられる作業現場や災害現場は世界中にどこにでもある。その要求に真っ先に応えることができるのは、恐れを知らず、人間の命令に忠実に従う、「オモチャでないヒト型のロボット」である。一旦そのようなロボットが進路確保などの難しい初期作業を行ったならば、その直後に汎用作業機械が大挙して侵入し、効果を拡大することができる。このような場面でもたまたたり故障率の高いロボットがまったく役に立たないことは明らかである。

著者らは、陸上動物の極限運動の一種である高速

走行が可能な脚式移動ロボットの実現を目指し、その制御理論とハードウェア試作を長年行ってきた。特に1999年には、ダイナミックな連続跳躍ロボットのための油圧サーボアクチュエータと制御系の開発に成功しており¹⁾、2010年からは、当大学において、軽量かつパワフルな油圧式ヒューマノイドロボットの研究を本格化した。そして今回、複数のメーカーの協力を得て、下半身部と専用制御装置の開発に成功した。このロボットは2004年度からATR脳情報研究所の川人らがJSTの計算脳プロジェクトのもとで開発した油圧駆動ヒューマノイドロボットの研究成果²⁾⁻⁴⁾をもとに、ハードウェアの国産化と高性能化を独自で達成したものである。

現在、米軍で開発中の油圧式歩行ロボットがネット動画やマスコミで話題を集めているが、今回我々が開発した新しいロボットは、軽量であること、高速であること、力制御による柔軟な運動制御が可能である点に特長がある。以下、本稿では開発したロボットについて簡単に紹介する。

2. ロボットの概要

2.1 ハードウェア概要⁵⁾

開発したロボットの概観を図1に示す⁵⁾。本ロボットは以下の特徴を有するヒューマノイドロボットの下半身部として設計されたものである。

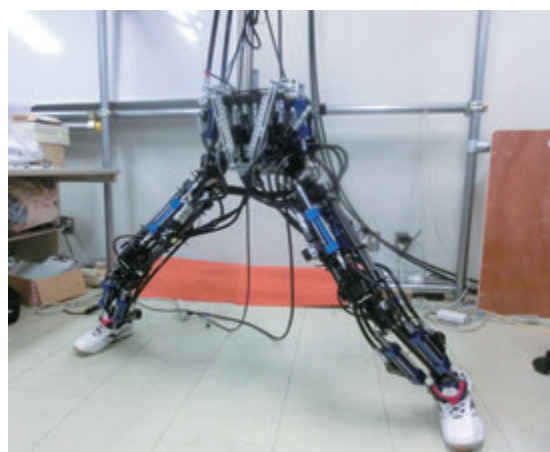


図1 ロボットの概観

- 1) 人と同等のサイズ（身長，重量）
- 2) 人と同等な関節トルク，関節角速度
- 3) 人と同等な可動角
- 4) 堅牢さ（転倒しても壊れない）

現在は脚部と骨盤のみで身長120cm，体重38kgである．数値は日本人の成人男性の大きさを参考に設定した．今後胴体と双臂，頭部を順次追加する予定である．各関節には角度センサと力センサが組み込まれており，アクチュエータは油圧ホースを介して外部のポンプで駆動される．

自由度構成は人のそれと異なるが，足部の位置と姿勢を任意に定めることができる最低限の構成とし，図2のように定めた．脚部の自由度は片脚6自由度とし，この上に胴体と双臂，頭部が取り付けられる予定である．

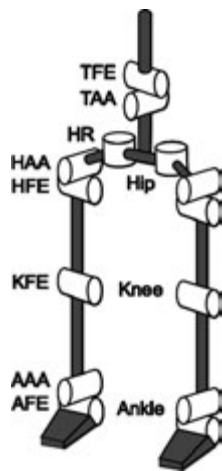


図2 関節の自由度構成

本ロボットは外部の油圧ポンプによって駆動される．油圧駆動を採用した理由はつぎの3点である．

- 1) 油圧源を外部に置くことによって，ロボット本体のパワー密度を簡単に高くできる
- 2) 油圧サーボは応答が速いため，制御系設計次第で，精密な力加減ができる
- 3) 油圧アクチュエータは構造が単純なため，無限回転しない関節をシンプルかつ軽量に構成するのに向いている．

現在のほとんどのヒューマノイドロボットは人間と比較してかなり鈍重である．繰り返すが，ノロノロと歩く上に力も出ないヒューマノイドロボットは作業移動ロボットとしてはまったく役に立たない．そこで，我々は油圧駆動のメリットを活かし，少なくとも人間と同等のスピードが出せるようメカの仕様を決定した．

具体的には，関節の仕様を表1のように定めている．各数値は人間の走行と跳躍データから決定した．

人間と同等の広い可動角を有している．最大トルクおよび速度は供給圧力21MPaにおける理論値である．なお，供給圧力は動作中に任意に変更可能であり，通常は4 MPa程度に下げている．

表1 関節の仕様（供給圧21MPaにおいて）
（関節名は図1を参照のこと）

Joint	RoM deg	Max torque Nm	Max velocity deg/s
TFE	−50/50	—	—
HFE	−100/30	360	1,370
KFE	0/130	345	1,490
AFE	−50/50	734	1,300
TAA	−15/15	—	—
HAA	−50/50	405	820
AAA	−15/15	830	830
HR	−20/20	440	820

本ロボットにおいては軽量化と単純化に特に注意を払っている．図3にロボットの構造を示す．土木工事で活躍している油圧ショベルを参考に，油圧シリンダをトラス構造の一部として利用し，油圧シリンダと構造部材にかかる力を一方向に整え，その方向にカーボン繊維強化プラスチック素材の強度を持たせることで，軽量化と強靱化を実現している．足首関節は干涉駆動になっている．構造が単純で部品点数も少ないため，従来の電動ロボットよりも低価格で製造可能と予想される．現在，一部のリンクのみカーボン製であるが，順次カーボンの比率を上げていく予定である．

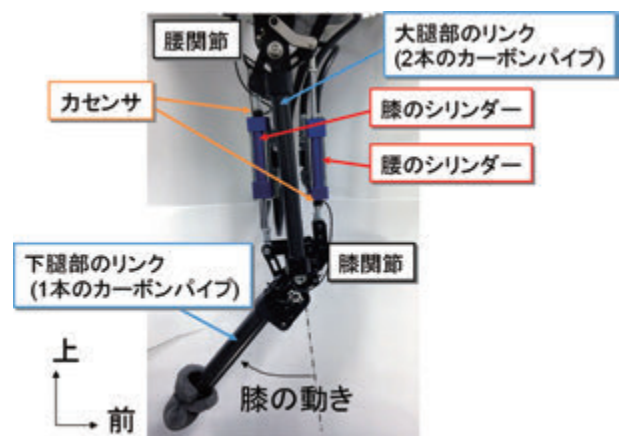


図3 ロボットの脚部構造

2.2 制御システムと力制御⁶⁾⁷⁾

油圧シリンダには小型で高応答なサーボバルブが

取り付けられている。これにより、シリンダの速度を応答性良く操作可能であるが、シリンダに力センサを追加し、その力情報をフィードバックしてバルブを操作することで力制御が実現可能である。つまり、ロボットの関節トルクを自在に制御できる。各アクチュエータには独自に開発したデジタルサーボコントローラが接続されており、局所的な位置、速度、力制御を実装している。コントローラはイーサネットを介して外部のホストPCにおいて実時間制御される。

なお、ロボットの力制御に関しては、最近、関節にトルクセンサを組み込むことで力を自在に制御する産業用ロボットが量産販売されているが、従来の電動ロボットに力センサを組み込んだものであり、ギヤの出力軸が負荷に直結する場合に直面する脆弱性が克服されているわけではない。また、電動ロボットではギヤを使ってトルクを稼ぐため、ギヤが持つ慣性が邪魔をしてアクチュエータの応答性が大きく低下してしまうという問題がある。

2.3 力制御による柔軟な全身運動

図1のロボットの試作の前に、まずは図3のテストモデルを製作し、その性能試験として、高速スイング、遊脚の重力補償制御、支持脚重力補償制御、ばね運動等を行った。動画は <http://p.tl/clyN> から閲覧可能である。このうちばね運動実験というのは、ロボット全体がばねのように振舞うような目標モデルを設定し、そのモデルが発生すべきトルクを指令し、挙動を評価する実験である。実際の実験データは文献⁷⁾を参照されたいが、力の追従性が良好であることがわかった。

実は、この一連の評価実験が成功すれば、ロボット全体のハードウェア開発上の問題はほとんど残らない。実際、図1のロボットのハードウェアが完成してから全身運動制御の実装は短時間で終わっている。図4にバランス制御の様子を示す。ロボットがシーソーの上に乗って、転倒ないように全身を動かしながらバランスをとっている。重心位置の他に胴体の姿勢を水平に保つ制御を重ね合わせている。

このデモで用いている全身運動制御アルゴリズムは、JST計算脳プロジェクトにおいて著者らが2006年に開発し、特許公開した技術で、実験結果の詳細も発表済みである³⁾⁻⁴⁾。位置決めをベースとした従来の方法とはまったく異なる、トルク制御をベースとした制御方法である。また、ハイパワーでありながら、人間のように、脱力したり、小さい力から大きい力まで、微妙に力を加減することができるので、ユーザーが自分の身体を想像しながら直感的にロボットを操作可能で、難しい作業を直接教示したり

学習させたりすることができる。一部はJST計算脳プロジェクトにおいて発表されている²⁾。さらに、今回開発したロボットは当時のロボットよりもはるかに軽量で、アクチュエータのスピードも3倍程度高いので、著者らの従来の研究を上回る成果が期待できる。

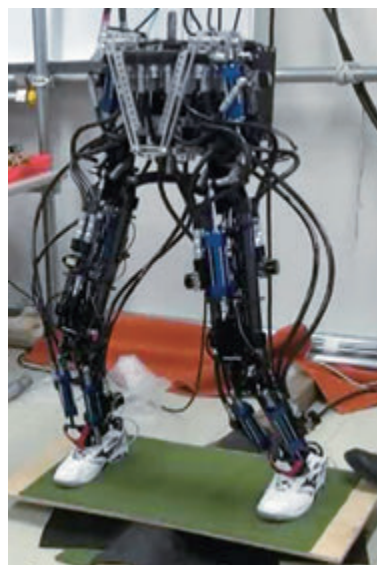


図4 力制御によるバランス制御の様子

3. おわりに

以上、本稿では、研究室で独自に開発した油圧歩行ロボットについて開発の経緯と概要を紹介した。技術的な詳細は今後学会で順次発表していく予定である。なお、同時並行で開発中の双腕ロボットと4脚歩行ロボットを含めて、「国際ロボット展2013」に展示予定である⁸⁾。

歩行ロボットの場合、他のロボットと異なり、自重と機構の複雑さが運動（2足歩行など）を制御するソフトウェア開発の障害になっていたが、今回、軽量かつ強靱なロボット開発に成功したことにより、これまで蓄積してきた歩行制御技術などのノウハウを無駄にすることなく、安全かつスピーディにソフトウェアを継続発展させる環境が整った。大学のリソースと国産技術のみで開発を成功させたことにも重要な意義があると考えている⁵⁾⁻⁸⁾。

高度なヒューマノイドロボットを実現するために油圧が必ず必要ということではまったくない。単に、目前の問題を解決する最短の方法を考えた結果、油圧という手段を用いてただけである。ただ、電動の等身大ヒューマノイドロボットも扱ってきた著者自身の経験を踏まえると、油圧は故障が少ないというメリットを強く感じる。また、複雑な機構を用い

ない限り、スケーリングが容易に行えるため、大小さまざまなロボットに技術を応用可能であると考えられる。さらに、近年発展が著しい油圧ハイブリッド技術、作動油や材料の改良など、要素技術発展の伸び代が大きく、それがロボットの運動性能の向上に直結する可能性があるとするれば、「ロボット制御屋」として目が離せない。

応用先としては、現時点では油圧源を外部に置くため、移動距離に制約があるものの、工場に備え付けの産業用ロボットはもちろん、過酷な環境でスピーディかつ高負荷な作業達成が要求される重作業支援ロボットや災害対応ロボット、福祉機器、宇宙医学、スポーツ機器の高性能シミュレータなどが考えられる。しかし、著者自身はヒューマノイドロボットの持つ非常に広範囲な研究プラットフォームとしての価値をとことん追求していきたい。とくに重視している目標は、人と同じサイズで人と同じ力と運動能力を達成することである。これは、かつて誰も達成したことがないが、人型のロボットの実用性を問うために必要な「最低限」の目標である。

最後に、多大なるご協力をいただきました関係各社様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 玄相昊, 上條敏, 美多勉, 動物の脚構造をモデル化した1脚走行ロボット-Kenken-, 日本ロボット学会誌, vol. 20, no. 4, pp. 453-462 (2002).
- 2) JST国際共同研究「計算脳プロジェクト」終了報告書 (2009).
- 3) Hyon, S. and Cheng, G., Passivity-based full-Body force control for humanoids and application to dynamic balancing and locomotion, IEEE/RSJ IROS, pp. 4915-4922 (2006).
- 4) 玄相昊, 複数の接地部分と冗長関節を有するヒューマノイドロボットの受動性に基づく最適接触力制御, 日本ロボット学会誌, vol. 27, no. 2, pp. 178-187 (2009).
- 5) 末若大輔, 石田浩基, 玄相昊, 油圧式軽量2足歩行ロボットの開発 (第1報): 機構設計とシミュレーション, 平成25年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 28-30 (2013).
- 6) 米田知生, 細山貴弘, 玄相昊, 油圧式軽量2足歩行ロボットの開発 (第2報): カサホ駆動試験, 平成25年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 31-33 (2013).
- 7) Hyon, S., Yoneda, T. and Suewaka, D., Lightweight hydraulic leg to explore agile legged locomotion, IEEE/RSJ IROS, pp. 4655-4660 (2013).
- 8) Ishida, H., Suewaka, D., Nishi, H., Hyon, S., Development of torque-controlled hydraulic robot platforms, IEEE/RSJ IROS, Workshop (2013).

(原稿受付: 2013年10月14日)

解説

バブラアクチュエータの開発と内視鏡誘導への応用

著者紹介



すず もり こう いち
鈴 森 康 一

岡山大学大学院自然科学研究科
〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1
E-mail: suzumori@sys.okayama-u.ac.jp

1990年横浜国立大学大学院博士課程修了、株式会社東芝を経て、2001年岡山大学教授、現在に至る。アクチュエータ、ソフトメカニズムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会正会員、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。



わき もと しゅう いち
脇 元 修 一

岡山大学大学院自然科学研究科
〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1
E-mail: wakimoto@act.sys.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、岡山大学助教を経て、2011年同大学准教授、現在に至る。空気圧アクチュエータの開発とその応用に関する研究に従事。日本ロボット学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員、博士（工学）。

1. はじめに

筆者らは、小型のソフトロボットの移動デバイスとして、ゴム構造体内部に設けた圧力室に空圧をかけて順に変形を起こして動作するアクチュエータを考案し¹⁾、バブラアクチュエータと呼んで研究を進めている。バブラ (bubbler) とは、このデバイスの表面に生じる変形が、次々と押し寄せる波のように見えることから名付けたものである。柔軟な構造を持つため、走行面の凸凹形状になじみやすい、走行面を傷つけない、水等がかかる箇所でも使える、狭い平板間などにも入り込める、安価に形成できるのでディスポーザブル（使い捨て）アクチュエータとしても使える、形状が簡単なので小型化に向く、等々、従来の車輪やクローラ方式の移動機構にはできなかったユニークな特性を持つ。

もともとは、狭い2枚の壁にはさまれた狭隘空間に計測器を挿入するために開発を始めたものだが、その後、内視鏡の外周に巻きつけることにより、自走機能を持った大腸内視鏡への研究に展開している。

本稿では、開発の経緯に沿ってバブラアクチュ

エータを紹介してゆきたい。

2. バブラアクチュエータ

2.1 平面型バブラアクチュエータ

図1に初めに開発したバブラアクチュエータの構造を示す。このバブラアクチュエータはシリコンゴムの一体成型品で、内部に12個の正方形断面を持つ空間（圧力室）を有している。各圧力室には、それぞれ細い送気チューブが接続され、外部の制御弁で内圧を制御できる。

各圧力室を順に加圧してゆくと、図2や図3に示すように、ゴムが弾性変形してバブラアクチュエータの表面に弾性進行波が形成される。図2は移動機構としてではなく搬送機構として用いた例である。

バブラアクチュエータ表面に形成された多数のフィンは、バブラアクチュエータ表面に発生する弾性進行波の動きを拡大し、移動速度を上げる働きをする。

有限要素法解析により、変形を起こしやすい形状、寸法、ならびに加圧パターン（印加圧力、波長、駆動周波数、デューティー比（圧力室の数に対する、一度に加圧している圧力室の数）の最適化を行い、設計している。一例を示すと、図1の寸法のもので、質量48g、波長6部屋分、デューティー比1/2の条件で、静摩擦係数0.3の水平平面上を、無負荷時に4.5mm/s、垂直方向10N負荷時に3.7mm/s、水平方向5N負荷時に1.8mm/sで移動する。

2.2 円筒型バブラアクチュエータ

平面型バブラアクチュエータの原理を、パイプ内の移動に応用したのが、円筒型バブラアクチュエータである²⁾。このアクチュエータは、図4に示すように、円筒状の形状を持つゴムの一体成型品である。円筒の外壁内部に、0.8mm×0.6mmの断面形状を持った圧力室が4組（図4上図ではA, B, C, Dで示す）組となって螺旋状に形成されている。このような構成にすれば、アクチュエータの端面に出てくる4つの圧力室の端から空圧を印加するだけで、外壁内に形成された複数の圧力室を4つおきに加圧することができる。要するにそれぞれの圧力室に空気を送る

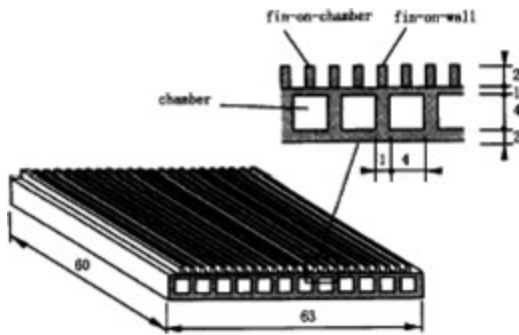
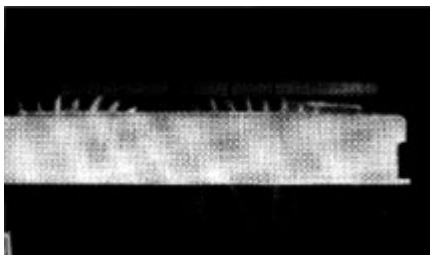


図1 バブラアクチュエータの構造



(a) コインの搬送（上面）



(b) ガラスプレートの搬送（側面）

図2 バブラアクチュエータ

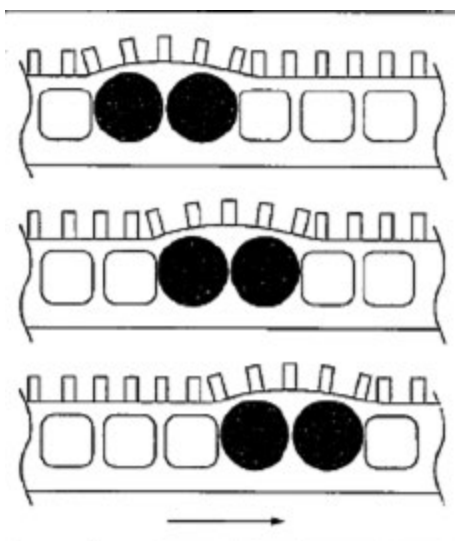


図3 バブラアクチュエータによる弾性進行波

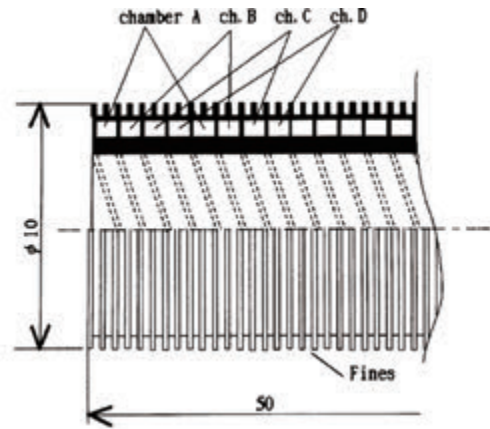


図4 円筒型バブラアクチュエータ

ための送気チューブが4本だけで済むのである。

各圧力室を順に加圧してゆくと、アクチュエータの外周壁表面にはゴムの変形により弾性進行波が生成される。図4に示す試作機は、内径11mmのアルミパイプ内を最高0.8mm/sの速度で移動する。

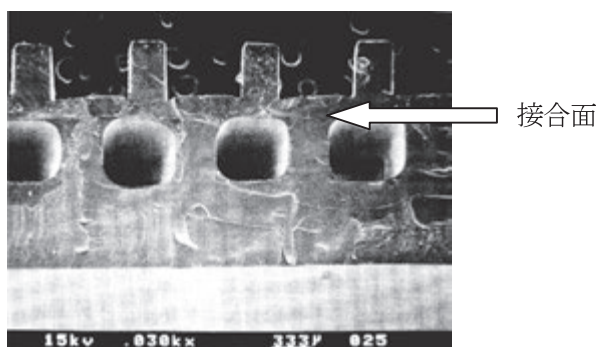
このアクチュエータの開発でもっとも難しい点は、容易に推測できると思うが、外壁内部に4条の螺旋状の空間をどのように形成するかである。これはなかなか難しい。

筆者らが採用した製法は、外周にフィンを形成した薄肉ゴムチューブと、同じく外径に4条の螺旋状の突起構造を形成したゴムチューブをそれぞれ成形し、前者の薄肉チューブの内面と、後者の螺旋状突起の先端を接合する方法であった。接合には、圧力室をつぶさないようにしなければならないので接着材などを使うのは難しい。そこで、触媒で前者チューブの内壁と螺旋状突起構造先端を化学的に接合しやすい状態にしておき、両者を被せて高温処理して接合する方法を取った。図5に当時製作した円筒型バブラの断面を示す。最初の試作段階のものであまりきれいにはできていないが、気密等十分な強度を得られた。

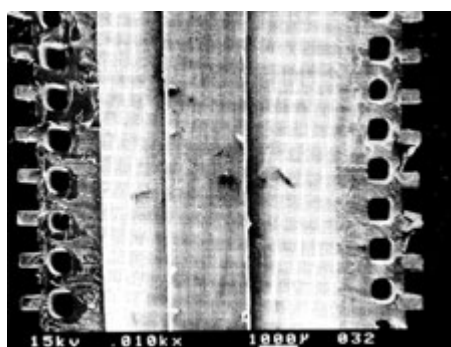
3. 大腸内視鏡への応用

3.1 チューブ巻きつけ型アクチュエータ

このような研究を進めているうちに、これを大腸



(a) 圧力室とフィン（下側の白い部分が円筒型バブラ中心の空間部）



(b) 断面全体図

図5 円筒型バブラアクチュエータの断面

内視鏡の自走装置に応用しようという話が持ち上がった。大腸は変形しやすく屈曲箇所も多いので、大腸内に内視鏡を挿入するのは、熟練した医師にとっても必ずしも容易ではない場合がある。自走式の大腸内視鏡ができないだろうか、という話であった。

しかしながら、前述の円筒型バブラアクチュエータは製造が容易ではない。代わりに考え付いたのが、4つの圧力室を並べて形成した薄い平板状のゴムチューブを内視鏡に巻きつける方法であった。

図6に示すようなゴムチューブを押し出し成形し、これを内視鏡の外周に巻きつければ、円筒型バブラアクチュエータと同じ動作が得られる。

内視鏡に巻きつけて、大腸のモデルへの挿入実験をしたところ、ある程度自走することと、操作者の挿入に要する力が小さくなることを実験で確かめた³⁾。

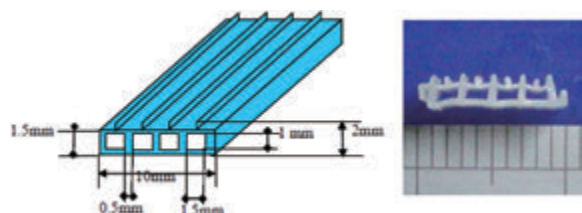
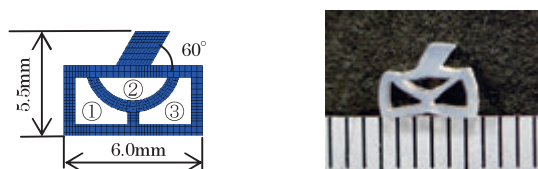


図6 平板チューブ型バブラアクチュエータ

3.2 内視鏡への応用を目指した新形状の導出

さらに高い挿入補助性を実現するために空気圧室の形状を変更したアクチュエータの開発を実施している。変位／断面積の大きさを評価指標として非線形有限要素法によってさまざまな形状を解析し、現状では図7(a)に示す断面形状を導出している⁴⁾。バブラは同一層に平行に配置された複数の圧力室から構成され、これを順に加圧することで進行波を生成していた。これに対して、新形状のアクチュエータでは3つの圧力室(①, ②, ③)が2層構造となっており、圧力室を表1に示す順に加圧(H)・減圧(L)していくことでアクチュエータ単体では、その上面のフィンで円状運動が行われる。このためアクチュエータを複数本、並行に配置し位相差をつけて駆動することで進行波が生成される。本形状ではフィンを斜めにするすることで、摩擦異方性を実現し大腸深部方向への推進性を高めている。図7(b)は製作したアクチュエータの断面形状である。



(a) 解析モデル断面 (b) 製作したアクチュエータの断面

図7 2層構造チューブ型アクチュエータの断面形状

表1 空気圧印加パターン

①	L	H	H	H	L	L
②	L	L	H	H	H	L
③	L	L	L	H	H	H

図8は直径6mmの樹脂ロッドに2本のアクチュエータを平行に巻きつけて、樹脂板上で駆動した際の様子である。本実験では7.1mm/sでのロッドの推進が確認されている。

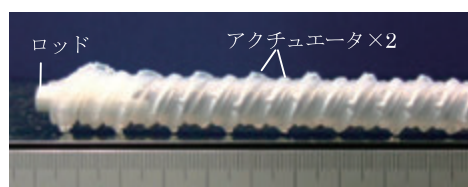


図8 樹脂ロッド搬送実験

3.3 大腸モデルへの挿入実験

既存の大腸内視鏡は操作者からの挿入力によって押し込まれていく。そのため剛性の高い機構となっ

ている。これに対して、アクチュエータによる推進性の付加が実現できれば、低剛性の内視鏡の挿入が実現でき患者への負荷の軽減が可能となる。

図9は市販の工業用内視鏡の外皮を剥がすことで低剛性内視鏡を製作し、これに2本のアクチュエータを搭載したものである。なお、先端のステアリング機構には湾曲型のゴムアクチュエータであるFlexible Microactuator (FMA) を用いている⁵⁾。

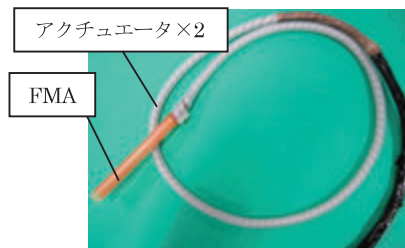


図9 アクチュエータを搭載した低剛性内視鏡

既存の大腸内視鏡とアクチュエータを搭載した低剛性内視鏡を用いて、大腸モデルへの挿入実験を行った。図10(a)は既存の大腸内視鏡挿入の状態を図10(b)はアクチュエータを搭載した低剛性内視鏡の挿入の状態をそれぞれ示している。既存の内視鏡では腸管の湾曲部であるS状結腸部を直線化させる必要があるのに対して低剛性内視鏡では腸管部に沿った状態での挿入が可能となっている。現状では低剛性内視鏡によって上行結腸の入口までの挿入が可能であった。なお、アクチュエータを搭載しない場合、あるいは駆動しない場合ではS状結腸の通過さえも不可能であった。

この挿入実験では大腸モデルの湾曲部にセンサを



(a) 既存の大腸内視鏡の挿入



(b) 低剛性内視鏡の挿入

図10 大腸モデルを用いた挿入実験

搭載し、腸壁と内視鏡間で発生する負荷を計測している。センサの搭載箇所は図10(b)の①～④である。図11は各々の内視鏡を用いて5回の挿入実験を行った際に計測された最大負荷を示しており、従来の内視鏡ではS状結腸①や下降結腸手前の湾曲部②に大きな負荷が生じているのに対して、アクチュエータを搭載した低剛性内視鏡ではその値が極めて低く抑えられていることがわかる。

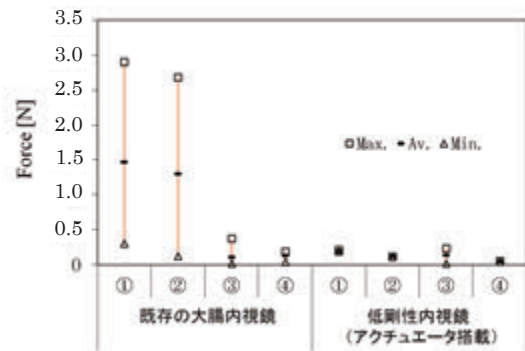


図11 挿入実験における負荷計測結果

4. ま と め

本稿では、筆者らが開発を行っているバブラアクチュエータに関して、その研究経緯を含めて紹介を行った。本アクチュエータは、ゴム構造体に設けた圧力室に空気圧を送る、という非常に単純な機構と駆動原理であり、これが大きなアドバンテージとなっている。応用として大腸内視鏡への適用を述べたが、安価で安全、かつ内視鏡全体に推進性を付加を実現する機構は従来のアクチュエータでは困難であり、本アクチュエータの特長が良く現れた例といえる。

参考文献

- 1) 鈴森康一, 進行波駆動型空圧ゴムアクチュエータの研究, 日本機械学会論文集 C, Vol. 64, No. 621 (1998-5), pp.1568-1573.
- 2) 鈴森康一, 関口貞雄, 空圧進行波アクチュエータ (bubller) の研究 (第2報: 円筒型bubllerの試作), 第14回日本ロボット学会学術講演会, (1996-11), pp.867-868.
- 3) Koichi Suzumori, Takayuki Hama, Takefumi Kanda, New Pneumatic Rubber Actuators to Assist Colonoscope Insertion, 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 995, pp.1824-1829, (2006-5)
- 4) 脇元修一, 山本陽太, 尾崎健, 鈴森康一, ラバーチューブアクチュエータによる大腸内視鏡挿入支援効果の検討, 平成24年度春季フルードパワーシステム講演会, (2012-5), pp.94-96.
- 5) 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, Vol.55, No.518, (1989-10), pp.2547-2552.

(原稿受付: 2013年10月23日)

電界共役流体を用いた小型壁面移動ロボット

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年慶大院後期博士課程修了。2002年慶大機械工学科助手、2003～2008年東工大精研助手、助教、2008～2012年慶大機械工学科専任講師をへて、2012年より准教授、現在に至る。機能性流体などの研究に従事。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

近年、生物が有する優れた移動能力をロボットに応用する研究が盛んに行われている¹⁾。なかでも、ミミズやシャクトリムシなどの柔軟生物は、構造や移動様式が比較的単純であるにもかかわらず、斜面、壁面、狭小空間などさまざまな環境下で移動できるため、ロボットの新たな移動様式として研究が行われている²⁾³⁾。

柔軟生物の移動様式は、蠕動運動を用いたミミズ型、および屈伸運動を用いたシャクトリムシ型の2つに大別される⁴⁾。筆者らはこれら2つの移動様式のうち、斜面などに対してよりロバストなシャクトリムシ型の移動様式に着目した。図1にシャクトリムシ型の移動様式を示す。シャクトリムシは、前後の脚を用いて対象面を保持する吸着動作、および胴体を屈伸させる屈伸動作を行い、この2つの動作を

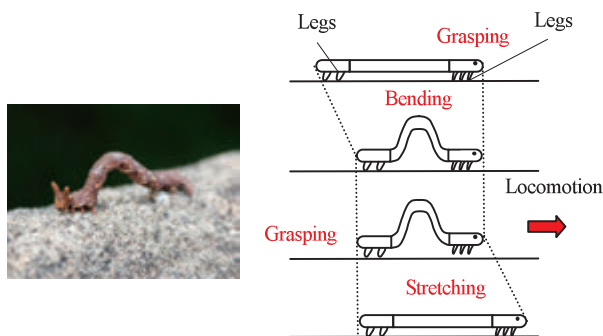


図1 シャクトリムシの移動様式

適切なタイミングで繰り返すことにより、前方へ移動する⁵⁾。吸着動作により体の一部を対象面に固定するため、ミミズ型の蠕動運動様式と比較して、斜面や壁面における移動においてロバスト性が高いと考えられる。

2. コンセプトおよび構造

2.1 コンセプト

シャクトリムシ型の移動ロボットを実現するためには小型のアクチュエータが必要である。また、ロボット全体の構造的な柔軟性を確保するためにはアクチュエータ自体の柔軟性も求められる。このため、直流電圧の印加によって活発な流動を発生する機能性流体である電界共役流体 (Electro-conjugate fluid, ECF) に着目した⁶⁾。液中に挿入した微小な電極対に電圧を印加するだけでマイクロ液圧源となり得るECFを利用すれば、容易に小型ソフトアクチュエータが実現でき、シャクトリムシ型ロボットの開発に有利である。図2にシャクトリムシ型ロボットのコンセプトを示す。ロボットは移動方向に対して

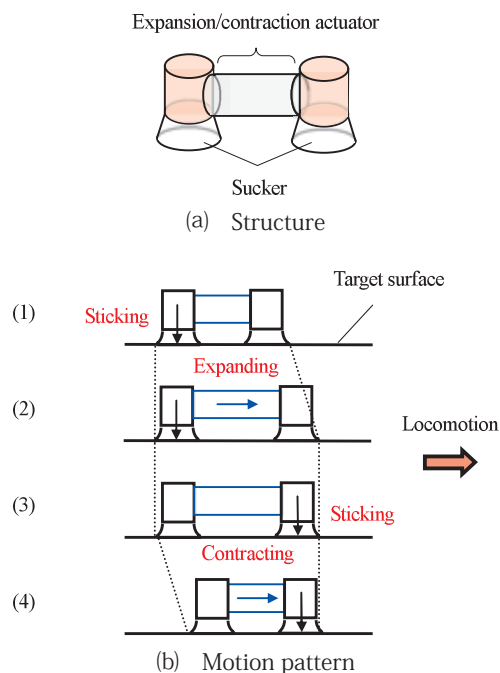


図2 シャクトリムシ型ロボットのコンセプト

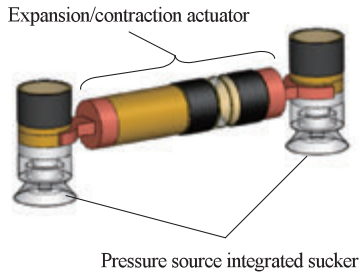


図3 シャクトリムシ型ロボットの全体像

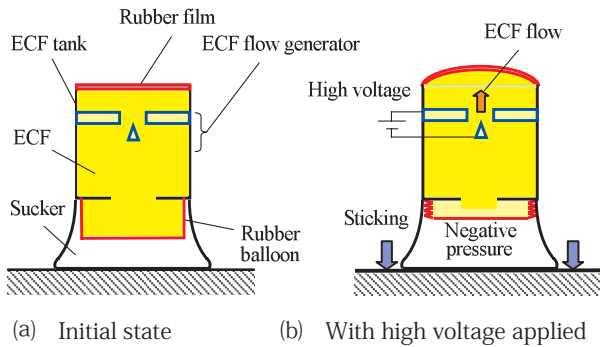


図4 圧力源一体型吸盤

前後に配置された2つの吸盤および伸縮アクチュエータにより構成されており、吸盤および伸縮アクチュエータはそれぞれ吸着動作および伸縮動作を行う。ここで、図1に示したシャクトリムシ型の移動様式における屈伸動作は、前後の脚を前方へ移動させることを目的としていることに鑑みれば、屈伸動作を伸縮動作に置き換えても全体の運動パターンに変化はない。

2.2 全体構造

シャクトリムシ型ロボットの全体像を図3に示す。図に示すように、ロボットは前後に配置された2つの圧力源一体型吸盤および伸縮アクチュエータにより構成されている。圧力源一体型吸盤および伸縮アクチュエータはECFを駆動源としており、それぞれが吸着動作および伸縮動作を担う。以下にそれぞれの具体的な構造を示す。

2.3 圧力源一体型吸盤

圧力源一体型吸盤を図4に示す。圧力源一体型吸盤は、図4(a)に示すようにECFの流動を発生させる流動発生部、ゴムフィルム、ゴムバルーン、ECFタンクおよび吸盤により構成されており、ECFタンクの内部はECFにより満たされている。また、流動発生部内には針-リング電極対⁶⁾が配置されている。なお、吸盤には工業用の真空輸送吸盤(Q10-SI, シュマルツ株式会社製, 材質:シリコンゴム)を用いた。流動発生部に高電圧を印加すると、図4(b)に示す矢印の方向にECFの流動が発生し、ゴムフィルムおよびゴムバルーンが変形する。この際、ゴム

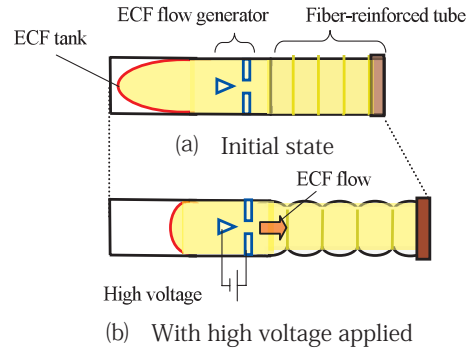


図5 伸縮アクチュエータ

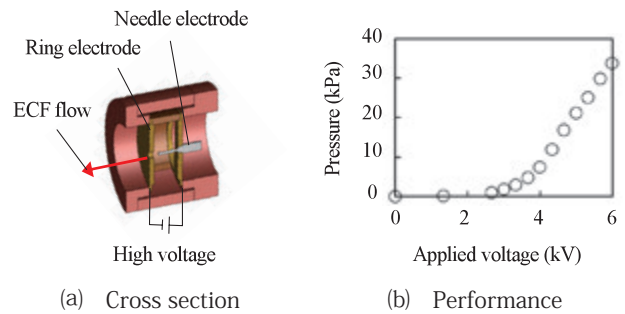


図6 流動発生部

バルーンが縮むことによって吸盤内部が負圧となり、吸盤は対象面に吸着する。また、電圧印加を停止するとゴムフィルムとゴムバルーンの弾性によって図4(a)の状態に戻る。以上のように、提案した圧力源一体型吸盤は吸着動作に真空ポンプや配管などを必要とせず、ロボットに一体化することができる。

2.4 伸縮アクチュエータ

伸縮アクチュエータを図5に示す。伸縮アクチュエータは図に示すように流動発生部、繊維強化ゴムチューブ⁷⁾およびECFタンクにより構成されており、内部はECFにより満たされている。このため、流動発生部に高電圧を印加すると、ECFタンクから繊維強化ゴムチューブ内部に向かってECFの流動が発生し、繊維強化ゴムチューブの内圧が増加する。繊維強化ゴムチューブは、円周方向に配置したアラミド繊維により周方向の膨張が拘束されているため、内圧の増加に従い軸方向に伸長する(図5(b))。また、電圧印加を停止すると、繊維強化ゴムチューブの弾性により図5(a)の状態に戻る。

3. 構成要素の性能

3.1 流動発生部

従来研究⁸⁾を参考に、針状電極の直径を0.13mm、リング状電極の内径を0.3mm、電極間距離を0.2mmとした針-リング電極対からなる流動発生部を製作した。構造と印加電圧に対する発生圧力を図6に示す。

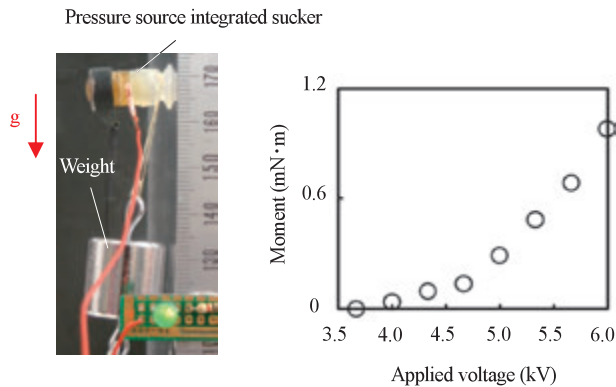


図7 圧力源一体型吸盤の性能

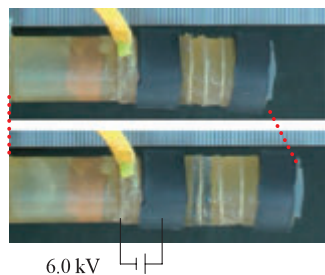


図8 伸縮アクチュエータの駆動の様子

ただし、作動流体はFF-101EHA2（新技術マネジメント社製）である。印加電圧の増加に伴って発生圧力は増加し、6.0kVで33.1kPaであった。

3.2 圧力源一体型吸盤

圧力源一体型吸盤を製作し、性能を評価した。図7に耐モーメント評価実験の様子と実験結果を示す。ただし、ここでの耐モーメントとは、図7(a)に示すように圧力源一体型吸盤におもりを吊り下げた際に、吸盤が垂直な対象面（アクリル）に吸着できる最大のモーメントである。図7(b)に示すように、本実験における最大耐モーメントは印加電圧6.0 kVの際の0.98mNmであった。これは、壁面から2 mm離れた位置に50gのおもりを吊り下げた時に相当する。なお、圧力源一体型吸盤は直径10mm、高さ21mmであり、質量は1.5gである。

3.3 伸縮アクチュエータ

伸縮アクチュエータを製作し、軸方向伸長率を測定した。実験結果を図8および図9に示す。図8は伸縮アクチュエータに内蔵された流動発生部に6.0kVを印加した際の様子である。また、図9は、伸縮アクチュエータに4.0kV、4.7kV、5.3kVおよび6.0 kVをステップ状に入力した際の応答を示している。図9に示すように、6.0kVのステップ入力に対して約0.8 sで最大伸長率7.94%に達した。なお、伸縮アクチュエータは直径9.5mm、全長34mmであり、質量は3.2gである。

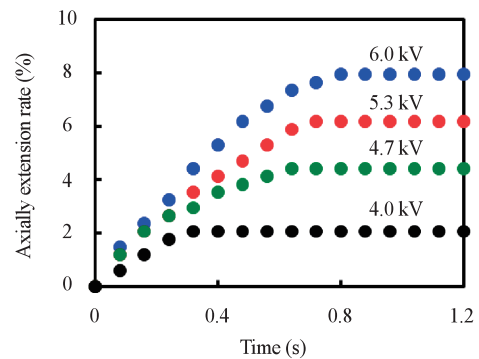


図9 伸縮アクチュエータのステップ応答

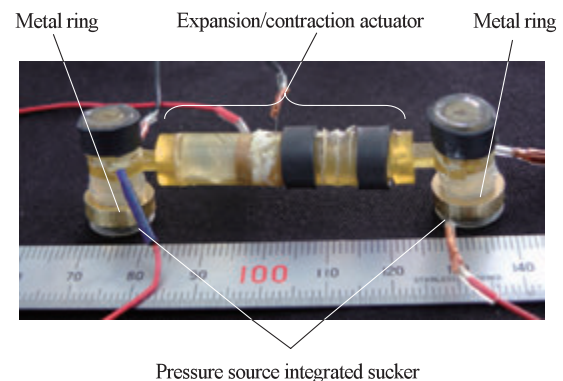


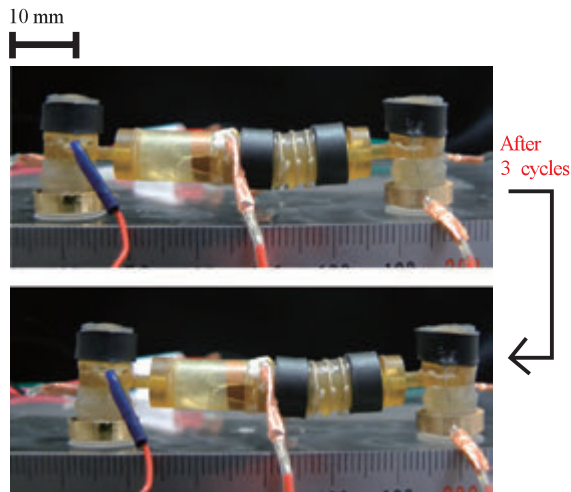
図10 シャクトリムシ型ロボットのプロトタイプ

4. シャクトリムシ型ロボット

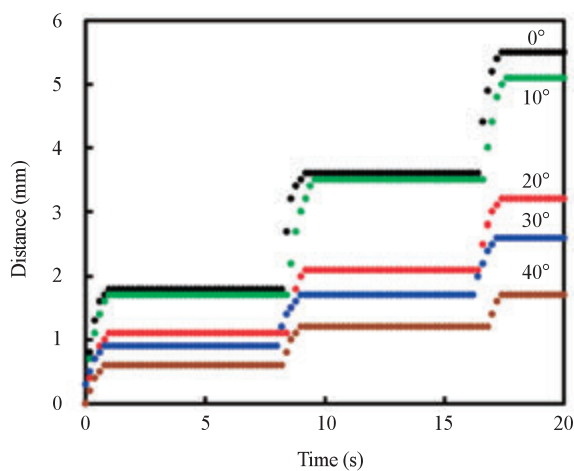
3章に性能を示した圧力源一体型吸盤および伸縮アクチュエータを用いて図10に示すシャクトリムシ型ロボットを製作した。ただし、圧力源一体型吸盤の吸盤部に金属リングを取り付けた。このリングは移動対象面に対して吸盤の密着度を向上させる役割を持つ。なお、ロボットは全長68mm、幅10mmであり、質量は9.5gである。

製作したロボットを用いて水平なアクリル板面上における駆動実験を行った。駆動実験の結果を図11に示す。図11(a)は、図2の(1)~(4)を1周期として3周期駆動させた際のロボットの様子を示しており、図11(b)は先端位置の時刻歴を示している。なお、各構成要素への電圧のON/OFFは手動で行い、印加電圧は6.0 kVとした。本実験より、ロボットは水平面において走行可能であることを確認した。また、図11(b)に示すように、開発したロボットの先端位置はシャクトリムシと同様、階段状の時刻歴を示している。なお、水平面においては1周期の伸長動作によって平均1.8mm移動した。

つぎに、傾斜角を10°ずつ増加させ斜面における駆動実験を行った。この結果、ロボットが駆動可能な最大の傾斜角度は40°であった。また、図11(b)に



(a) State of experiment (on a horizontal acrylic board)



(b) Results

図11 駆動実験の結果

示すように、斜面における駆動実験結果も水平面における実験結果と同様に、階段状の時刻歴を示していることがわかる。また、傾斜角度が増大するに従って1周期の伸長動作による平均移動距離は減少し、傾斜角 40° の際には平均 0.6mm であった。

以上より、製作したロボットは吸盤を用いることによりシャクトリムシの吸着動作を再現しており、傾斜角度 $0^\circ \sim 40^\circ$ の斜面においてシャクトリムシ型の移動様式により駆動可能であることがわかった。しかし、傾斜角が 40° を越える斜面ではロボットは移動できなかった。これは、圧力源一体型吸盤を対象面に押し付ける力が不足していたためであると考えられる。

5. おわりに

生物の優れた移動様式を取り入れたロボット開発の一例として、斜面や壁面でも移動可能なロボットの開発を目指し、ECFを駆動源とするロボットを提案した。プロトタイプを製作し、駆動実験を行った結果、ロボットは水平面および傾斜角 40° 以下の斜面において駆動可能であることを確認した。本ロボットはアクチュエータや吸盤、ポンプ、タンクなどを一体化した構造であり、駆動源としてECFを用いることによって柔軟生物型ロボットの実現が比較的容易であることがわかる。

参考文献

- 1) Menciassi, A., Dario, P.: Bio-inspired solutions for locomotion in the gastrointestinal tract : background and perspectives, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Vol. 361, p.2287-2298 (2003)
- 2) Qullin, J.: Kinematic scaling of locomotion by hydrostatic animals: ontogeny of peristaltic crawling by the earthworm lumbricus terrestris, The Journal of Experimental Biology, Vol. 202, p.661-674 (1999)
- 3) Zhang, H., Wang, W., Gonzalez-Gomez, J., Zhang, J.: A Bio-Inspired Small-Sized Wall-Climbing Caterpillar Robot, Mechatronic Systems Applications, InTech, p. 1-16 (2010)
- 4) Koh, J., Chu, K.: Omegabot: Biomimetic Inchworm Robot Using SMA Coil Actuator and Smart Composite Microstructures (SCM), Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, p.1154-1159 (2009)
- 5) Rincon, D., Sotelo, J.: Ver-vite: dynamic and experimental analysis fore inchwormlike biomimetic robots, IEEE Rociotics & Automation Magazine, Vol.10, Issue. 4, p.53-57 (2003)
- 6) Abe, R., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K.: Concept of a Micro Finger using Electro-conjugate Fluid and Fabrication of a Large Model Prototype, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 136, Issue 2, p.629-637 (2007)
- 7) Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K.: Development and control of a micro artificial muscle cell using electro-conjugate fluid, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 133, Issue. 2, p.493-499 (2007)
- 8) Yamaguchi, A., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K.: An In-Pipe Mobile Robot Using Electro-Conjugate Fluid, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 5, No. 3, p.216-226 (2001)

(原稿受付：2013年9月26日)

解説

柔軟袋状構造を利用した流体駆動型クローラ機構

著者紹介



きむら ひとし
木村 仁

東京工業大学大学院
〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1
E-mail: kimura@mech.titech.ac.jp

2004年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同大学助手。2007年同大学助教。現在に至る。生物に見られる水力学的骨格を利用した流体駆動柔軟機械システムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士(工学)。



かた おか もく たろう
片岡 木太郎

東京工業大学大学院
〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1
E-mail: kataoka.m.aa@m.titech.ac.jp

2012年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。生物に見られる水力学的骨格を利用した流体駆動柔軟機械システムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会学生会員。修士(工学)。



いの のり お
伊能 教夫

東京工業大学大学院
〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1
E-mail: inoue@mech.titech.ac.jp

1978年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同大学助手。1989年同大学助教。2000年同大学教授。現在に至る。生物に学ぶバイオメカニクス、セルオートマトンや骨組織に作用する応力解析や医療工学などの研究に従事。日本機械学会などの会員。工学博士。

1. はじめに

ミミズやイソギンチャクなどの生物は、袋状組織の内圧を調整することによってその剛性を変化させ、構造物あるいはアクチュエータとして利用している。このようなシステムを生物学用語で水力学的骨格系と呼ぶ¹⁾²⁾。この動作原理は非常に単純で、袋状構造は内部が加圧されたときに剛性が高くなり、減圧されたときに柔軟になるというものである(図1)。

著者らはこのような袋状構造の内圧変化を利用した柔軟なメカニズムをこれまでにいくつか提案している³⁾⁻⁵⁾。そのうちのひとつとして、今回は柔軟な流体駆動型クローラについて述べる。

便宜上、本稿では内圧を一定に保って構造部品として利用するものを構造骨格(Structural Bag)、加

減圧してアクチュエータとして利用するものを駆動骨格(Actuator Bag)と呼ぶことにする。



図1 柔軟な袋状構造の加減圧による剛性変化

2. 提案する柔軟クローラの基本構成と動作原理

提案する柔軟クローラの基本的構成方法を図2に示す。まず、隣り合う構造骨格同士が互いに回転自由になるよう連結し、履帯(クローラ)を構成する。基本構成では、この構造骨格の間に駆動骨格を配置する。折れ曲がった履帯部は駆動骨格が伸展したときに能動回転する。以上により基本的な柔軟クローラが構成される。

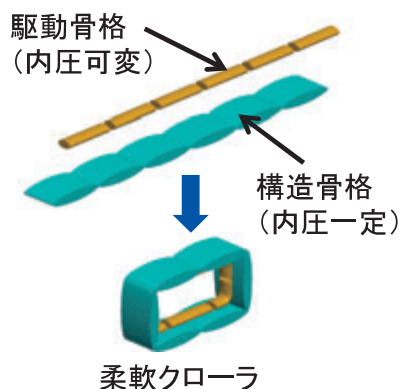


図2 柔軟クローラの基本構成

本クローラの動作原理を図3に示す。構造骨格ひとつ分の長さの移動が、本機構の加減圧サイクルとなる。加圧された駆動骨格のうち、最後尾を減圧し、これと同時に減圧された先頭部の駆動骨格を加圧するとクローラは前進する。加減圧する駆動骨格を逆にすれば後進も可能である。また、図ではクローラ上部の駆動骨格は駆動力の発生に寄与していないが、これらも利用すればトルクを2倍にすることが可能になる。しかしこの場合、必要な駆動流量も2倍

に増えることになる。

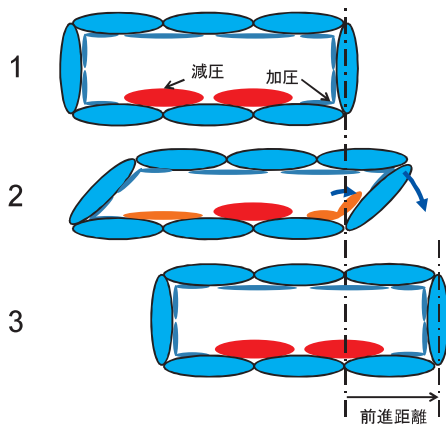


図3 柔軟クローラの動作原理

提案する柔軟クローラは、従来の金属やプラスチック製のものよりも地形に適応して柔軟に変形することが可能なため、不整地において高い走破性能が期待できる。車輪やクローラ機構で接地部分のみを柔軟にするという発想は以前から存在したが⁶⁾⁷⁾、提案機構は駆動部分も含めて機構全体が柔軟に変形できるまったく新しい構造である。

提案機構の動作を確認するために、試作機を作成した。試作機の圧力系統を図4に示す。本機構は圧力供給部にシリンダのような摺動部分がないため、油、空気、水などほとんどすべての駆動流体を利用可能である。また、管路を広くとってポペット式の弁を利用するなどすれば、多少汚れた駆動流体も用いることができる。この他、水中での応用時には用いる流体を水にすることで簡単に比重を1に近づけることができるという特徴もある。

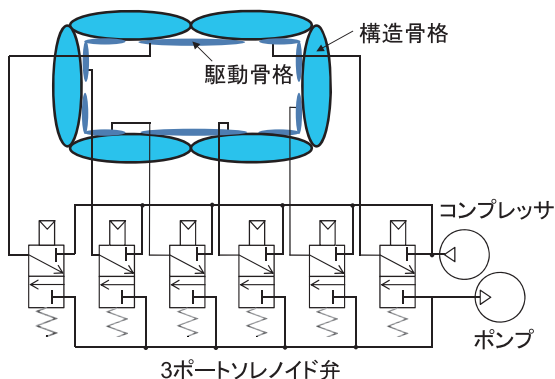


図4 試作柔軟クローラの圧力系統図

図5に試作した柔軟クローラの動作実験の様子を示す。実験コストを考慮し、本研究では駆動流体に空気を利用している。駆動骨格を順々に加減圧することで、実際に安定した前後進動作が可能なが確認できた。動作速度は構造骨格の全長約200mmに対して11m/s程度であった。この試作機は緩衝用

ビニール袋を構造骨格とし、駆動骨格には天然ゴムチューブに市販のエア継手を取り付けたものを用いている。また、袋状構造同士の固定には粘着テープを利用している。

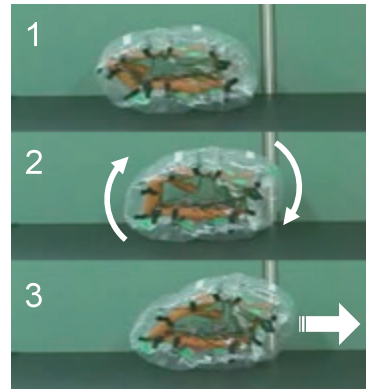


図5 柔軟クローラ試作機の動作実験の様子

実際の装置を作成する際には、部品同士の固定方法は重要なノウハウとなってくる。

機構全体の柔軟性を維持するためには、ネジなどの硬い部品を構造骨格や駆動骨格の固定に用いることは避ける必要がある。ただし、継手などの非可動部分で周囲を柔軟な部品で覆えるような場所においては、ネジなどの硬い部品を利用しても機構全体の柔軟性を大きく損なうことはない。

この柔軟クローラの応用例としては、図6に示すクローラの接地面積がロボットの投影面積のほとんどを占めるような全体が柔軟な移動ロボットや、クローラを内蔵した二重ループ構造の狭隘地形用移動ロボットなどが考えられる（図7）。

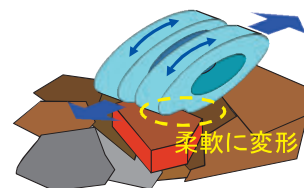


図6 柔軟クローラを利用した移動ロボット

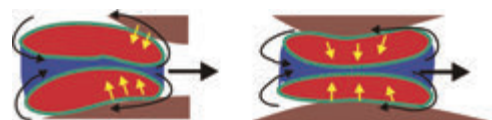


図7 二重ループ構造の狭隘地形用移動ロボット

通常の移動機構は金属やプラスチックなどの硬い部品で構成されているので、地形に挟まれるとスタックしてしまうが、この移動ロボットは全体が柔軟で全接地面が同一方向に駆動されるため、図7に示すように対地適応変形しながら走破できる。図8はこの二重ループ構造のロボットの構成手順である。

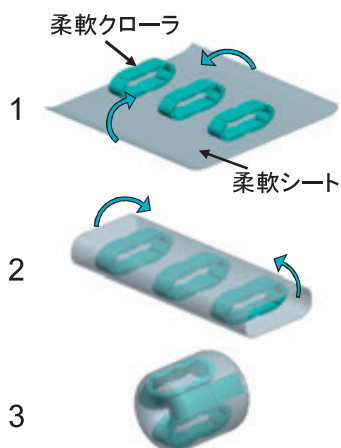


図8 全接地面が同一方向に駆動される柔軟移動ロボット

また、これらのロボットはコンプレッサや弁、コントローラといったものを袋状構造で包んでしまえば全体を柔軟に構成できるので、落下などの衝撃に対して非常に強い構造といえる。

3. クローラ性能の改良

3.1 兼用骨格（テーパ形状袋状構造）利用型

前節で述べた基本的構造の柔軟クローラは、図3や図5に示されるように、駆動時にクローラ高さが大きく変化する。特に、構造骨格が立ち上がるシーケンスでは、クローラ高さは最低でも構造骨格の長さひとつ分となる。これはクローラの高さが問題とならない場合には良いが、図8に示すような狭隘地形の走破などの用途には望ましくない。そこで本研究では、図9に示すような構造骨格と駆動骨格の働きを兼ねた兼用骨格を新たに作成した。

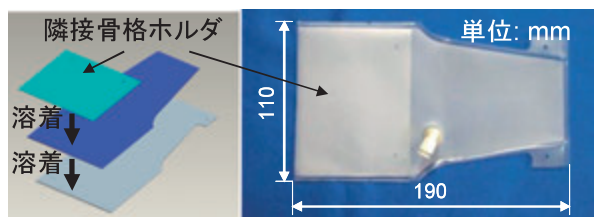


図9 テーパ形状を持った駆動／構造兼用骨格

これはテーパ形状の袋状構造に隣接骨格用のホルダを取り付けたもので、これらを鎖状に繋ぐことで柔軟クローラが構成される。この機構では先端部がアクチュエータとしてクローラを駆動するだけでなく、加圧されている他の袋状構造が構造骨格の働きを兼ねて直線形状を維持するものである。前述した試作機で利用した天然ゴムは、駆動力に寄与しない伸びが生じる。これを避ける目的で、この兼用骨格では0.2mm厚のウレタンゴムシートを複数枚重ねて、超音波ウェルダによって溶着して袋状構造を構成している。

著者らの過去の研究により、駆動骨格の発揮力は

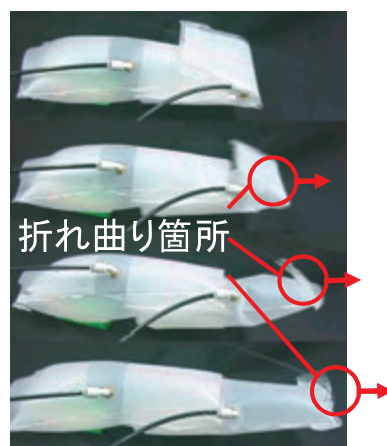


図10 テーパ形状によるせり出し動作

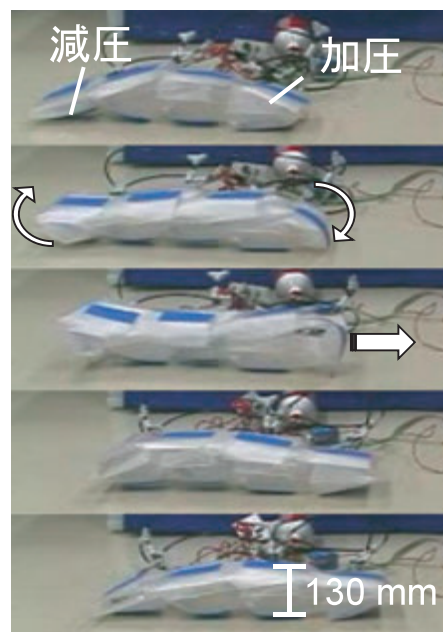


図11 動作中の最大高さを低減したクローラ動作

幅の3乗に比例することがわかっている⁸⁾。したがってテーパ形状の袋状構造は加圧されると幅の広い根本部分から段々と幅の狭い先端部分に折れ曲がり箇所を移動するようにして伸展する（図10）。このため、本クローラでは構造骨格の立ち上がり動作によって全高が大幅に変動することがない。

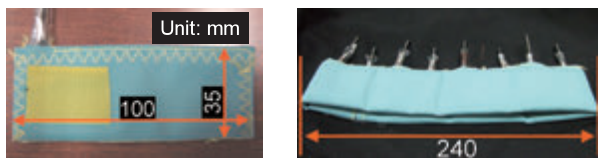
図11は試作した兼用骨格によるクローラの動作実験である。図に示されるようにクローラの全高はほとんど変動せず、最大でも約130mmであり、骨格一個分の高さ190mmよりも小さな全高で動作が可能であることが確認できた。しかし、自立駆動用の小型ダイアフラムコンプレッサ（HARGRAVE社製E129-13-120）を用いた場合、最高速度は約5 mm/s程度であった。

3.2 強化骨格利用型

前述した兼用骨格利用型は、クローラ全高を低く維持することには成功したが、動作速度には改善の余地があった。自立駆動を考えた場合、コンプレッ

サの最大供給流量には限界がある．そこで本研究では袋状構造の耐圧を向上させ、駆動流体の入力圧力を上げることで動作速度の向上を試みた．

図12(a)はウレタンゴムシートで作成した袋状構造の表面をナイロン繊維で覆うことで耐圧を強化した駆動骨格である．ナイロン繊維に気密、水密性はないが、本構造では内側のウレタンゴムが流体を密閉し、外側のナイロン繊維が内圧によって生じる力を支えることで密閉性と高い耐圧を両立させている．ウレタンゴムシートのみで作成した駆動骨格の耐圧が約0.5MPaだったのに対し、強化した骨格は約4MPaになった．また、骨格一個あたりの体積を小さくしたため、加減圧のために必要な流量が少なくなった．図12(b)は強化した駆動骨格を連結して作成した柔軟クローラである．クローラ全体もナイロン繊維で覆うことで、駆動骨格同士を強固に連結できるため、これまでのものより動力の伝達効率が向上したと考えられる．



(a) 繊維強化した駆動骨格 (b) 強化、小型化したクローラ

図12 繊維強化した駆動骨格と柔軟クローラ

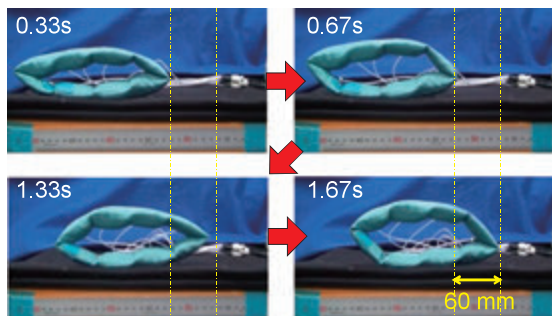


図13 繊維強化した柔軟クローラの動作実験の様子

繊維強化した柔軟クローラの動作実験の様子を図13に示す．駆動に必要な流量が少なくなったことと、小型コンプレッサの最大発生圧力を使用できるようになったため、クローラの最高速度は駆動骨格の長さ100mmに対し、39mm/sと大幅に改良された．

4. 結 論

流体駆動機構のひとつとして、袋状構造の内圧を変化させて動作する全体が柔軟なクローラ機構について議論した．はじめに柔軟クローラの基本的な構造を議論し、ビニール袋と天然ゴムを利用した試作機による動作原理の確認を行った．しかし、この構造のクローラはクローラ高さが変動する問題があった．そこでテーパ形状を有した袋状構造を利用した

クローラを開発した．これは幅が広い袋状構造の方が発揮力が大きいことを利用し、袋状構造の折れ曲がり箇所を幅の広い根本部分から幅の細い先端部分に徐々に移動させ、せり出すような動作を実現するための構造である．袋状構造の素材には、伸びの少ないウレタンゴムシートを採用した．試作機による実験の結果、クローラ高さの変動はほとんどない動作が実現できた．しかし、幅の広い袋状構造を利用したため、動作に必要な流量が大きく、最高動作速度は約5mm/s程度であった．

この問題を解決するため、袋状構造の耐圧を向上させて動作速度の向上を試みた．ウレタンゴムシート製の袋状構造の表面をナイロン繊維で覆うことで、袋状構造の耐圧は0.05MPa程度から0.4MPa程度にまで向上した．入力圧力を高くすることで、袋状構造の体積を小さくすることが可能になり、クローラの最高動作速度は約40mm/s程度にまで向上した．

参考文献

- 1) Garth Chapman: The Hydrostatic Skeleton in the Invertebrates, Biological Reviews, Vol.33, Issue 3, p.338-371 (1958)
- 2) William M. Kier: Hydrostatic skeletons and muscular hydrostats, Biomechanics (Structures and Systems) : A Practical Approach, A.A.Biewener, ed. New York IRL Press at Oxford Univ. Press. (1992)
- 3) 木村仁, 丸山大輔, 梶村文裕, 小関道彦, 伊能教夫: 水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボット (新型クローラの開発および試作ロボットの狭隘地形における動作実験), 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.7, p.1092-1099 (2007)
- 4) 木村仁, 丸山大輔, 鈴村紘司, 伊能教夫: 水力学的骨格を利用した柔軟繊維アクチュエータ, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.41, No.6, p.16-23 (2010)
- 5) Hitoshi Kimura, Mokutaro Kataoka, Shotaro Suzuki, Daisuke Akimoto, Norio Inou: A Flexible Robotic Arm with Hydraulic Skeleton, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.6, No.7, p.1107-1120 (2012)
- 6) Bekker M.G.: Introduction to Terrain Vehicle Systems, Ann Arbor/ The University of Michigan Press (1969)
- 7) 米田完, 太田祐介, 浜瀬茂男, 粉体の変形特性を利用したハイグリップクローラの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.8, p.1188-1193 (1997)
- 8) Daisuke Maruyama, Hitoshi Kimura, Michihiko Koseki, Norio Inou: Driving force and structural strength evaluation of a flexible mechanical system with a hydrostatic skeleton, Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, Applied Physics & Engineering, Vol.11, No.4, p.255-262 (2010)

(原稿受付: 2013年8月22日)

解説

先端成長動作による狭隘地形内の無摺動移動探索ロボット

著者紹介



つか 越 秀 行

東京工業大学大学院
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 S5-19
E-mail: htsuka@cm.ctrl.titech.ac.jp

1998年東京工業大学大学院工学研究科博士課程修了。同大学助手を経て、2004年同大学工学部助教授、准教授、現在に至る。レスキューロボット、流体アクチュエータの研究に従事。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

原子炉配管内の亀裂検査やがれき内の人命探査など狭隘地形内の情報収集作業として、有線探査機を深奥部までスムーズに搬送する技術が求められている。現在現場では、ケーブルカメラやファイバースコープのように、先端に探査機を搭載した機器を挿入口から押し込む方式が採用されている。しかし、探査距離が長くなると摩擦の影響により押し込みづらくなるうえに、分岐点で進行方向を選択できないなどの課題を抱えている。

その対策としてロボットによるさまざまな移動方法が試みられてきたが^{(6)~(8)}、本稿ではこれら諸問題の根本的な解決を図るために、移動体が環境に対して摺動せずに推進できる「先端成長動作」と名付けた新たな移動の概念、およびそれを具現化するための流体圧を利用した駆動原理を紹介させていただく⁽¹⁾。

2. 先端成長動作

植物にみられる根や茎の成長では、周知のとおり全体が伸長するのではなく、先端付近の分裂組織（成長点）のみが変化する。この現象を参考に「先端から生えるアクチュエータ」を構成できれば、環境に対する摺動抵抗を著しく軽減しながら狭隘地形内のスムーズな移動が期待できる。

なお、類似の動作を生成する人工物として、配管の内壁に沿ってホースを内部から構造材を繰り出す

配管補修装置⁽²⁾や直進に特化したホース式探査機⁽³⁾などが考案されている。本報で紹介する「先端成長動作」とは、これらの直進動作に加えて、根元の形状を保持しつつ能動的に先端を湾曲させることも含めた動作を目指したものである。特に、S字クランクのように湾曲方向の反転が求められる状況では、移動体を経路に適合させながら推進できる先端成長動作はきわめて優位に作用する（図1、2）。その実現には、内部から構造体をスムーズに繰り出す機能に加えて、任意の箇所で湾曲できる柔軟性と探査機を搬送できる高い出力／密度特性とを兼備したアクチュエータの導入が不可欠となる。

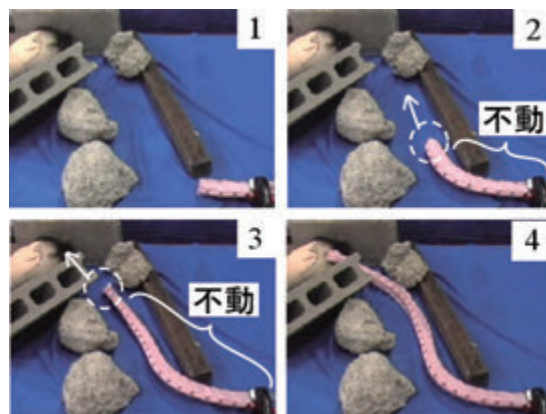


図1 植物のように先端部だけが伸長する柔軟ロボット

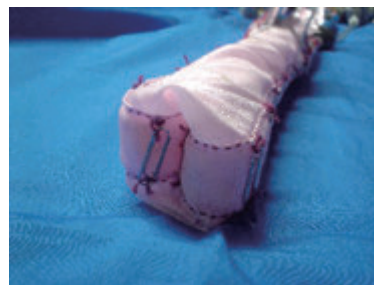


図2 ロボットの先端部

3. 駆動原理

3.1 基本アクチュエータ

先端成長動作を生成するアクチュエータとして、柔軟な偏平チューブをチャンバーとする流体圧駆動

に着目した。偏平チューブとは、無加圧状態で断面が偏平状態を保ち、内部を流体で加圧すると、周長をほぼ一定に保ちながら円形に近づくように変形するものである（図3）。チューブを折り曲げて流路を遮断した状態から内部を加圧すると、下流側チューブがスムーズに繰り出される現象が生じる（図4）。この繰り出し現象は偏平チューブ特有の性質であり、一般の円筒チューブにはみられない⁴⁾。なぜなら、円筒チューブの場合、折り曲げ部を境に下流側の円形断面が繰り出しを阻害する抵抗として作用してしまうからである。

偏平チューブは、市販のウレタン製円筒チューブ

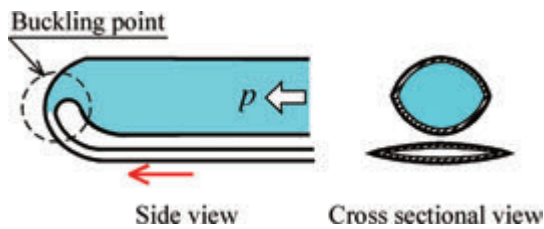


図3 偏平チューブの断面

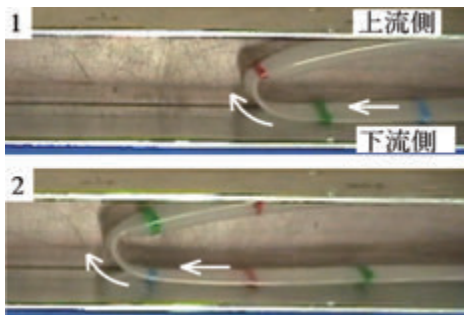
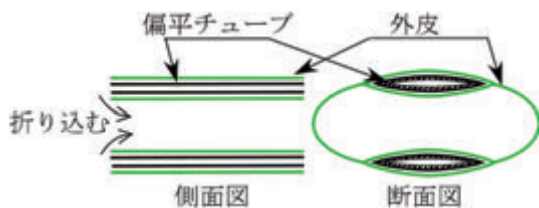
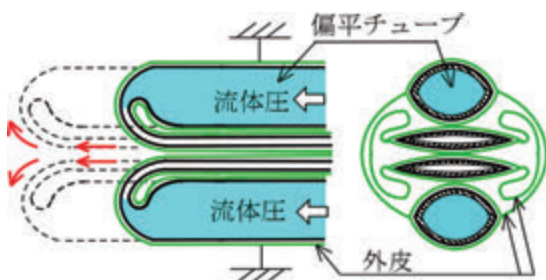


図4 流体圧により偏平チューブの折り曲げ部が移動



(a) 折り込む前の初期状態



(b) 折り込んだ後の加圧状態

図5 2本の偏平チューブを束ねる構造

を加熱しながら押し潰すことにより、容易に製作することができる。このチューブの流体圧と駆動力との関係は、文献5)をご参照いただきたい。

当該アクチュエータの作動流体として、基本的には空気圧と水圧の双方とも利用可能である。ただし、後述するロボットの湾曲動作を考慮した場合、圧縮性を利用できる空気圧駆動の方が適するものと考えられる。

3.2 直進動作

上述のアクチュエータを以下のように組み合わせることにより、内部から繰り出す推進動作が生成される。すなわち、摩擦が小さく滑りやすい布で円筒状の外皮を構成する。その内側に複数の偏平チューブを円筒の軸方向に沿って図5(a)のように挿入したのち、その一端を内部に折り込む。この状態から外側の偏平チューブの一端を加圧すると、環境に対して外側は不動のまま、内側からチューブと外皮が繰り出されながら推進する直進動作が生成される（図5(b)）。

ここで、外皮は単にチューブを束ねるための役割だけでなく、チューブの間隔を適切に保つ機能も具備している。図6の装置によりチューブ間距離 d と推力 F との関係を比べた実験結果（図7）をご覧ください。これより、折り曲げ部での内部漏れによる損失と、外皮同士の擦れに起因した摩擦による損失との具合により、推力を最大化できる最適な

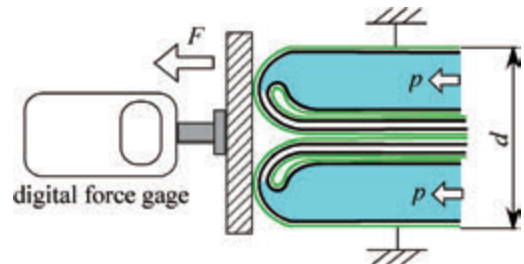


図6 推力を測る実験装置

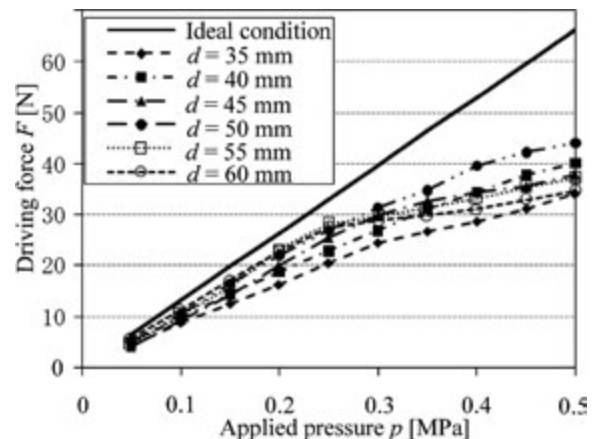


図7 圧力・推力・チューブ間距離との関係

チューブ間距離が存在するものと予測される。

3.3 湾曲動作

湾曲動作を生成するには、複数の偏平チューブの推進量に差異を設けることが要求される。その実現のため、偏平チューブ内を加圧する圧力段階として、 $p_H > p_S > p_L \geq p_M$ の大小関係を満たす4つのレベルを設ける。ここで、 p_M はアクチュエータ全体の形状保持に要する圧力の最小値、 p_S は直進に要する圧力の最小値、 p_H および p_L は各々湾曲外側と内側に位置するチューブ内を加圧する際の圧力値を示す。

直進時は双方のチューブを p_S で加圧する。湾曲時はブレーキ力を作用させるために、湾曲内側のチューブの下流側を不動状態としつつ、各チューブの内圧が上記の関係を満たすように加圧すると、曲率半径の小さい湾曲の生成が可能となる。

つぎに、アクチュエータ全体の形状を保持しながら先端のみを直進・湾曲させるための構造を説明する。形状の保持には、湾曲の内側に生じる外皮の“しわ”を固定することが有効に機能する。そこで、以下に述べる原理により、推進しつつ自動的にしわが固定されていくような構成を試みた。

すなわち、薄い弾性体で構成されたホルダーを外皮の外側に一定間隔ごとに配置する(図8)。チューブ内が無加圧状態のとき、外皮に対してチューブが自在に可動できるアンロック状態となる。

一方、 p_M 以上の圧力で加圧すると、チューブの変形にともないチューブがホルダーに食い込むため、

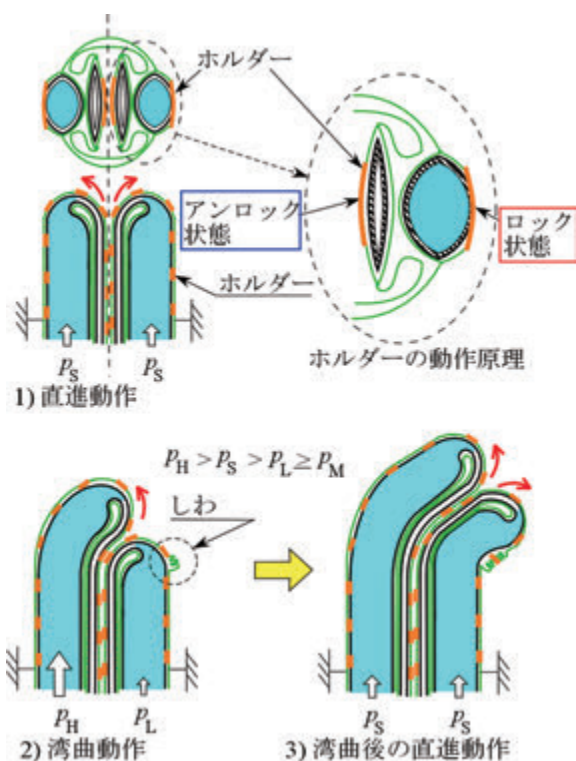


図8 湾曲および形状保持を実現する原理

外皮に対してチューブが不動となるロック状態に変わる。以上の原理により、外皮が外側に繰り出されつつしわを固定できるため、内圧を変えても形状の保持が可能となる。

4. 試作機 “Grow-hose-I”

4.1 カメラの搭載方法

先端成長動作では、先端の構造が常に変化しながら移動するため、先端に部材を固定することはできない。そこで、カメラを搭載したヘッドユニットの搬送方法として、推進にともなって外皮に対してスライドできる拘束方法を導入することとした。すなわち、ヘッドユニットには受動的に回転する複数のローラーを設け、外皮には推進方向に対して平行に柔軟レールを設ける(図9)。チューブが推進すると、対向する2つのローラーが柔軟レールを挟みながら移動するため、ヘッドユニットが外皮に対してスライドしながら搬送される動作が生じる。なお、後退時には、チューブ内の圧力を減圧しつつカメラケーブルを牽引することにより、スムーズな回収動作も可能となる。

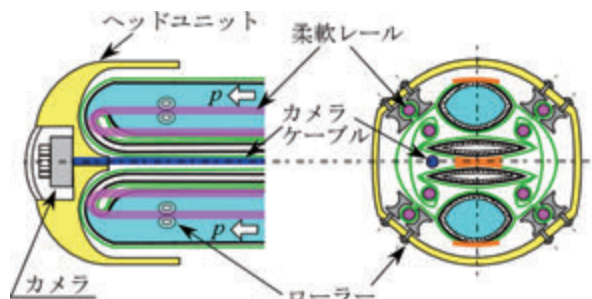


図9 探査機を搭載したヘッドユニットを搬送する構造



図10 試作したGrow-hose-Iの外観

4.2 狭隘地形内の移動探索

試作機Grow-hose-Iの外観を図10に示す．全長3 m外径50mmのサイズとなり，その他のスペックは表1に示す通りである．内径70mmの湾曲管路内の移動（図11），およびクランク経路内でカメラを搬送しながらの移動探索が可能となることを確認した（図12）．なお，このときの圧力の設定値は $p_M = p_L = 0.2\text{MPa}$ ， $p_S = 0.4\text{MPa}$ ， $p_H = 0.5\text{MPa}$ とし，曲率半径120mmの湾曲を生成しながら先端成長動作が生成されることも確認した．

5. おわりに

外部環境に対して無摺動で直進・湾曲動作を生成する先端成長動作は，本稿で紹介した配管や狭隘経路の環境だけでなく，さまざまな用途に応用可能な推進手法である．たとえば，さらに小型化を図り人体と親和性を有する素材を導入することにより，腸壁に無摺動でカメラを搬送する大腸内視鏡などへの応用にも期待できる．今後は，ヘッドユニットの位置を推定する機能などを付加したうえで，現場での

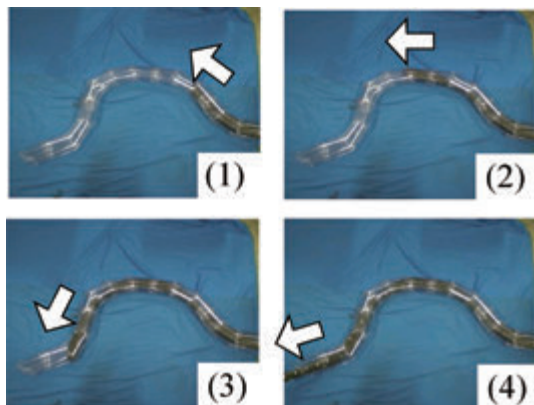


図11 内径70mmの曲がった管内を移動するGrow-hose-I

表 Grow-hose-Iの仕様

外形	長さ3 m，断面直径 $\phi 50\text{mm}$
チューブ	偏平チューブの偏平幅18mm，肉厚1 mm
供給圧	空気圧 0.5MPa
ホルダー	ステンレス製クリップ（ $22 \times 6 \times 0.5\text{mm}$ ）35mm間隔に配置
柔軟レール	ナイロン製 断面外径 $\phi 2\text{mm}$
ローラー	ステンレス製 $\phi 4 \times 8\text{mm}$
ヘッドユニット	アクリル製ケース 外径 $\phi 62.5\text{mm}$ ，長さ40mm
カメラ	$21 \times 21 \times 16\text{mm}$

運用方法についても検討を進めたい．

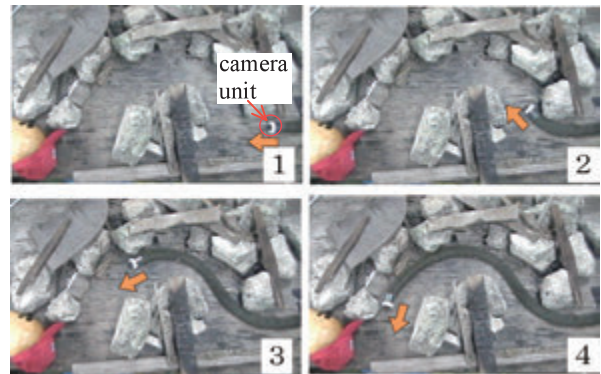


図12 カメラを搬送しながら移動するGrow-hose-I

謝辞

本研究はJSPS科研費20360113（基盤研究（B））のご支援を受けて行ったものです．

参考文献

- 1) Hideyuki Tsukagoshi, Nobuyuki Arai, Ichiro Kiryu, Ato Kitagawa, “Tip Growing Actuator with the Hose-shaped Structure Aiming for Inspection on Narrow Terrain”, International Journal of Automation Technology, Vol. 5, No. 4, 516-522 (2011)
- 2) <http://www.paltem.jp/method/hl.html>
- 3) Mishima, T Aoki, S Hirose “Development of Pneumatically Controlled Expandable Arm for Search in the Environment with Tight Access”, Proc. Int. Conf. on Field and Service Robotics, FSR2003, 315-320, 2003
- 4) 森庸太郎，塚越秀行，北川能，“柔軟偏平チューブに沿ってスライドする流体アクチュエータ（第1報：A-driveの提案とその動作解析）”，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol. 41, No. 5, pp. 98-105 (2010)
- 5) Hideyuki Tsukagoshi, Yotaro Mori, Ato Kitagawa, “Fast Accessible Rescue Device by Using a Flexible Actuator”, International Conference on Robotics and Automation (ICRA2012), 1175-1180 (2012)
- 6) Kazuna Sawata, Masashi Konyo, Satoshi Saga, Satoshi Tadokoro, and Koichi Osuka “Sliding Motion Control of Active flexible Cable using Simple Shame Information”, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, SaB8.4 (2009)
- 7) A. Kitagawa, H. Tsukagoshi, M. Igarashi, “Development of Active Hose with a Small Diameter for Search and Life-prolongation of Victims,” Journal of Robotics and Mechatronics, 15-5, 474/481 (2003)
- 8) Ken Ozaki, Shuichi Wakimoto, Koichi Suzumori “Novel design of rubber tube actuator improving mountability and drivability for assisting colonoscope insertion”, Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, 3263-3268 (2011)

（原稿受付：2013年10月31日）

会議報告

日本機械学会 2013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
脇 元 修 一

岡山大学大学院自然科学研究科
〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1
E-mail : wakimoto@act.sys.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。岡山大学助教を経て、2011年同大学准教授、現在に至る。空気圧アクチュエータの開発とその応用に関する研究に従事。日本ロボット学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

日本機械学会年次大会は機械学会の全部門が関わる非常に大規模な大会である。2013年度は、岡山大学津島キャンパス（写真1¹⁾）にて2013年9月8日～11日の日程で開催された。

大会テーマとして「メカニカルイノベーションによる新エネルギー社会の実現」を掲げ、各部門のオーガナイズドセッション、一般セッションの学術講演の他、市民開行事、特別講演、特別企画、企業機器展示、カタログ展示、高校生科学技術コンテストなど多くの行事が催された。

本年度の学術講演発表件数は約1,350件であり、40室を利用して行われた。



写真1 岡山大学 津島キャンパス¹⁾

2. フルードパワーに関する学術講演発表

参加者に配布されたプログラムを一読すると大会

中様々なセッションにおいて、フルードパワーに関する研究発表が実施されていたことがわかる。

しかしながら、本大会では多くのセッションがパレルに実施されるため、筆者が実際に参加できるセッションには限りがあった。本報告では機素潤滑設計部門とロボティクス・メカトロニクス部門が合同で行ったオーガナイズドセッションである「次世代アクチュエータシステム(1)～(3)」で発表されたフルードパワーに関する9件の研究についての簡単な紹介に留めさせていただくことをご容赦いただきたい^{2)～10)}。

セッション全体を通して印象的であったのは、流体駆動システムにおいて一般に使用され、比較的大型の外部装置となってしまうポンプやバルブなどの機器を必要としない、あるいはそれらの代わりになり得る小型の圧力源や駆動システムに関する研究発表が多くなされていたことである。写真2は講演発表の様子である。



写真2 次世代アクチュエータシステムでの講演発表の様子

2.1 磁性流体関連

月岡らは磁性流体を2枚のポリイミド薄膜内に封入した構造のダイアフラム型のアクチュエータを開発し、外部磁場を印加した際のアクチュエータの駆動特性を実験的に明らかにしている。直径5mmのダイアフラムを用いた際に15 μ mの変位を実現している²⁾。

2.2 イオン液体関連

福武らは環境負荷の小さいイオン液体を動力源とする自発運動機構の開発を目指している。水面にイオン液体を滴下した際の拡散による表面張力差を動力として利用する試みであり、本発表では数種類の

イオン液体を用いて表面張力の時間変化, 拡散速度, 拡散時間についての比較を行い, 運動機構としての利用可能性について言及している³⁾.

2.3 ECF関連

電圧の印加によって流動が発生する電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluid, ECF) を用いた研究に関して3件の発表が行われた。

Gu HongriらはECFマイクロポンプの電極として用いる三角柱-スリット形電極対 (Triangular Prism-Slit Electrode pairs, TPSE) に関して, 今後のさらなる小型化を見据えて主要寸法パラメータを微小化した類似マイクロTPSEを製作し, その発生圧力を測定している。類似マイクロTPSEの特性はTPSEの微小化がより強いECFジェットを発生させ得ることを示唆するものであった⁴⁾。

金らは小型点字表示機の実現に向け, 小型かつ高出力のECF液圧源を可能とする小型の針-円筒スリット形電極対 (Needle-Holes Electrode pairs, NHE) を提案している。本発表ではMEMS技術を用いてNHEを製作しており, 機械加工によって製作されていたこれまでの電極対と比較し, 2.3倍の出力パワー密度を達成している⁵⁾。

嚴らは正・負の印加電圧によってECFジェットの方向を切り替えることが可能な両方向ECFマイクロポンプを製作しており, これによってシリコンゴム製のバイモルフ形アクチュエータの駆動に成功している⁶⁾。

2.4 水圧関連

吉田らは交流圧力源と流体共振回路を用いた水圧アクチュエータの駆動システムを提案している。交流圧力源の駆動周波数を流体共振回路の共振周波数と一致させるか否かで生じる差圧を利用することでアクチュエータの駆動を実現している。共振周波数の異なる2つのモデルを並列に配置した2自由度アクチュエータシステムにおいて, 各々のアクチュエータの独立駆動を達成しており提案したシステムの有効性が確認されている⁷⁾。

2.5 ガス圧関連

空気圧を含めガス圧力関連の発表は3件行われた。

和田らは水の電気分解/合成というガスの発生と吸収の可逆反応に着目し, 固体高分子形燃料電池を用いたガス圧源の開発を行っている。合成反応におけるガス吸収時に発生する電荷をコンデンサに蓄え, つぎの電気分解において利用するというエネルギー回生方法を提案しており, 14%のエネルギー回生率を達成している⁸⁾。

松岡らは高温環境下での利用を目指し, 作動流体の気液相変化を利用したアクチュエータの開発を

行っている。耐久性と耐熱性に優れたインコネル製ベローズの内部に作動流体としてトリエチレングリコールを封入した構造となっている。常温から300℃までの温度範囲においてベローズアクチュエータの伸長・収縮特性の計測を行っている⁹⁾。

刀根らは精密位置決めステージの実現を目指し静圧軸受パッドを多層に配置した多連型空気圧軸受アクチュエータを開発している。本報告では θ 方向の位置決め機構としての応用可能性を実験的に調べており, 最大で 2.0×10^{-4} radの傾斜角が実現できることを確認している¹⁰⁾。

3. おわりに

筆者が参加したセッションでは各発表に対して活発で有意義な議論が行われていた。

今回の2014年度の日本機械学会年次大会は2014年9月7日(日)～10日(水)の期間で東京電機大学にて実施される予定である。

最後に, 私事であるが筆者は本大会には実行委員として準備や会期中の運営に微力ながら尽力させていただいた。参加された方々に本大会, および岡山の地を楽しんでいただけたなら幸いである。

参考文献

- 1) 日本機械学会 2013年度年次大会 ホームページ, <http://www.jsme.or.jp/2013am/>
- 2) 月岡達規, 大久保悠平, 今井郷充: ポリイミドダイアフラムで風刺した磁性流体によって駆動するMEMSアクチュエータの基本特性, J1174011, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013.
- 3) 福武大河, 土谷茂樹: イオン液体を動力源とする自発運動機構に関する研究, J114014, 同上.
- 4) Gu Hongri, 金 俊完, 横田眞一, 枝村一弥: 電極対のマイクロ化によるECF効果に関する研究, J114012, 同上.
- 5) 金俊完, 近藤一由, 横田眞一, 枝村一弥: MEMS技術を用いた針-円筒スリット形ECFマイクロ液圧源, J114013, 同上.
- 6) 嚴祥仁, 横田眞一, 金俊完, 枝村一弥: 両方向ECFマイクロポンプによるマイクロアクチュエータの駆動, J114023, 同上.
- 7) 吉田和弘, 渡邊真帆, 嚴祥仁, 横田眞一: 周波数可変交流圧力源を用いた多自由度マイクロアクチュエータシステム, J114025, 同上.
- 8) 和田晃, 鈴森康一, 協元修一: 可逆化学反応現象を利用したガス圧制御システムの開発 ー第3報: エネルギー回生の実現ー, J114021, 同上.
- 9) 松岡大樹, 鈴森康一, 協元修一: 作動流体の相変化を利用した高温環境用アクチュエータの開発, J114024, 同上.
- 10) 刀根祥樹, 松岡敬, 平山朋子, 佐々木勝美: 多連型空気静圧軸受パッドによる θ 方向超精密位置決め機構の特性評価, J114031, 同上.

(原稿受付: 2013年10月4日)

会議報告

第13回「運動と振動の制御」 シンポジウム (MOVIC2013) 報告

著者紹介



むら やま えい じ
村山栄治

芝浦工業大学 博士 (後期) 課程 2 年
〒337-8570 さいたま市見沼区深作307
E-mail: nb12107@shibaura-it.ac.jp

2003年芝浦工業大学大学院修士課程修了。同年(株)ウェーブフロント入社。2005年ネオリウム・テクノロジー(株)入社。2012年芝浦工業大学大学院博士課程入学。空気圧サーボを応用したデバイスの製作と制御系設計、管路内流れの計測と解析に従事。日本フルードパワーシステム学会会員

1. はじめに

平成25年8月27日(火)～30日(金)、Dynamics and Design Conference 2013 (D&D2013) および第13回「運動と振動の制御」シンポジウム (MOVIC2013) は、「海を越え、国を越え、世代を超えて!」を総合テーマに九州産業大学 第8号館で開催された¹⁾。

MOVIC2013では、つぎのようなオーガナイズド・セッションが企画され、

- ・M-OS1 磁気浮上・磁気軸受の制御
- ・M-OS2 建築・建設構造物の耐震・免震・制振
- ・M-OS3 スマート構造システム
- ・M-OS4 制御用センサ・アクチュエータ
- ・M-OS5 フルードパワーの基礎と応用
- ・M-OS6 運動制御とシミュレーションの融合
- ・M-OS7 精密・情報・産業機器の制御
- ・M-OS8 昇降機・物流システムの制御
- ・M-OS9 ビークルの運動と制御
- ・M-OS10 自律知能無人ビークルの運動と制御
- ・M-OS11 ロボットおよび人間のダイナミクスと制御
- ・M-OS12 海洋におけるシステムと制御
- ・M-OS13 宇宙機・宇宙ロボットのダイナミクスと制御
- ・M-OS14 非線形制御理論とその応用
- ・M-OS15 適応学習制御とその応用

・M-OS16 MBSE (モデルベースシステムズエンジニアリング) と1D-CAE

・M-OS17 触覚フィードバック

台風が接近する中、活発な議論が展開された。

以下では、フルードパワーに関連した「M-OS5 フルードパワーの基礎と応用」の様子を報告する。

2. 講演の概要

オーガナイズド・セッション「M-OS5 フルードパワーの基礎と応用」はさらにカテゴリが分けられ、29日に「空気圧制御の高度化」、「フルードパワーの基礎」、30日に「フルードパワーの応用」および「人に優しいフルードパワー」が実施された。

2.1 空気圧制御の高度化

座長は眞田一志先生 (横浜国立大学) で、4件の講演がおこなわれた。アクチュエータには、空気圧シリンダや空気圧ベローズ、制御対象は二足歩行ロボットや多自由度微動ステージ、また、位置決め制御の検討としてシステム同定やロバスト制御などさまざまな手法を適用した結果が紹介され、興味深い内容であった。

2.2 フルードパワーの基礎

座長は田中豊先生 (法政大学) で、4件の講演がおこなわれた。油圧用マニホールドブロック、油圧ベーンポンプ、軸受けなど製品開発には欠かせないフルードパワーを利用した要素であったため、非常に興味深い内容であった。また、CFD (Computational Fluid Dynamics) など高度な解析手法の紹介もあり充実したセッションとなった。

2.3 フルードパワーの応用

座長は川上幸男先生 (芝浦工業大学) で、3件の講演がおこなわれた (1件、講演取り消し)。前日のフルードパワーの基礎に続き、自動変速機、気泡除去装置、CPU冷却システムなど対象に実験や解析結果との比較などさまざまな視点で検討した結果が紹介された。

2.4 人に優しいフルードパワー

座長は藤田壽憲先生 (東京電機大学) で、3件の講演がおこなわれた。高機能マット、レスキュー用

アシストスーツ、立ち上がり動作支援装置などフルードパワーの特性を活かし開発したデバイスが紹介された。

最終セッションとなったが、活発な議論が展開さ



写真1 懇親会の挨拶（眞田先生）

れた。

29日の夜には懇親会が開催され、多くの先生方と学術的な情報交換がおこなわれた。

3. おわりに

今回のMOVIC2013「M-OS5 フルードパワーの基礎と応用」では、さまざまな講演があり、また、活発な議論がなされ大変充実したセッションとなったと感じられた。

最後に、本セッションを開催するにあたり、オーガナイザーの眞田一志先生をはじめとする企画委員、WGの皆様、ならびに事務局スタッフの皆様に感謝し、報告を終える。

参考文献

- 1) D&D / MOVIC2013 トップページ, <http://www.jsme.or.jp/conference/dmccconf13/index.html>

(原稿受付：2013年10月25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)	950	16	128	130
差 引 増 減	+ 7	0	+ 1	0

(注1) 正会員の内訳 名誉員14名・シニア員33名・ジュニア員165名

正会員

中野 寿身 (日立建機(株))
赤澤 翔 (KYB(株))
滝口 和夫 (日立建機(株))
高橋 正憲 (川崎重工業(株))

石川竜乃介 (KYB(株))
根田 知樹 (小松製作所)
青木 誠 (川崎重工業(株))

学生会員

佐藤 政哉 (東京工業大学)

トピックス

ISO/TC131/SC9/WG1 ISO4413の改正

著者紹介



しぶ ふみ あき
渋谷 文昭

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

1973年 東京電機大学 精密機械工学科卒。
同年 株東京計器入社
油圧システムの設計に従事し、現在に至る。
日本フルードパワーシステム学会の会員

1. はじめに

分科委員会SC9は、油空圧システムの設計、構成、取付け、性能評価、運転、保全および安全などに関わる事項について審議している。

ワーキンググループWG1は、第3版としてISO 4413:2010, Hydraulic fluid power—General rules and safety requirements for systems and their componentsを改正した。

この国際規格は、1979年にISO4413:1979, Hydraulic fluid power—General rules for the application of equipment to transmission and control systemsとして制定された。その後、1998年に第2版としてISO4413:1998, Hydraulic fluid power—General rules relating to systemsが改正されている。

この国際規格が改正されたので、それに伴い対応する日本工業規格のJIS B 8361も改正することにし、2013年5月20日に公示された。

ISO4413:2010とJIS B 8361との対比およびJIS化の審議中に特に問題となった事項は、このJIS規格の附属書と解説にそれぞれ載っているので、それを参照願いたい。

ここでは、第3版のISO4413:2010の改正におけるISO活動の実態と、油圧システムの機械安全規格としてのポイントについて報告する。

2. ISO4413:2010の改正

ISO4413は、従来、油圧システムの一般規則につ

いて規定していたが、第3版では油圧システムおよびその機器の機械安全規格として改正している。

2.1 ISO4413:2010の主な改正点

第3版の主な改正は、つぎの3点である。

- (1) ISO4413:1998と欧州規格EN 982:1996との統合
- (2) 欧州機械指令2006/42/ECに従った安全要求事項との統合
- (3) 機械安全に関する国際規格を考慮した安全要求事項の更新

この改正によって、欧州の機械指令は、流体動力システムおよび機器のための安全要求事項として、このISO4413:2010を適用している。

また、ISO4413:2010は、適用範囲を従来の産業機械（工業の製造工程において用いられる機械設備をいい、以下、産業機械と呼ぶ）から、車両機械（土木機械、農業用機械、産業車両などをいい、以下、車両機械と呼ぶ）を加えたすべての機械類に使用する油圧システムおよびその機器に変更している。

機械安全規格の階層において、ISO4413:2010は、グループ安全規格のタイプBに属する。

2.2 WG1審議の経緯

ワーキンググループWG1が国際規格を制定するまで審議した経緯は、つぎの通りである。

- (1) 2007年7月パリ会議にて、ドイツが提案したISO/WD 4413を審議し、CD（Committee draft）への移行を決定した。

この会議で米国は、車両機械の市場では油圧装置の設置スペースが確保できず、この要求を実行するのは困難であると反対した。

日本は、機械安全の規格化が遅れており、この段階のコメントを提出できなかった。

- (2) 2008年2月フランクフルト会議にて、ISO/CD 4413を審議し、DIS（Draft international standard）投票に移行することを決定した。

米国の主張や各国のコメントについて審議した主な事例はつぎの通りである。

- a) 米国は、ISO/CD 4413は車両機械の市場を無視しており、SAEおよびASABEに矛盾する恐

れがあるとして、機械的な動作、接近性、非常停止および提出最終資料などの提案内容は、産業機械だけに適用するように主張した。

b) 遮断弁 (Isolation valve) は、不適切なものが多く、安全を維持するために、製造業者が認可したものを使用することにした。

c) 作動油選定の際は、電気的な危険の評価項目として、電気伝導率を考慮することにした。

d) エアブリーザの管理は、従来から不十分であり、エレメントの点検用インジケータを備えるのが望ましいとした。

e) 損傷なしで、油圧システム内の最大差圧に耐えられないフィルタは、バイパス弁を付けることにした。

f) 安全に関する油圧システムの検証および検査項目は、つぎの4点が承認された。

- ・油圧システムおよびその構成機器の識別
- ・油圧システム内の機器の接続
- ・システム全体の機能
- ・機器からの油漏れ

(3) 2009年3月ミラノ会議にて、ISO/DIS 4413の審議を終了し、FDIS (Final draft international standard) に移行することを決定した。

米国は、DISの投票では反対したが、この会議で、車両機械に関する多くを主張し、受け入れられて、賛成に転じた。

日本は、15件提案し、すべて承認された。

米国が主張した車両機械の主な事例をつぎに示す。

a) 機器を交換する時は、油タンクの油抜きを必要としないことにしたが、車両機械は、油タンクの下に油圧ポンプがあり、サクション配管にはシャットオフ弁が無いために、この実現は困難であり、適用を除外することにした。

b) 操作や保守の時は、油圧システムからのこぼれ油を完全に回収することにしたが、車両機械は、この実現が困難であり、適用を除外することにした。

c) フィルタは保守時期を表示するインジケータ付を用いることにしたが、車両機械は、運転時間ごとに保守を行っており、インジケータ無しを用いている。このため、車両機械は、フィルタ交換に関する事項を取扱説明書に記載することにした。

d) クーラを保守するために、冷却水の閉止弁を設けることにしたが、車両機械は、実施しておらず、適用対象を産業機械に限定することにした。

e) 電気接続部は、すべてISO/IEC規格に準拠し

た電気コネクタを使うことにしたが、車両機械は対応が困難なため、適切な規格または製造業者の規格に従うことにした。

3. ISO4413の概要

ISO4413：2010第3版の規格の構成および関連する国際規格を表1に示す。

表1に示す引用規格は、ISO 4413：2010の規定の一部を構成しており、これらの引用規格は、その最新版を適用する。

表1 規格の構成と関連する国際規格

箇条番号	内 容	関連国際規格
1	適用範囲	ISO 12100：2010 設計の一般原則
2	引用規格	ISO 1219-1/2 図記号 ISO 4021 微粒子分析 ISO 4406 汚染レベル ISO 5598 用語 ISO 6020-1/2/3 シリンダ ISO 6022 シリンダ ISO 6149 Mネジポート ISO 6162-1/2 フランジ ISO 6164 角フランジ ISO 10762 シリンダ ISO 12100：2010 ISO 13850 非常停止 ISO 13851 両手操作 ISO 16656 シリンダ ISO 16874 識別記号 ISO 23309 洗浄 IEC 60204-1 電気機器の一般要求事項 IEC 60947-5-5 ラッチ
3	用語及び定義	
4	重大な危険源の一覧表	
5	一般規則及び安全のための要求事項	ISO 1179 ポート ISO 4395 シリンダ ISO 9974 Mネジポート ISO 11926 UNネジポート ISO 13732-1 高温表面 ISO 13849-1 制御システムの安全関連部 設計原則

		ISO 14121 リスクアセスメントの原則 ISO 17165-1 ホース ISO/TR 11688-1 低騒音 ISO/TR 17165-2 ホース ISO/TS 13725 座屈荷重 IEC 60529 IPコード IEC 61310-3 表示
6	安全要求事項の検証及び受入検査	
7	使用上の情報	
8	規格準拠表示	

したがって、欧州の機械指令に適合するには、この引用規格および関連する国際規格の安全要求事項をすべて満たさねばならない。この規格の中、主要なものは、つぎの通りである。

(1) ISO12100：2010およびISO14121

機械の本質安全設計とリスクアセスメントの実施を要求している。

(2) ISO13849-1：2006

制御システムの安全関連部に該当する機器が適用の対象になり、機械の安全レベルを示す指標のPL（パフォーマンスレベル）の提供を要求している。

(3) IEC60204-1

機械の電気装置の一般的な安全事項を要求している。入力電源断路、感電防止、制御回路および制御機能、電線、エンクロージャなどがある。

また、第3版で新たに追加した安全要求事項を表2に示す。この中の箇条5.1.2は、制御システムの安全関連部に関するISO13849-1：2006の適用を要求している。

表2 新規に追加した安全要求事項

箇条番号	内 容
5.1.2	制御システムは、リスクアセスメントに従って設計しなければならない。

5.4.4.3.5	マニホールドブロック組立品及び機器は、識別記号を付けなければならない。
5.4.5.1.1.2	油圧作動油選定時は、電気伝導率を考慮しなければならない。
5.4.5.1.3	作動油の清浄度は、システム内で最も汚染物質の影響を受け易い機器に適していなければならない。
5.4.5.2.1 d)	油タンクは、事故による外部漏れ防止のオイルパンを設けるか又は、浸透性のない場所の上に、設置しなければならない。
5.4.5.2.2.8	油タンクは、必要に応じて、等電位ボンディングを設ける。
5.4.5.2.3.4	水分離器を設けた場合は、保守時期を知らせる指示器を備えていなければならない。

以上のように、第3版のISO4413：2010は、油圧システムおよびその機器の機械安全規格として位置づけられており、多くの関連規格を有している。

4. おわりに

1995年に発効されたWTO/TBT協定のあとの1997年から図記号、回路図、用語、油圧システム通則などのISO規格の作成に携わってきた。ISO規格の対応では、世界的なネットワークの構築と普段から情報交換をすることによって、採決する投票時に自国に有利になる働きかけが重要であるといわれてきた。しかし、言葉の壁が厚く、実行は難しかった。

今年、ISO4413改正版のJIS規格が公示されたこともあり、ISO4413のISO活動について報告した。

ISO4413の活動では、なりふり構わず主張する米国の取り組みと、機械安全規格を長年、地道に築き上げてきた欧州の2つの姿が印象に残っており、これに関して報告した。読者の参考になれば、幸いである。

参考文献

- 1) ISO国際会議報告書 H20年3月 JFPA工業会 p115~117
- 2) ISO国際会議報告書 H22年3月 JFPA工業会 p2~4

(原稿受付：2013年10月11日)

トピックス

タイ駐在員日記

著者紹介



くり た とし ゆき
栗田敏行

CKD THAI CORPORATION LTD.
Amata Nakorn Industrial Estate, 700/58 Moo1
Bankao, Panthong, Chonburi, Thailand
E-mail : kurita@ckdthai.com

1991年 国立名古屋工業大学工学部修了
同年 CKD(株)入社
2011年 タイに赴任、現在に至る

1. はじめに

タイにおける日系企業の進出は歴史が古く、現在もその勢いは加速の一途である。タイ歴10年20年といった先輩方もここでは多く働かれており、駐在歴3年に満たない筆者がタイを語ることなどは大変恐縮に思うが、執筆の機会をいただいたことで、海外経験ゼロでも何とか生活してこられたタイと、そこで出会った方たちへの感謝の意味で、筆者なりに経験したことを中心にタイを紹介させていただく。

2. タイについて

タイの人口は約6,600万人で、面積は51.3万平方キロメートル（日本の約1.4倍）、マレーシア、ミャンマー、ラオス、カンボジアと国境を接している。日本からは飛行機で約6時間。人口の約95%が仏教徒という仏教の国で、金色に輝く仏塔や仏像は観光雑誌などでもおなじみである（図1）。



図1 金色に輝くタイの仏塔

タイのもうひとつの特徴が王室の国ということであり、タイの国旗は中央の青線が国王、その上下の白線が宗教（仏教）、そして赤線が国家・国民を表している。熱心な仏教徒が多く、国王に対する国民の忠誠心が高いタイという国の特徴が、この三色旗からも見て取れる。

タイと日本との親密な関係の歴史は120年以上にもわたり、経済的にも文化的にもタイにとってもっとも親しみのある国が日本だと言われている。実際、タイにとって最大の貿易相手国は日本であり、タイに進出している外国企業数・投資額も日本がトップである。文化面でも日本に対しては大変親近感を持っており、お寿司が好きというタイ人は結構多い。最近オープンした日本をテーマにしたショッピングモールには、日系のスーパーやチェーン店、日本食レストランなどが軒を連ねているが、店内は日本人ではなく多くのタイ人でいつも賑わっている（図2）。



図2 タイ人で賑わう日本のショッピングモール

3. タイ語について

タイ語は基本的な9種類の母音を持ち、それぞれに短母音と長母音があり、さらに5種類の声調（音の上げ下げ）が組み合わされ、また子音の中にも息を出して発音する有声音と、息を出さずに発音する無声音があったりすることから、発音を習得するのが難しい言語のひとつと言われている。

「マー」も声調が異なるだけで「犬」になったり「馬」になったり「来る」になったりとまったく別の単語になる。「遠い」は「クライ」だが、「近い」も「クライ」であるため、そういった発音に慣れていない日本人にとっては訳がわからない。筆者もカタカナ読みのいい加減な発音で単語を並べる程度しかできないが、日本人と仕事をした経験のあるタイ人や、日本人向けのお店の店員さんなどは、そういったいい加減な（というか明らかに間違った）発音のタイ語もなぜか聞き取ってくれる。「きっとこんなことを言っているのだろう」と想像しながら聞いてくれているのであろうが、知らない人が見ればまるでペラペラとタイ語を話しているかのように見える。日本から家族が遊びに来た時も、会話する相手がそのようなタイ人だと、子供も「お父さんすごい」と勘違いしてくれるのでありがたい。しかし、田舎のタイ料理屋などのいわゆる「普通のタイ人」には何回繰り返し話してもまったく通じないので、そのたびに現実を突きつけられ凹むことになる。

4. タイでの食生活

タイといえばタイ料理。辛いスープの「トムヤムクン」や、青いパイアヤを使った辛いサラダの「ソムタム」などは有名であるが、辛い物とはにかく辛い。「辛い料理が好きだ」と言おうものなら、「日本人向けに手加減した辛さ」ではないレベルの辛い料理が出てくるため、「辛い物は苦手です」と多少演技しておいた方が身の安全のためである。もちろん日本人の口に合うマイルドなタイ料理も数多くあり、それらを覚えておけば、日本からの知人をアテンドする時でも平和なタイ料理が楽しめる（図3）。



図3 タイ風焼きそば パットイ（若干甘い）

また、タイは鶏肉が安くておいしく、鶏をタレにつけて丸ごと焼いた「ガイヤーン」などはビールによく合う。専門店では丸ごと一羽がぶら下げられているので、コレと指させば包丁で刻んでお皿に盛っ

て出してくれる（図4）。



図4 鶏肉を丸ごと焼いたガイヤーン

ちなみに、タイはお酒に対して寛容ではなく、お酒の販売が禁止されている時間帯があり、11時から14時までと17時から24時までの時間帯しか酒類の購入ができない。また、仏教関連の日や選挙の前日当日もお酒の販売や提供が禁止されるため、多くの酒好きな日本人を惑わせている。スーパーでビールを買おうとしてレジで精算を断られ、言葉も通じず困惑している日本人を見ると、赴任当時の自分の姿を重ねてしまうが、これは誰もが乗り越えねばならないタイの酒慣習のひとつである。

5. 水掛け祭り

タイ人がもっとも楽しみにしている連休が4月のタイ正月（ソンクラン）であり、前後に休日をつなげて大型連休にする会社が多い。このソンクラン中はあらゆる場所で水掛け祭りが行われ、日頃おとなしいタイ人もこの時とばかりに騒ぎまくるのが面白い。観光地などでは大勢の人が押しかけ、全身びしょ濡れになりながら水を掛け合って楽しんでいるが、一般道でもピックアップトラックの荷台に子供たちが乗りこみ、ゆっくり走行しながら沿道の人たちと水を掛け合って大喜びしている。

この時期は1年で一番暑い真夏であり、一緒になって水を掛け合うと子供の頃に帰ったようでとても気持ちがいい。ただし、携帯電話や財布の防水は必須である（図5）。



図5 ソンクランに水掛けを楽しむ風景

6. タイの自動車事情

現在、東南アジア最大の自動車生産国となったタイであるが、今後も東南アジアのハブ拠点としての発展が期待されている。周りに目を向けると、本当に自動車が増えてきた。初めてのマイカー購入に対する税制優遇などもあり、ここ1～2年で新車需要が急速に増え、結果的に渋滞の発生頻度も大幅に増えている気がする。バンコク市街地や周辺での大渋滞は巻き込まれたら最後でまったく動かなくなる上、予期せぬ時間帯でも発生するためたちが悪い。アポイント時刻を守ることはビジネスマナーの基本であるが、ここ最近は安全を見て移動される方でも約束時刻に到着できないということが多くなってきた。日本では遅刻の理由で「渋滞しています」と説明しても読みが甘いと思われるだけであるが、最近のタイでは「それは大変でしたね」とねぎらう会話が自然になってきている。

7. 休日の過ごし方

休日の過ごし方で、癒しの時間となっているのが釣り船で沖に出る「海釣り」である。タイに赴任して最初に知り合いになった日本人の方が大の釣り好きで、ご一緒させてもらったことが海釣りとの出会い。以来、その釣りに定期的に参加させていただきながら、そこで知り合った方を通じて別の釣り会にも誘っていただいたりして、海釣りを通じて多くの方との輪が広がっている。会社名をお聞きすると仕事上ではお客様にあたる方も調達先メーカーにあたる方もいらっしゃるが、海の上ではビール片手のんびり語り合ったり釣果を競いあったりと、友人として関係づくりができるので互いに心苦しくない。そしてある時、仕事で困った際には、互いに電話一本ですぐに力になったり、なってもらったりが自然にでき、本当に助けられる。タイだけに限った話ではないだろうが、海外特有の日本人同士のつながりというものを経験させていただいている（図6、7）。

日本人のタイでの休日の過ごし方の代表格は、やはりゴルフであり、私も仕事上で必要と感じ、タイに赴任してからゴルフをゼロから始めたが、センスがない上に練習量も少ないため、未だ初級者のままである。しかし、最近は少し真面目に向き合うようになり、単にコースに出るだけでなく、同じく上達を目指している友人と定期的に一緒に練習に行き、終わった後に食事をしながらいろいろと語り合うことも休日の楽しみの一つになっている（図8）。



図6 タイは釣れる魚の種類が豊富



図7 船上で刺身にするとおいしいコロダイ



図8 ヤシの木を眺めながらのラウンド

8. 最後 に

今まで海外にはまったく縁がなかった筆者が、言葉の通じない国に来て仕事することとなり、たくさんの失敗や戸惑いを重ねてきたが、タイという国、そしてそこで働く人たちに助けられながら、何とか仕事や生活の環境を築いていくことができた。「この国で働かせてもらい給料をいただいている」ということに感謝しながら、新たにタイに来られた方、新たにタイで出会う方たちに、今まで自分が多くの方からいただいていた厚意を、今度は少しずつでも恩返ししていきたいと思っている。

（原稿受付：2013年9月26日）

研究室紹介

東京工業大学香川・只野研究室

著者紹介



きむ いん
金 寅

東京工業大学大学院
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 R2-408
E-mail : kim.i.aa@m.titech.ac.jp

東京工業大学大学院総合理工学研究科メカノ
マイクロ工学専攻博士後期課程、空気圧駆動手
術ロボットIBISのマスターコンピュータに関する
研究に従事、日本フルードパワーシステム学
会学生会員。



や じま たく み
矢 島 拓 実

東京工業大学大学院
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 R2-408
E-mail : yajima.t.ab@m.titech.ac.jp

東京工業大学大学院総合理工学研究科メカノ
マイクロ工学専攻博士前期課程、空気圧駆動手
術ロボットIBISの操作性向上に関する研究に従
事、日本フルードパワーシステム学会学生会員。

1. はじめに

香川・只野研究室は圧縮性流体の計測制御に関する研究をしています。扱う流体は主に空気であり、管路内での特性を調べる研究から空気圧駆動手術支援ロボットに関する研究まで、幅広く行われています。最近では水素を利用した研究も進められています。

研究室の教員は、香川利春教授、只野耕太郎准教授、尹鍾皓助教、原口大輔特任助教の4名です。学生は博士課程の学生3名、修士課程の学生9名、学部4年生1名と留学生数名がおり、さらに顧問、研究員、事務員など、多くの方々が協力して研究室を運営しています。また、東京医科歯科大学に異動された川嶋健嗣教授も積極的に助言をしてくださります。

2. 研究紹介

香川研究室では圧縮性流体のプロセス制御や水素関連の研究をしています。只野研究室では空気圧の応用機器として、主に手術支援ロボット関係の研究を行っています。

2.1 分岐・合流管における動特性評価

現在までに、分岐および合流部分を持つ空気圧管路の動特性について、10Hzまでの領域は確認されてきました。しかし、実際の現場では50Hz近くの高周波域で使われており、この領域の動特性は不明です。そこで、高周波領域における分岐合流管内の状態を一次元モデルにより構築し、実測値と比較によりモデルの妥当性を検討しています。これにより、ガスパイプ内の損失等がわかり、効率のいいパイプ配置を設計することができるようになります。

2.2 等温化原理を用いた水素貯蔵タンク

燃料電池車内の容器に水素を高速充填する際、圧縮熱により水素の温度が急上昇する問題があります。そこで、水素の温度を急上昇させることなく、安全かつ省エネルギーで充填時間を短縮する方法として、高圧水素用準等温化压力容器¹⁾を提案しています。準等温化压力容器はガスより熱容量が大きく、広い表面積を持つ物体を容器内に封入することで充填時の温度上昇を抑える容器です。解析により、体積充填率約2%のアルミ線を入れることで温度上昇を10℃以上抑えることがわかりました。今後実験により、準等温化容器の効果、解析の妥当性について検討します。

2.3 力覚提示の補助

本研究室では力覚提示機能を有するマスタスレーブ型手術支援ロボット「IBIS」を開発しました²⁾。このロボットにおいて、操作者にさらに別の感覚を与えることによって力覚提示を補助し、より高精度にロボットを操作する方法を提案しています。現在行っているのは、提示する力が大きくなるにつれてマスタの温度を上げる方法と、操作者の指先に複数の空気噴流を当てて力の方向を提示する方法です。

マスタの温度制御にはペルチェ素子を用います。この方法により、人間が感じにくい0.5N以下の弱い力でも、温度提示を用いることによって高精度に力を知覚することができました。

また、空気噴流噴きつけ部は図1のようにマスタの先端に取り付けます。ここには4つのノズルがあり、個別に流量を調節した噴流を噴きつけます。こ

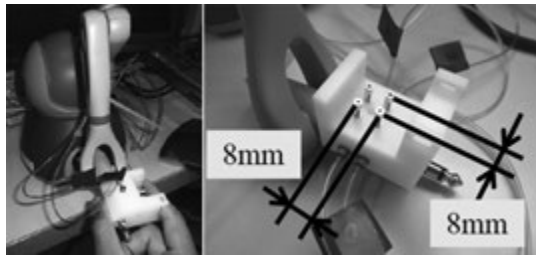


図1 空気噴きつけ部

の手法を用い、縫合実験にて針を目的の位置に向かって高精度に刺すことができることを確認しています。

2.4 力入力型操作インタフェース

近年の力覚提示機能を有するマスタマニピュレータは、多数のアクチュエータが必要となり、広い可動範囲を得るためには、大型化を避けることができません。そこで、アクチュエータなしで操作部に力を加えるだけでロボットを動かせる方法を提案し、コンパクトで可動範囲に制限のない操作インタフェースの開発を行っています。

操作部に加えた力は、仮想のモデルから速度および位置目標値に変換され、ロボットに送られます。スレーブマニピュレータは外力推定機能を有しますので、そのモデルには外力推定値が反映され、操作者による力の制御もできることを確認しました。

3. 行 事

香川・只野研究室では毎年多数の行事が開催されています。

5月頃にはハイキングに行きます。このハイキングでは自然を堪能しながら、新年度で新しくなった研究室のメンバーと積極的な交流が図れます。このハイキング後は皆打ち解け、仲良くなることができます。

6月頃にはキャンパス内のバレーボール大会に参加します。そのために4月から練習を重ね、大会での上位入賞を目指しています。図2は試合中の様子です。2010年には準優勝をすることができました。

8月には研究室旅行に行きます。研究室旅行は1泊2日で行われ、観光をしたりスポーツを楽しんだりします。今年は河口湖へ行きました。この旅行では先生方とも親しく話すことができ、リフレッシュにもなります。図3は研究室旅行でチーム対抗フットサル大会をした後の写真です。

また、香川先生はよく飲み会を開催していただきます。香川・只野研究室の飲み会では、香川先生か



図2 バレーボール大会



図3 研究室旅行(フットサル後)

らリクエストをいただいた料理を、食材を買ってきて自分たちで調理します。この飲み会によって料理の腕も上達しました。

4. おわりに

香川・只野研究室は研究内容も各イベントも非常に魅力的な研究室であり、この研究室に所属することができて良かったと思います。今後の研究生生活も残りわずかですが、最後までしっかりと頑張りたいと思います。

参考文献

- 1) 川嶋健嗣, 藤田壽憲, 香川利春: 等温化圧力容器を用いた空気の非定常流量計測, 計測自動制御学会論文集, Vol. 33, No. 3, pp. 149-154 (1997)
- 2) K. Tadano and K. Kawashima: Development of a master slave system with force-sensing abilities using pneumatic actuators for laparoscopic surgery. In Advanced Robotics, volume 24, pages 1763-1783, 2010.

(原稿受付: 2013年11月14日)

若いフルードパワー技術者に送る 老いた電気屋フルードパワーファンの妄言

著 者 紹 介



の み や ま こ う い ち
野見山 紘 一

株式会社工苑
〒213-0004 川崎市高津区諏訪 1-11-1
E-mail: nomiyama@koenn.co.jp

1966年電気通信大学卒。在学中に家業にて社会心理実験装置を同大学に納入。家業の工苑社を1973年株式会社に改組。社長就任現会長。油圧サーボ制御大好き人間。日本フルードパワーシステム学会会員、元基盤強化委員会幹事。

電気屋の私がフルードパワーの魅力に取り付かれて40年になる。この時代は丁度フルードパワーがマイコンによるシステムコントロールと結びつく時期と一致している。

何故こんなフルードパワーファンが誕生してしまったのか、その辺りを一人の電気屋がそこに至る由来を年寄りの妄言として記してみた。若いフルードパワーエンジニアに何か残せれば幸いである。

1950年台後半にゲルマニウムトランジスタが一般化するまでは電子回路は真空管の時代だった。

その後、自然界にほぼ無限にあるといわれたシリコンが半導体素材のベースとなり、シリコントランジスタは進化し素材純度の向上およびウェハーサイズ大型化と微細加工技術の進歩の中で複合トランジスタからIC（集積回路）化へと進みさらにSSI（小規模集積回路）＜MSI＜LSIへと変遷しつつCPUチップの誕生を見る。そしてこれも4ビットバスから8ビット、16ビット、32ビット、64ビットとバス幅を広げさらに周辺回路もチップ内に取り込んで演算機能だけではなくメモリーやI/Oも組み込まれた大規模システムチップが一般化し、クロック周波数もKHzだったものがGHzとなっている。内部メモリーも当初1Kbitに満たないレジスタしかなかったものが今やGbyteレベルにも達する勢いである。マイコンソフトは機械語でいかに使用メモリーを少なくするかが競われ、フォートラン、コボルといったコンパイラは一棟を占拠した大型コンピュータ設備の上ではじめて有効利用できるものであった。今のパソコンはどんなに安いものでも当時の大型コン

ピュータの機能を凌駕している。

そもそも電子計算機誕生の頃は演算1bitを構成するフリップフロップ回路が2個の真空管で成り立っていた時代があるのだから。

1960年代にはじまるマイクロコンピュータの急激な発展は産業機械制御技術の急速な進化をもたらした。当初はコンピュータは関連ハードウェアの技術競争の時代であったが、80年代にはハードはシステム化された発達段階に入りソフトウェアの進化こそがコンピュータエイジの中心技術となっていくのはご承知のとおりである。

航空機100年の発展過程といわれたがコンピュータは50年で第2の産業革命を成し遂げさらなる発展を続けている。

日常生活のあらゆる分野にコンピュータ技術が適応されており、どんな仕掛けが組み込まれているかなんぞと考えることもない。

フルードパワーもそういった流れの中でコンピュータに結びついたシステム化に向かわざるを得ない。油圧学会がフルードパワーシステム学会と名称変更にした事由である。ただ、実際の装置を構成するにはコンピュータにはソフトウェア技術がその中心になっても装置としては最適なI/O部分無しには成り立たない。これには装置メカシステムと制御コンピュータシステムとを繋ぐものと、操作する人間と制御コンピュータシステムとを繋ぐMMIとが存在することは論を待たない。どちらもハードウェアとソフトウェアの協調が最大限に要求される。

安心、安全、安定、自然負荷の軽減は常に基本課題である（図1）。

コンピュータの発達は同時にシミュレーション技術の発達をもたらした。制御の設計、予測の計算手法を一変させた。さらにその計算手法の新しいアイデアも続々と生まれている。それに伴って実験の量は著しく減じ、破壊テストなども大幅に少なくて済むようにはなったが、それは実験の価値、必要性を減じるものでは決してない。

私たちの会社は私の父親が細々営んでいた写真用

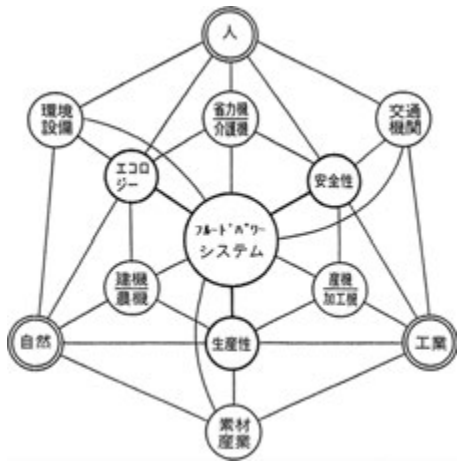


図1 フルードパワー相関図

品製造のワンマンカンパニーを、1965年に電気通信大学と一緒に卒業して就職した大会社をすぐにやめて野見山と一緒に仕事をするべえと言ってくれた同期生3人が押しかけ入社して電子制御屋も開業してしまったものであるが、たまたま親父の東工大同窓コネで中田孝教授が明石製作所を、カヤバ工業から内田油圧に移られた田谷三郎専務が自社とカヤバ工業、不二越などをご紹介くださって、当時丁度世の中にメカトロ化の嵐が吹き始め、精密機械メーカーが一斉に電子制御を考えるようになった時代と一致し、我々にとってはまったくのグッドタイミングであった。

大学出たてのほとんど素人に近い我々にサーボ加振制御のノウハウや、油圧制御機器の電子装置についての技術内容を原理からお教えくださった上記の会社のエンジニアの方々には本当に感謝している。

その中で1980年代半ばにアメリカカリフォルニアシリコンバレーにあるヒューレットパッカード社プロッタ開発チーム出身のDr. ヤコブ・タルが起業したガリル社のデジタルサーボコントローラを日本で売らないかとの話があり、現地でのセールスセミナーに参加したりして販売展開することとなった。もともと電動サーボモーターのコントローラであったがこれは油圧サーボに引きそうと考えて油圧マーケットへの拡販を考えた。A/B相リニアエンコーダのFB信号のみで位置、速度、加速度制御可能でオンフライでのPIDゲインなどのパラメータ可変、2軸の直線・円弧補完、動作プロファイルやシーケンスのメモリー機能など当時としては先進的で、内田油圧にサーボシリンダ付き油圧ユニットを発注してセールス行脚をはじめた。この中でいろいろな油圧業界のエンジニアの方々と面識をいただいたことはその後の財産となった。

その頃、中田孝先生から教え子でもある武蔵工大(当時)の佐藤三禄先生を紹介され、当時油空圧学会の基盤強化委員長の先生から基盤強化委員をやったということで学会のお手伝いを始めることとなった。ここでは北川先生、香川先生をはじめ真田先生、川嶋先生などの諸先生と一緒に仕事をさせていただいた。基盤強化委員としては第3回IFPEXに主催の日本工業新聞社と折衝して大学・高専研究室発表コーナーを設けていただくことができた。

また、油機メーカー各社の油空圧学会員にお願いして展示に使った油機のカットモデルを大学・高専のご要望のあった研究室に寄付していただくシステムを作ったりできた。ここでもいろいろな先生方や各社のエンジニアの方々とご面識をいただくことができた。困った折に非常に心強いご教示をいただける方々である。

このようにして電気屋出身の私がどんどんと油圧制御の奥深さ、面白さを味わってきたわけである。振り返っても、本当に好きなことを面白く仕事にさせていただき十分な充足感が得られた。

閑話休題。

最近妙にプレイという言葉に引っかかっている。ウィキペディアでは英語で「遊ぶ」「試合をする」「ゲームをする」「演奏する」「録音・録画を再生する」「役を演じる」の意とある。機械的な意味は出てこない。一方、手元の三省堂デイレリーコンサイスでは上記の意のほか[機]遊び(余裕)とある。

この「機」遊びの概念について考えてみると、これはブレーキ、ハンドルのガタ、シリンダロッドやピストンの隙間、ジョイント部の余裕などメカの可動部には必ずあり職人さんの腕の見せ所である。洋の東西を問わず、これを遊びという言葉で表す。

一方プレイボーイという言葉がある。米語であるが世界中で通用する。日本語に遊び人という言葉がありほとんど同義である。この日本語は訳語ではあるまい。もの同士が面を接して動くためにはPLAY=遊びを必要とする。これが無いとものはお互いに動けずかじりを起こしてしまう。潤滑油が機能するためには正しい隙間=プレイを要する。

社会が機能するためにも、人間関係にも遊びは必要であり、哺乳動物が種を保存するためにも潤滑が必須である。世に遊びほど大切なものはない？

(失礼ながら文中敬称は略させていただいた)

(原稿受付：2013年10月21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**〈理事会・委員会日程〉**

1月23日	情報システム委員会
1月24日	編集委員会
1月28日	企画委員会
1月31日	理事会
2月4日	基盤強化委員会

〈委員会報告〉**第3回基盤強化委員会**11月25日 15:30～17:00 機械振興会館B3-3
(出席者12名)

- 1) 会員サービス・会員数増加について
- 2) 外部への情報発信について
- 3) 若手フルードパワー育成道場について
- 4) フルードパワー・バーチャルミュージアムについて
- 5) その他

第3回編集委員会12月5日 14:00～17:00
東京工業大学 田町キャンパス キャンパスイノベーションセンター 8F-806会議室 (出席者15名)

- 1) 学会誌発行報告
- 2) 学会誌編集計画
 - ・ Vol.45 No.1「フルードパワーを活用した移動ロボットの最前線」
 - ・ Vol.45 No.2「フルードパワーに貢献する加工、材料、表面処理技術」
 - ・ Vol.45 No.3「エアコンプレッサの最新技術」
 - ・ Vol.45 No.4「フルードパワーの魅力(案)」
- 3) その他
 - ・ トピックスについて
 - ・ 会誌出版経費の合理化について

- ・ ロゴ問題について

第3回企画委員会11月29日 15:00～17:00 機械振興会館
地下3階3B-3号室 (出席者16名)

- 1) 平成25年度実施事業に関する報告・審議事項
 - ・ オータムセミナー終了報告
 - ・ 平成25年秋季講演会終了報告
 - ・ ウィンターセミナーに準備状況について
 - ・ その他
- 2) 平成26年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - ・ 平成26年春季講演会併設セミナーについて
 - ・ 平成26年春季講演会について
 - ・ オータムセミナーについて
 - ・ ウィンターセミナーについて
 - ・ 公益事業について
 - ・ その他
- 3) その他審議・確認事項
 - ・ 会誌1月号の掲載予定会告記事について
 - ・ 研究委員会規程、内規について
 - ・ 委員会の開催時期について
 - ・ WGの構成について
 - ・ その他

第3回委員長会議会11月25日 14:30～15:30 機械振興会館B3-3
(出席者9名)

- 1) 新会長推薦について
- 2) 平成25年秋季講演会開催状況について
- 3) 平成26年度フェロー認定者推薦状況について
- 4) 学会の財務基盤の強化の進捗状況について
- 5) 各委員会からの報告
- 6) その他

会 告

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

平成25年度 ウインターセミナーのお知らせ 「大型機械と油圧技術」

開催趣旨：

昨今の省エネ化／環境重視等のニーズを背景に、パワーエレクトロニクスを始めとした電動機の技術革新に伴い、各種機械装置においては、電動シリンダやリニアモータ等の電動アクチュエータが普及していますが、それら電動アクチュエータでは実現困難な、油圧駆動システムが必須とされる分野は顕然と存在しています。本セミナーでは、各種大型機械における油圧システムを取り上げ、高出力／大容量をはじめとした、油圧ならではの長を活かしたシステムの紹介を通じて、油圧技術の

現状と今後の展開について展望したいと考えています。

講演内容：ブルドーザーの油圧駆動システム（コマツ）／船の操舵装置（川崎重工業株式会社）／超大型鍛造プレス油圧システムの概要（日本エアロフォージ株式会社）／グラブ浚渫船と大型油圧システム（株式会社小島組）

開催日時：2014年2月21日(金) 13:00～16:20

会 場：機械振興会館 本館地下3階B3-2
(東京都港区芝公園3-5-8)

触れて学べる！ 入門者向き実習講座「油空圧技術」 空気圧システム制御の実務 (M1301)

主 催：一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会
協 力：独立行政法人 高齢・障害・求職者雇用支援機構
大阪職業訓練支援センター、関西職業能力開発促進センター（ポリテクセンター関西）

募集要項

方 針：企業においてはじめて油空圧技術に携わる人材を対象とした導入教育。座学で学んだ内容を実習で体験し、興味と理解を深める教育をおこなう。

期 間：平成26年6月11日(水)～13日(金)

会 場：ポリテクセンター関西（大阪府摂津市三島）
<http://www3.jeed.or.jp/osaka/poly/>

対 象：学会ホームページを参照下さい。

研修概要：参加者は油圧と空気圧の双方の講義と実習を受けることができます。詳細は学会ホームページを参照下さい。

(1) 講義 6月11日(水) 9:15～16:00

(2) 実習 6月12日(木)および13(金) 9:15～16:00

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

一般社団法人日本機械学会 関西支部 第330回講演会 実務者のための振動機素と制振・制御技術

主 催：一般社団法人 日本機械学会関西支部

日 時：2014年1月27日(月)～28日(火)

会 場：大阪科学技術センター8階中ホール（大阪市西区靱本町1-8-1 / TEL: 06-6443-5324）

COMPSAFE2014（第1回安全・安心のための計算理工学国際会議）

共 催：日本計算力学連合・日本計算工学会・東北大学災害科学国際研究所

開 催：2014年4月13～16日

会 場：仙台国際センター

The 12th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2014)

第12回「運動と振動の制御（国際会議）」

主 催：一般社団法人 日本機械学会

開 催：2014年8月4日(月)～6日(水)

会 場：札幌コンベンションセンター

会 告

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

平成26年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー 「フルードパワーに貢献する材料, 加工, 表面処理技術」のお知らせ

開催日: 平成26年5月28日 (水)

開催趣旨:

平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナーは平成26年5月28日(水)に機械振興会館(東京都港区)で開催されます。本講演会では、フルードパワーに貢献しモノづくり基盤を担っている材料、加工、表面処理技術について企業の具体的な事例や最新の研究・技術開発成果についてご発表

をいただきます。詳細は学会ホームページに随時掲載いたしますので、ご確認をいただきますようお願いいたします。

なお、日本フルードパワーシステム学会誌45巻2号(2014年3月号)が当日の講演資料となりますので、各自ご持参を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。

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催 平成26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: 平成26年5月29日(木)・30日(金)

開催趣旨:

平成26年春季フルードパワーシステム講演会は平成26年5月29日(木)・30日(金)に機械振興会館(東京都港区)で開催されます。本講演会では、一般講演に加えて、特別講

演・オーガナイズドセッション・製品技術紹介セッションや技術懇談会などを企画する予定です。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。

平成26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」のお知らせ

開催日: 平成26年5月30日(金)

開催趣旨:

本講演会では、企業関係の方々に製品・技術の紹介をしていただくオーガナイズドセッション(「製品・技術紹介セッション」)の通算15回目の開催を企画しました。本企画は、企業関係の方々に、現在、企業がお持ちの製品・技術あるいは検討課題などを、学会主要行事の1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・技術の交流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、平成15年より表彰事業の1つとして設立された「最優秀講演賞」社会人部門の審査対象となります。企業関係の会員みなさまの参加を心よりお待ちしております。

会 告

(一社)日本フルードパワーシステム学会 賛助会員一覧表

アイシン・エイ・ダブリュ(株)
 (株)明石合銅
 アズビル(株)湘南工場
 アズビルTACO(株)
 (株)アドヴィックス
 アネスト岩田株式会社
 イートン(株)
 (株)医器研
 (株)IHI
 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
 (株)打江精機
 SMC(株)
 SMC(株)中国
 (株)大阪ジャッキ製作所
 大瀧ジャッキ(株)
 (株)オプトン
 鹿島通商(株)
 KYB(株)
 KYBエンジニアリング・
 アンド・サービス(株)
 KYB-YS(株)
 (株)桂精機製作所
 神威産業(株)
 川崎重工業(株)
 キャタピラー・ジャパン(株)
 旭東ダイカスト(株)
 協和シール工業(株)
 極東開発工業(株)
 (株)クボタ
 クロダニューマティクス(株)
 (株)古河製作所
 (株)工苑
 甲南電機(株)
 (株)コガネイ
 コスモ石油ルブリカンツ(株)
 (株)小松製作所
 (株)小松製作所試験センタ
 (株)小松製作所研究本部
 (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

佐藤金属株式会社
 三和テッキ(株)
 三輪精機(株)
 CKD(株)
 (株)島津製作所
 (株)ジェイテクト
 勝美印刷(株)
 JX日鉱日石エネルギー(株)
 ジヤトコ(株)
 新日鐵住金(株)交通産機品カンパニー
 住友建機(株)
 住友重機械工業(株)
 住友精密工業株式会社
 制御機材株式会社
 千住金属工業(株)
 第一電気(株)
 (株)TAIYO
 タイヨーインターナショナル(株)
 (株)タカコ
 (株)タダノ
 ダイキン・ザウアーダンフォース(株)
 ダイキン工業(株)
 ダイワ(株)
 大生工業(株)
 調和工業(株)
 (株)都筑製作所
 TMCシステム(株)
 (株)TNK
 テラル(株)
 天竜丸澤(株)
 トーヨーエイトック(株)
 東京メータ(株)
 TOHTO(株)
 東北特殊鋼(株)
 東明工業(株)
 DOOSAN CORPORATION
 東洋機械金属(株)
 同和発條(株)
 東京計器(株)
 東京計器パワーシステム(株)
 特許機器(株)
 特許庁
 豊興工業(株)
 (株)豊田自動織機
 中村工機(株)

長津工業(株)
 長野計器(株)
 ナブテスコ(株)
 ニッタ(株)
 日新沪器器工業(株)
 日本アキュムレータ(株)
 (株)日本アレフ
 日本機材(株)
 日本クエーカー・ケミカル(株)
 日本工業出版(株)
 日本シリンダ共同事業(株)
 日本精器(株)
 日本電産トソク(株)
 (一社)日本フルードパワー工業会
 日本ムーク(株)
 (株)野村商店
 (株)ハイダック
 日立建機(株)
 (株)日立建機ティエラ
 (株)日立建機カミーノ
 (株)日立製作所
 日立住友重機械建機クレーン(株)
 広瀬バルブ工業(株)
 ピー・エス・シー(株)
 フジサンケイビジネスアイ
 フェスト(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)
 マサモト(株)
 (株)増田製作所
 松巳鉄工(株)
 マックス(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)
 油研工業(株)
 理研精機(株)
 ワールドインシュアランス
 ブローカーズ(株)

編集室

次号予告

—特集「フルードパワーに貢献する材料、加工、表面処理技術」—

〔巻頭言〕「フルードパワーに貢献する材料、加工、表面処理技術」発行にあたって	武田 稔
〔解説〕電子機器用の難燃ポリ乳酸複合材の開発	木内 幸浩、位地 正年
DLC-Si被覆電磁クラッチを用いた次世代電子制御AWDカップリングの開発	安藤 寛之
水圧システムに貢献する電磁材料	山田 裕樹
電磁軟鉄バリレス加工の構築	窪田 朝徳、李 和樹
油圧ポンプ・モータに貢献する摺動部品材料と表面処理技術	西田 信治
〔会議報告〕ASME/BATH FPMC 2013会議におけるフルードパワー技術研究動向	田中 豊
ICHP2013におけるフルードパワー技術研究動向	坂間 清子
機械学会・山梨講演会OS「流体パワーによる駆動と制御」におけるフルードパワー技術研究動向（仮）	川上 幸男
計測自動制御学会・流体計測制御シンポジウムにおけるフルードパワー技術研究動向（仮）	藤田 壽憲
〔トピックス〕特許文献を調べる・特許電子図書館の活用3 日本の分類・テーマコード1	木原 和幸
JIS B 8370:2000 空気圧システム通則の改正	張 護平
アメリカ駐在員日記	黒尾 賢治
〔研究室紹介〕山梨大学工学部情報メカトロニクス工学科油空圧制御研究室	大内 俊英
〔企画行事〕平成26年度企画行事紹介	大内 俊英、桜井 康雄
平成25年度オートムセミナー開催報告「鉄道車両とフルードパワー技術」	風戸 昭人

平成25年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 吉田和弘（東京工業大学）	委員 成田 晋（KYB株）
副委員長 塚越秀行（東京工業大学）	西海孝夫（防衛大学校）
委員 伊藤雅則（東京海洋大学）	藤田 壽憲（東京電機大学）
内堀晃彦（宇部工業高等専門学校）	丸田和弘（株コマツ）
小倉 弘（日立建機株）	村松久巳（沼津工業高等専門学校）
加藤友規（福岡工業大学）	柳田秀記（豊橋技術科学大学）
北村 剛（油研工業株）	山田真の介（株TAIYO）
木原和幸（財工業所有権協力センター）	山田敏夫（株コガネイ）
栗林直樹（川崎重工業）	吉満俊拓（神奈川工科大学）
五嶋裕之（機械振興協会）	担当理事 宮川新平（KYB株）
佐藤恭一（横浜国立大学）	山田宏尚（岐阜大学）
妹尾満（SMC株）	
多田昌弘（CKD株）	編集事務局 藤谷秀次（学会事務局）
中野政身（東北大学）	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(株)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。（社外頒布用の複写は許諾が必要です。）

権利委託先：(中法) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

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

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

日本フルードパワーシステム学会論文集

第45巻, 第1号 (2014)

平成26年1月

目次

研究論文

1. 出力圧力が高速で変更可能なアキュムレータの
開発とその応用

芦 金石, 留 滄海, 齊藤 理人,
大坂 一人, 大場 孝一, 北川 能 1

2. 気体用超精密高速応答圧力レギュレータを用いた
エアタービンスピンドルの回転数制御

加藤 友規, 東嶋 元気, 矢澤 孝哲,
大坪 樹, 野崎 悠輔, 田中 克敏 8

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.45, No.1

January 2014

Contents

Paper

1. A Study on Development of Accumulator whose Output Pressure Can
Be Adjusted Quickly and Its Application
Jinshi LU, Canghai LIU, Michihito SAITO,
Kazuhito OSAKA, Kouichi OBA, Ato KITAGAWA 1
2. Rotation Control of Air Turbine Spindle using High Precision,
Quick Response Pneumatic Pressure Regulator
Tomonori KATO, Genki HIGASHIJIMA, Takanori YAZAWA,
Tatsuki OTUBO, Yusuke NOZAKI, Katsutoshi TANAKA 8

Published by
The Japan Fluid Power System Society
c/o Kikaishinko Building
3-5-22 Shiba-koen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011, Japan

研究論文

出力圧力が高速で変更可能なアキュムレータの開発とその応用*

芦 金 石**, 留 滄 海***, 斉 藤 理 人****
大 坂 一 人*****, 大 場 孝 一*****, 北 川 能*****

A Study on Development of Accumulator whose Output Pressure Can Be Adjusted Quickly and Its Application

Jinshi LU, Canghai LIU, Michihito SAITO
Kazuhito OSAKA, Kouichi OBA, Ato KITAGAWA

In this study, an Active Charge Accumulator (ACA) is proposed as a new accumulator whose output pressure can be adjusted to N levels quickly. Because an ACA is a piston type accumulator which is divided into several oil chambers, the effective area of the oil chambers in the ACA can be changed by switching the valves at the oil chamber inlets. Therefore, the required one of N-levels output pressure can be obtained. In a system with N accumulators to provide N levels output pressure, an ACA can be used to replace the N accumulators. Experimental results verified that the efficiency of the valve-controlled hydraulic servo system using a 2-level pressure ACA is greatly improved, and the power consumption of the system is reduced when compared with a traditional valve-controlled hydraulic servo system.

Key words : High efficiency, Hybrid power supply, Accumulator, ACA, Pressure conversion device

1. 緒 言

油圧サーボシステムは弁制御サーボシステムとポンプ制御サーボシステムに分類できる。通常の弁制御サーボシステムでは、常に定容量ポンプとリリーフ弁からなる油圧源を用いて、油圧源の圧力は一定であるので以後は1圧弁制御サーボシステム（略称：1圧システム）と呼ぶことにする。この1圧システムは応答性は良いが効率が悪いという欠点があり、これに対してポンプ制御サーボシステムはシステムの効率は良いが応答性は悪いという欠点がある。これに対し、筆者らはN圧ハイブリッド油圧源を既に提案した¹⁾。そして2圧ハイブリッド油圧源を用いた

弁制御サーボシステム（略称：2圧システム）を例として検証実験を行い、N圧ハイブリッド油圧源を用いた弁制御サーボシステムは高効率かつ高応答であることを明らかにした^{1),2)}。

しかし、N圧ハイブリッド油圧源では、出力圧力の異なる複数個のアキュムレータを使用するため、アキュムレータの切替、充填は煩雑になる。本論文では、出力圧力の異なる複数個のアキュムレータの役割を一つで担える、すなわち出力圧力がN段階に変更可能な新形のアキュムレータとして、アクティブチャージアキュムレータ（Active Charge Accumulator：略称ACA）を提案し、その作動原理を説明する。そしてACAを用いた弁制御サーボシステムが高効率であることを検証する。

ACAを用いた弁制御サーボシステムの例として、2圧ACAを用いた弁制御サーボシステム（略称：2圧ACAシステム）の検証実験を行う。そして2圧ACAシステムが1圧システムに比べて効率がよく、一体形2圧ハイブリッド油圧源（ポンプからアキュムレータへの油の充填、およびアキュムレータからサーボ弁への油の放出が同一の弁で行われるタイプ。）を用いた弁制御サーボシステム²⁾とほぼ同等な性能を有することを明らかにする。なおここで提案するACAを用いた弁制御サーボシステムのアプリケーションとしては、N圧ハイブリッド油圧源を用いたシステム²⁾と同様、工作機械のような予め負荷が分かる場合を考えて

*平成24年12月3日 原稿受付

**中国大連工業大学機械工程与自動化学院
(所在地：中国遼寧省大連市甘井子区輕工苑1号)

***中国西南科技大学製造科学与工程学院
(所在地：中国四川省綿陽市青竜大道中段59号)

****日本アキュムレータ株式会社
(所在地：静岡県清水区西久保415)

*****油研工業株式会社
(所在地：神奈川県綾瀬市上土棚中4-4-34)

*****東京工業大学大学院理工学研究科
(所在地：東京都目黒区大岡山2-12-1)
(E-mail：kitagawa@cm.ctrl.titech.ac.jp)

いる。

2. アクティブチャージアキュムレータ (ACA)

2.1 ACAの考え方

ピストン形アキュムレータのピストンの油室側をFig. 1のように階段状にし、油室を幾つかに分割しておく。各油室の接続先を充填時と放出時で切り換えると、充填圧力と放出圧力を変えることができる。

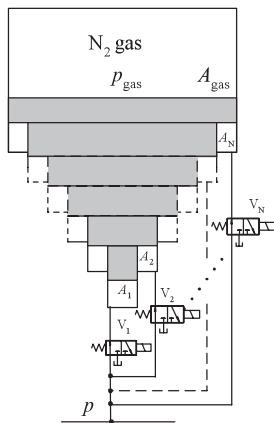


Fig. 1 Concept of active charge accumulator

ACAの油室の受圧面積をそれぞれ $A_1, A_2, \dots, A_N$ とする。Fig. 1に示した出入口に設置された3方向切換弁 $V_1, V_2, \dots, V_N$ により、各油室はOFFでは回路に、ONではタンクに接続される。ピストンに作用する力のバランスから、ACAの充填時あるいは放出時の圧力 p は式(1)となり、少なくとも N 段階の圧力を得ることができる。

$$p = \frac{A_{\text{gas}}}{\sum A_i} p_{\text{gas}} \quad (1)$$

なお、 A_{gas} は N_2 ガス側の受圧面積であり、 p_{gas} は N_2 ガスの圧力である。また式(1)の分母は、入口の切換弁がOFFとなっていて回路に接続された状態の油室の受圧面積の総和である。特に、全ての切換弁がOFFの場合は油室の受圧面積の総和は A_{gas} に等しくなり、 $p = p_{\text{gas}}$ となる。

2.2 ACAを用いた弁制御サーボシステム

ACAは各油室の出入口に設置された切換弁のON/OFFにより圧力が変更できるので、 N 圧ハイブリッド油圧源の複数のアキュムレータの役割を一つで担うことができる。 N 個のアキュムレータを有する一体形および分離形 N 圧ハイブリッド油圧源を用いた弁制御サーボシステムをFig. 2に、ACAを用いた弁制御サーボシステムをFig. 3に示す。この両者が有する機能はほぼ同等と考えられるが、後者にはアキュムレータが1個しかないという特徴がある。

ACAのうち最も基本的な2圧ACA (Fig. 4) について、その計算例を示す。2圧ACAは2圧すなわち、低圧モードと高圧モードを有しており、低圧モードの圧力範囲を2.7 ~ 2.87MPaに、高圧モードの圧力範囲を8.4 ~ 8.7MPaに設

定すると、式(1)に両モードの低圧限界の圧力を $p_{\text{gas}} = 2.7\text{MPa}$, $p = 8.4\text{MPa}$ のように代入することにより、受圧面積比は、式(2)のように得られる。

$$A_a : A_b : A_{\text{gas}} = 0.32 : 0.68 : 1 \quad (2)$$

この面積比は3章以降の実験のために開発した2圧ACAの油室の受圧面積比に等しく、各受圧面積 A_a , A_b , A_{gas} は

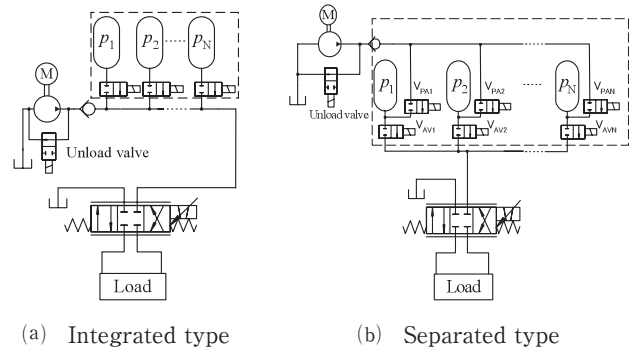


Fig. 2 N-level pressure valve-controlled hydraulic servo system

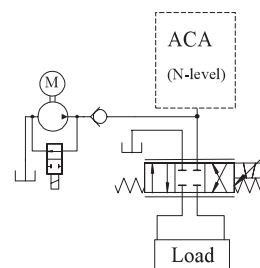


Fig. 3 N-level pressure ACA valve-controlled hydraulic servo system

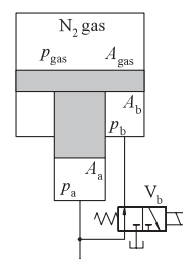


Fig. 4 Schematic diagram of 2-level pressure ACA

それぞれ 121.6cm^2 , 258.4cm^2 , 380cm^2 である。

3. 実験

3.1 2圧ACAシステム

N 圧ACAを用いた弁制御サーボシステムの作動原理の説明および高効率の検証のため、Fig. 4に示す2圧ACAを用いた2圧ACAシステムを例として、作動原理を説明し、検証実験を行う。この2圧ACAシステムをFig. 5に示す。

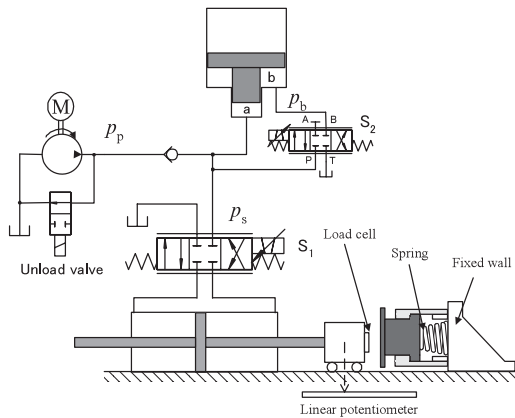


Fig. 5 2-level pressure ACA valve-controlled servo system

Table 1 Specification of the experimental setup

Press force	5700N, max
Cylinder	Piston diameter: 22mm Cylinder bore diameter: 40mm Stroke: 150mm
Spring	26.1N/mm
Pump	6 L/min, 1500rpm

Fig. 5に示した2圧ACAの油室bの出入口に設置する高速の切換弁として高速リニアサーボ弁（定格流量 60L/min, 周波数応答330Hz@-3dB/410Hz@-90°） S_2 を使用する。またシリンダの位置および力を制御するサーボ弁として高速リニアサーボ弁（定格流量 10L/min, 周波数応答350Hz@-3dB/450Hz@-90°） S_1 を用いる。ポンプのアンロード弁として廣瀬バルブ工業（株）社製の電磁操作式ストップバルブ（HSO-T03-A10F-21）を用いる。ほかのシステムの仕様をTable 1に示す。N₂ガスの充填圧力を2.38MPaに設定する。2圧ACAの低圧モードの出力圧力範囲と高圧モードの出力圧力範囲は第2章に示したとおりである。

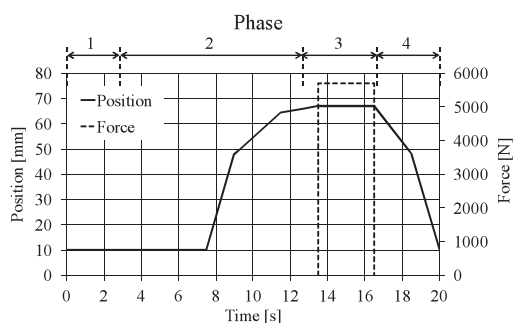


Fig. 6 Target position and force

Fig. 5のシリンダの0～20sにおける目標出力（変位・力）の例としてFig. 6を用いる。Fig. 6において、シリンダは最初位置決め制御が行われ、途中からはピストンがばねを押しながら進み13.5sに壁に到達する。壁に達した後、つまり目標変位が67mmに達した後、シリンダを力制御に切り換え、ピストンが壁を押し続ける。16.5s以降は再び位置決め制御

が行われピストンが壁から離れる。すなわち、シリンダは、13.5s～16.5sの間は力制御、それ以外は位置決め制御が行われる。

Fig. 5に示した2圧ACAからサーボ弁 S_1 への供給モードとしてTable 2に示した二つが考えられる。一つ目は弁 S_2 の入力信号が-10Vで、 S_2 のPポートがAポートに、BポートがTポートに接続され、油室aの圧油だけで駆動される場合で、この状態を高圧モード（High）という。二つ目は弁 S_2 の入力信号が10Vで、 S_2 のAポートがTポートに、PポートがBポートに接続され、油室aと油室bの両方の圧油で駆動される場合で、この状態を低圧モード（Low）という。

Table 2 Two operating conditions of the power supply

Pressure mode	Value of S_2	Port of servo valve
High	S_2 : -10V	P→A B→T
Low	S_2 : 10V	A→T P→B

そしてTable 2に示した低圧モード（Low）と高圧モード（High）、およびポンプのロードとアンロードの組み合わせにより、Table 3に示す4つの作動状態が考えられる。状態HLと状態HUは高圧モード（High）で、ポンプがロードあるいはアンロードの場合である。状態LLと状態LUは低圧モード（Low）で、ポンプがロードあるいはアンロードの場合である。

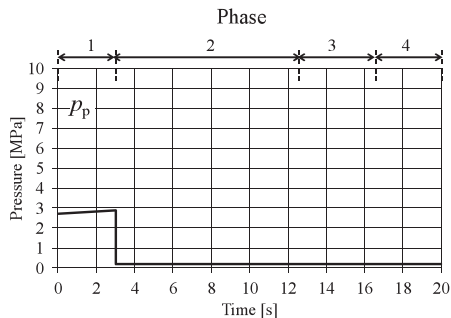
Table 3 Running Models of the servo system on ACA

Running model	Pump	Pressure mode
LL	Load	Low
LU	Unload	
HL	Load	High
HU	Unload	

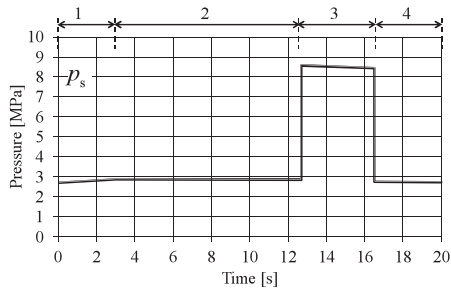
2圧ハイブリッド油圧源では、2つのアキュムレータに圧油を充填することが不可欠であるため、充填を行う際、低圧充填と高圧充填の両方を行うことが必要である。しかし2圧ACAでは、油室側の受圧面積の変化により、ACAからの供給圧力を変化させることができるので、充填方法が簡単になる。2圧ACAには3つの充填方法がある。第1の方法は、低圧モード時にだけACAに圧油を充填する方法である。この方法の場合、ACAの作動状態にはTable 3に示したLL, LU, HUの3つがある。第2の方法は、高圧モード時にだけACAに圧油を充填する方法である。この方法の場合、ACAの作動状態にはTable 3に示したLU, HL, HUの3つがある。なお高圧充填状態（HL）の場合は、ACAの油室aを回路に、油室bをタンクに接続するので、ポンプから油室aに圧油を充填し、タンクから油室bに油が

充填される。最後に、第1の方法あるいは第2の方法で充填を行うと、充填が不十分となる場合は、低压モード時と高压モード時の両方で充填することが考えられる。これを第3の方法という。この方法の場合、ACAの作動状態にはTable 3に示したLL, LU, HL, HUの4つがある。本論文では、2圧ACAシステムの目標出力の周波数が低く、流量を多量に必要としないため第3の方法は必要なく、第1あるいは第2の方法での実験が十分可能であるので、ここでは試行的に第1の方法で実験を行うこととした。

Fig. 6に示す変位・力の目標に対し、以下では、0～20sの間をFig. 6に示す4つのPhaseに分け、各Phaseの2圧ACAの作動状態を具体的に述べる。分かり易くするため、後述の実験結果（実験そのI）を参考にして描いた各Phaseの圧力変化の説明図をFig. 7に示す。なお、初期の圧力モードは低压モードとし、圧力 p_s の初期圧力が27MPaとなるようあらかじめ油を充填しておくとする。



(a) Pump pressure



(b) Supplied pressure to the servo valve

Fig. 7 Illustration of pressure change

Phase 1は状態LLであり、ポンプはサーボ弁 S_1 へ圧油を供給すると同時に2圧ACAの油室aと油室bの両方に圧油を充填する。圧力 p_s が287MPaに達すると、Phase 2に移行する。Phase 2は状態LUであり、ポンプはアンロードとなり2圧ACAの油室aと油室bの両方からサーボ弁 S_1 に圧油が供給される。位置決め制御が終われば、位置決め制御から力制御へ、つまり低压モードから高压モードへ切り換え、Phase 2からPhase 3に移行する。実際は余裕を考慮してシリンダ変位が66mmに達した瞬間、つまり力制御が始まる67mmの直前に高压モードに切り換える。切り換える時に、2圧ACAの

油室bをタンクに接続し、油室bの油圧が高速で約0になると、圧力 p_s が84MPa以上に達し、高压モードになる。Phase 3は状態HUであり、2圧ACAの油室aからサーボ弁 S_1 に圧油が供給される。ACAの容量が十分であれば、力制御の間では油圧回路圧力を84MPa以上を保ちながら圧油を供給し続けることができる。力制御が終われば、力制御から位置決め制御へ、つまり高压モードから低压モードへ切り換え、Phase 3からPhase 4に移行する。実際は余裕を考慮してシリンダ変位が66.9mmに達した直後、つまり位置決め制御が開始された後に低压モードに切り換える。Phase 4はPhase 2と同じ状態LUである。

以上をまとめると、弁 S_2 およびアンロード弁の制御手順はTable 4に示すようになっている。すなわち、低压から高压あるいは高压から低压へのモード切り換えは変位によっており、その変位は試行錯誤によって決めた。またポンプのロードとアンロードの切り換えは圧力によって行った。このように、ポンプに接続したアンロード弁と2圧ACAの油室bの出入口に繋げる弁 S_2 を適切に制御すれば、ポンプ、2圧ACAが交代でロードセンシングの状態を保ちながらサーボ弁に必要な流量・圧力を供給することができる。

Table 4 Switching conditions of valves

	Switching conditions	Change of valve state
Phase1→Phase2 (LL→LU)	$p_s \geq 287\text{MPa}$	Unload valve: unload
Phase2→Phase3 (LU→HU)	Displacement increases to 66mm	valve (S_2): -10V
Phase3→Phase4 (HU→LU)	Displacement decreases to 66.9mm	valve (S_2): +10V

2圧ACAと同様に、N圧ACAにおいてもポンプに接続したアンロード弁とACAの各油室の出入口の切換弁として高応答の制御弁を用い、ACAから負荷駆動に必要な圧油を供給するようにすれば、N圧ACA油圧源は高応答でロードセンシングが可能な油圧源となる。そしてこの油圧源と弁制御方式を組み合わせれば、高効率弁制御サーボシステムの実現が可能となる。

3.2 実験そのI

N圧ACAを用いた弁制御サーボシステムの有効性を確認するため、システムの効率特性と応答特性の両面を調べる必要がある。本論文ではまず、効率特性についての検証実験を行う。実験はFig. 5に示す2圧ACAシステムを用いて行った。

実験そのIにおいて、目標出力（変位・力）としてFig. 6を用いた。この実験は位置決め制御と力制御の切り換えが必要な例である。切換弁の制御手順はTable 4と同じである。

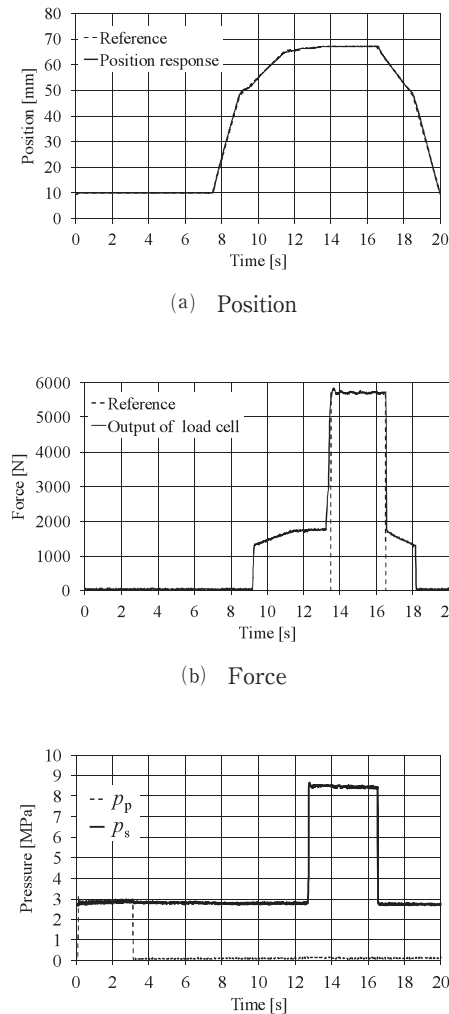


Fig. 8 Experiment I

実験結果をFig. 8示す。Fig. 8(a), (b)から、位置決め制御及び力制御は目標によく追従していることが確認できた。Fig. 8(c)から、サーボ弁 S_1 への供給圧力 p_s は負荷に応じて2段階に制御されていることが確認できた。Fig. 8(b)のロードセルの出力（シリンダの負荷）ならびに(c)のサーボ弁 S_1 への供給圧力より、2圧ACAはロードセンシングが実現されていることが確認できた。そしてFig. 8(c)に示すポンプの供給圧力 p_p により、2圧ACAシステムは1圧システムに比べて、ポンプが発生した流体動力が大幅に削減されているのが確認できた。詳しく説明すると次のようになる。ポンプの吐き出し流量を一定と見なすと、2圧ACAシステムのポンプが生成した流体エネルギーはポンプの供給圧力 p_p が示す線で囲まれた面積に対応しているのに対し、1圧システムのポンプが常に84MPa（高圧モードの圧力の最低設定値）の圧油を供給していると仮定すると、そのポンプが生成したであろう流体エネルギーはFig. 8(c)において高さ84MPaの長方形の面積に対応している。この面積比より2圧ACAシステムのポンプが生成した流体エネルギーの1圧システムに対する削減率を求めると約92%となる。すなわ

ち2圧ACAは、Fig. 6のような目標出力に対して一体形2圧油圧源¹⁾と同程度の流体動力の削減性能を有することがわかった。

3.3 実験そのⅡ

Fig. 5に示した実験装置を用い、実験そのⅠにおいてシリンダの変位が40mmとなる位置を実験そのⅡの原点にし、振幅25mm、周期6sと周期2sの正弦状の目標値を与えた場合の位置制御実験を行った。周期2sの実験結果を例として説明する。なお、ポンプの吐出流量を15L/minとした。Fig. 9の破線に示すように、変位が10mmに達するまではシリンダは無負荷で、変位が10mmに達した後はピストンがばねを押しながら進み、変位がピークの25mmを過ぎ再度10mmに達した後はピストンがばねから離れるようにシリンダの初期位置を設定した。

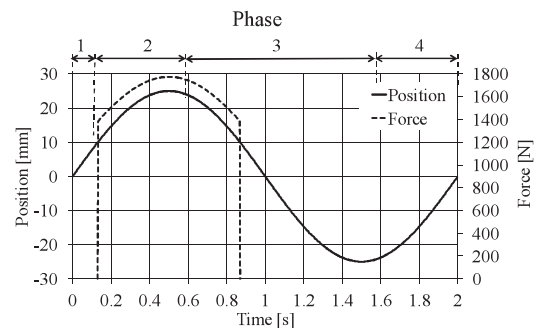
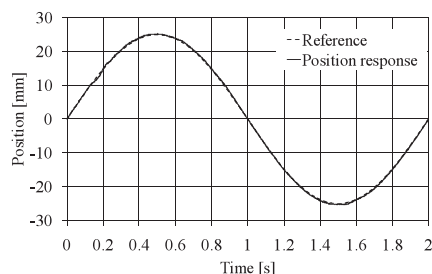


Fig. 9 Target position and force in experiment I

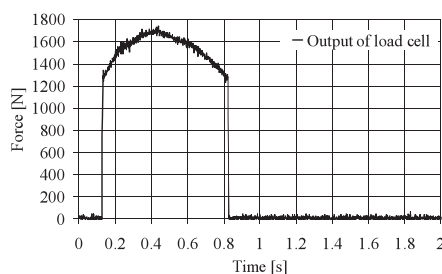
2圧ACAを用いてシステムの効率向上を行うが、余裕を考慮して、シリンダ変位が9mmからピークを過ぎた後の24mmまでの区間では2圧ACAが高圧モードとなるようにし、それ以外の区間では低圧モードとなるようにした。

以下では、0～2sの間をFig. 9に示す4つのPhaseに分け、各Phaseにおける2圧ACAの作動状態を具体的に述べる。2圧ACAの初期充填圧力によってPhaseの順序が異なってくることを説明するため、例として実験の前の2圧ACAの初期充填圧力だけを実験Ⅰで設定した27MPaではなく287MPaと設定した。そのためPhase1はTable3に示す状態LUとなっている。Phase2は状態HUである。Phase3は状態LLである。Phase4はPhase1と同じ状態LUである。なお、Phase3の充填終了時刻は2圧ACAの圧力が低圧モードの出力圧力範囲の上限（287MPa）を越える時刻で決まる。実験結果をFig. 10に示す。Fig. 10(a)から、位置決め制御は目標によく追従していることが確認できた。Fig. 10(b)の実線はロードセルの出力、すなわちシリンダの負荷ばねの力である。Fig. 10(c)に示したサーボ弁 S_1 への供給圧力 p_s から、サーボ弁への供給圧力は負荷に応じて2段階に制御されていることが確認できた。Fig. 10(b)のロードセルの出力（シリンダの負荷）ならびに(c)に示したサーボ弁 S_1 への供給圧力により、2圧ACAがロードセンシングを実現していることが確認できた。そして、2圧ACAシステムは1圧システ

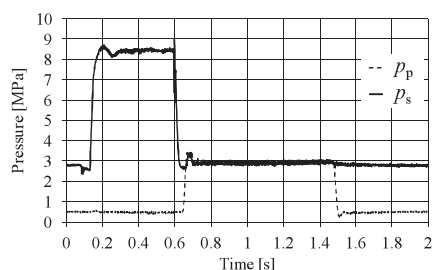
ムに比べて、ポンプが発生した流体動力が大幅に削減されているのが確認された。その削減率を実験と同様に計算すると約80%となり、効率が大幅に向上したと言える。2圧ACAは、正弦状の目標出力に対して一体形2圧油圧源³⁾と同程度の流体動力の削減性能を有することがわかった。



(a) Position



(b) Force



(c) Pressure of pump and supplied pressure to the servo valve

Fig. 10 Experiment II

3.4 消費電力

本章ではこれまで、2圧ACAシステムが1圧システムに対して高効率であることを表す指標として、ポンプが発生したかあるいは発生したであろう流体動力の削減率を用いてきた。これに対し、多くの場合、ポンプは電動機で駆動されており、消費される電力はポンプが発生する流体動力と若干異なる。そこで本節ではポンプを駆動するための電動機の消費電力を実際に測定することにより、消費電力がどの程度削減されるかを確認する。

まずポンプがアンロード状態 (6 L/min : $p_p \approx 0.10 \text{ MPa}$, 15 L/min : $p_p \approx 0.45 \text{ MPa}$), 低圧充填状態 ($p_p = 2.7 \text{ MPa}$) の各状態における電動機の消費電力を横河メータ&インストルメンツ株式会社製CW120を使い、2電力計法によって測定

した。ここで、ACAでは使用するポンプは本来定容量形ポンプでよいが、本実験では幅広い実験条件に対応するため、可変容量形ポンプを2通りの状態で固定して使用している。これをTable 5に示す。アンロード状態での消費電力は吐出圧力が低いにもかかわらずかなり大きいことが分かる。

Table 5 Power consumption in pump unloading

Flow	Pump unloading	Low pressure
6 L/min	0.781kW	1.055kW
15 L/min	0.961kW	1.530kW

次に、実験そのⅠの目標値、および実験そのⅡ（周期6sと周期2s）の目標値の3種類の目標値に対するシリンダ往復の実験を行い、一定時間内の平均消費電力を測定した。平均消費電力およびその削減率をTable 6に示す。

Table 6 Power consumption of high efficiency experiments

No	Input signal & Pump flow rate	Electric power: 1-level pressure system $p_s = 8.4 \text{ MPa}$ kW	Power reduction by 2level pressure ACA system			
			① Electric power pump : running		② Electric power pump stopped	
			kW	%	kW	%
1	Cycle 6 L/min	1.683	0.789	53	0.187	89
2	6s, 25mm 15 L/min	2.619	0.986	62	0.420	84
3	2s, 25mm 15 L/min	2.637	1.116	58		80

No.1（実験そのⅠの目標値）の場合、1圧システムでの平均消費電力は1.683kWであった。これに対し、2圧ACAシステムの平均消費電力はかなり小さく、大幅な削減が実現されている。Table6には3種類の削減率を示した。それぞれ、①はアンロード時も電動機でポンプを回転したままの場合、②はアンロード時には電動機を止めポンプを停止した場合の平均消費電力の削減率である。③はFig.8(c)の説明で示したようなポンプが発生する流体動力（吐出流量と吐出圧力の積）から求められる削減率であり、参考のために示した。2圧ACAシステムにおいてアンロード時もポンプを動かしたままの①の場合、平均消費電力はかなり削減されているものの③ほどではない。アンロード時にポンプを止める②の場合は、アンロード時の電力損失がないので、①より大きく③に近くなる。しかし、電動機が起動停止を繰り返す際の起動時の電力消費のため、②の削減率は③の場合より若干小さい。

No.2（実験そのⅡ、周期6s）の場合も平均消費電力はNo.1と同様、電動機を止めた方が削減率は良くなり、流体

動力から求められる削減率に近づく。No.3（実験そのII，周期2s）も同様であるが，②の実験結果がないのは，アンロード時間が短く，ポンプを止めるほどの時間がないためである。

これまではACAを用いたシステムの効率を従来の1圧サーボシステムを対象として比較したが，現在一般的となっているポンプ制御システムとの比較では次のことが言える。すなわちポンプ制御システムもACAを用いたシステムもリリーフ弁からの無効流量がなく，効率の違いにはポンプ駆動エネルギーが大きく影響する。インバータ制御される前者の電動機は低回転ほど，また低負荷率ほど効率が低い，後者の電動機は高効率点で一定回転数で運転され効率高い。一方，ACAを用いたシステムには弁制御による圧力損失が必ず存在する。したがって，両者の効率比較を行う場合，使用条件が大きく影響すると推測される。これらについては今後の課題としたい。

4. 結 言

N圧ハイブリッド油圧源をコンパクトに実現できるアクティブチャージャキュムレータ（ACA）を提案し，ACAの作動原理を説明した。そしてACAを用いた弁制御サーボシステムが高効率であることを検証した。

例として2圧ACAシステムの検証実験を行った。いずれの実験においても，2圧ACAはロードセンシングが実現されていることが確認できた。そして2圧ACAシステムは2圧システムと同様，1圧システムに比べて効率が向上することを明らかにした。また，実験の際，消費電力を測定し，

1圧システムに比べて，消費電力が大幅に削減されることを確認した。なお2圧ACAは2圧ハイブリッド油圧源より，構成が簡単になるという利点がある。本論文は比較的低周波数領域（一体形2圧ハイブリッド油圧源が使用可能な385Hz以下の周波数領域）について実験を行い，2圧ACAシステムが一体形2圧ハイブリッド油圧源を用いた2圧システムと同等の性能を有することを明らかにした。比較的高周波数領域（385Hz以上の周波数領域）については今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 芦金石, 留滄海, 斉藤理人, 大坂一人, 大場孝一, 北川能：N圧ハイブリッド油圧源とそれを用いた高応答高効率油圧サーボシステムに関する研究（第1報，N圧ハイブリッド油圧源の提案と効率向上の検証実験），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 42, No. 3, p. 46-52 (2011)
- 2) 芦金石, 留滄海, 斉藤理人, 大坂一人, 大場孝一, 北川能：N圧ハイブリッド油圧源とそれを用いた高応答高効率油圧サーボシステムに関する研究（第2報，システムの応答に関する実験と消費電力），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 44, No. 5, p. 95-101 (2013)
- 3) Lu, J., Liu, C., Kitagawa, A., Saito, M., Osaka, K., Oba, K. : Study on N-level Pressure Hybrid Power Supply Hydraulic Servo System with High Efficiency and High Response, Proceedings of 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, p. 79-84 (2011)

研究論文

気体用超精密高速応答圧力レギュレータを用いた エアタービンスピンドルの回転数制御*

加藤 友規**, 東嶋 元気**, 矢澤 孝哲***
大坪 樹***, 野崎 悠輔***, 田中 克敏****

Rotation Control of Air Turbine Spindle using High Precision, Quick Response Pneumatic Pressure Regulator

Tomonori KATO**, Genki HIGASHIJIMA**, Takanori YAZAWA***,
Tatsuki OTUBO***, Yusuke NOZAKI***, Katsutoshi TANAKA****

The aim of this research is to establish a quick and robust rotation control method for the air turbine spindle used in ultra-precision machining. In ultra-precision machine tool, such as an aspherical lens generator, air turbine spindles with aerostatic bearing are widely used due to their beneficial properties, such as high precision, high speed, low friction, and low vibration. Nevertheless, when a disturbance force (e.g., cutting force) is given to the spindle, the rotation speed of the spindle tends to decrease. Because methods of controlling the air supply pressure and the flow rate are not sufficiently precise and quick, it has been impossible to control the rotation speed and the output torque of the air turbine spindle. To solve these problems, in this research, we developed a high-precision quick-response pneumatic pressure regulator and applied it to the rotation feedback control of an air turbine spindle. We also set a disturbance force observer in the feedback control system, in order to avoid rotation speed change caused by the disturbance force given to the air turbine spindle. By simulation and experiment, the effectiveness of the proposed method is evaluated.

Key words : Pneumatics, Air turbine spindle, Rotation control, Disturbance observer

1. 緒 言

超精密非球面加工機などの超精密加工機械において、高精度・高速対応・低摩擦・低振動などの優れた特性を有する静圧空気軸受が広く使用されている¹⁾²⁾。静圧空気軸受は、軸と軸受の間に介在する $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ の空気膜により、軸・軸受部品の回転軸の誤差運動が抑制され、その他の軸受と比較して振動・発熱・摩耗が少ないという特性を有する。高速回転が求められる軽負荷の小径工具用や回転噴霧式塗装用のスピンドルの駆動には、静圧空気軸受を用いたエアタービンスピンドル（以下、エアタービンスピンドル）が用いられている³⁾。しかし、エアタービンスピンドルの回転数に関して次のような問題が報告されている。

1) 空気圧供給のシステム上の問題による回転数の変動。

2) 加工負荷の変動による回転数の変動⁴⁾。

まず、エアコンプレッサからの供給空気圧の変動に同期して空気圧供給ラインの圧力が変動すること、工場などで複数の空気圧機器が同時に使用された場合に供給空気圧の変動が抑制できない等の問題が発生する。

次に、加工負荷による回転数の低下を抑制するために、エアタービンスピンドルでは一般的に供給空気圧を変化させて所定の回転数を維持する方法が採られている。しかし、この方法では、回転数をステップ状に変化させる場合や回転数の変動を高速に制御することが困難である。これまでにエアタービンスピンドルの供給空気圧・流量・回転数・出力トルクの関係に関する研究は行われている³⁾が、供給空気圧と流量を高速かつ精密に制御する技術が確立されておらず、出力・回転数の高速かつ安定的な制御は困難であった。

本論文では、エアタービンスピンドルの回転数の安定化と高速制御の実現を目的とし、これまで開発を進めてきた気体用超精密高速応答圧力レギュレータ（以下、HPQR）⁵⁾を用いて供給空気圧を制御した。特に、本報では加工負荷による切削外乱を起因とする回転数の変動を抑制させるために、HPQRの制御系内に回転数フィードバックと外乱オブザーバを組み込むことで、タービン駆動側供給圧を制御

*平成25年3月8日原稿受付

**福岡工業大学大学院工学研究科

(所在地：福岡県福岡市東区和白東3-30-1)

(E-mail: t-kato@fit.ac.jp)

***長崎大学大学院工学研究科

(所在地：長崎県長崎市文教町1-14)

****東芝機械株式会社ナノ加工システム事業部

(所在地：静岡県沼津市大岡2068-3)

した。

2. 主な記号

F : 力	[N]
F_{cut} : 外力	[N]
F_{dis} : 推定外力	[N]
G_{in} : 流入流量	[kg/s]
G_{out} : 流出流量	[kg/s]
k_a : トルク係数	[Nm/Pa]
K_i : 積分ゲイン	[Pa/(min ⁻¹ s)]
K_p : 比例ゲイン	[Pa/min ⁻¹]
K_{Gl} : HPQRの積分ゲイン	[V/kg]
K_{ph} : HPQRの比例ゲイン	[(kg/s)/Pa]
K_v : スプール弁の流量ゲイン	[(kg/s)/V]
N : 回転数	[min ⁻¹]
N_{ref} : 目標回転数	[min ⁻¹]
P : 圧力	[Pa]
P_b : 軸受圧力	[Pa]
P_{comp} : 補償圧力	[Pa]
P_{ref} : 圧力目標値	[Pa]
$\dot{P}$: 圧力微分値	[Pa/s]
R : 気体定数	[J/(kg K)]
T_N : 回転数制御の時定数	[s]
T_o : オブザーバの時定数	[s]
T_p : 圧力制御の時定数	[s]
T_t : タービンの時定数	[s]
V : タンクの容積	[m ³]
θ : 温度	[K]
τ_{dis} : 外力トルク	[Nm]
$\hat{\tau}_{dis}$: 推定トルク	[Nm]

Table 1 Specifications of HPQR

S.P. valve	FESTO MPYE-5-1/8LF-010B
Pressure sensor	TOYODA PD64S
Sensor resolution	50Pa
P.D. sensor	TMC DTP-8
Isothermal chamber	1 L

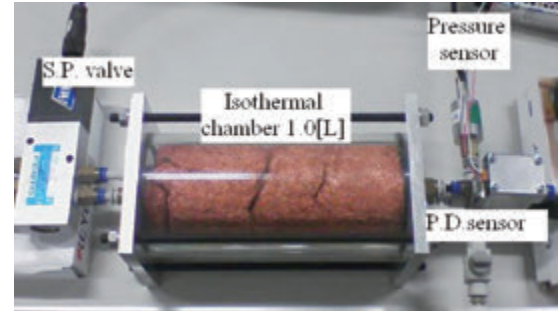


Fig. 1 Fabricated HPQR

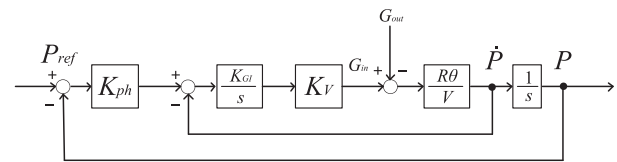


Fig. 2 Block diagram of HPQR

ここで、マイナーループの制御時定数がメインループの時定数よりも十分に小さいと仮定すると、圧力制御系の伝達関数は一次遅れ系で近似することができる。本論文における実験においては、HPQRの圧力制御の時定数が $T_p=0.05s$ となるように各値を設定した。

3. HPQRの構成

HPQRは、圧力センサと圧力微分計（P.D.Sensor）を用いて、スプール型サーボ弁（SP.弁）を制御することで供給空気圧を高速かつ精密に制御する減圧機構である。本研究で使用したHPQRの写真をFig.1に示す。また、HPQRの装置構成をTable 1に示す。HPQRの制御ブロック線図をFig.2に示す。HPQRの圧力制御系は、圧力制御をメインループ、圧力微分値をマイナーループとした2つの制御系から構成した微分先行型の制御系⁵⁾である。これにより、HPQRの供給側・下流側のいずれで外乱（流量や圧力の変動）が生じて、その影響を打ち消す制御の構成となっている。HPQRの制御系の伝達関数は式(1)となる。

$$\frac{P}{P_{ref}} = \frac{1}{\frac{K_{Gl}K_v}{K_{ph}}s^2 + \frac{1}{K_{ph}}s + 1} \doteq \frac{1}{1 + T_p s} \quad (1)$$

4. 回転数フィードバックによる制御

4.1 回転数制御系の構成

エアタービンスピンドルの回転数を測定しフィードバックすることで、回転数を制御する制御系を構成した。回転数制御系のブロック線図（概略図）をFig.3に示す。回転数は回転系により計測・フィードバックされ、PIコントローラを経てHPQRに圧力制御の指令値が与えられる。この構成により、エアタービンスピンドルの供給圧力を制御し、回転数を高速かつ安定的に制御することが可能である。

4.2 PIコントローラの設定

後述の第5章にて、加工負荷による外力の補償を行うにあたって、本章では加工負荷がない静的な状態においてエアタービンスピンドルの回転数を制御することを目的に制御系を構成した。HPQRの圧力制御の時定数 T_p は、後述の回転数フィードバック制御系の時定数よりも十分に小さいと仮定し、回転数フィードバック制御系内でのHPQRの圧力制御の伝達関数を1に近似した。

また、エアービンスピンドルの供給圧力 P と回転数 N の関係は一次遅れ系によって表すことができる。本実験で使用するエアービンスピンドルの静特性を事前に測定し、時定数はおよそ $T_t=10\text{s}$ であった。そこで、エアービンスピンドルの回転数をフィードバックしHPQRの圧力を制御するために、PI制御により回転数をフィードバック制御するコントローラを設定した。本論文で示すエアービンスピンドルを用いた実験ではコントローラによる回転数の時定数を $T_N=1.0\text{s}$ と設定した。つまり、回転数フィードバック制御系の回転数の伝達関数は次式となる。

$$\frac{N}{N_{ref}} \doteq \frac{1}{1+T_N s} = \frac{1}{1+1.0s} \quad (2)$$

5. 外乱オブザーバ

5.1 外乱オブザーバの制御系構成

第4章で述べた回転数フィードバック制御系は、エアービンスピンドルに作用する加工負荷の影響を無視して設定した。本章では、この加工負荷による外乱の影響を補償し、回転数を安定的に制御することを目標とした。この加工負荷による外乱を測定し、フィードバックできれば外乱の影響を打ち消すことが可能となる。その結果、システムのロバスト性を高めることができる。しかし、エアービンスピンドルは静圧空気軸受を用いているため、接触式の力測定器を用いて実際の加工中に負荷トルクを直接測定することは困難である。そこで、エアービーンへの入力と出力から外乱を推定する外乱オブザーバを構成した。供給圧力 P 、回転数 N 、外乱トルク τ_{dis} の関係は P から N までの伝達関数より次式で表し、加工負荷による外乱の推定が可能である。

$$\tau_{dis} = Pk_a - N(1+T_t s) \quad (3)$$

しかし、この方法では回転数の微分値が必要である。外乱オブザーバによる外乱推定値は高周波でハイゲインとなるため観測ノイズの影響を非常に受けやすくなる⁶⁾。そこで、外乱の推定値は適切な時定数のフィルタを通す必要があり、外乱オブザーバ内にローパスフィルタを設定し、ローパスフィルタの時定数を外乱オブザーバの時定数 T_o とした。この時定数を適切に設定することで各外乱がエアービンスピンドルの回転数に与える影響を補償することができる。本実験では制御系の安定性を考慮して、シミュレーション結果より時定数を $T_o=1.0\text{s}$ と設定した。外乱オブザーバの出力 $\hat{\tau}_{dis}$ は次式となる。

$$\hat{\tau}_{dis} = \frac{1}{1+T_o s} \tau_{dis} \quad (4)$$

このとき、回転数 N から外乱オブザーバの出力 $\hat{\tau}_{dis}$ までの伝達関数は式(5)に表すように微分要素を用いない形に変形できる。ブロック線図をFig. 4に示す。

$$\frac{\hat{\tau}_{dis}}{N} = -\frac{1+T_t s}{1+T_o s} = -\frac{T_t}{T_o} - \frac{1-\frac{T_t}{T_o}}{1+T_o s} \quad (5)$$

5.2 外乱オブザーバを組み込んだ回転数制御系の構成

第4章で述べた回転数フィードバック制御系内に5.1節で構成した外乱オブザーバを組み込みFig. 5に示す制御系を構成した。この制御系では、連続的な加工負荷による外乱が作用する状態でも外乱を補償して回転数を高速かつ安定的に制御することができる。この系の回転数制御系の出力は次式になる。

$$N = \frac{1}{1+T_t s} (Pk_a - \tau_{dis}) \quad (6)$$

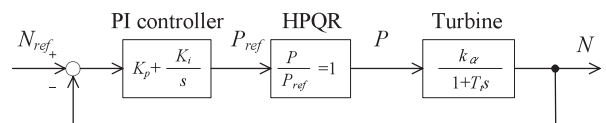


Fig. 3 Block diagram of rotation feedback control

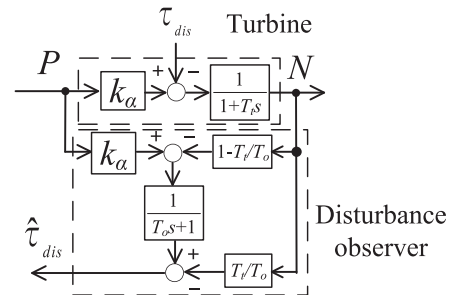


Fig. 4 Block diagram of disturbance observer

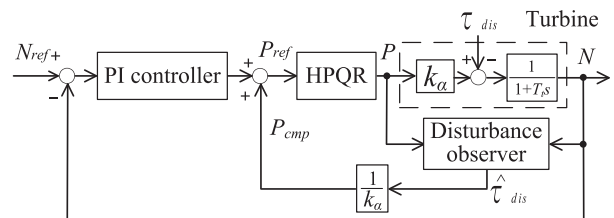


Fig. 5 Block diagram of proposed rotation control system

6. 提案する回転数制御系の性能評価実験

6.1 実験装置構成

第5章で構成した回転数制御系をHPQRに適用しエアービンスピンドルの回転数を制御する実験を行った。実験装置の構成をFig. 6に示す。本実験で使用したエアービンスピンドルはFig. 7に示す東芝機械社製のエアービンスピンドルである。仕様をTable 2に示す。

タービン側供給圧力を制御するために、HPQR、オプトフォトファイバーセンサ（小野測器社製「FS-540, FG-1200」）、DSP（エムティティ社製「s-BOX」）を用いて構成した。なお、静圧空気軸受の供給圧力は市販のダイヤフラム型減圧弁を使用し $P_b=0.5\text{MPa}$ と設定した。（以下、静圧

空気軸受の供給圧力は全て $P_b=0.5\text{MPa}$ と設定する。)

6.2 回転数の高速制御実験

この実験では、回転数制御時と非制御時における応答性を比較するために、エアタービンスピンドルの目標回転数を $N_{ref}=3,000\text{min}^{-1}$ から $4,000\text{min}^{-1}$ にステップ的に変化させ、その際の時定数を比較した。比較のために、回転数非制御時ではタービン側の供給圧を $P=19.2\text{kPa}$ から 26.3kPa にステップ状に変化させることで目標回転数を $N_{ref}=3,000\text{min}^{-1}$ から $4,000\text{min}^{-1}$ にステップ的に変化させた。このとき、エアタービンの回転数を安定させた状態で行うために、100秒間駆動させて回転数が安定した後に回転数をステップ状に変化させた。実験結果をFig. 8に示す。Fig. 8より、回転数非制御時の場合では回転数の時定数は10s程度であったが、回転数制御時に時定数が約1.0sとなり、回転数の時定数を10分の1程度に短縮した。この結果より、所定の回転数を高速に制御することができるため、作業の高速化及び省エネルギー化につながると考えられる。

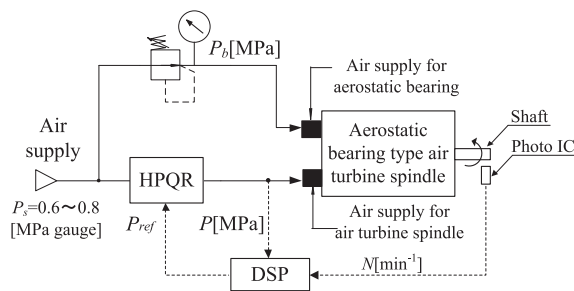


Fig. 6 Configuration of experimental apparatus



Fig. 7 Aerostatic bearing type air turbine spindle

Table 2 Specifications of air turbine spindle

Total weight	10kg
Turbine type	Spindle collision type
Torque coefficient	0.1Nm/Pa
Axial stiffness	26.5N/ μm
Rotation speed	0 min^{-1} (0 MPa) 20,000 min^{-1} (0.2 MPa)

6.3 回転数の安定制御実験

エアタービンスピンドルの回転数の安定性を評価するために、この実験ではエアタービンスピンドルのタービン側の供給圧力を次の3通りの方法で設定し目標回転数に対する応答を比較した。

- ① 市販のダイヤフラム型レギュレータで圧力を設定した場合。
- ② HPQRを用いて供給圧力を一定値に制御した場合。
- ③ HPQRを用いて回転数フィードバック制御をした場合。

本実験ではエアタービンスピンドルを30分間連続で駆動させ目標回転数を $N_{ref}=3,000\text{min}^{-1}$ とした。①と②では、回転数が $3,000\text{min}^{-1}$ となるように圧力を 19.2kPa に設定した。実験結果をFig. 9に示す。また、①の実験時におけるエアコンプレッサの供給圧力（レギュレータ通過前の大元の空気圧源）の変動とエアタービンスピンドルの回転数の変動の関係をFig. 10に示す。Fig. 9より、回転数は①の場合には 150min^{-1} 程度、②の場合には 50min^{-1} 程度の範囲で変動していた。これに対して③（提案方法）の場合には、回転数の変動が 10min^{-1} 以内の範囲に抑制されている。①～③の各条件での実験結果について、それぞれ以下のことが考えられる。

エアコンプレッサからの供給圧力の変動に同期してダイ

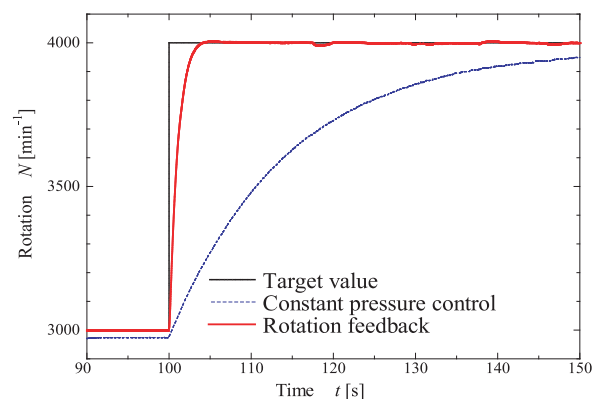


Fig. 8 Experimental results (Step responses of spindle rotation)

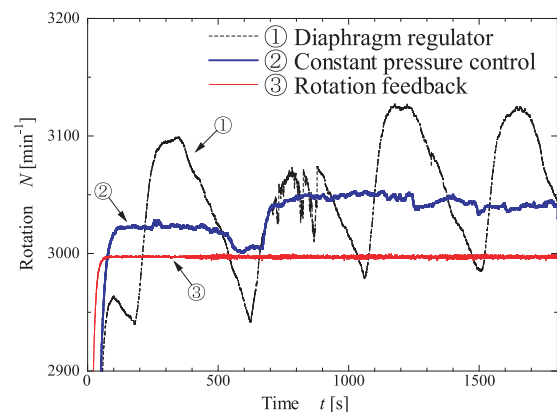


Fig. 9 Experimental results (Stability of spindle rotation)

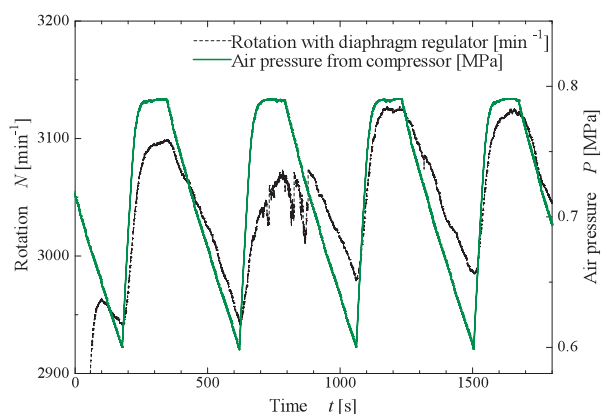


Fig. 10 Experimental results

ヤフラム型レギュレータからの出力圧力が変動したことが回転数変動の原因と考えられる。

静圧空気軸受側の供給圧力が変動することにより静圧空気軸受の剛性が変化し回転数に影響を与えていたと考えられる。

エアコンプレッサからの供給圧力の変動をHPQRで抑制し、さらに回転数をフィードバック制御したことにより、回転数の変動が小さく抑えられている。

6.4 外乱の推定実験

構成した外乱オブザーバが正しく外力を推定できているか確認する実験を行った。実験装置の構成をFig. 11に示す。Fig. 12はエアタービンスピンドルの主軸に外力を与える実験の際の装置の写真を示す。このエアタービンスピンドルの主軸に外力を与える装置は、スラスト方向にエアシリンダ (SMC, CDJ2B16-150-B) を設置しエアシリンダの先端に取り付けたロードセル (東京測器社製, TCLZ-50NA) を主軸の中心半径40mm付近に押し当てられるように装置を構成した。外乱オブザーバによる外乱の推定値は、第5章に示す制御系に圧力センサと回転計の値を用いてDSP内で演算することにより推定した。この実験では、エアタービンスピンドルの目標回転数を $N_{ref}=3,000\text{min}^{-1}$ と設定し、回転数を回転数フィードバック制御で制御した。回転数が十分に安定した状態でエアタービンスピンドルに連続的な外乱が作用したと想定し、0.1N程度の外乱を30秒間与えた。切削外力に関しては様々な報告があるが、本実験ではプリント基板のドリル加工時における切削外力の大きさ⁷⁾を参考に0.1Nとした。

外乱オブザーバの出力値に相当する推定トルク $\hat{\tau}_{dis}$ を推定外力 F_{dis} に変換し、ロードセルの出力値 F_{cut} と比較した。結果をFig. 13に示す。この結果から、このときの F_{dis} と F_{cut} の誤差は最大0.01N程度であり、形態もおおむね一致していた。推定値の位相が遅れて出力されているのは、外乱オブザーバ内のローパスフィルタ ($T_f=1.0\text{s}$) によるものであると考えられる。また、外乱オブザーバではタービンの慣性による時定数を $T_i=10\text{s}$ としたが、実際には条件 (加減速・平衡

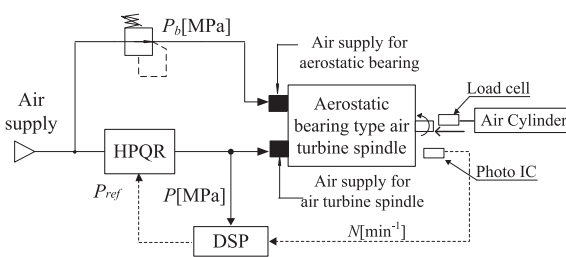


Fig. 11 Configuration of experimental apparatus of disturbance force

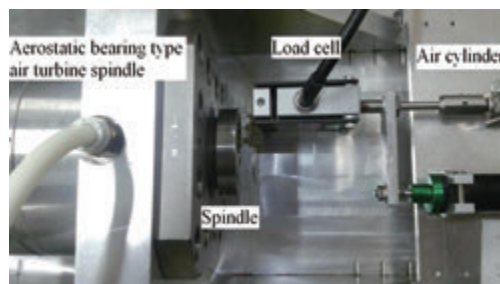


Fig. 12 Experimental apparatus to estimate disturbance force

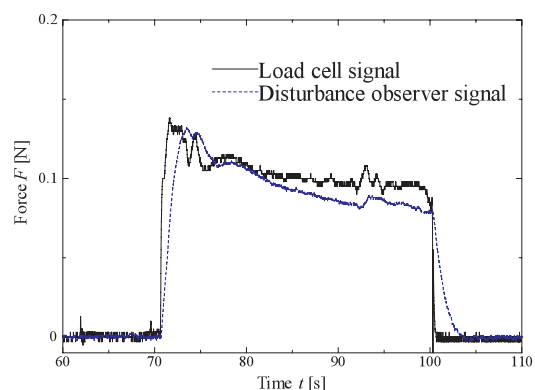


Fig. 13 Experimental results (Presumption of disturbance force)

圧など) によりこの値には変動があると考えられ、このことも推定値の誤差の一因と考えられる。しかしおおむね、外乱オブザーバを用いて加工負荷による外乱を推定できているといえる。

6.5 外乱発生時の回転数制御実験

エアタービンスピンドルに外乱が与えられた際の回転数制御の効果を確認するため、6.4節の実験と同様に $F_{cut}=0.1\text{N}$ に相当する外乱を60秒間与え比較した。ここで、エアタービンスピンドルの目標回転数を $N_{ref}=3,000\text{min}^{-1}$ 、エアシリンダへの供給圧を $P_c=0.3\text{MPa}$ と設定し、以下の方法で比較した。

- ① 市販のダイヤフラム型レギュレータで供給圧を設定した場合。
- ② 外乱オブザーバを組み込まずに回転数フィードバック制御をした場合。
- ③ 外乱オブザーバを組み込んだ制御系で回転数制御をした場合。

この3通りの実験の結果をFig. 14に、②の場合と③の場合の回転数 N の結果の拡大図をFig. 15に示す。

Fig. 14より、市販のダイヤフラム型レギュレータで供給圧を設定した場合は、外乱が与えられると回転数が 2400min^{-1} 程度低下した。

またFig. 15より、外乱オブザーバを組み込まずに回転数フィードバック制御を行った場合は、コンタクトの瞬間に回転数が 150min^{-1} 程度低下したが、時定数で10s程度で目標の回転数に復帰していた。

外乱オブザーバを組み込んだ制御系で回転数制御を行った場合は、コンタクトの瞬間に回転数が 50min^{-1} 程度低下したが、時定数が20s程度で目標の回転数に復帰しており、外乱オブザーバを組み込まなかった場合と比較して、回転数を高速に制御することができていた。また、復帰後の回転数に大きな変動は見受けられず、回転数が安定的に制御できていた。さらに、外乱が与えられなくなった瞬間から、元の回転数に復帰するまでの回転数の変動量や時間も小さく抑えられていた。

この結果より、旋削のような連続的な加工において回転数の一定制御により加工精度の向上が期待される。

7. 結 言

本論文では、エアタービンスピンドルのタービン側の供給圧力をHPQRで制御し、回転数の安定化と高速制御の実現を目的とし、HPQRの制御系に回転数フィードバック制御を取り入れることで回転数を高速かつ安定的に制御する制御系を構成した。また、エアタービンスピンドルに作用する外乱により回転数に定常偏差が発生するが、この影響を補償するために回転数フィードバック制御系内に外乱オブザーバを構成しHPQRに実装し回転数制御系を構成した。実験的な検証を行った結果、以下の結言を得た。

- ・本実験で使用したエアタービンスピンドルでは、回転数制御を適用することで、従来の方法と比較して、回転数の時定数を10分の1程度に短縮し、回転数を高速に制御することが可能となった。
- ・長時間エアタービンスピンドルを駆動させる実験を行い、市販のダイヤフラム型レギュレータを使用した場合と供給圧力の一定値に制御した場合では回転数が大幅に変動を起こしていたが、HPQRに回転数制御を適用した場合は回転数の変動を抑えることができた。
- ・エアタービンスピンドルに擬似的に加工負荷による外乱を与える装置を用いて、エアタービンスピンドルの主軸に連続的な加工を想定した外乱が与えられた状態を再現する実験を行い、外乱がある状態のときに発生していた回転数の偏差の抑制を可能とした。特に、外乱オブザーバを回転数フィードバックの制御系に組み込んだ場合は外乱オブザーバを組み込まなかった場合と比較して、回転数を高速に制御することができた。

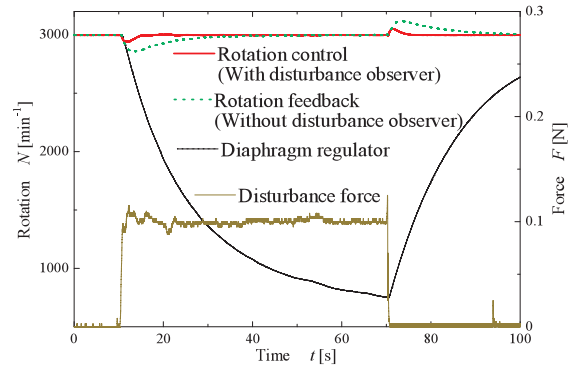


Fig. 14 Experimental results (When the spindle rotation of disturbance force is given)

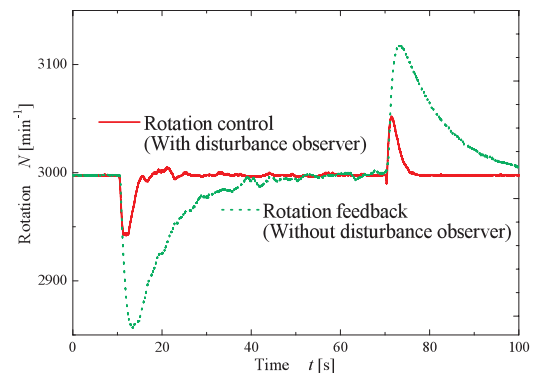


Fig. 15 Experimental results (Enlarged view of spindle rotation)

謝 辞

本研究は科研費（課題番号：23760122）の助成を受けたものである。また、ご助言頂いた香川利春先生・川嶋健嗣先生（東京工業大学）、仙波卓弥先生（福岡工業大学）に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 田中克敏：超精密工作機械のダイナミクス，機械の研究，Vol. 42, No. 1, p. 125 (1990)
- 2) 吉岡勇人，松村晋平，橋詰等，新野秀憲：給気温度制御による空気静圧主軸の熱変形抑制，日本機械学会論文集中集（C編），Vol. 70, No. 700, p. 3605-3610 (2004)
- 3) 田中克敏：超精密加工機械の高精度化の研究，博士学位論文（日本工業大学），p. 49-69 (2008)
- 4) 中尾陽一，浅岡直哉，藤本政良：回転角制御機能を備えた流体駆動スピンドルの開発と回転角制御，日本機械学会論文集中集（C編），Vol. 76, No. 763, p. 281-290 (2010)
- 5) 川嶋健嗣，加藤友規，山崎俊平，香川利春：気体用の超精密高速応答圧力レギュレータの開発，日本フルードパワーシステム学会論文集中集，Vol. 38, No. 2, p. 17-22 (2007)
- 6) 野波健蔵，平田光男，西村秀和：MATLABによる制

- 御系設計, p. 99-102 (1998)
- 7) 小池晶弘, 高橋直紀: プリント基板用微小径ドリルのための微小トルクセンサ開発とトルク測定, 日本機械学会北信越支部第46期総会・講演会講演会論文集, No. 097-1, p. 101-102 (2009)

会 員 各 位

平成26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

平成26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、平成26年度（自平成26年4月1日～至平成27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、何卒ご容赦ください。

敬 具

記

平成26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

- ・25年度以前の会費を未納の方は、新年度分（平成26年度）と併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致しますので、FAXまたはE-mailにてご一報いただきたく、宜しくようお願い申し上げます。

以上

00東京

口座番号 (右詰めにご記入ください)

001103133690

金 額

千 百 十 万 千 百 十 円

※

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 取扱

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)

(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。

切取り取らないで郵便局にお出しください。

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。

払込票兼受領証

口座番号

001103133690

右詰めにご記入ください

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

※

(消費税込み)

受 付 局 日 附 印

料 金

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「社団法人 日本フルードパワーシステム学会」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上げます。

*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、ファクシミリまたはE-mailで学会宛にご連絡くださいますようお願い申し上げます。

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―三二 電話(〇三)三四三三―八四四一 FAX(〇三)三四三三―八四四二
編集兼発行人 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇―一〇―三一―三三六九〇

東京都文京区小石川一―三―七
印刷所 勝美印刷株式会社