

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

May.2012 Vol.43 No.3

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「フルードパワーシステムと地震対策」

——目 次——

特集「フルードパワーシステムと地震対策」

【巻頭言】

「フルードパワーシステムと地震対策」発行にあたって 金 俊完 141

【総論】

フルードパワー技術を用いた免震・制震について 露木 保男 142

【解説】

高層ビル用制震オイルダンパ 栗野 治彦 146

阿佐ヶ谷プロジェクト—3次元免震建物の開発と建設— 高橋 治 149

鉄道車両用地震時脱線防止対策左右動ダンパ 鈴木 貢 156

遠隔操作建設ロボット 山田 宏尚 159

危険建物内への迅速・安全なアクセスを目指した流体ロープウェイ 塚越 秀行, 北川 能 162

【FPIC会議報告】

ICMT2011におけるフルードパワー技術関連の研究 巖 祥仁 165

FLUCOME2011におけるフルードパワー技術研究動向 香川 利春 168

FLUCOME2011 in TAIWAN

【教室】

おもしろ油圧機構 第6回 方向制御弁 大橋 彰 171

おもしろ空気圧「高分子膜式エアドライヤ」 桑名 伸好 174

【トピックス】

産業オートメーション技術における国際標準化 五嶋 裕之 176

—CADデータ交換の諸問題とISO 10303 (STEP) 規格— 山田真の介 179

アメリカ駐在日記 内堀 晃彦 182

TCP/IPを用いたネットワーク通信の基礎 阿部 利章 185

学生によるフルードパワー企業見学記

【会告】

平成24年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ 134

平成24年春季講演会併設セミナー「電動とフルードの社会貢献」 135

第31期通常総会・技術懇談会 開催のお知らせ 136

若手育成フルードパワー道場7「フルードパワーに生かせる電子回路技術」開催のお知らせ 136

触れて学べる！ 入門者向き実習講座「油空圧技術」 137

共催・協賛行事のお知らせ 139

各委員会名簿 140

第2回フルードパワーに関する日中国際共同ワークショップ 145

その他 133, 137, 170, 188

■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

Vol. 43, No. 3

May 2012

—Contents—

Special Issue “Fluid Power Systems as Earthquake Countermeasures”

【Preface】

At the Special Issue of “Fluid Power Systems as Earthquake Countermeasures”

Joon-wan KIM 141

【Survey】

Seismic Isolation and Passive Vibration Control Using Fluid Power Technology

Yasuo TSUYUKI 142

【Explanation】

Structural Control Oil Damper for High-rise Buildings

Haruhiko KURINO 146

Asagaya Project

—Development and Construction of Three-dimensional Seismic Isolation Building—

Osamu TAKAHASHI 149

A Lateral Damper to Improve the Running Safety of Railway Vehicles during an Earthquake

Mitsugi SUZUKI 156

Tele-operation of the Construction Robot

Hironao YAMADA 159

Fluid Powered Ropeway Aiming Rapid and Safe Access into Dangerous Buildings

Hideyuki TSUKAGOSHI, Ato KITAGAWA 162

【FPIC Report】

Researches on Fluid Power Technologies in ICMT 2011

Xiangren YAN 165

Introduction of Fluid Power Technology FLUCOME2011 in TAIWAN

Toshiharu KAGAWA 168

【Lecture】

No.6 Directional Control Valve

Akira OHASHI 171

High Polymer Membrane Air Dryer

Nobuyoshi KUWANA 174

【Topics】

International Standardization of Factory Automation

—Problems of Product Data Exchange and ISO 10303—

Hiroyuki GOTO 176

U.S. Resident Diary

Masanosuke YAMADA 179

Basis for Network Communication Using TCP/IP

Akihiko UCHIBORI 182

Description of Visit to Fluid Power Company by the Student

Toshinori ABE 185

【JFPS News】

133, 134, 135, 136, 137, 139, 140, 145, 170, 188

会 告

〈理事会・委員会日程〉

4月20日	委員長会議・臨時理事会
5月11日	企画委員会
5月25日	理事会
5月30日	編集委員会
6月6日	基盤強化委員会
6月8日	情報システム委員会

〈第6回 理事会〉

- 3月30日 15:00～16:20 機械振興会館B3—1
(出席者17名)
- 1) 一般法人移行準備状況について
 - 2) フェロー候補者の選考結果について
 - 3) 名誉員の推薦について
 - 4) 2012第2回日中国際共同ワークショップ企画について
 - 5) 会員の推移と入退会者について
 - 6) 3月30日評議員会・理事会資料について
(評議員会と共通議題)
 - 7) その他

〈委員会報告〉

第5回基盤強化委員会

- 3月8日 15:00～17:00 機械振興会館B3—7
(出席者10名)
- 1) 会員サービスについて
 - 2) 若手フルードパワー育成道場について
 - 3) フルードパワー・バーチャルミュージアムについて
 - 4) その他

第6回委員長会議

- 3月13日 15:00～17:00
田町キャンパスイノベーションセンター
(出席者7名)
- 1) 一般法人移行準備状況について
 - 2) フェロー候補者の選考結果について
 - 3) 学会賞受賞者への連絡方法について
 - 4) 名誉員の推薦について
 - 5) 2012第2回日中国際共同ワークショップ企画について
 - 6) 3月30日評議員会・理事会資料について
 - 7) その他

第4回情報システム委員会

- 3月22日 15:00～17:00 機械振興会館6S—1
(出席者8名)
- 1) 総会出欠確認システムについて
 - 2) ウィンターセミナーと春季講演会のイベントシステム
に関して
 - 3) 新規会誌・講演会論文集の電子化について
 - 4) FPIC会議報告の執筆者の推薦について
 - 5) 国際シンポジウムのWeb掲載について
 - 6) 会員専用HPのコンテンツの充実について
 - 7) 委員の任期について
 - 8) その他
- 【継続議題】
- 1) 旧会誌、講演論文集の電子化について
 - 2) 会告等のHP掲載手順について
 - 3) HPの更新について
 - 4) その他

第6回編集委員会

- 4月6日 14:00～17:00
田町キャンパスイノベーションセンター
(出席者15名)
- 1) 学会誌発行状況について
 - 2) 学会誌編集計画について
 - 3) トピックスについて
 - 4) 現賛助会員の企業記事について
 - 5) フェローへのコーヒープレーク執筆依頼について
 - 6) 1月号への1年分の特集号予定の掲載について
 - 7) その他

会 告

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24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24年5月24日(木)、25日(金)

講演募集要項

平成24年春季フルードパワーシステム講演会を下記のとおり開催します。本講演会は通常の一般講演に加え、フルードパワーの魅力にフォーカスしたオーガナイズドセッションとして、「ミクロとマクロでブレークスルーを支えるフルードパワー」、「フルードパワーシステムのトライボロジーとその周辺技術」、「生体協調システムとしてのフルードパワー」を企画しました。また、24日午後は編集委員会と企画委員会の合同企画による併設セミナー「電動とフルードの社会貢献」を、25日午後は特別企画として、23日に開催されます日中ワークショップのため中国からお招きした研究者による特別講演を予定しております。本講演会が参加者皆様の情報交換ならびに交流の場となれば幸いです。どうぞ奮ってご参加いただきますようご案内申し上げます。

1. 開催日時：平成24年5月24日(木)～25日(金) 9:00～17:00(予定)
2. 会 場：機械振興会館 本館
〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (<http://www.jspmi.or.jp/about/access.html>)
3. 講演会プログラム：5月中旬に学会ホームページ (<http://www.jfps.jp>) に掲載予定です。
4. 講演会の形式：
 - (1) 講演時間：1題目につき20分(講演15分、討論5分)です。
 - (2) 座 長：会員の中からあらかじめ見識ある方を人選します。
 - (3) 講演論文集：申込講演の前刷原稿をオフセット印刷し、一冊に編集します。
 - (4) 討 論：講演発表時に5分間の討論の時間を設けてありますが、さらに講演会終了後1ヶ月間は会員より「書面による討論」を受け付けています。講演者はその討論に対して学会へ書面をもって回答することを原則とします。
 - (5) 論文集への投稿：講演者は講演会終了後の討論締め切後、「日本フルードパワーシステム学会論文集」に投稿できます。
5. 参加登録：
 - (1) 講演会の参加者は参加登録が必要です。また、講演者は前刷原稿締切日(平成24年4月11日(水))までに事前登録が必要です。参加登録は、学会ホームページ (<http://www.jfps.jp>) 上で行ってください。詳細はホームページをご覧ください。
 - (2) 登録料：登録料には各種講演の聴講料および講演論文集1冊の代金が含まれます。なお、講演会の参加登録者は、5月25日17:00から開催予定の技術懇談会に参加することができます。

平成24年5月10日(木)以降(講演会当日を含む)にご登録の場合は、次の表に示す料金となります。

	正会員・賛助会員企業の社員	名誉員・学生会員	日本フルードパワー工業会会員企業の社員、共催・協賛団体の会員(正会員)	一般
講演会	20,000円	15,000円	22,000円	25,000円
併設セミナー	15,000円	7,000円	17,000円	20,000円

会員資格について不明な点は、学会事務局までお問い合わせください。

また、同一の講演者が複数の講演を行う場合、2件目以降は、1講演につき7,000円が加算されます。

- (3) 別売り講演論文集料金：登録料に含まれる1冊の講演論文集とは別に論文集を購入される場合、正会員・名誉会員・賛助会員企業の社員は6,000円、フルードパワー工業会会員企業社員、協賛・共催団体社員は8,000円、一般は10,000円にて、当日受付において購入できます。また、学会ホームページ (<http://www.jfps.jp>) から講演論文集申込書をダウンロードしE-mailに添付して学会宛 (info@jfps.jp) に送信する方法でも購入できます。ただし、発送は講演会終了後となります。
6. 会員証について：会員証(カード)をお持ちの方は、当日ご持参くださいますよう、御願い申し上げます。

7. 連絡先：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

E-mail info@jfps.jp TEL 03-3433-8441 FAX 03-3433-8442

会 告

日本フルードパワーシステム学会 主催

平成24年春季講演会併設セミナー
「電動とフルードの社会貢献」

(企画・編集委員会合同企画)

開催日時：2012年5月24日(木) 13:00～17:00

開催場所：機械振興会館 本館(東京都港区芝公園 3-5-8)

趣 旨：平成23年5月に予定されていた春季講演会併設セミナー「電動とフルードの社会貢献」は、昨年の5月号会告でお伝えした通り、東日本大震災の影響により、中止のやむなきに至りました。そこでこのたび、改めて学会誌第42巻2号の特集号「電動とフルードの社会貢献」にご執筆された方々の中から講師を数名(7名を予定)お招きし、平成24年春季講演会併設セミナーとして企画させていただくことになりました。電動とフルードのアプリケーションの棲み分け、昨今の環境保護の問題なども含め、相互の新たな利用価値を考える機会として、本セミナーをご活用願えれば幸いです。

なお、本セミナーは学会誌を担当する編集委員会と、講演会やセミナーの企画を担当する企画委員会の合同企画事業の第9回目です。

春季講演会との併設開催ですので、フルードパワーシステムの最新情報を得る絶好の機会であり、ぜひ春季講演会とセットでの参加登録をお勧めします。

受 講 料：本誌中の平成24年春季フルードパワーシステム講演会会告の「5.参加登録」をご参照ください。

テキスト：学会誌42巻第2号(平成23年3月発行)をテキストとして使用します。お持ちの方はご持参ください。

申込方法：当学会のホームページ(<http://www.jfps.jp>)から行ってください。

お問い合わせ：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

当日のプログラム

- 13:00～13:05 企画委員長挨拶 大内英俊(山梨大学)
- 13:05～13:35 「鉄道台車の空気圧を用いたサスペンション制御技術」
住友金属工業株式会社 根来尚志 氏
- 13:35～14:05 「超精密加工・計測分野におけるフルードパワー技術」
長崎大学 矢澤孝哲 先生
- 14:05～14:35 「超大型電動式油圧ショベル」
日立建機株式会社 藤田浩二 氏
- 14:35～15:05 「グリーンメカトロニクスと液圧システム」
名城大学 大道武生 先生
- 15:05～15:15 休憩
- 15:15～15:45 「オートマチックトランスミッションに用いられる電動機器」
日本電産トーソク株式会社 安田智宏 氏
- 15:45～16:15 「小型電動グリッパの機能と特徴」
株式会社TAIYO 大石貴弘 氏
- 16:15～16:45 「パワーステアリングの技術動向」
株式会社ジェイテクト 山内健太郎 氏
- 16:45～16:50 編集委員長挨拶 眞田一志(横浜国立大学)
- 司会：加藤友規(福岡工業大学)

会 告

第31期通常総会・技術懇談会 開催のお知らせ

開催日：平成24年 5 月25日(金)

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会第31期通常総会、技術懇談会をつぎのように開催いたします。

第31期通常総会

1. 開催時間：15：00～16：40
2. 会 場：機械振興会館 地下3階 研修1号室（〒105-0011 東京都港区芝公園3－5－8）
(<http://www.jspmi.or.jp/kaikan.htm>)

技術懇談会

1. 開催日時：17：00～19：00
2. 会 場：機械振興会館 地下3階 ニュー・トーキョー
3. 参 加 費：7,000円 参加費は当日申し受けます。

連絡先：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

E-mail：info@jfps.jp TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

会 告

若手育成フルードパワー道場7

「フルードパワーに生かせる電子回路技術」開催のお知らせ

基盤強化委員会合同企画

開催趣旨：

知識や経験の不足など、わが国のものづくり産業が抱える多くの問題が指摘されております。知識や経験を伝承し共有する面からも、日本フルードパワーシステム学会では明日のフルードパワーを担う若き技術者の方々に積極的に学会活動に参加し、企業と学会、企業と企業のヒューマンネットワークを築く交流の場を設けることが大切であると考えております。また、これらの方々に企業と学会、企業間での橋渡しを担っていただく契機を提供できればと願っています。

そこで、技術者に軸足を置いた横断的な交流を目指し、日本フルードパワーシステム学会でなければできないサロニックな雰囲気の新企画「若手育成フルードパワー道場」を2006年度より開始し大変好評を得ております。

2012年度は「フルードパワーに生かせる電子回路技術」と題し、フルードパワーにマイコンなど電子回路を組み込む（エンベデッド）際に必要な知識を提供します。エンベデッドは機器の高機能化に必須であることは公然の事実ですが、生産のグローバル化時代においてはノウハウをブラックボックスにして独自性を保つための強力な武器ともなり、今後新たな進展をすることは確実です。電磁弁の1個ごとにマイコンが内蔵される時代が来るかもしれません。このような場合、機械技術者に必要となる組込用マイコンやプログラマブル高機能集積回路（FPGA、CPLD）や開発ツール、デジタル電子回路を言語で記述するVHLなどの実践的知識を提供します。講師として、敢えて専門家ではなく、メカトロ化の必要に迫られて自ら知識を習得した機械技術者を迎え、機械技術者にとって障壁となる事項やこのクリアなどについて語ってもらいます。また可能な限り実習を含めます。

会場は芝公園の機械振興会館内を予定しております。教室終了後は講師を囲んで懇談会を開催します。講師および参加者同士と情報を交換する貴重な機会です。奮っての参加をお願いいたします。

開催時期：2012年 5 月、8 月、11 月、2013年 2 月の年間合計 4 回。開催月は予定。

参 加 費：5 万円（4 回分一括）（賛助会員企業の方なら、会員、非会員を問わず参加できます。）

参加者定員：20 名（定員になり次第締め切ります）

以上

会 告

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 (M1303)

主 催：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 (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24年6月13日(水)～15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：以下の要件を満たす者

- (1) 原則として企業に勤務し、事業主の推薦ならびに保証のある者
- (2) 工業高校、普通科高校、大学を卒業、もしくはこれと同等の学力があると認められる者

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。

- (1) 講義 6月13日(水) 9:15～16:00

・油空圧技術の特徴 ・基礎公式 ・作動油と圧縮空気の状態

講師：横浜国立大学 教授 眞田 一志 先生

明治大学 教授 小山 紀 先生

- (2) 実習 14日(木)および15日(金) 9:15～16:00

- ①油圧実習：主な油圧機器と油圧回路

講師：ポリテクセンター関西 正木 克典、中西 英明

- ②空気圧実習：主な空気圧機器と空気圧回路

講師：ポリテクセンター関西 正木 克典、中西 英明

定 員：24名 (定員になり次第締め切らせていただきます)

研修費用：1名につき 12,100円 (消費税込み) お申し込みと同時に下記にお振込みください。

*受講料には、講義のほか教科書、教材費、実習受講費も含まれています。

*研修費用振込先：三井住友銀行 日比谷支店 (普) 7611417

名義：シャダンハウジン ニホンフルードパワーシステムガッカイ

修了証書：講義と実習の修了者には、一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会より、修了証を授与します。

申込方法：一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会事務局にお問い合わせください。

申込期限：平成24年5月31日(木)

問合せ先：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丁目5番22号 機械振興会館 別館102

TEL：(03)3433-8441 FAX：(03)3433-8442 E-mail：info@jfps.jp

会 告

賛助会員会社一覧表

アイシン・エイ・ダブリュ(株)

(株)医器研

(株)明石合銅

(株)IHI

(株)アドヴィックス

出光興産(株)

イー-ton(株)

イナバゴム(株)

(株)インターナショナル・サーボ・データ	天竜丸澤(株)
(株)打江精機	トーヨーエイトック(株)
SMC(株)	東京メータ(株)
SMC(株)中国	TOHTO(株)
NOK(株)	東北特殊鋼(株)
(株)大阪ジャッキ製作所	東明工業(株)
大瀧ジャッキ(株)	DOOSAN CORPORATION
(株)オプトン	東洋機械金属(株)
鹿島通商(株)	同和発條(株)
KYB (株)	東京計器(株)
KYBエンジニアリング・アンド・サービス(株)	特許機器(株)
KYB-YS(株)	特許庁
川崎重工業(株)	(株)豊田自動織機製作所
協和シール工業(株)	(株)豊田中央研究所
極東開発工業(株)	中村工機(株)
(株)クボタ	長津工業(株)
クロダニューマティクス(株)	長野計器(株)
(株)工苑	ナブテスコ(株)
甲南電機(株)	ニッタ(株)
(株)コガネイ	日新汙器工業(株)
コスモ石油ルブリカンツ(株)	日本アキュムレータ(株)
(株)小松製作所	日本工業出版(株)
ザウアーダンフォース・ダイキン(株)	日本精器(株)
(株)阪上製作所	日本電産トーソク(株)
(株)鷺宮製作所	日本ムーグ(株)
三和テッキ(株)	(株)ハイダック
CKD(株)	日立建機(株)
(株)島津製作所	(株)日立製作所
(株)ジェイテクト	広瀬バルブ工業(株)
勝美印刷(株)	ピー・エス・シー(株)
(株)ジコー	フェスト(株)
JX日鉱日石エネルギー(株)	(株)フクダ
住友金属工業(株)	(株)不二越
住友建機(株)	二見屋工業(株)
TACO(株)	ボッシュ・レックスロス(株)
第一電気(株)	昌富工業(株)
(株)TAIYO	マサモト(株)
(株)タカコ	(株)増田製作所
(株)タダノ	マックス(株)
ダイキン・ザウアーダンフォース・マニファクチャリング(株)	松巳鉄工(株)
ダイキン工業(株)	ヤマシンフィルタ(株)
ダイワ(株)	ヤマハモーター hidroリックシステム(株)
大生工業(株)	(株)山武
(株)中央パッキング	油研工業(株)
調和工業(株)	理研精機(株)
(株)TNK	

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

ロボティクス・メカトロニクス講演会2012/03/26

主 催：一般社団法人日本気化器学会 ロボティクス・メカトロニクス部門
 会 期：平成24年5月27日(日)～29日(火)
 会 場：浜松科学館（共催）、アクトシティ浜松 研修交流センター・展示イベントホール

TECHNO-FRONTIER 2012

主 催：社団法人 日本能率協会
 会 期：平成24年7月11日(水)～13日(金) 10:00～17:00
 会 場：東京ビックサイト（有明・東京国際展示場）東展示場4～6ホール

第40回可視化情報シンポジウム

開 催 日：2012年7月24日(火)～25日(水)
 開催場所：工学院大学 新宿校舎 東京都新宿区西新宿1-24-2 TEL: 03-3342-1211
 連 絡 先：実行委員会 幹事：東京理科大学 工学部機械工学科 元祐昌廣 E-mail: mot@rs.tus.ac.jp
 〒102-0013 東京都千代田区九段北1-14-6 TEL: 03-5228-8361 FAX: 03-5213-0977

一般社団法人日本機械学会関西支部 第320回講習会

実務者のための振動基礎と制振・制御技術

開 催 日：2012年7月30日(月)～31日(火)，9:10～16:40
 会 場：大阪科学技術センター（大阪市西区鞠本町1-8-4 / TEL: 06-6443-5324）
 申 込 先：一般社団法人日本機械学会関西支部
 〒550-0004 大阪市西区鞠本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 TEL: 06-6443-2073
 FAX: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp

日本混相流学会年会講演会2012

主 催：日本混相流学会
 開 催：2012年8月9日(木)，10日(金)，11日(土)
 会 場：東京大学柏キャンパス（千葉県柏市柏の森）
 ホームページ：<http://www.jsmf.gr.jp/nenkai2012/index.html>

Dynamics and Design Conference 2012 総合テーマ：「システムを考える。境界を越えて。」

主 催：一般社団法人 日本機械学会
 開 催：2012年9月18日(火)～21日(金)
 会 場：慶應義塾大学日吉キャンパス（横浜市港北区日吉4丁目1-1）
 申込方法：<http://www.jsme.or.jp/conference/dmccconf12/>

第30回記念日本ロボット学会学術講演会

主 催：一般社団法人 日本ロボット学会
 会 期：2012年9月17日(月・祝)，18日(火)，19日(水)，20日(木)
 場 所：札幌コンベンションセンター
 U R L：<http://www.rsj.or.jp/rsj2012>

キャビテーションに関するシンポジウム（第16回）

主 催：日本学術会議 第3部（予定） 第16回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会
 （委員長：東京大学大学院教授・松本洋一郎）
 開 催：平成24年11月23日(金・祝)，24日(土)
 会 場：金沢工業大学（〒921-8501 石川県『野々市市扇が丘7-1』）
 連 絡 先：金沢工業大学工学部機械工学科 佐藤恵一教授 TEL: 076-248-9214
 FAX: 076-294-6734 E-mail: cav16@mlist.kanazawa-it.ac.jp

理 事 会

会 長	横 田 眞 一 (東京工業大学)	伊 藤 寛 (株)ジェイテクト)
副 会 長	香 川 利 春 (東京工業大学)	田 中 豊 (法政大学)
	高 田 芳 行 (SMC(株))	中 野 政 身 (東北大学)
	築 地 徹 浩 (上智大学)	布 谷 貞 夫 (コマツ)
理 事	大 内 英 俊 (山梨大学大学院)	早 川 恭 弘 (奈良工業高等専門学校)
	大 科 守 雄 (日立建機(株))	早 瀬 敏 幸 (東北大学)
	小 山 紀 (明治大学)	藤 田 壽 憲 (東京電機大学)
	榊 原 康 生 (油研工業(株))	宮 川 新 平 (KYB(株))
	桜 井 康 雄 (足利工業大学)	監 事 饗 庭 健 一 (東京計器(株))
	眞 田 一 志 (横浜国立大学)	陸 浦 淳 二 (CKD(株))
	鈴 木 勝 正 (東京都市大学)	柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)
	高 崎 邦 彦 (株)TAIYO)	

企画委員会

委 員 長	大 内 英 俊 (山梨大学)	小 松 英 寿 (株)コガネイ)
副 委 員	高 崎 邦 彦 (株)TAIYO)	鈴 木 健 児 (神奈川大学)
幹 事	桜 井 康 雄 (足利工業大学)	風 戸 昭 人 ((公財)鉄道総合技術研究所)
委 員	饗 庭 健 一 (東京計器(株))	妹 尾 満 (SMC(株))
	赤 木 徹 也 (岡山理科大学)	高 岩 昌 弘 (岡山大学大学院)
	荒 井 一 則 (フジサンケイビジネスアイ)	竹 村 研治郎 (慶應義塾大学)
	伊 藤 和 寿 (芝浦工業大学)	只 野 耕太郎 (東京工業大学)
	内 堀 晃 彦 (宇部工業高等専門学校)	田 中 豊 (法政大学)
	遠 藤 弘 (コマツ)	成 田 晋 (KYB(株))
	大 見 康 生 (川崎重工業(株))	早 川 恭 弘 (奈良工業高等専門学校)
	落 合 正 巳 (協立機電工業(株))	兵 藤 訓 一 (東京計器(株))
	加 藤 友 規 (福岡工業大学)	山 崎 大 生 (東京都市大学)
	川 嶋 健 嗣 (東京工業大学)	和 田 重 伸 (CKD(株))
	川 島 正 人 (東北特殊鋼(株))	顧 問 小 山 紀 (明治大学)
	高 後 哲 也 (日本電産トーソク(株))	

基盤強化委員会

委 員 長	小 山 紀 (明治大学理工学部)	大 科 守 雄 (日立建機(株))
幹 事	佐 藤 恭 一 (横浜国立大学大学)	中 里 雅 一 (KYB(株)技術本部)
委 員	眞 田 一 志 (横浜国立大学大学)	大 場 孝 一 (油研工業(株))
	川 上 幸 男 (芝浦工業大学システム理工学部)	藤 田 壽 憲 (東京電機大学工学部)
	東 川 智 信 (株)TAIYO)	西 股 健 一 (SMC(株)技術本部)
	布 谷 貞 夫 (コマツ)	和 田 重 伸 (CKD(株)生産本部)
	佐 藤 毅 彦 (東京計器(株))	吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)
	斎 藤 賢 治 (日本大学)	香 川 利 春 (東京工業大学精密工学研究所)

情報システム委員会

委 員 長	藤 田 壽 憲 (東京電機大学)	久保田 浩
幹 事	竹 村 研治郎 (慶應義塾大学)	小 薮 栄太郎 (苫小牧工業高等専門学校)
委 員	一 柳 隆 義 (防衛大学校)	田 中 豊 (法政大学)
	巖 祥 仁 (東京工業大学)	塚 越 秀 行 (東京工業大学)
	小 山 紀 (明治大学)	野 口 恵 伸 (KYB(株))
	川 上 幸 男 (芝浦工業大学)	吉 田 和 弘 (東京工業大学)

巻 頭 言

「フルードパワーシステムと地震対策」発行にあたって*

金 俊 完**

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により引き起こされた東日本大震災では、地震とそれに伴って発生した津波による死者が15,854人、行方不明者が3,155人（2012年3月10日時点の警察庁まとめ）となり、現代の日本で最も悲惨な被害を及ぼした¹⁾。今後の地震対策に向け国家レベルで迅速かつ継続的な努力が求められる中、フルードパワー技術の地震対策への貢献が必要とされている。このような状況を背景にして、地震対策におけるフルードパワーシステムの研究動向を調査する重要性が増しつつあることから、本学会では初めて地震関連の特集号が企画された。本特集では、地震災害から国民の生命・財産を守り、豊かで安全・安心な社会を実現するための災害予防対策として、地震による災害の未然防止・予備的対策でのフルードパワーシステムの取り組みの事例を紹介する。また、震災を克服し新しい希望を持てる日本社会への転機として、災害救助、災害復旧・復興におけるフルードパワーシステムの対処の事例を紹介する。

本特集号を構成する6件の解説記事は、1件の総論と5件の解説に区分されている。内訳として、4件は地震による被害の未然防止において、2件は災害後の救助・復興におけるフルードパワー技術に関するものである。以下にその概要を紹介する。

まず、「フルードパワー技術を用いた免震・制震について」では、地震に対して建築構造物の安全性を確保する技術の「総論」として、基礎知識である耐震、制震、免震の違いから幅広く解説している。また、この解説記事では、2011年の東北地方太平洋沖地震におけるオイルダンパを用いた制震ビルと免震ビルの効果を、都心の高層ビルと震源地近くのビルの具体的な事例を挙げて説明している。

「総論」で幅広く説明したフルードパワー技術を用いた建築物の制震技術について、解説記事「高層ビル用制震オイルダンパ」では、従来型オイルダンパから、理論上、従来型の約2倍のエネルギーを吸収できるON/OFF制御型可変オイルダンパまで詳しく紹介している。

建築物の免震技術を解説する記事としては、「阿佐ヶ谷プロジェクト—3次元免震建物の開発と建設—」が企画された。この解説では、水平方向の地震振動に対してのみ有効な従来の免震システムを発

展させた、水平方向と上下方向を同時に免震化する3次元免震システムを紹介している。

地震による人命被害を最小限にするには、建築物の安全性のみならず、多数の人々が利用する鉄道車両の安全性の確保も欠かせないことから、この対策について、解説記事「鉄道車両用地震時脱線防止対策左右動ダンパ」で紹介している。

上記のような地震被害の未然防止におけるフルードパワー技術とともに重要なことは震災後の救助と復興である。本特集号では、復興技術として、「遠隔操作建設ロボット」を解説記事として挙げている。本解説では、油圧パワーショベルの遠隔操作のためにバーチャル・リアリティ技術を投入した臨場感と高度な作業が実現可能なシステムを紹介している。

救助技術の解説記事としては、「危険建物内への迅速・安全なアクセスを目指した流体ロープウェイ」を紹介している。震災後の人命探査や危険物の探知のための移動方法として、チューブ内に流体エネルギーを供給することでゴンドラをチューブに沿って双方向に移動させる流体ロープウェイについて説明している。

本特集号で紹介された解説記事からフルードパワー技術は地震対策の分野において重要な役割をしていることが再確認された。フルードパワーと地震対策について、有益ある解説記事の執筆を快くお引き受けいただき、珠玉のような解説記事をご執筆いただいた著者の皆様にこの紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/nigaijokyo.pdf>

[著 者 紹 介]

きむ じゅうん わん
金 俊 完 君



2005年東京大学大学院博士後期課程精密機械工学専攻修了。2005年東京工業大学精密工学研究所助教、現在に至る。機能性流体とMEMS技術を融合した研究に従事。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。工学博士。

E-mail: woodjoon@pi.titech.ac.jp

*平成21年12月25日 原稿受付

**東京工業大学 精密工学研究所

(所在地 〒162-0845 横浜市緑区長津田町4259—R2—42)

総論

フルードパワー技術を用いた免震・制震について*

露 木 保 男**

1. はじめに

近年、フルードパワー技術を用いた免震・制震システムが飛躍的に増えている。耐震装置としてフルードパワー技術を用いているのがオイルダンパである。市場にはすでにビル用の制震オイルダンパ、免震オイルダンパが合わせて2万基以上送り出されている。また2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が東北地方を襲ったが、これらの装置は効果的に働き、多くのビルにおいて構造部材の損傷や内部の設備や人命を守ることができた。

2. 長周期地震と高層ビルの揺れ

東北地方太平洋沖地震宮城県牡鹿半島の東南東沖130kmの海底を震源として発生した地震は、日本における観測史上最大規模のマグニチュード9.0を記録した。震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北約500km、東西約200kmの広範囲に及んだ。滑り量は最大200mに達し、東北から関東の広範囲にかけて、揺れは200秒以上続いた。この地震の大きな特徴のひとつは、長周期震動により震源から遠く離れた超高層建物が大きく揺れたことである。震度5強を記録した新宿の高層ビル群は大揺れし、また震源より約700kmも離れ、震度3しかなかった大阪府咲洲庁舎（高さ256m、55階建）でも片振幅1.4mもの揺れが10分以上続いた。これは建物周期（6.5秒）と表層地盤の卓越周期（振動を周波数分布で表した時に一番多く出てくる周波数のこと）が近づいてしまったためである。

この理由は、高層ビルが数多く建設される大きな平野部ほど長周期地震が発生しやすいことにある。岩盤の固い山岳部の地盤は固有周期が短い、砂地やローム層の多い平野部は長く、長周期地震が発生しやすい。

建物は振動体と捉えられるが、それゆえに必ず固有周期を持っている。大揺れの基となる1次の固有

周期は建物の高さにより異なり、概略的につぎのように計算される。

鉄骨造ビルの1次固有周期（秒）

$$= 0.03 \times \text{高さ} H \text{ (m)}$$

コンクリート造ビルの1次固有周期（秒）

$$= 0.02 \times \text{高さ} H \text{ (m)}$$

通常、オフィスビルは柱のスパンを長くする必要から鉄骨造で建設され、マンションは柱のスパンが短くても良いので比較的安価な鉄筋コンクリート造で建設される。オフィスビルの階高を4m、マンションの階高を3.5mとすると図1のように建物の階の高さと固有周期の関係が得られる。参考に戸建住宅も示すが、戸建住宅は低層であることと、壁が耐力を大きく負担するために、質量に対して剛性が高くなり、固有周期は0.5秒以下と短くなる。

図1より、20階建て以上の高層マンションは1.4秒以上の固有周期を持ち、長周期地震に共振しやすいことがわかる。今回の震災で周囲の戸建住宅や低層ビルがほとんど揺れなかったのに、高層ビルが大揺れしたのはこれに起因している。

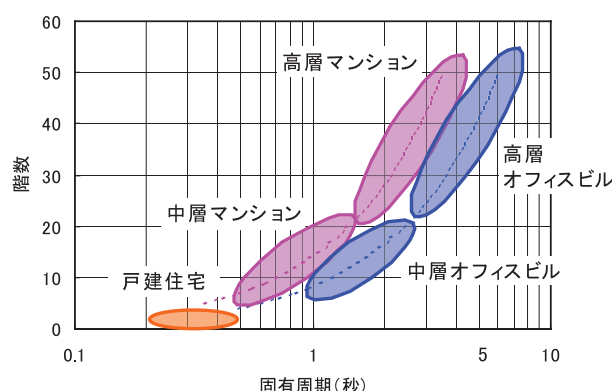


図1 建物の階数と固有周期の関係

3. 耐震・制震・免震の違い

建物の地震に対する構造を分類すると耐震構造、制震構造（制振構造と呼ぶこともある）、免震構造に分けることができる。耐震構造は建物の剛性を増し、強度を上げる建て方である。そして所定以上の

*平成24年2月9日 原稿受付

**カヤバシステムマシナリー株式会社

(所在地 〒514-0396 三重県津市雲出長常町1129番1)

地震荷重が加わった場合、建物の接合部を塑性変形させて、構造部材の塑性変形エネルギーで地震エネルギーを吸収する。制震構造は各階の層間に設けられたオイルダンパなどの制震装置でエネルギーを吸収する。免震構造は積層ゴム（鉄とゴムとを交互に積み重ね水平方向に動きやすくした支持材）などの支持材で建物を浮かし、地震力を建物に伝えないようにするものである。しかし免震機構は必ず復元力を持たねばならない。よって共振を防ぐために、また変位を抑制するために、オイルダンパなどの減衰装置と組み合わせて構成される。これを図2に示す。

減衰の強さを表す減衰比（建築関係では減衰定数と呼ばれている）は通常、制震では全体で3～10%、免震では1層に集中させるために20～30%にて建築設計される。

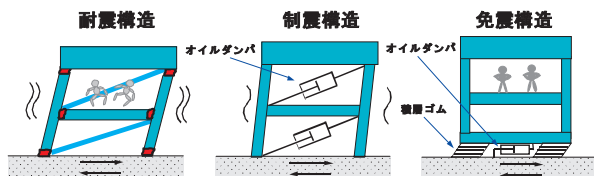


図2 耐震，制震，免震の違い

4. オイルダンパの構造

流体による減衰力の発生は、主に粘性抵抗によるものとオリフィスによる絞りで制御されるものがある。一般的に粘性力を利用するものは粘性ダンパ、オリフィス面積をバルブで制御するものはオイルダンパと呼ばれている。

図3に筒型オイルダンパの原理図を示す。オイルが充填したシリンダ（ ϕD ）の内側をピストンおよびピストンロッドが速度（ V ）で作動する構造になっている。流体は圧縮しないものとする、流量（ Q ）がタンク室に流れ、粘性力と慣性力の流れの抵抗で、内圧（ P ）が発生する。この原理を応用して、制震用オイルダンパおよび免震用オイルダンパが設計されている。

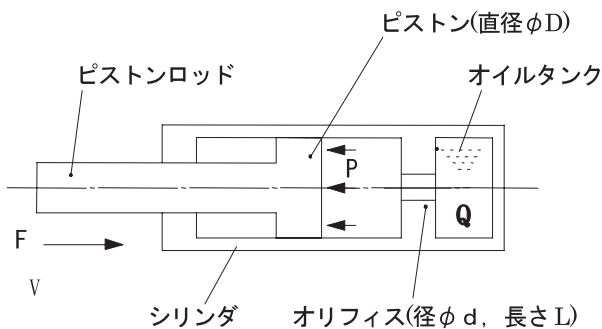


図3 オイルダンパの原理図

5. 制震ビルの効果

建物の共振を効率よく抑えることができるのがオイルダンパである。減衰装置には材料の塑性変形を利用した変位依存型のものとオイルダンパのように速度依存型のものがある。変位依存型は塑性変形前の小振幅では弾性変形のために剛性を上げてしまい、固有周期が短くなり応答加速度を上げてしまうという欠点を持つ。それに対して速度依存型減衰装置であるオイルダンパは建物の固有周期を短くすることなく、速度に比例した減衰力を建物に与えることができる。そのために揺れ幅が小さくなるように制御しても、応答加速度が大きくなり難いという長所を持つ。

オイルダンパを装着した超高層ビルも表1に示すように都内にも多数あるが、今回の地震に対して優れた制震効果を発揮し、安全機能としてのエレベータの緊急停止はあったものの、建物構造躯体の損傷を回避することができた。また油漏れなどの不具合も報告されなかった。

表1 都心のオイルダンパ装着制震高層ビル例

ビル名称	高さ (m)	階数	ダンパ数 (基)
新宿センタービル	222	54	288
愛宕グリーンヒルズ事務棟	186	52	688
愛宕グリーンヒルズ住宅棟	157	42	144
六本木ヒルズ	238	54	356
銀座三井ビル	107	25	32
東京ベイコートクラブ	100	27	336
モード学園コクーンタワー	50	50	110
北青山3丁目AOビル	90	16	66
西新宿6丁目計画	167	45	66
後楽2丁目ビル	149	34	46
東急キャピトルタワー	120	29	182
全共連ビル	200	33	158
秋葉原ダイビル	147	31	42
環状2号虎ノ門計画	255	52	516

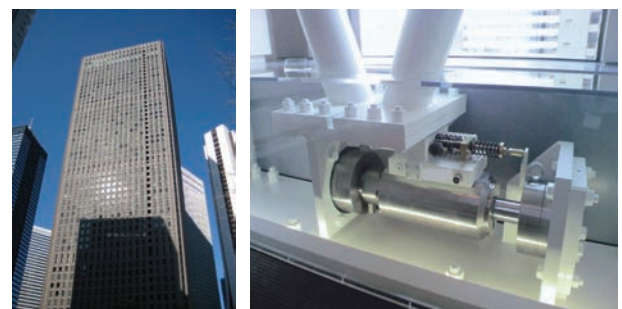


写真1 新宿センタービルとオイルダンパ

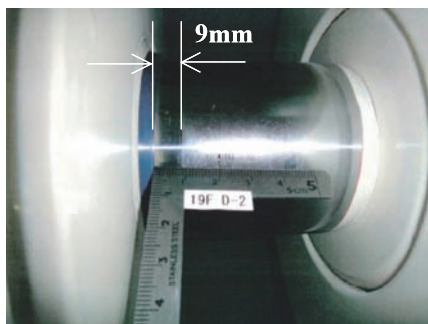
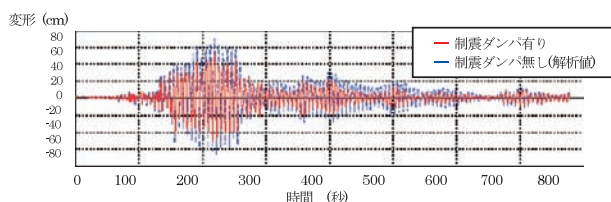


写真2 オイルダンパの摺動跡

図4 新宿センタービル制震ダンパの効果¹⁾

新宿センタービルの場合、500kNサイズの変位依存型のオイルダンパが288基装着されているが、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動に対して短辺方向の建物の減衰が1.3%から2.7%に増加し、22%低減される効果が得られた。写真1に新宿センタービルの外観とオイルダンパの写真、写真2にオイルダンパの摺動跡（最大ストロークは9mm）を示す。建物のダンパ有無による建物の変形の比較データを図4に示す。

6. 免震ビルの効果

免震建物は1995年の阪神・淡路大震災でその有効性が実証されたことにより飛躍的に増加した。しかしながらいまだ日本における免震建物は総建築着工件数の数パーセントにしかすぎない。それでも日本免震構造協会の調査によれば、免震ビルは現在年間200～250棟が建設され、2010年現在の総計で約2,600棟に達している。免震用オイルダンパ（写真3参照）も多数出荷され、積層ゴムや滑り支承（ステンレスと樹脂を接触させ水平方向に滑りやすくした支持材）と合わせて免震装置を構成している。これらの免震ビルも、今回の震災で大きな効果を発揮することができた（表2参照）。特に仙台地区の従来構造の耐震ビルでは倒壊はないものの、内部の被害が大きく、各フロアで家具や備品が倒れ、一部で壁のボードの剥落などが多発した。それに対して免震ビルでは大きな被害はなく、安全が確保されたとの報告を受け取ることができた。

例として仙台市内の免震マンションの調査結果を挙げる。本建物は23基の積層ゴム、5基の弾性すべ

表2 震源地近くのオイルダンパ装着免震ビル例

ビル名称	ダンパ数	場所	震度
栗原中央病院	70	宮城県栗原郡	震度7
花京院アザレアビル	36	宮城県仙台市	震度6強
みさと健和病院	32	埼玉県三郷市	震度5強
足利赤十字病院	28	栃木県足利市	震度5強
石巻消防署	6	宮城県石巻市	震度5強
一番町平和ビル	20	宮城県仙台市	震度6強
アパ仙台五橋	4	宮城県仙台市	震度6強
レジデンス仙台1番町	10	宮城県仙台市	震度6強



写真3 免震用オイルダンパ

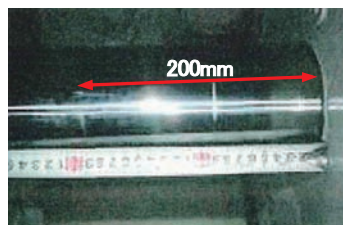


写真4 ピストンロッドの摺動跡

り支承、10基のオイルダンパにて構成されている。本建物は被害の大きかった仙台市内においても大きな被害を受けず、生活に支障をきたすことは無かった。写真4にオイルダンパのロッドのしゅう動跡を示す。これによるとストロークは±200mmも振れており、いかに大きな地震だったか、また免震装置が積層ゴムやオイルダンパの作動により機能を果たしたかを示している。

7. おわりに

本稿では紙面の関係で紹介できなかったが、この他にも多くのフルードパワーを用いた耐震装置が今回の震災で活躍した。フルードパワーの真骨頂は「制御された力強さ」にあるが、特にセミアクティブ制御を含めたパッシブ制御のオイルダンパについては、外部のエネルギーを用いず、効率よく振動を吸収するという命題に対して抜群の性能を示しており、今後ますます社会の安全に対して貢献していくものと確信している。

参考文献

- 1) 細澤治他：新宿センタービルの長周期地震動対策とその効果，鉄鋼技術，p. 31-37（2011）

[著 者 紹 介]

つゆ き やす お
露 木 保 男 君

1973年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1973年萱場工業(株)入社。現在、カヤバシステムマシナリー(株)技術部長。油圧制御、オイルダンパの開発に従事。日本建築学会会員。

会 告

日本フルードパワーシステム学会・中国機械工程学会流体伝動及制御分会 共催

第2回フルードパワーに関する日中国際共同ワークショップ

— The 2nd Japan-China Joint Workshop on Fluid Power —

開催日：平成24年5月23日(水)

日本フルードパワーシステム学会では、国際交流事業の一環として、中国機械工程学会流体伝動及制御分会と共同で、日本と中国のフルードパワーに関する国際共同ワークショップ(The Japan-China Joint Workshop on Fluid Power)を開催しています。このワークショップは、日中の産官学の研究者・技術者がフルードパワーに関する最新の研究および技術や市場動向を紹介し合い、情報交換と交流を行う学術講演会です。第1回は2010年に中国の蘭州にて開催され、第2回は下記の日程で東京で開催されます。今回のワークショップのテーマは「Sustainable Future on Fluid Power」です。日中双方より5編ずつ合計10編の技術研究論文が発表される予定です。皆様、奮ってご参加ください。

1. 開催日時：平成24年5月23日(水) 13:00～17:00
2. 会場：日本・東京・機械振興会館 地下3階 研修1
〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (<http://www.jspmi.or.jp/kaikan.htm>)
3. 講演の種類：学術講演(英語)。日中双方でExtended Abstractによる審査後、選ばれた論文のFull Paperによる査読を経たそれぞれ以下の5件の論文(英語)
4. 参加登録料：¥20,000(講演前刷り集を含む)(当日受付のみ)
(平成24年春季講演会あるいは平成24年春季講演会併設セミナーへご登録の方は ¥10,000-)
5. 申込方法：以下の問い合わせ先までE-Mailでご連絡ください。参加登録料は当日、会場にて徴収します。
6. 問い合わせ先：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
E-mail info@jfps.jp TEL 03-3433-8441 FAX 03-3433-8442

解 説

高層ビル用制震オイルダンパ*

栗 野 治 彦**

1. はじめに

地震や強風に対する建築構造物の振動を制御する制震構造は、1980年代に本格的な実用化研究が始まった技術であるが、1990年代に入って急速に普及が進み、現在ではさまざまなタイプの制震装置が実用化されている。その中でも、小さな振幅から線形性の高い性能を発揮し、累積のエネルギー吸収量に制限のないオイルダンパは、昨今話題の長周期地震動対策としても有効な、比較的オールラウンドな効果を期待できるものであるが、建物への設置条件に伴う構造的な制約により、必ずしも十分な効果が得られない場合がある。本稿では、既往技術の中でも適用範囲の広いオイルダンパをベースにしながら、新着想のON/OFF型制御ロジックを取り入れることで、従来型の理論限界を超える制震性能をシンプルな構成と合理的なコストで実現する、独創的かつ汎用性の高い制震オイルダンパを紹介する。

2. 従来型オイルダンパ

2.1 制震オイルダンパの内部機構

制震ダンパに要求される主な機能は、①高耐久・長寿命、②大荷重（1000～2000kN程度）、③高剛性（理由は次節で述べる）、④コンパクトさ（壁厚≒ $\phi 400$ 以内）、などであり、国内の高層ビルに本格的に適用されたのは1995年である¹⁾。図1に一般的な制震オイルダンパの内部機構概念図を示す。両ロッド式・ピストン式アキュムレータによる密閉型が多く、ボールジョイントなどの自在継手が採用される。また、大地震時の過大な荷重発生を避けるため、リリーフ弁が装備されるのが普通である。

2.2 従来型ダンパの力学特性と限界性能

制震ダンパは一般にブレースなどを介して建物層間に設置され、その力学特性はいわゆるMaxwellモデルで表される（図2）。ダンパ剛性と取付構造剛性の直列和である k は大きい方が望ましいため、制

震ダンパは剛性に配慮された設計がなされているが、実建物では取付部周辺架構の局部変形などに支配される部分が多く、柱梁架構に比べて十分大きな剛性が取れないのが普通である。一方、減衰係数 C は調圧弁により調整可能である。図3は円振動数 ω の正弦波加力を受けるMaxwellモデルの荷重変形関係の模式図であり、ループ面積が振動エネルギー吸収量を表す。 C が大き過ぎてもブレース構造に近づくだけでエネルギー吸収は期待できない。すなわち、 C には最適値が存在し、その時のエネルギー吸収量は k により限界付けられるのである。

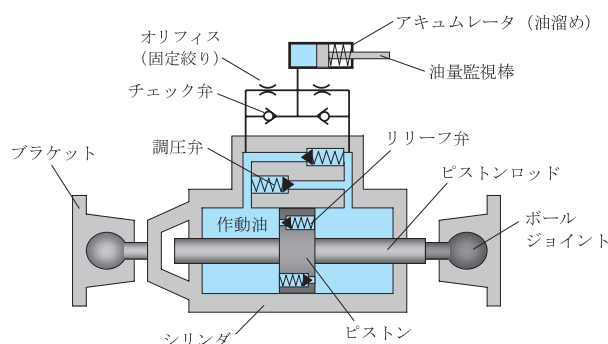


図1 制震オイルダンパの内部機構概念図

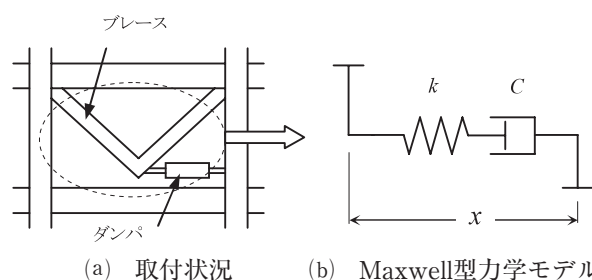


図2 建物に設置されたダンパの力学モデル

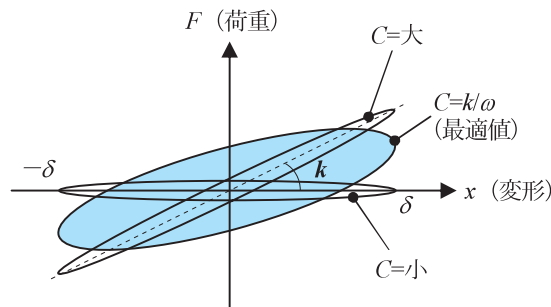


図3 従来型オイルダンパの荷重変形関係

*平成24年2月10日 原稿受付

**鹿島建設株式会社

(所在地 〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

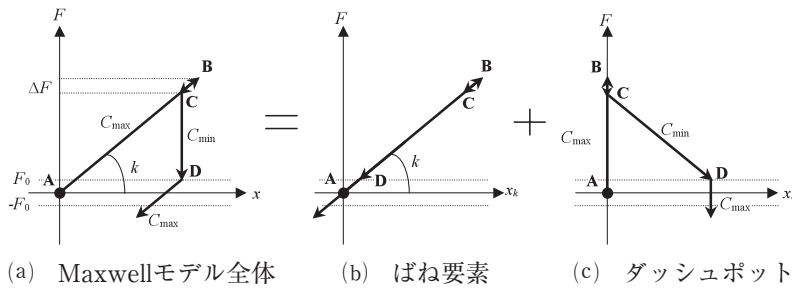


図4 装置部の挙動とエネルギー吸収のプロセス

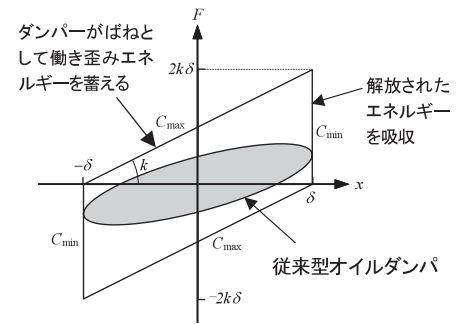


図5 ON/OFF制御時の荷重変形関係

3. エネルギー吸収効率を最大化する制御則

「Maxwellモデルの構造制約条件による限界を打破する」ことを命題として開発されたのが、オイルダンパの減衰係数を2段階（最大 $=C_{\max}$ /最小 $=C_{\min}$ ）に切り替えるON/OFF型制御則である²⁾。

図4はON/OFF型制御によるエネルギー吸収のプロセスを示したものである。振動中のA～B間は $C_{\max}$ （弁＝閉）に設定し、剛性 k のばね要素（内封油やブレース・周辺架構）に歪エネルギーを蓄える。振動が反転したC点で $C_{\min}$ （弁＝開）に切替え、蓄えたエネルギーを熱として除荷吸収し、D点で再び弁を閉じて同じ挙動を繰り返すことで、理論上、従来型の約2倍のエネルギー吸収を実現する（図5）。このように、ダンパ設置部周辺の弾性を最大限に利用して、自動的（チューニングフリー）に振動数依存のない高いエネルギー吸収性能を発揮する。

4. ON/OFF制御型可変オイルダンパの開発

4.1 セミアクティブ型（第1世代）

最初のON/OFF制御型オイルダンパは、電磁弁を用いたセミアクティブ型として1999年に誕生し、多数の超高層ビルに適用され、振動実験や地震観測により効果が実証されている^{たえば3)}。図6および図7は、31階建て超高層ビルに設置された装置とそのビルでの地震観測波形である。従来型オイルダンパでは実現し得ない応答低減効果を発揮している。

4.2 完全自動制御型（第2世代：最新型）

わずかとはいえ電力が必要なセミアクティブ型の弱点を克服すべく、新たに着手したのが「電力を用いずにON/OFF制御を自動的に実現する」新しい油圧機構を搭載したオイルダンパの開発である⁴⁾。

図4のプロセスを分析すると、ダンパの内圧が上昇から下降に変化する際に弁開度が切替われば良いことがわかる。この機能を実現するために考案された自動油圧開閉機構の概念図が図8である。常時及び内圧上昇中（ピストンが片方向への移動中）は、圧力バランスにより開閉弁＝閉となるよう設定され

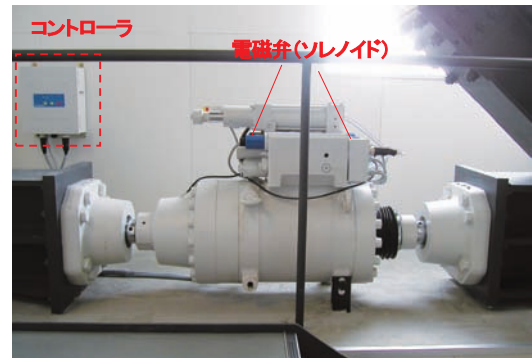


図6 セミアクティブ型オイルダンパー

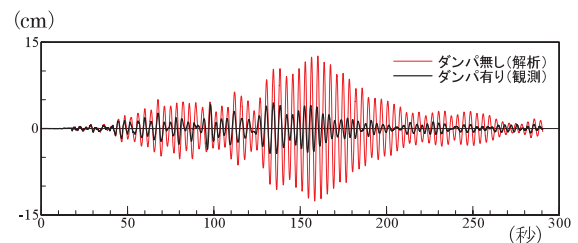


図7 31階建て超高層ビルで観測された波形（2004年新潟県中越地震時における頂部変位）

ている。振動方向が変わって内圧が低下し始めると、逆止弁により高圧を保持したバッファ圧力により開閉弁が駆動され開く。左右の圧力差が解消されると再び開閉弁は閉じて同じ挙動を繰り返す。このように、逆止弁を備えたバッファ内の圧力がセンサと制御弁駆動力の両方の働きをすることで、電力を用いることなく、ON/OFF制御を自動的に実現するのである。図9に具体的な油圧回路図を示す。

図10は、自動油圧開閉機構を搭載した実大装置の写真である。油圧開閉機構をコンパクトな独立ユニットとしているため、従来型オイルダンパのプラットフォームを引き継ぐことが可能となっている。図11は実大装置の加力実験結果であり、図11(a)より、図5の概念図と同じループが実現されていることが分かる。また、複雑な外力に対する挙動も簡単な解析モデル（減衰可変Maxwellモデル）で高精度に追跡できることが確認されている（図11(b)）。

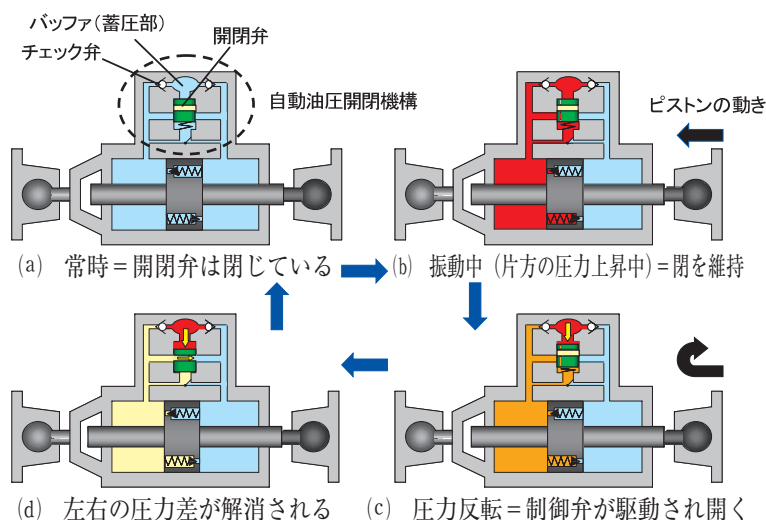


図8 自動油圧開閉機構の動作プロセス概念図

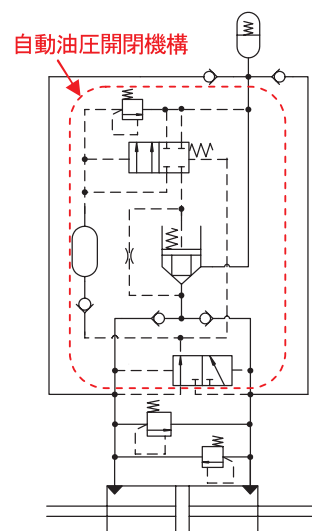


図9 自動油圧開閉機構の油圧回路図



図10 完全自動制御型オイルダンパ

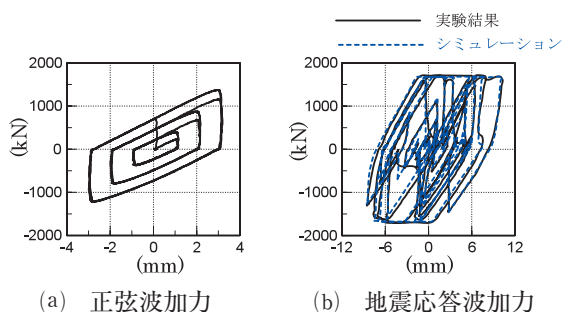


図11 実大装置の荷重変形関係

5. おわりに

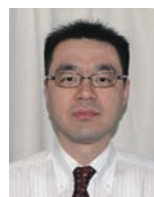
以上のように、Maxwellモデルに由来する構造的制約条件下において、従来型オイルダンパでは実現できないエネルギー吸収性能を実現するON/OFF型制御則を提案し、これを搭載した制震システムの開発と実用化を進めてきた。適用件数は、超高層ビルを中心に30棟近くに達しており、地震や強風から建物を守り続けている。特に自動油圧開閉機構を搭載した第2世代型は、パッシブ型とセミアクティブ型の境界を越えた新領域の制震技術であり、きわめて広い応用範囲を有する制震システムである。

参考文献

- 1) 石原和男, 田上淳, 栗野治彦ほか: 高減衰オイルダンパによる高層建物の制震 (その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21428-21430, 1996年9月
- 2) 栗野治彦, 田上淳, 清水幹: エネルギー吸収効率最大化を目的としたセミアクティブオイルダンパ, 第2回日本制震(振)シンポジウム, pp. 77-84, 2000年11月
- 3) 栗野治彦, 大類哲, 清水幹: 新潟県中越地震における新潟市に建つ超高層制震建物の観測記録, 日本建築学会大会梗概集, 21450, 2005年9月
- 4) 栗野治彦, 田上淳, 山田俊一, 松永義憲: エネルギー吸収効率に着目したON/OFF型パッシブダンパ (その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21034-21035, 2004年8月

[著者紹介]

栗野 治彦 君



1989年東京大学工学部建築学科卒, 1991年同大学院工学研究科修士課程修了。鹿島建設入社。振動制御・制震システムの研究開発に従事し、現在建築設計本部グループリーダー。日本建築学会、米国機械学会などの会員。博士(工学)。

E-mail: kurino@kajima.com

解 説

阿佐ヶ谷プロジェクト—3次元免震建物の開発と建設—

高 橋 治*

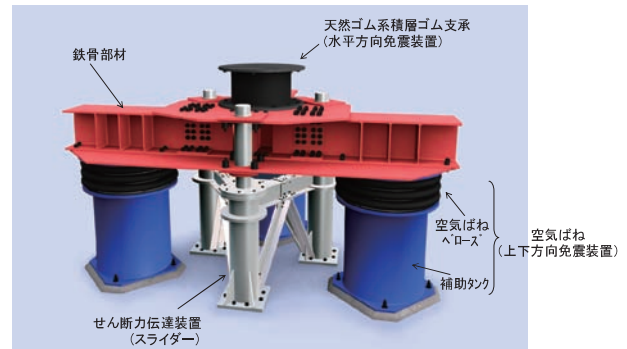
1. はじめに

従来の免震システムは主に水平方向の地震に対してのみ有効なものであった。その理由として、建物の損傷は上下動よりも水平動による影響が大きいと考えられてきたことが挙げられる。しかしながら、近年では全国的な地震観測網の整備と観測センサーの精度向上に伴い、上下動についてもこれまで考えられてきたよりも影響が大きいことが明らかとなってきた。特に、遠方の海溝型の地震に比べて、直下型の地震では水平動と同時に大きな上下動が起こる場合があり、実際に2008年の岩手・宮城内陸地震では4000gal近い上下動が観測されている。

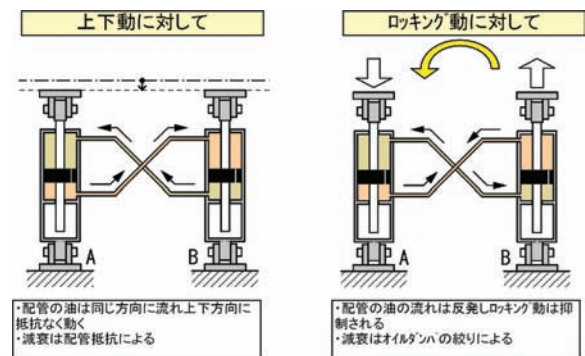
このように設計時の想定を超える地震動に対する、より高度な構造安全性に加えて、たとえば、拠点医療施設では地震時における医療機器の散乱を防いで被災直後から即座に医療活動を行う必要性などが要求される。また、危険物を扱う研究所や半導体製造工場などに代表される高価な設備を有する施設では機器の損傷を防ぐだけでなく、火災および事故の防止、地震被災後の迅速な操業再開が要求される。

近年では建物基礎部で水平免震を行い、必要に応じて部分的に上下免震床を導入する例もあるが、建物の階数や規模によっては基礎部で水平方向と上下方向を同時に免震化した方がコストダウンを見込める場合もある。また、建物全体を水平上下方向に免震化することは美術館の絵画のように壁に取り付いている内装品に対しても免震効果が期待できる。

以上の観点から、著者等は水平方向と上下方向を同時に免震化する3次元免震システムを新たに開発し、本論では阿佐ヶ谷プロジェクトとして共同住宅に適用した例を紹介する。さらに、3次元免震装置およびロッキング抑制装置の性能を確認するために実施した確証試験について報告するとともに、3次元免震構造を実建物に適用する際の設計の考え方、2009年11月に着工してから今日までの建設状況につ



(a) 3次元免震装置



(b) ロッキング抑制付オイルダンパーシステム

図1 3次元免震システム

いて報告する。なお、本プロジェクトは、国土交通省の第1回超長期住宅先導的モデル事業（住宅の新築（共同住宅））の一つとして採択された事業である。

2. 3次元免震システム概要

2.1 3次元免震装置

開発した3次元免震装置は、水平方向は積層ゴムにより、上下方向は空気ばねにより免震するシステムである。図1(a)に示すように、通常の免震構造で用いられている天然ゴム系積層ゴム支承の下に鉄骨架台を組み、これらを空気ばねで支える構造としている。また、積層ゴムから鉄骨架台へ伝わる水平力を上下方向にしゅう動しながら直接基礎に伝えるために、鉄骨架台に組み込まれた保持筒の中に鋼棒を通したせん断力伝達装置（スライダ）を設けている。このように、水平方向と上下方向で独立した装

*平成24年2月8日 原稿受付

**株式会社 構造計画研究所

(所在地 〒164-0012 東京都中野区本町4-38-13)

置を組み合わせることによって、免震層の設計時における明快さを確保するとともに、各支点下で水平および上下方向それぞれに装置を選定できる組合せの自由度を得ることができる。なお、長期使用時において、空気ばねは自動レベリング装置により支点の位置が所定より高ければ空気を抜き、低ければコンプレッサーにより空気を入れ、常に一定の高さを保つ機構を備えている。

2.2 ロッキング抑制付オイルダンパーシステム

本システムのように、上下方向の剛性を柔らかくすることにより、建物全体のロッキング運動が誘発される場合がある。そのようなロッキング動を抑制するため、図1(b)に示すように、一对の上下方向のオイルダンパーのピストンで隔離された上下のオイルタンクをクロス配管で連結する、ロッキング抑制付オイルダンパーシステムを開発した。ロッキング抑制付オイルダンパーシステムは、2本のオイルダンパーのタンクを配管により建物の対角線上にたすき掛けにして繋ぎ、2本のダンパー間をオイルが行き来できるようにすることで、上下動成分に対しては配管抵抗による減衰で上下方向のエネルギーを吸収し、ロッキング動成分に対してはダンパー絞りによる減衰でロッキング動を抑制するシステムである。これらは油圧を用いた機械的な仕組みで実現できるパッシブな装置であるため、電気トラブルによる故障や誤作動の心配がなく、高い信頼性を確保することができる。

3. 適用建物

3次元免震を採用した建物は地上3階、最高部高さ9.0mの共同住宅である。建物概要を表1に、建物の外観および断面を図2に、免震ピット平面図を図3に示す。基準階の平面形状は、X方向はスパン長さ2.7～7.2mの3スパン、Y方向はスパン長さ4.5mの3スパンである。

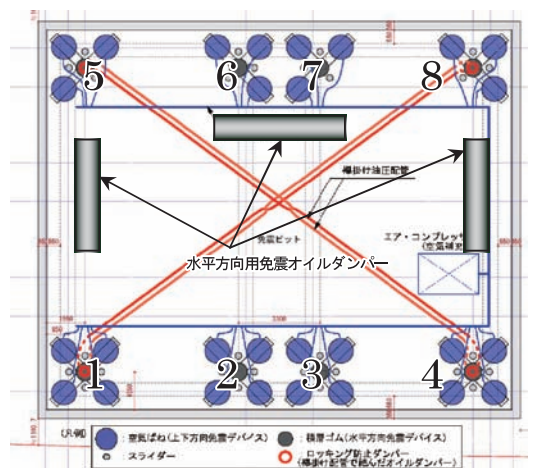
建物は地震に対する安全性向上のため、1階床梁下と基礎の間に3次元免震部材を設置した基礎免震建物である。免震部材には水平方向に対しては天然ゴム系積層ゴム支承とオイルダンパー、上下方向に対しては空気ばねとスライダーおよびロッキング抑制付オイルダンパーを使用している。地震時に基礎部分と上部構造に相対変位が生じるため、水平方向クリアランスを600mm、鉛直方向クリアランスを100mmとしている。また、基礎部分と上部構造に設置される設備配管などは相対変位に追従する機能を有したものをを用いている。上部建物は純ラーメン構造で、1階および2階に13.5mのPC梁を設けロングスパンの空間を構成し、自由に間仕切りを配置できる計画

表1 建物概要

所 在 地	地：東京都杉並区阿佐ヶ谷南
竣 工	工：平成23年3月
用 途	途：共同住宅
延 床 面 積	積：548.78㎡
階 数	数：地上3階
建 物 高 さ	さ：9.00m
構 造 形 式	式：RC造 ラーメン構造
免 震 部 材	材：3次元免震装置 (天然ゴム系積層ゴム支承、空気ばね、せん断力伝達装置(スライダー)) ロッキング抑制付オイルダンパーシステム 水平方向用免震オイルダンパー



図2 建物の外観および断面



(数字は支点番号)

図3 免震ピット

となっている。

4. 性能確認試験

4.1 3次元免震装置の性能確認試験

3次元免震システムに用いる積層ゴム、空気ばね、せん断力伝達装置（スライダ）それぞれを3次元免震装置として一体に組み上げ、各部品の挙動および装置全体での復元力特性を確認するための試験を行った。組合せ確認試験の状況を写真1および図4に示す。試験に用いた装置は実物大で、実際に建物に供与する装置と同等である。

上下方向の復元力特性の代表的な試験結果と解析結果の比較を図5に示す。せん断力伝達装置（スライダ）のしゅう動摩擦力により、軸力－上下変位関係曲線において変位が反転する両端で急勾配の立上り部が現れている。曲げモーメント－回転角関係においては、水平方向変位により生じる付加曲げモーメントにより鉄骨架台に回転を生じるが、積層ゴムの回転角は1/500以内となっており、積層ゴムの水平方向の性能に悪影響を及ぼさない範囲である。また、水平方向の復元力特性については概ね線形となり、天然ゴム系積層ゴム支承の復元力と同様の性状となっている。いずれの場合においても、実験結果と解析結果は良好な対応を示している。

4.2 オイルダンパシステムの性能確認試験

ロッキング抑制装置付オイルダンパーの機能を確認するため、試験体に本システムを模して配管接続したオイルダンパーを用いて加振実験を行い、追従性能を確認するとともに解析結果との比較を行った。



写真1 組合せ確認試験の様子

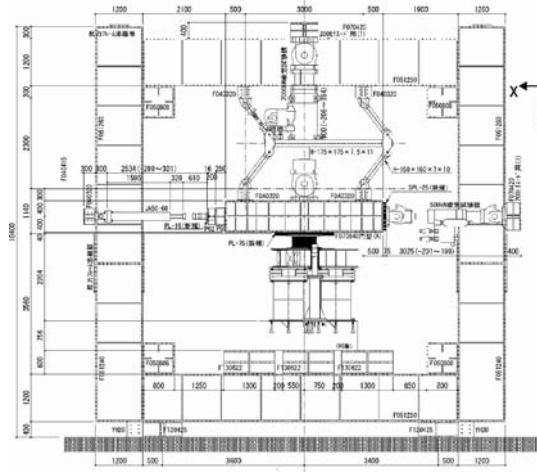


図4 組合せ確認試験の荷重装置

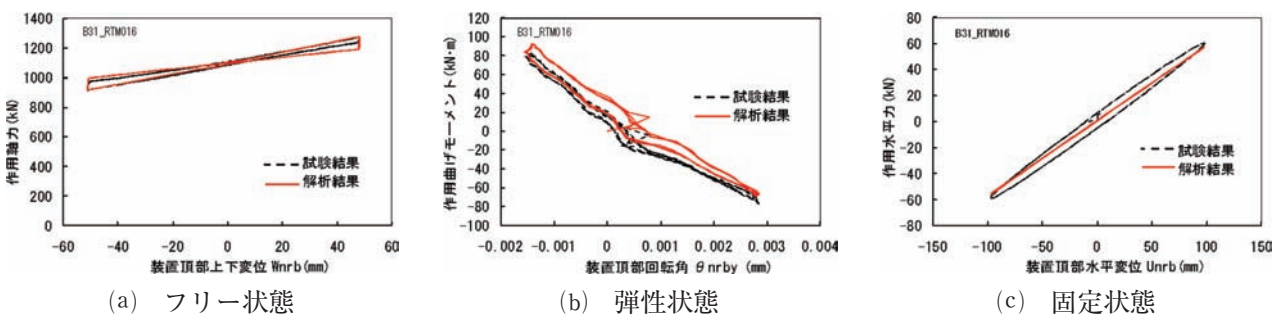


図5 3次元免震装置の上下方向の復元力特性

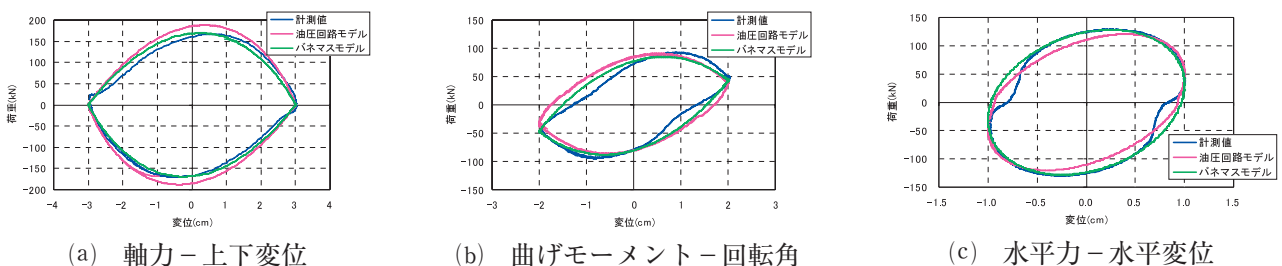


図6 ロッキング抑制付オイルダンパシステムの復元力特性

設省建築研究所・日本建築センター（1992）」による方法を基本として、告示に規定される加速度応答スペクトルに上下動成分係数を乗じて上下動の目標スペクトルを設定し、位相に観測記録のUD成分を用いて上下動を作成した。ただし、本建物の3次元免震システムは上下方向の入力が重要になることから、0.6秒程度より長周期成分については「免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン：日本免震構造協会（2005）」の知見を反映させ、擬似速度応答スペクトル振幅が50cm/sとなるように設定した。表5に設計用入力地震動の一覧を示す。

5.5 地震応答解析結果

図9にY方向+Z方向加振における各層の最大応答解析結果を示す。図10には、3次元免震装置の効果確認として、3次元免震、水平免震のみ、基礎固定の場合それぞれの上下方向最大応答加速度を示す。本建物の3次元免震装置では免震層に生じる水平力に応じてスライダのしゅう動部摩擦力（鉛直方向力）が変動するが、これを考慮した解析モデルにおいても各層の上下方向最大応答加速度は基礎固定時と比較して1/2～1/3程度に低減されている。また、本建物の2階床部は陸立ち柱を有した13.5mのロングスパン梁となっているため、上下動が入力された際にロングスパン梁の上下振幅により水平免震のみおよび基礎固定の場合は床応答加速度が増幅されているが、このような場合においても上下免震を行った場合では床応答加速度は各階で一樣となっている。なお、水平方向最大応答加速度については、頂部で300gal以下となっており、一般的な水平免震構造と同等の性能を有しているといえる。

図11は各支点における上下免震装置の軸力負担を示している。上下方向の応答が大きいほど、空気ばねと上下オイルダンパーの軸力負担が増えているが、スライダの軸力負担はしゅう動部の摩擦力による

表4 設計クライテリア

(a) 水平方向

入力地震動	レベル1 水平方向のみ	レベル2 水平上下方向同時
	短期許容応力度以内 1/400以内	短期許容応力度以内 1/200以内
上部構造	応力 層間変形 (ロッキング角含まず)	短期許容応力度以内 1/200以内
3次元 免震装置	層間変位 15cm ($\gamma=100\%$) 以内 せん断歪み 引張応力 相対回転角 安定変形以内 引張力を生じない 1/50以内	30cm ($\gamma=200\%$) 以内 性能保証変形以内 引張力を生じない 1/50以内
スライダ	応力 ブッシュ面圧 49N/mm ² 以内	0.8Mp以内* (Mp:全塑性モーメント) 49N/mm ² 以内

*組合せ確認試験において、スライダが塑性化した状態でも上下方向の免震機能は阻害されないことを確認している。また、ロッドの最大曲げモーメントの解析結果が全塑性モーメントの0.8倍以下であれば既ね弾性みなせる。

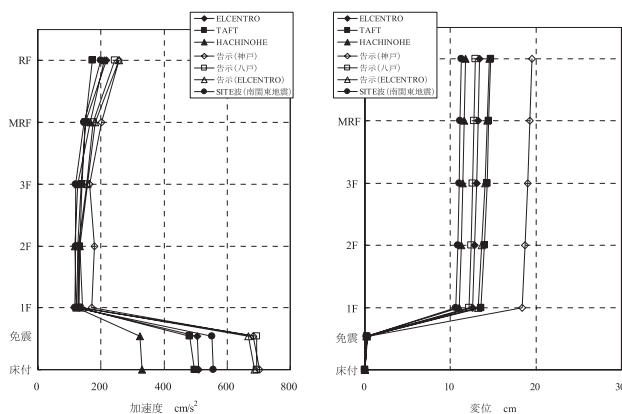
(b) 上下方向

入力地震動	レベル2 水平上下方向同時
	短期許容応力度以内 1/250以内
上部構造	床応答 最大応答加速度 (Gal) 建物傾き
上下方向 免震装置	空気ばね 上下変位 (mm) 内圧 (MPa) スライダ 軸応力 ストローク (mm)
ロッキング 抑制装置	最大減衰力 (kN) ストローク (mm)

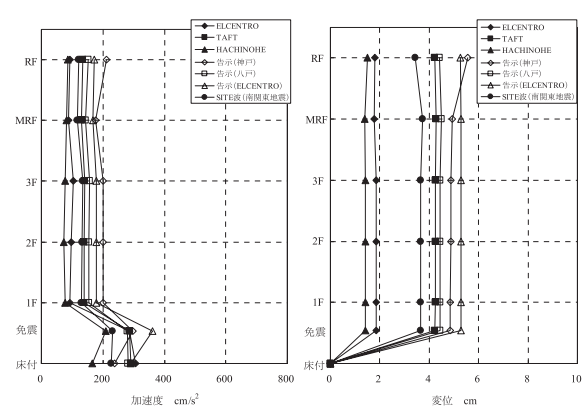
表5 設計用入力地震動一覧

設計用入力地震動	継続時間 (秒)	入力最大加速度 (cm/s ²)*	
		水平方向	上下方向
		Lv. 1	Lv. 2
ELCENTRO 1940 NS, UD	255 (25)	510 (50)	307 (16)
TAFT 1952 EW, UD	248 (25)	496 (50)	290 (19)
HACHINOHE 1968 NS, UD	168 (25)	336 (50)	166 (15)
告示波および模擬地震動 (神戸位相)	146 (13)	693 (71)	238 (32)
告示波および模擬地震動 (八戸位相)	135 (12)	703 (82)	282 (31)
告示波および模擬地震動 (ELCENTRO位相)	149 (12)	686 (77)	292 (36)
SITE波 (南関東地震)		557 (72)	228 (25)

* () 内は最大速度 (cm/s)



(a) 水平方向最大応答加速度および変位



(b) 上下方向最大応答加速度および変位

図9 最大応答結果

水平力に依存するため、スライダの軸力変動は少ない。また、空気ばねの最大軸力が支点1～4と5～8で差が出ているのは1ユニットあたりの空気ばねの基数によるもので、空気ばね1基あたりの内圧はほぼ等しくなっている。

ロッキング抑制付オイルダンパーの効果検証として、対角上の支点1と支点8の上下変位時刻歴を図12に示す。支点1と8は同一位相で互いに追従するように変位しており、ロッキング抑制付オイルダンパーにより建物はロッキングを抑制しながら上下方向に変動していることを確認した。なお、ロッキング角はY方向最大で1/570となった。

6. 施 工

3次元免震装置の据付は現場でアセンブルを行うため、空気ばねやスライダ等の装置の位置関係の精度が重要となる。そこで、今回は全ての装置を一枚のベースプレートに設置した。(写真2)ベースプレートは、コンクリート打設時にベースプレート内に空隙が生じないように空気抜き穴を各所に設けている。また、スライダと鉄骨架台の精度確認として、3次元免震装置据付後に全数しゅう動検査を行い、過度に摩擦力が発生していないことを確認した。

7. おわりに

3次元免震装置の開発と建物への適用例について、建物の概要と設計方針、代表的な実大試験の概要とシミュレーションとの比較結果、およびこれらを踏まえた建物地震応答解析について紹介した。

今後の展望として、より高層の建物への適用や戸建て住宅向けなどのより安価な3次元免震システムの開発、冒頭で述べたように高額な内装設備を持つ建物や防災センター、官公庁への普及を期待する。

現在、本建物は阿佐ヶ谷「知粋館」と命名され、竣工を迎えている。また、竣工前試験として自由振動試験を実施し、概ね設計で想定した免震特性を確認することができた。今後、常時計測システムによる長期観測などのデータ収集も行い、微振動時や地震時の応答低減の効果検証を行う予定となっている。これらのデータを基に、より高性能な装置の開発が進むことが期待される。

謝 辞

本建物の構造設計にあたっては藤田隆史・東京大学名誉教授のご指導の下、(株)構造計画研究所・清水建設(株)・カヤバシステムマシナリー(株)により行われており、また、本建物の装置開発にあたっては、日本原子力発電(株)が経済産業省から受託して設けた3

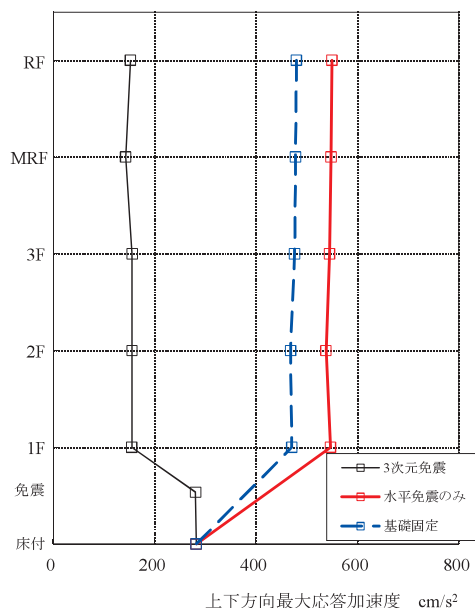


図10 装置の有無による比較 (告示波八戸位相)

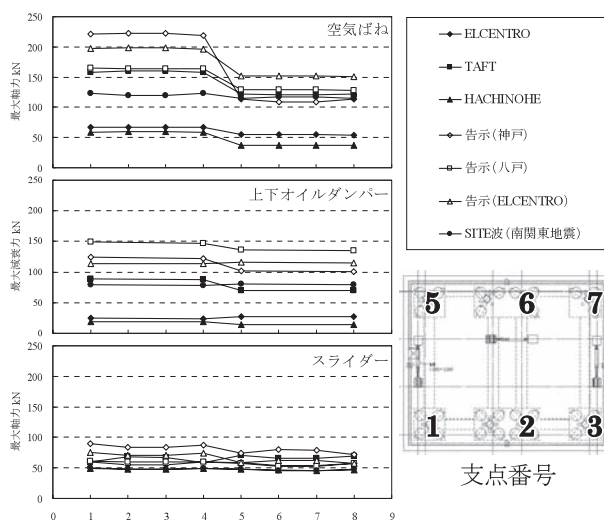


図11 3次元免震装置の最大応答値

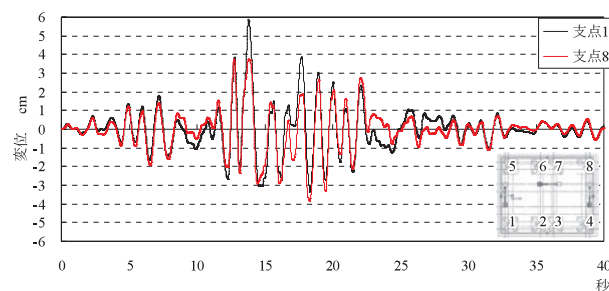


図12 2点間の時刻歴応答変位 (上下方向)

次元免震委員会（委員長：藤田隆史・東京大学名誉教授）の指導により、日本原子力研究開発機構（旧核燃料サイクル開発機構）と民間各社の技術協力^{2)~6)}を得て実施した「発電用新型炉技術確証試験」⁹⁾の成果の一部を活用しました。ここに記して謝意を表します。



写真2 3次元免震装置据付状況

参 考 文 献

- 1) 青井真, 森川信之: 2008年岩手・宮城内陸地震のKiK-netー関西に於ける4gの強震記録, 日本地震工学会誌, No. 9, p. 20-24 (2009)
- 2) 蔭山満ほか: 発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究, (単独ローリングシール型: その1), 2002 Dynamics and Design Conference: 機械力学・計測制御講演論文集2002 (abstract), p. 240 (2002)
- 3) 梅木克彦ほか: 発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究, (単独ローリングシール型: その2), 2004 Dynamics and Design Conference: 機械力学・計測制御講演論文集, p.105-1-105-4 (2004)
- 4) 柏崎昭宏ほか: 発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究 (油圧機構: その1), Dynamics and Design Conference 2002, 講演論文No 612 (2002)
- 5) 島田貴弘ほか: 発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究 (油圧機構を用いた3次元免震システム: その2), 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2004, 講演論文No 103 (2004)
- 6) 須原淳二ほか: 発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究 建屋全体3次元免震システムの開発, 日本建築学会, 構造工学論文集Vol. 52B, p.207-220 (2006)
- 7) 高橋治ほか: 3次元免震建物の開発 (その1) ~ (その12), 日本建築学会大会梗概集B-2, (2008, 2009)
- 8) 国枝正春: 空気ばね車両の上下振動の理論と実験, 鉄道技術研究報告, 第6号, 車両編第3号, (1958)
- 9) 日本原子力発電株式会社: 発電用新型炉技術確証試験事業報告書その2 3次元免震技術確証試験, p. 3. 2. 2-52-53 (2003)

[著 者 紹 介]

たか はし おさむ
高 橋 治 君



1967年 東京都北区生まれ。東京理科大学工学部建築学科卒業, 同大学院建築学専攻修了。1991年 株式会社構造計画研究所へ入社し, 現在は執行役員兼構造設計部部长。博士(工学), 構造設計一級建築士, 建築構造士, 日本建築学会会員など。

E-mail: taka@kke.co.jp

解 説

鉄道車両用地震時脱線防止対策左右動ダンパ*

鈴木 貢**

1. はじめに

2004年に発生した新潟県中越地震では、走行中の新幹線が地震動により脱線に至るという事象が発生した。その後、地震時における鉄道システムの安全性を向上する方策に関して、さまざまな検討がなされ、その一部はすでに実用化されている。

鉄道総研では地震時のような車両各部が大変位する場合においても解析が可能な車両運動シミュレーションプログラムを開発し、このプログラムを用いて台車改良による地震時の走行安全性を向上させる方策について検討を行った。この検討結果の一つとして、本来、乗り心地の向上を目的に車体／台車間に装備されているオイルダンパ（以下、左右動ダンパと記す、図1）の減衰性能を高め車両の振動を抑制することが、地震時の脱線対策に有効であることがわかった¹⁾。

この検討結果をもとに、新幹線車両での使用を前提とした、通常時の走行性能を損なうことなく、地震時のみ大きな減衰力を発生する地震時脱線防止左右動ダンパ（以下、地震対策ダンパと記す）を開発した。以下に、地震対策ダンパの概要と、開発に際し実施した性能確認試験のうちダンパ単体での性能

試験ならびに実台車加振試験の結果について報告する。

2. 地震対策ダンパの概要

地震対策ダンパには、地震時には大きな減衰力の発生が、通常時には現行の左右動ダンパ（以下、現行ダンパと記す）と変わらぬ性能が要求される。このため、ダンパのピストン速度（以下、ピストン速度と記す）に応じた減衰性能を設定することで要求性能を実現した。具体的には、ピストン速度が200mm/s以下の通常走行中に想定される速度域では発生する減衰力を現行のままとし、地震時のように車体と台車が通常走行時よりも大きく振動してピストン速度が高速となる際にはリリーフ弁のリフト量を規制することで大きな減衰力を発生する減衰特性とした。地震対策ダンパに使用する油圧回路は、当初、左右動ダンパのものとして実績のあるユニフロー方式で開発を進めた。しかし、原理試作機による単体での加振試験の結果、この方式ではピストン速度が高速になるにつれ、ベースバルブからの作動油の吸い込み不良や、タンク室内の作動油の油面変動による空気の吸い込みにより減衰性能が低下することがわかった。そこで、これを解消するため、作動油の移動量を抑制するため油圧回路をバイフロー方式に変更するとともに、タンク室容積を拡張した原理試作機を製作し改めて検討を行った。この結果、ピストン速度が600mm/sの場合においても目立った減衰不良はなく、安定した減衰性能を得られることがわかった。これを受け、地震対策ダンパにはバイフロー方式の油圧回路を採用し製作した。図2に製作した地震対策ダンパの外観と主要寸法を示す。取り付け長およびダンパストロークは現行ダンパとの互換性を考慮し同じ寸法とした。その一方で、外径およびシリンダ内径は大きな減衰力の発生に伴い上昇する内圧に耐えうるよう堅牢な構造となっている。

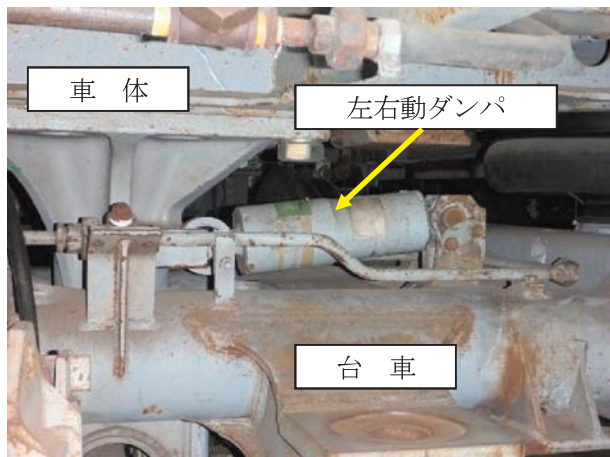


図1 左右動ダンパの例

3. 単体での性能確認試験

地震対策ダンパ単体での減衰性能を調査するため、ダンパ試験機による正弦波加振試験を実施した。この際、比較のために現行ダンパについても同様の試

*平成24年2月10日 原稿受付

**公益財団法人 鉄道総合技術研究所

(所在地 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

験を実施した。試験結果として得られた、ピストン速度と発生減衰力最大値の関係を図3に示す。ピストン速度が200mm/s以下の通常時には、地震対策ダンパの減衰性能は現行ダンパのものと変わらないことを確認した。その一方で、地震時のようにピストン速度が200mm/sを超える異常時には、地震対策ダンパの発生する減衰力は現行ダンパに比べ大きく、最大で約2倍になることがわかった。



(単位：mm)

	地震対策ダンパ	現行ダンパ
外 径	156	90
取付長	455	
ストローク	135	
シリンダ内径	90	70
ピストンロッド外径	35	

図2 地震対策ダンパの外観と主要寸法

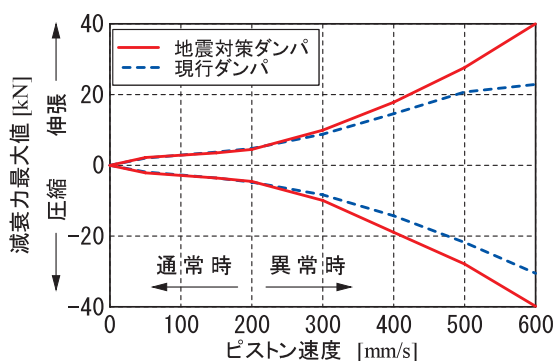


図3 単体試験による性能線図（F-V線図）

4. 実台車加振試験による性能確認

4.1 試験概要

台車に実装した状態での地震対策ダンパによる地震時走行安全性の向上効果を確認するため、鉄道総研の大型振動試験装置（以下、振動台と記す）上に設置した新幹線車両半車体モデルの試験体を用いて加振試験を実施した。使用した試験体の外観を図4に示す。試験体は、振動台上に敷設されたレール、

その上に配された実物の新幹線台車、車体を模擬した荷重枠、荷重枠の転倒防止と前後およびヨー方向の運動を拘束するための転倒防止リンクから構成される。なお、荷重枠上にはデッドウェイトが取り付けられており、この数量を変更することで車体の質量を任意に設定することが可能である。また、試験体には各部の挙動調査を目的に各種センサが取り付けられている。

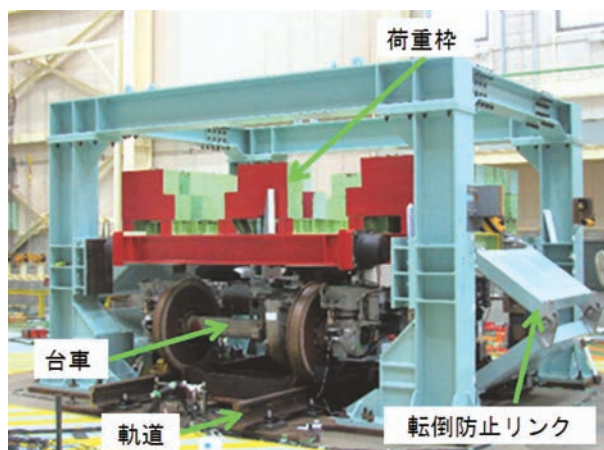


図4 振動台試験で使用した試験体の外観

試験では、振動台を正弦波および地震波で左右方向に加振し、この時に試験体の4つの車輪のうちいずれかの車輪において、車輪からレールに伝わる自重や振動などによる垂直方向の荷重（以下、輪重と記す）がゼロとなる、つまり車輪がレールから離れる現象に注目し、この際の加振条件を調査した。地震波加振では、新潟県中越地震の際に新幹線が脱線した高架橋上の推定地震動²⁾を用い、これに任意の倍率（以下、加振倍率と記す）を乗じ加振した。

4.2 正弦波加振試験結果

正弦波加振の結果、輪重がゼロとなった際の振動台左右変位振幅を図5に示す。加振周波数が0.7Hz以上の加振条件では、地震対策ダンパを装備した場合の加振振幅は、現行ダンパを装備した場合のものに比べ大きくなっていることがわかった。さらに、地震対策ダンパを装備し、現行ダンパを装備した場合に輪重がゼロとなった加振条件で測定された輪重の最小値と車体左右変位の最大値を表1に示す。地震対策ダンパを装備した場合には、輪重が残存すること、車体左右変位が小さくなることがわかった。これらのことから、地震対策ダンパを装備することによる走行安全性が向上することを確認した。

なお、この試験では、現行ダンパの許容荷重を超える条件での加振を重ねたため、途中で破損に至った。このため、図5、表1には双方のダンパを装備

した場合のデータが存在する1.2Hzまでの試験結果を示している。

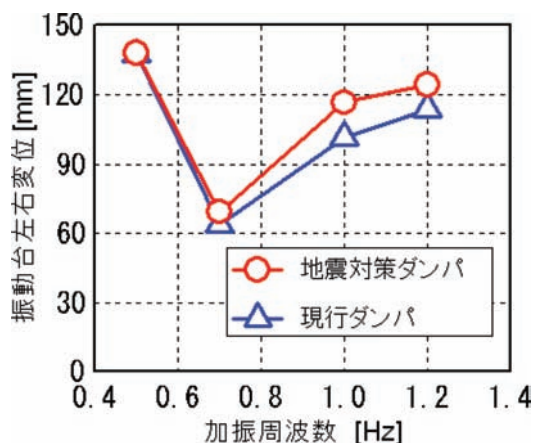


図5 輪重がゼロとなる振動台左右変位

表1 現行ダンパで輪重がゼロとなる加振条件での比較

加振条件		軽重最小値 [kN]		車体左右変異 [mm]	
周波数 [Hz]	加速度 [Gal]	現行	地震対策	現行	地震対策
0.5	130	0.0	0.9	121.0	113.8
0.7	115	0.0	10.9	124.0	114.1
1.0	350	0.0	3.8	116.1	108.4
1.2	550	0.0	2.8	82.0	78.5

4.3 地震波加振試験結果

地震波加振の結果、現行ダンパを装備した場合には加振倍率60%、地震対策ダンパを装備した場合には加振倍率65%の時にそれぞれ輪重ゼロが確認された。また、地震対策ダンパを装備し、現行ダンパを装備した場合に輪重がゼロとなった加振倍率60%の加振条件で測定された輪重の最小値と車体左右変位の最大値を表2に示す。正弦波加振試験の結果と同様に、地震対策ダンパを装備した場合には、輪重が残存すること、車体左右変位が小さくなることがわかった。これらのことから、地震対策ダンパを装備することによる走行安全性が向上することを確認した。

5. おわりに

地震時における鉄道車両の脱線を防止する方策の

ひとつとして地震対策ダンパを提案、試作し、各種試験によりその効果を確認した。その結果、現行ダンパを装備した場合に比べ地震時の走行安全性が向上することを確認した。

今後は、さまざまな車両での使用に対応できるようダンパ本体の小型軽量化を図るとともに、新幹線車両に導入されているフルアクティブ振動制御装置へ対応できるよう検討を進めていきたいと考えている。

表2 現行ダンパで輪重がゼロとなる加振条件での比較

現行ダンパ		地震対策ダンパ	
輪重ゼロ観測部位	車体左右変位 [mm]	輪重最小値 [kN]	車体左右変位 [mm]
車輪No.1	83.1	7.2	80.0
車輪No.3		8.2	

6. 謝 辞

地震対策ダンパの開発にあたり多大なるご協力を賜りました東日本旅客鉄道株式会社ならびにK Y B株式会社の関係各位に末筆ながら厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 宮本、石田：台車改良による地震時走行安定性向上に関する研究、鉄道総研報告、Vol. 21, No. 12, p. 35-40 (2007-12)
- 2) 新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析、鉄道総研報告、特別52号 (2008-12)

[著 者 紹 介]

すずき
鈴木

みつぎ
貢 君



東京都立航空工業高等専門学校卒。1992年財団法人鉄道総合技術研究所入所、現在に至る。走行安全性測定技術などの研究に従事。日本機械学会会員。
E-mail : mitsugi@rtri.or.jp

解 説

遠 隔 操 作 建 設 ロ ボ ッ ト *

山 田 宏 尚 **

1. はじめに

日本がロボット大国といわれるようになって久しいが、福島原発の事故では日本製ロボットは殆ど投入されず、実際に活躍できたのは米国製ロボットであった。その理由として、米国では放射能汚染対策を含む軍事目的のロボットがすぐに実践投入できるよう開発されているのに対し、我が国では災害救済に使えるロボットは研究レベルでの開発にとどまっており、実践投入を想定した準備・開発が十分されていなかった点がある。また、日本のロボット技術開発が製造現場で使われる産業用ロボットやヒューマノイド型に集中していることなども指摘されている。このように、今回の原発事故で日本のロボットが活躍できなかったのは、日本のロボット技術が劣っているからではなく、開発体制（目標設定）の問題であると考えられる。

震災前は「日本の原発では致命的な事故は起こりえない」との立場から、実践投入用の復旧ロボットを真剣に開発する体制が整えられてこなかったが、今後は即実践投入できるロボットの開発がされるようになっていくであろう。大学などの研究機関では、そのための要素技術を含む基礎的研究開発がますます重要になっていくものと思われる。

当研究室では災害復旧などにおける無人施工で用いることを想定した、研究用の遠隔操作建設ロボットシステムを構築している。具体的には、油圧パワーショベルを遠隔操作できるようにし、視覚提示にVR（Virtual Reality：バーチャル・リアリティ）技術を導入してオペレータに作業現場の十分な臨場感を与えるとともに、コンピュータの支援に基づく高度かつ精密な作業を実現するための研究を行っている。本システムを用いた研究内容については、過去の解説記事^{1),2)}にて概要を述べている。本稿では最近の研究の取り組みについて紹介する。

2. 遠隔操作・臨場感提示建設ロボット

図1に、本研究で用いている遠隔操作・臨場感提示建設ロボットシステムの概要を示す。建設ロボットは、油圧ミニショベルにステレオCCDカメラ、マイクロフォンなどを取り付けて遠隔操作ができるように改造したもので、すべての油圧アクチュエータはスレーブ側コンピュータにより制御できるようになっている。このシステムでのマスタは2個のジョイスティックで、スレーブは建設ロボット（フォークグラブ・ブーム・アーム・スイングを含む）である。

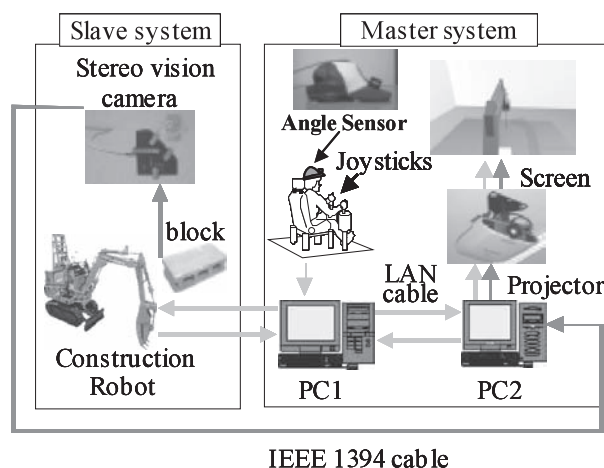


図1 遠隔操作建設ロボットシステム

従来の遠隔操作システムでは複数のカメラを用いて多視点の映像を見ながら作業を行う場合が多いが、作業場所によってカメラやセンサといった設備が限られることや死角が生ずることにより、現場を直接見ながら作業を行う場合と比べ作業効率は30%～50%となるとの報告がされている。このような問題点を補完する技術としてVR技術に着目し、コンピュータ内に構築される仮想空間を介した遠隔操作システムを導入することで、視覚センサの数やカメラの死角の問題を克服し、作業効率の改善を図っている。以下ではその取組の中から、①オペレータの頭部に設置した角度センサを用いることで頭部の動きをセンシングし、操作者の意志により能動的に視

*平成24年2月28日 原稿受付

**岐阜大学工学部人間情報システム工学科
(所在地 〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

点移動を行えるシステムおよび、②力覚フィードバックに聴覚フィードバックを加えたマルチモーダル・インターフェースの適用事例について紹介する。

3. VRによる能動的視覚提示法

遠隔操作システムでは操作者への視覚提示をどのように行うかがもっとも重要である。当研究室では、これまでステレオビデオ画像や、CG (Computer Graphics) を用いた自動視点移動による視覚提示を行ってきた^{3)~5)}。しかし、固定されたカメラからの映像ではなく、操作者がカメラ視点を能動的に動かすことができれば、作業現場の状況をより正確に把握でき作業者の空間認識能力が向上することが期待できる。本研究では、図2に示すようにオペレータの頭部に角度センサを設置し、オペレータが首を傾けることにより能動的に視点を動かせる視覚提示システムを構築した。図3にオペレータの頭上の角度センサの傾き角度に対応したCG内仮想カメラの移動軌跡を示す。



図2 頭上にセットされた角度センサ

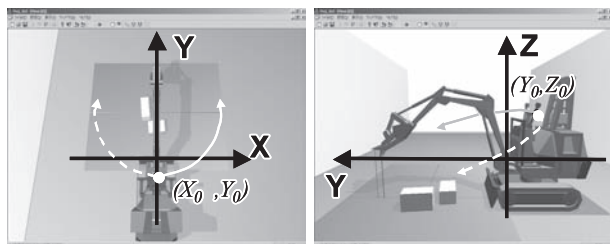


図3 仮想カメラの移動軌跡

本システムを用いて、自動移動視点と角度センサを用いた曲線軌道の視点による作業を行ってもらい、評価を行った⁶⁾。その結果、作業者が能動的に視点を移動する方法では、作業現場の状況の把握がしやすくなり、操作の正確性や作業効率は従来の自動移動視点法⁵⁾よりも高くなることが確認された。またNASA-TLXという主観的評価手法により、操作者の作業疲労度を評価したところ、頭部による操作が必要となるため、身体への疲労感が増えるものの、全体として作業に対する精神的な負担が軽減されることがわかった。

4. 聴覚情報を用いた力覚提示法

先に述べた視覚提示システムに加えて、建設ロボットにより対象物を把持したときに、把持対象物の微妙な変形しやすさが判別できれば、対象物を壊さずに取り扱うことができる。当研究室ではこれまでに、対象物からの反力を、ジョイスティックへの力覚提示として操作者へフィードバックすることを行ってきた^{4), 5)}。しかし、壊れやすいものや柔らかく変形しやすい対象物を把持したときの力情報を操作者が正確に判別・認識して操作することは容易ではない。また、ジョイスティックからの微妙な力覚を手で感じ取りながら、対象物を壊さず、落とさないように遠隔操作することは作業者にとって大きな負担となる。そこで、ジョイスティックからの力覚フィードバックに加えて対象物からの反力に基づく聴覚情報をフィードバックすることで、微妙な力覚の認識を可能にする手法について検討した⁷⁾。

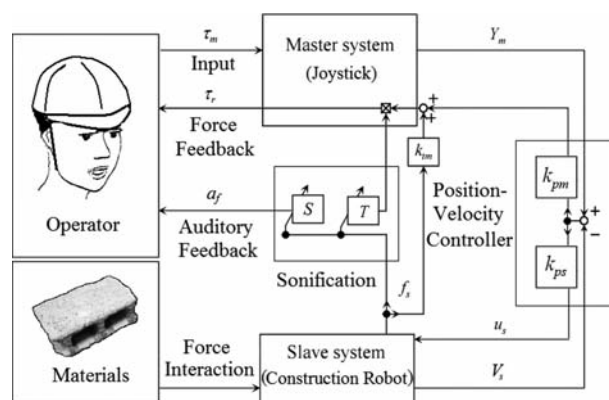


図4 音声フィードバックシステムの概要

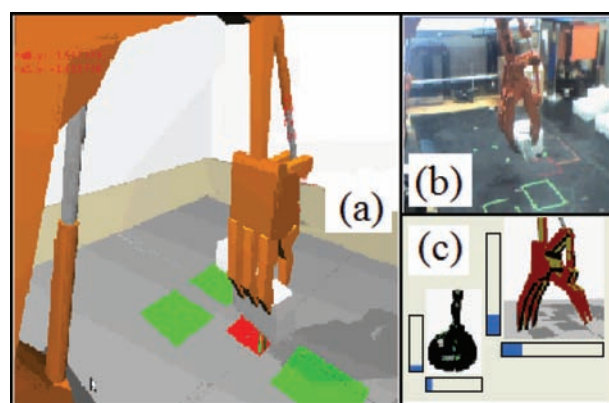


図5 操作者への画像提示

本研究では、図4に示すような聴覚による力覚フィードバックシステムを構築した。本システムでは、対象物からの反力を油圧シリンダ内の圧力センサで計測し、摩擦などの外乱を補正した後、ジョ

イスティックへの力覚提示に加えて音声信号として操作者に力覚情報をフィードバックするものである。また、力覚・聴覚に加えて図5に示すように画像中にも力覚情報をゲージで提示するようにした。すなわち(a)CGによる作業現場の提示に加え、(b)実写映像および(c)フォークグラムへの反力およびジョイスティックへの力覚のゲージによる表示を行った。本システムを用いて評価実験を行い、操作性を改善できることを確認した⁷⁾。

5. おわりに

本稿では、当研究室における遠隔操作・臨場感提示建設ロボットの研究概要を紹介した。紙面の都合により一部の研究概要のみについて述べたが、詳細については文献を参考にされたい。なお、現在本システムを学外からインターネット接続して遠隔操作をできるようにし、岐阜大学から約300km離れた場所からの遠隔操作実験に成功している。原理的には地球の裏側からでも岐阜大学の建設ロボットを操作できるようになっている。今後は、インターネット回線を介した遠隔操作における操作性改善について取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- 1) VRを応用した建設機械の遠隔操作システム, フルードパワーシステム, 山田宏尚, 35巻4号, pp. 262-266 (2004)
- 2) 油圧システムとVR技術, 山田宏尚, フルードパワー, Vol. 20, No. 2, pp. 44-46 (2006)
- 3) Construction Tele-Robotic System with Virtual Reality (CG Presentation of Virtual Robot and Task Object using Stereo Vision System), Yamada, H. and Muto, T., International Journal of Control and Intelligent Systems, Vol. 35-3, pp. 195-201, (2007).
- 4) 力覚提示機能を有する遠隔操作建設ロボットシステムの操作性評価 (カメラ映像による遠隔操作ロボットシステムに力覚提示機能を備えた場合の操作性評価), 山田宏尚, 加藤英寿, 土井達也, 日本機械学会論文集, C編, 73巻735号, pp. 3055-3062, (2007).
- 5) 力覚提示機能を有する遠隔操作建設ロボットシステムの操作性評価 (仮想空間を用いた操作システムに対する力覚提示機能の有用性), 黄玲涛, 加藤英寿, 川村拓也, 山田宏尚, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 42巻3号, pp. 53-59, (2011).
- 6) Construction Robot Tele-operation with a VR-aided Display: Workspace Viewpoint Manipulation Effect, A. A. Yusof, X. Tang, T. Kawamura, H. Yamada, Yamada, International Journal of Robotics & Automation, Vol. 26-4, pp. 376-388 (2011).
- 7) Operational Evaluation of a Construction Robot Tele-operation with Force Feedback, - Evaluation of Tele-robotic Force Perception using Auditory Feedback -, Ahmad Anas Yusof, Takuya Kawamura, Hironao Yamada, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 43巻1号, pp. 8-15, (2012).

[著 者 紹 介]

やま だ ひろ なお
山 田 宏 尚 君



1991年名古屋大学大学院 博士課程修了, 名古屋大学工学部講師等を経て2007年より岐阜大学工学部 教授。油圧制御, 人間支援システム, 画像処理工学などの研究に従事。日本油空圧学会, 日本機械学会, 日本ロボット学会等の会員。工学博士。

E-mail : yamada@gifu-u.ac.jp

解 説

危険建物内への迅速・安全なアクセスを目指した流体ロープウェイ*

塚 越 秀 行**, 北 川 能**

1. はじめに

危険建物内の情報収集を安全かつ迅速に行う手段の1つとして、探査機能を備えた無人移動ロボットの活用が挙げられる。なかでも、大地震直後の余震環境下における人命探査や、危険物の位置情報などを推定する際には、たとえ障害物が散乱した状況でも速やかに移動可能なロボットがあれば、被害の軽減に役立つものと期待される。

このような劣悪環境下における代表的な移動方法として、i) 車輪やクローラによる無限回転移動や蹴り出し機構を用いた跳躍のように床反力を得ながら移動する方法^{5,6)}、ii) 壁面や天井面に吸着しながら移動する方法⁷⁾、iii) 小型ヘリのように空中に浮遊しながら移動する方法⁸⁾、などが検討されてきた。いずれの方法も「万能な移動手段」ではないため、目標の探査領域や作業内容に応じて適切な移動方法を選択する必要がある。

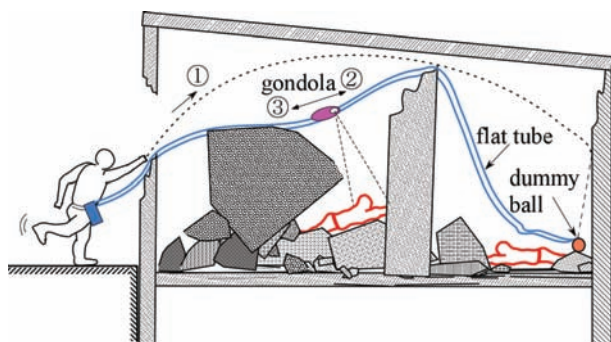


図1 流体ロープウェイのイメージ図



長さ：170mm
高さ：33.5mm
幅：73mm
質量：118g

図2 無線カメラを搭載したゴンドラの外観

本稿では、上記の分類とは異なる新たな移動手段として、筆者らの考案した「流体ロープウェイ」¹⁾を紹介する(図1, 2)。すなわち、たとえ床反力を得にくい状況でも、地面に放出されたレールの機能を担う柔軟チューブに沿って探査機を推進させることにより、多様な地面に対応しやすい移動を目指した方式である。運用手順や駆動原理に加えて、建物内の情報収集作業の機能性についても述べる。

2. 流体ロープウェイの概念

流体ロープウェイは、つぎの3つの基本要素から構成される。すなわち、内部に流体エネルギーを供給する1本の柔軟なチューブ、探査機器を搭載したゴンドラ、およびチューブの投げやすさとその停留性を保つために適切な質量を有したボールである。チューブは、探査する目標距離の2倍以上の長さを有するものとし、初期状態ではその中央の折り返し点でボールに通されている。

流体ロープウェイの基本的な運用は、以下3つの手順に沿って進められる(図1) i) 建物外にいるオペレータが、建物内の目標探査方向にチューブ付きボールを投げ入れる。ii) チューブ内に流体エネルギーを供給することにより、ゴンドラをチューブに沿って双方向にスライドさせる。この際、ゴンドラから送信される情報を受信しながら探査する。iii) 探査終了時点で、ゴンドラをオペレータのもとに帰還させたのち、一端を引っ張りながらチューブを回収する。ボールは現場に捨て去るものとする。

流体ロープウェイの最大の特徴は、動力源をゴンドラ内部に搭載せず、代わりにチューブ内の流体エネルギーを利用してゴンドラを推進させる点にある。すなわち、ゴンドラに内蔵されたスライダとよぶ軽量の構造体で、チューブ内の流路を遮断しながら推力を生成する。また、通常のロープウェイと異なり、チューブは外部環境に対して不動のため、凹凸環境でもチューブにしゅう動摩擦が生じにくい構成である。

*平成24年3月7日 原稿受付

**東京工業大学大学院

(所在地 〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

3. ゴンドラの駆動方法

3.1 Λ -driveの導入

ゴンドラを駆動するスライダの構造として、いくつかの候補が考えられる。チューブとスライダ間の摩擦損失を極力低減し、長いチューブに沿ってスライダがスムーズに移動するために、以下に述べる駆動原理を導入した。

その駆動原理は、偏平チューブとスライダの要素から成る簡便な構造に基づいたものである。偏平チューブとは、無加圧状態では断面が偏平形状を形成し、加圧状態では断面周長をほぼ一定に保ちつつ断面が円形に近づくチューブである。スライダは、主に摩擦低減のためのローラーと座屈保持のためのストッパから構成されている。図3のようにチューブ内的一方を加圧すると、座屈点まで流体は流れるものの、座屈点より下流側は流路が遮断されるため

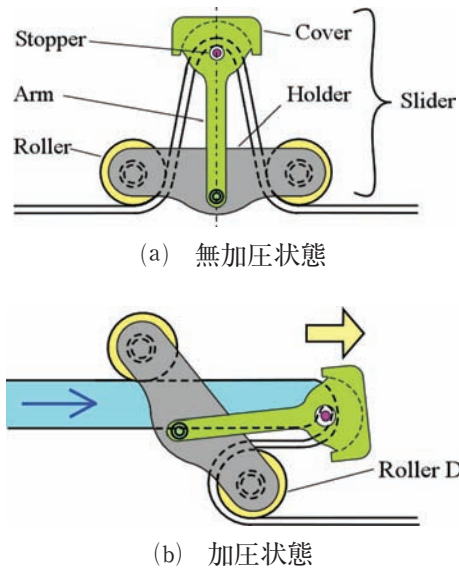


図3 Λ -driveで駆動されるスライダの構造

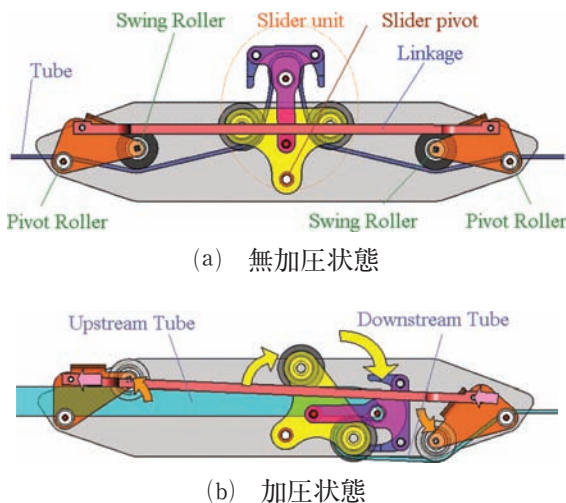


図4 ゴンドラの構造

流体は流れない。さらに加圧し続けると、座屈点を含む曲げ部とともにスライダも下流側に駆動される。曲げ部の形状とギリシャ文字 Λ （ラムダ）との類似性から、この構成を Λ -drive²⁾と名付けてきた。

3.2 ゴンドラの内部構造

ゴンドラに取り付けられたスライダにおいて、下流側のチューブが、上流側のチューブおよびゴンドラの長手方向と常に平行に保たれる図4に示す機構を導入した。これにより、推力方向とスライダの移動方向が一致し、駆動効率の向上が望めるからである。詳細は文献¹⁾を参照されたい。

4. 建物内の探査実験

試作したゴンドラ（図2）には、30mまで無線送信可能な小型カメラ（アールエフ社製 RC-12、質量14.7g）が2個搭載されている。また、これらのカメラは、探査範囲を広げるために、スライダの傾斜動作を利用して回転できるように取り付けられている。

流体ロープウェイの有用性を確かめるため、危険建物を模擬した環境で実験を行った。オペレータと建物の間に7mのギャップがあるため、建物内を直視できない状況で情報収集を迅速に行うことを目指した。質量520gのチューブ付き低反発ボールを建物内に投てきした。チューブ内を0.4MPaの空気圧で加圧して、ゴンドラを約2.0m/sの速度で建物に近づけた（図5-1, 2, 3）。建物内に進入する際、窓のフレームと衝突してスタックしたが、チューブを弛ませた後、速度を2.5m/sに速めると、フレームを踏破することが確認された。建物内では、上流側

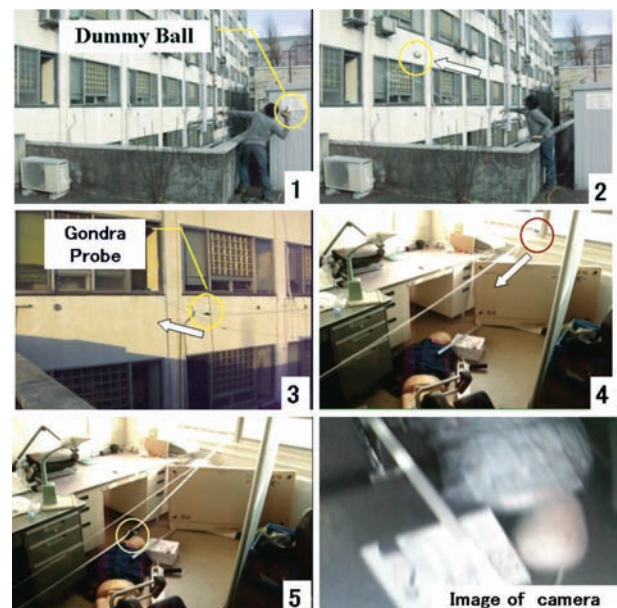


図5 危険建物と想定した建物内の探査実験

の流量制御によりゴンドラを速度を 0 m/s ~ 1.0m/s の間で調整しながら移動させ、ゴンドラ内に搭載された無線カメラの映像に要救助者（人形）が映り、速度 0.7m/s で往復させながら探査可能なことが確認された（図 5-5）。

5. おわりに

本稿では、危険建物内の情報収集を迅速・安全に行う無人探査ロボットの移動手段として、流体ロープウェイと名付けた新たな移動方式を紹介し、その運用方法や特徴を述べた。チューブを投てきする装置³⁾、および投てきしたチューブの一端を壁に固定する投てき式吸着体⁴⁾も並行して開発中である。また、本手法は、偏平チューブの代わりに消防ホースでも駆動することが確認されている。さらに高出力化を図り、原発内のモニタリング作業などへの適用も試みる予定である。

謝 辞

本研究の一部は、消防防災科学技術推進制度の研究助成を受けて行われた。また、本装置の開発に貢献していただいた森庸太郎君に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) Yotaro Mori, Hideyuki Tsukagoshi, Ato Kitagawa "Fluid Powered Ropeway: Self-propelled Probe Sliding Along Flexible Tube" Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 23, No. 2, 215-224 (2011)
- 2) 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, Λ -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論文集, 第41巻, 第5号, 98-105 (2010)
- 3) Eyri Watari, Hideyuki Tsukagoshi, and Ato Kitagawa "Novel Method to Throw a Tube Into High Altitudes for a Throw and Collect Rescue Inspector" Proceedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR) and the Support Technologies for Mobile Machines, pp. 1314-1322 (2010)
- 4) 測上和峻, ワタリエイリ, 塚越秀行, 北川能 "危険建物内のレスキュー活動を支援する投てき式吸着体の開発" ロボティクス・メカトロニクス講演会2011, 2A1-J11 (2011)
- 5) Toshio Takayama and Shigeo Hirose "Development

of "Souryu I & II" -Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space" Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 15, No. 1 (2003)

- 6) Hideyuki Tsukagoshi, Yotaro Mori, Masashi Sasaki, Takahiro Tanaka, and Ato Kitagawa "Development of Jumping & Rolling Inspector to Improve the Debris-traverse Ability" Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 15, No. 5 (2003)
- 7) Hideyuki Tsukagoshi, Hiroyuki Chiba, Ato Kitagawa "Gel-type Sticky Mobile Inspector to Traverse on the Rugged Wall and Ceiling" IEEE International Conference on Robotics and Automation, FrA2.5 (2009)
- 8) Kevin S.Pratt, Robin R.Murphy, Jennifer L.Burke, Jeff Craighead, Chandler Griffin, Sam Stover "Use of Tethered Small Unmanned Aerial System at Berkman Plaza II Collapse", Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp. 134-139 (2008)

[著 者 紹 介]

つか 塚 越 秀 行 君



東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻 准教授, レスキューロボット, 人体装着型流体アクチュエータ, 流体制御システムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会・計測自動制御学会等の会員, 博士 (工学)。

[著 者 紹 介]

きた がわ 能 君



東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻教授, 流体制御, 流体駆動ロボット, 生体協調流体システム等の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会・計測自動制御学会等の会員, 工学博士。

FPIC会議報告

ICMT2011におけるフルードパワー技術関連の研究*

嚴 祥 仁**

1. はじめに

2011年11月30日から12月2日までオーストラリアのメルボルンでICMT2011 (15th International Conference on Mechatronics Technology) が開催された。ICMTはメカトロニクス分野を含めて幅広い分野の研究発表が行われる国際会議である。今回のICMT2011では4件の基調講演と22セッションにおいて112件の発表が行われた。また11月29日の夜にはウェルカムパーティが、12月1日の夜にはバンケットが開催され、会議参加者の親睦を深めるよい機会になった。そして12月2日には会議参加者を対象としてAustralian SynchrotronとCarlton United Breweryへの見学が行われた。

2. フルードパワー関連の発表

本国際会議はフルードパワー関連がメインの分野ではないが、今回は基調講演の1件を含めて、計12件のフルードパワー技術関連の発表が行われた。特に機能性流体関連の発表が多く行われたので、機能性流体のみを細分化して発表内容を分類するとECF関連が6件、MR関連が3件、ER関連が1件、その他が2件であった。

2.1 ECF関連の発表

ECF (Electro Conjugate Fluid : 電界共役流体) とは不均一電界印加によりジェットを発生する機能性流体である。

YashikiらはECFジェットを利用した電子チップ冷却用フレキシブルポンプを開発するため、ECFジェット発生用の電極パターンとジェット特性との関係を明らかにしている。また、その結果を利用してフレキシブルポンプを試作し、実験によりその性能を示している¹⁾。

Eomらは液圧源として用いるECFジェット発生器を、アクチュエータに内蔵した新たなピストンシ

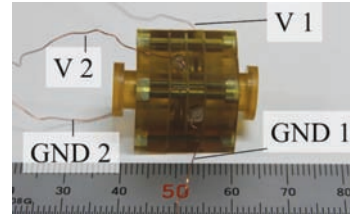


図1 マイクロアクチュエータ [文献2) から転載]

リンダ形マイクロアクチュエータ (図1) を提案している。このアクチュエータは、ゴム製のローリングダイアフラム、ECFジェット発生器、シリンダで構成される。実際にマイクロアクチュエータを試作し、実験を通して、その性能を示している²⁾。

WangらはECFジェット発生器に使用するマイクロ三角柱スリット形電極の集積化に関する研究を行っている。この研究ではパワー密度を高めるため電極4つを直列に配置し集積化している。その電極の形状や配置を最適化するために、三角柱スリット形電極 (図2) に関するパラメータを変化させ、最適なパラメータを実験的に検討している³⁾。

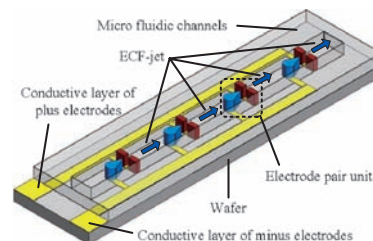


図2 マイクロ三角柱スリット形電極の集積化 [文献3) から転載]

TokidaらはECFジェット発生器とゴム製アクチュエータ、バネアクチュエータ、そしてECFタンクで構成されたミミズロボットを試作し、その特性を実験的に示している⁴⁾。

NguyenらはMEMS技術を用いて、圧力源を内蔵したマイクロレートジャイロを提案・試作 (図3) している。このジャイロでは圧力源であるECFジェット発生用の電極と速度検出センサをフォトリソグラフィとニッケルメッキにより製作することで、大量生産を可能としている⁵⁾。

*平成24年2月3日 原稿受付

**東京工業大学精密工学研究所

(所在地 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259—R2—41)

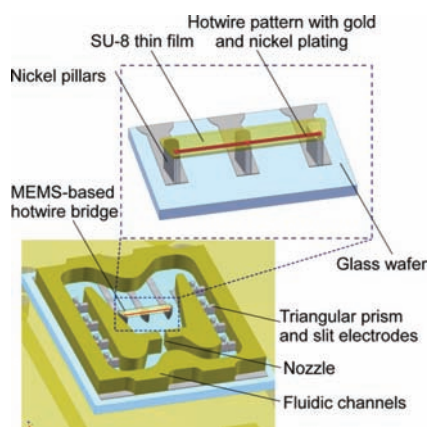


図3 ECFマイクロジェットノズルの構成図
[文献5)から転載]

Kimらは高性能ECFマイクロポンプを開発するために、フォトリソグラフィとニッケルメッキのMEMS技術を用いて、三角柱スリット形電極を平面上に集積化する製作技術を提案している。その技術に基づき集積化したECFジェット発生用の電極を製作し(図4)、その特性を実験的に示している⁶⁾。

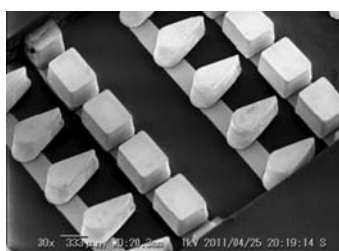


図4 平面上に集積化された三角柱スリット形電極
[文献6)から転載]

2.2 MRF関連の発表

MRF (Magneto Rheological Fluid: 磁気粘性流体) とは磁界印加により粘度が増加する機能性流体である。

Guoらは2枚の薄いアルミ板の間に、MRFを入れたサンドイッチ構造梁を製作している。そして非均一磁界の位置を変化させながらサンドイッチ構造梁にかけることにより、サンドイッチ構造梁の固有振動数が変化することを実験的に示している⁷⁾。

GrelaudらはマルチディスクMRブレーキを最適化する新しいアルゴリズムを提案し、そのアルゴリズムをシミュレーションにより検証している⁸⁾。

PengらはセルフセンシングMRダンパの研究を行っている。提案したMRダンパではピストンロッド側と、カバー側にコイルが巻かれている。これによりピストンロッドの動きに合わせて誘導電圧が発生するので、この電圧をセンサ信号として利用する。この研究ではセルフセンシングMRダンパを設計し、

シミュレーションによりその性能を検証している⁹⁾。

2.3 ERF関連の発表

ERF (Electro Rheological Fluid: 電気粘性流体) とは電界印加により粘度が増加する機能性流体である。

Yoshidaらは柔軟なチューブと数個のERバルブマイクロユニットで構成される2自由度屈曲可能なERマイクロバルブ(2-DOF FERV)を提案している(図5)。ERバルブマイクロユニット間の流路長さ、および屈曲による流れの変化のER効果への影響を実験的に明らかにし、これに基づいて、5個のERバルブマイクロユニットからなる2-DOF FERVを試作している¹⁰⁾。

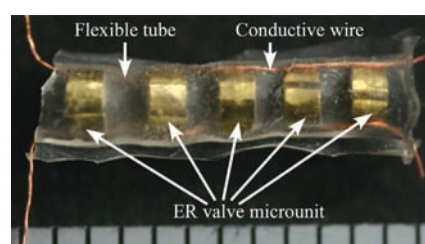


図5 2自由度屈曲可能なERマイクロバルブ
[文献10)から転載]

2.4 その他

Kimらは自動変速機に適用できる可変オイルポンプを提案している。このポンプはリニアアクチュエータとばねからなる電子制御アクチュエータを用いて流量を制御する。この設計のために数学モデルを導出し、そのシミュレーションにより検証を行っている¹¹⁾。

Ahnは基調講演で電動油圧アクチュエータを用いたパワーアシストロボット(図6)に関して発表した。この研究は電動油圧システムをパワーアシストロボットに適用するのが主な目的であり、4Dジョイスティックによる人の操作を解析し、作業条件に応じて適切な知能制御をすることによって、柔軟性や制御性のよいパワーアシストシステムを構築して



図6 電動油圧パワーアシストロボット
[文献12)の著者から提供]

いる。

3. おわりに

本稿では国際会議ICMT2011におけるフルードパワー技術関連の発表，および基調講演の各概要を紹介した。

参 考 文 献

- 1) Yashiki, A., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K.: A Flexible Pump Using Electro-Conjugate Fluid for Liquid Cooling of Electronic Chips, Proc. ICMT2011. p. 174-179 (2011)
- 2) Eom, S., Masuda, H., Yokota, S., Yoshida, K., Edamura, K.: Study about micro cylinder for bidirectional rolling diaphragm actuator using ECF jet, Proc. ICMT2011. p. 461-464 (2011)
- 3) Wang, H., Kim, J., Yokota, S., Edamura, K.: Parameter Optimization on Power Density of MEMS-based Micro Triangular-prism-slit Electrode Array as an ECF-jet Generator, Proc. ICMT2011. p. 421-425 (2011)
- 4) Tokida, K., Yamaguchi, A., Takemura, K., Yokota, S., Edamura, K.: A Bio-inspired Robot Using Electro-conjugate Fluid, Proc. ICMT2011. p. 85-90 (2011)
- 5) Nguyen, T., Imamura, T., Kim, J., Yokota, S., Edamura, K.: Development of MEMS-based ECF micro rate gyroscopes with the micro hydraulic power source and flow sensor in a chip, Proc. ICMT2011. p. 552-556 (2011)
- 6) Kim, J., Nguyen, T., Yokota, S., Edamura, K.: High Performance ECF (Electro-Conjugate Fluid) Micropump by the In-plane Integration of MEMS-fabricated electrodes, Proc. ICMT2011. p. 546-551 (2011)
- 7) Guo, M., Hu, G., Li, W., Alici, G.: Vibration Characteristics of Sandwich Beam with MR Fluid under Nonhomogeneous Magnetic Field, Proc. ICMT2011. p. 97-100 (2011)
- 8) Grelaud, M., Li, W., Kennedy, O., Michal, G.: A magnetic circuits' optimization algorithm for MR devices, Proc. ICMT2011. p. 118-123 (2011)
- 9) Peng, G., Li, W., Hu, G., Alici, G.: Design and Simulation of a Self-Sensing MR Damper, Proc. ICMT2011. p. 112-117 (2011)
- 10) Yoshida, K., Hakoda, S., Eom, S., Yokota, S.: An ER Microvalve Having Two-DOF Flexibility, Proc. ICMT2011. p. 46-49 (2011)
- 11) Kim, C., Truong, D., Trung, N., Ahn, K., Yoon, J., Lee, J., Han, H., Kim, J.: Development of an Electronic Control Variable Displacement Lubrication Oil Pump, Proc. ICMT2011. p. 306-310 (2011)
- 12) Ahn, K.: A Study about power assistant robot using electro-hydraulic actuator, ICMT2011 Keynote Speech (2011)

[著 者 紹 介]

おむ 嚴 さん いん 祥 仁 君

2009年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。同年東北大学助教，2010年東京工業大学助教，流体マイクロマシン，機能性流体の研究に従事。JFPS, JSME, JSPEなどの会員。博士（工学）。

E-mail : sieom@pi.titech.ac.jp

FPIC会議報告

FLUCOME2011におけるフルードパワー技術研究動向 FLUCOME2011 in TAIWAN*

香 川 利 春**

1. 前 書 き

FLUCOMEは日本で開始された流体の計測制御と可視化に関する国際会議で1985年に東京国立教育会館で第1回目が行われた。以来、世界の各地で流体の計測制御と可視化に関する分野のそれぞれについて著名な議長が中心となり国際会議が行われている。今回、2011年12月5日から9日まで、台湾のキーロン市（基隆市）と台湾最南部のケンティン公園で行われた。本報告はFLUCOME2011流体の計測制御と可視化に関する会議におけるフルードパワー技術研究動向とフルイディックスに関する紹介を行う。



図1 台湾国立海洋大学

2. 概 要

本会議は国立台湾海洋大学でJ. H. CHEN教授を議長として行われた。5日間にわたり、主催者発表で21ヶ国150の論文発表が行われた。すべての講演をチェックした訳ではないが、キャンセル論文は前回2009ロシアでの会議時に比べて格段に少なかった。講演は4つのパラレルで行われた。学生を動員しても合計250人程度の総数のため、また会場が大きい

場合は、かなり人数が少ない状況であった。講演内容は多方面にわたっていた。もっとも多いのは、外部流れの可視化の関連論文であった。議長を行った海洋大学のCHEN教授は海洋大学の教授であるため、海洋関連の研究が多く行われた。研究室には大きな海流水槽を有し可視化装置により実験を行っている。この海洋関連は2009年にFLUCOME議長を行ったフロリダのC.J. CHEN教授の継続であり、深い関係を有しているようである。

フロリダ州立大学のCHEN教授の所では、ノズルの静音技術の研究が盛んで、軍需にも近いと考えられたが、台湾のCHEN教授の研究も実用的で軍需にも同様に近いと思われた。国立海洋大学は台北の北30キロの基隆市にあり、海に面している。津波がきたらキャンパス全体が浸水しそうである。

キーノートで話されたジョンホプキン大学のJ. Katz教授の乱流構造の話は基礎から最新の研究まで扱い、大変に参考になった。

また、FLUCOME会議の方針を討議する国際ナショナルコミティ会議は2日目の昼食時に台湾国立大学の2階の会議室で行われたが、12月であるものの、25度C以上となり、冷房が欲しいと感じられた。国際ナショナルコミティ会議ではC.J. CHEN教授へのFLUCOMEアワードの贈呈が決まった。C.J. CHEN教授は脳溢血で過去に倒れた経験をお持ちであるが可視化に大変な情熱を持たれている。FLUCOME設立当初は3年のインターバルで行っていたが、2005年の中国Chengdu会議からは2年おきの開催となっている。

また国際ナショナルコミティ会議では2013年の奈良会議の後の2015年の開催地の提案が3件行われた。UAEUのY.HAIK教授、フランスのリオン工科大学バディ教授、英国エディンバラ大学のR. Wallece教授である。従来案ではオーストラリアでの開催が希望されていたが、担当教授のリタイアなどで開催が困難になった。

3. FLUCOMEの発祥と運営

FLUCOMEが初回に行われた1985年は半導体産

*平成24年2月5日 原稿受付

**東京工業大学 精密工学研究所

(所在地 〒213-0013 川崎市高津区末長226—3—319)

業が未だ発達していない時代で、流体によって論理判断を行うフルイディックスが持てはやされていた。計測自動制御学会にはフルイディックス部会が設けられ、日本油空圧学会（現日本フルードパワーシステム学会）、日本機械学会の講演会では盛んに研究報告がなされていた。FLUCOME1985の議長の中山泰喜教授も含め、実行委員会の多くはフルイディックスの研究を行っていた。

フルイディックスとはフルイド：流体とロジック：論理との造語であり、1960年代からの比較的新しい技術である。フルイディックスは流体の流れに論理を乗せてかつ増幅しパワーレベルを上げて、そのまま駆動などに用いる技術であり、1970年代では熱狂的にもてはやされ、大学においてもこの関連で多くの学位論文が出された。フルイディックスでは従来の流体制御技術と異なり、流路の内部に弁や膜などの可動要素を持たない特徴を有している。ミサイルの誘導装置、一般産業での自動化に利用された。フルイディックスの流体振動を利用する流量計や核燃料サイクルのための渦流ダイオード利用空気圧駆動ポンプに適用された。

1970年代では半導体製品がほとんど民生品には無く、出始めのフリップフロップや演算増幅器は学卒初任給もするような要素もあった。したがって現在では相対的に価格は数万分の1以下に下がった事になる。

フルイディックスの発案は1960年代に米国陸軍研究員のDr. R.E. Bowles, B.M. Harton, R.W. Warrenの3名が渦流れを利用した新型の真空掃除機を研究していたときに、渦流れ、流れの剥離と付着を観察して流体素子の基礎を思いついたとされる。この数年の家電掃除機の原理も渦を用いた原理による機種がフィルターのメンテナンス性のため、多く利用されるようになってきている。流れの付着と剥離の応

用はDr. H. Coanda, Prof. L.A. Zalmanzonらの研究が有名である。乱流噴流の偏向を制御に応用するものの、その乱流ノイズにSN比の劣化が著しいため層流比例増幅素子LPAが開発された。

これらのフルイディックス技術も時代の変遷と共に歴史に埋もれていく結果となった。論理演算を行う半導体要素の1970年代に比較して数万分の1の価格となり、かつまたアナログ量とデジタル量の変換AD-DA素子の低価格化に伴い、フルイディックスシステムの採用はほとんど無くなった。しかしながら日本フルードパワーシステム学会および計測自動制御学会に関係する流体計測制御関連の研究者の多くはフルイディックスの経験を生かしている。また機械分野の学生が流体回路インピーダンスの学習を行うにはフルイディックスがきわめて効果的であるなど、教育面での貢献も大である。

1990年代になり、前章フルイディックス部会を取り巻く環境変化に伴い、計測部門に属する流体計測部会と制御部門に属する流体制御部会の統合が議論された。産業界、学校関係も共通して所属する場合も多いため、統合の意見が多く、計測自動制御学会の産業応用部門に一括して流体計測制御部会が発足した。日本フルードパワーシステム学会の油空圧便覧にも記載がされていて、歴史的意味のみでなく実際の類似技術の研究に大変に参考になっている。

4. FLUCOMEの今後の発展と使命

FLUCOMEは国際会議として時代に即してテーマを新しくし、最新のPIV技術の進展とともに発展すると思われる。特に近年バイオ領域へのテーマ展開なども期待される。またFLUCOME委員会において前記フルイディックス、空気圧の教材を保有し、適宜講習会などに利用している。近年の学生は生活が大変便利になり、実体験がきわめて少なくなって



図2 FLUCOME2011海洋大学ホール集合写真

いる。

たとえば車やバイクや時計の分解修理，部品交換などは実質上不可能となっている。これらに対してフルイディックスは実体験においてインピーダンス



図3 FLUCOME2011第2会場

マッチングなどを体験できる貴重な教育要素となると考える。

日本フルードパワーシステム学会は本FLUCOMEを協賛しているが，今後共に発展することを祈念する。

[著者紹介]

か がわ とし はる
香 川 利 春 君



1974年東京工業大学制御工学科卒業。同年度北辰電機製作所入社。76年東京工業大学工学部制御システム工学科助手，同講師，同助教授を経て，現在同大学精密工学研究所教授。流体計制御システム，流体計測，生体計測に関する研究に従事。計測自動制御学会，日本機械学会，日本シミュレーション学会などの評議員及び日本フルードパワーシステム学会副会長を務める。工学博士。

E-mail : t-tukiji@sophia.ac.jp

会 告

会 員 移 動

会員の種類	名誉会員	正会員	海外会員	学生会員	賛助会員
会 員 数 (4月10日現在)	13	876	14	138	101
差 引 増 減	0	-36	0	-15	-3

正会員

土屋 順裕 (株)ガスター)
ウーレイレイ (株)エイムテック)
阪田 隆敏 (株)ジェイテクト)
宇田 健吾 (株)ジェイテクト)
河野 晶彦 (株)ジェイテクト)
高橋 究 (株)日立建機ティエラ)

笹原 謙悟 (株)神崎高級工機製作所)
北畠 多門 (SMC(株))
井上 昌弘 (株)ジェイテクト)
香川 弘毅 (株)ジェイテクト)
加藤 雅之 (出光興産(株))
辻井 喜勝 (株)タカコ)

教室

おもしろ油圧機構 第6回 方向制御弁*

大橋 彰**

1. はじめに

油圧制御弁には、圧力、流量、方向の三つの制御要素がある。このうち方向制御弁は、アクチュエータの回転や往復の方向切換、始動／停止、回路中の経路選択などの機能を有している。圧力および流量制御弁の連続的な可変制御と異なり、どちらかを選択するという単純な機能であるが、手動／電動などの操作方法の相違を含めると多種の製品が存在し、油圧装置には数多く使用される。

2. 電磁切換弁

2.1 スプール形電磁切換弁

図1～2に電磁切換弁の外観と断面図を示す。

図1は、各種油圧装置でもっとも多く使用される口径1/8の電磁切換弁であり、最高使用圧力35MPa、最大流量100L/minである。大流量が必要な場合は、この弁をパイロットとする図2のパイロット操作形切換弁を使用する。口径3/4から口径1・1/4程度までの製品があり、最大流量は1000L/min以上に達する。親子弁の通称がある。

親弁、子弁ともに、弁の要素はスプールとばねであり、スプール両端の操作方式により、手動／機械／パイロット圧／電磁／電磁一油圧などに分類される。図2の親弁は、パイロット圧操作に相当し、電磁弁の電磁力でスプールを直接押すことに限界があるため、この方式が採られている。両弁の間に挟まれたパイロットチョーク弁は、親弁のスプール切換え時のショックを軽減するため、パイロット通路の絞り作用によってスプールの切換え速度を可変にするものである。

図3は、図1の弁の断面写真である。スプールは、穴と所定の隙間で勘合される棒状の部品で、長手方向に切欠きを有している。ボデー内でストロークすると、この切欠きにより通路P、A、B、Rの4ポートに通じるボデー側の溝を塞いだり開けたりする。

図2の断面図に示すソレノイドbまたはaに通電すると、鉄芯Ass'y内の可動鉄芯が吸着されてプッシュピンを押し、スプールはばねに抗して左端または右端に移動する。非通電時に両端のばねにより定位する中立位置を含め、3位置弁と呼ぶ。

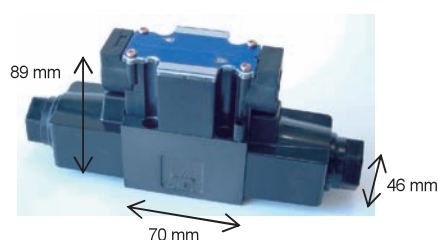


図1 1/8 電磁切換弁外観

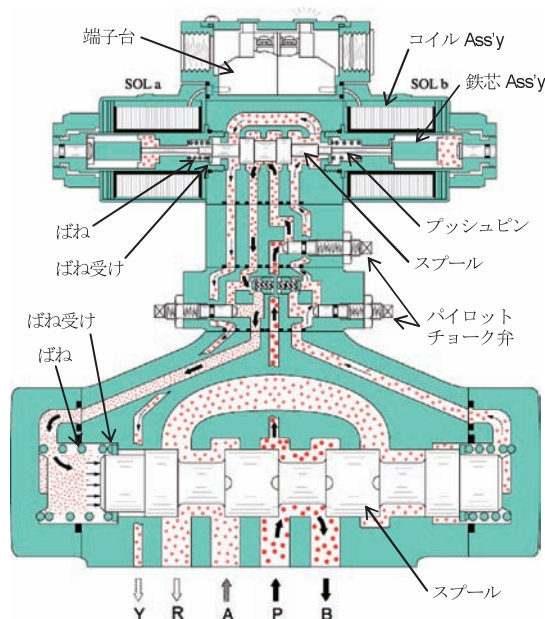


図2 電磁パイロット切換弁の断面

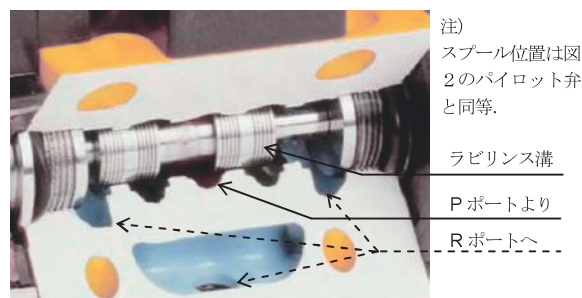


図3 スプールとボデーの例

*平成23年8月18日 原稿受付

**油研工業

(所在地 〒252-1113 綾瀬市上土棚中4-4-34)

図3において、スプール外周のラビリンス溝は、弁内部やすきまの流れが不均一となって半径方向の圧力分布が不平衡にならないよう、圧力平衡を保つために設ける。弁を高圧で長時間保持する場合、スプールが弁本体に押し付けられ作動不良になる流体固着現象を避けるために有効である。

図4に、電磁切換弁の取付けプレートの一例を示す。取付け面寸法はISO規格に準拠しており、異なるメーカーの製品でも取付け互換性がある。プレート下部に配管接続して使用するが、ポート穴と取付けボルト穴を加工した弁ブロック（マニホールド）に電磁弁を直接取付けることも多い。

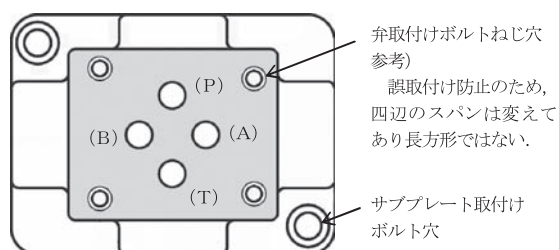


図4 1/8弁取付けサブプレート

2.2 ポペット形電磁切換弁

図5は、ポペット形電磁弁の一例であり、油通路の開閉を電磁操作する場合に用いる。ポペット形のためスプール形に比べ漏れも少なく、流体固着現象なども生じない。コイルAss'yに通電して固定鉄芯を磁化すると、ばねに抗してプランジャポペットが吸着され、差動ポペットが押上げられ、黒塗りの矢印で示した開状態となる。

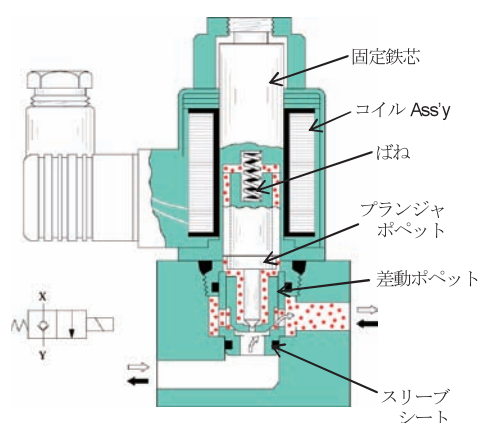


図5 ポペット形電磁弁

類似の弁としてポペット形2方向電磁弁（シャットオフ弁）もある。これらの弁の取付け方法には、サブプレート形以外にカートリッジ形があり、弁ブロックのキャビティ穴に挿入して用いる。

図6はポペット形パイロット切換弁を示し、内蔵

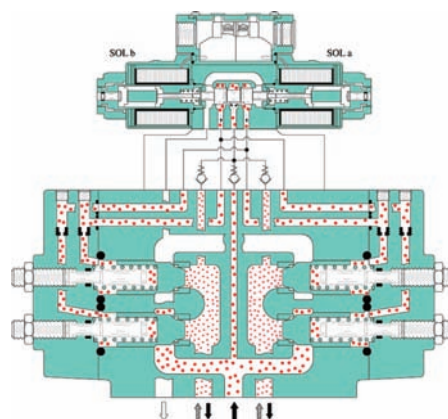


図6 ポペット形電磁弁

する4個のポペットに方向・流量・圧力制御の各機能を持たせ、個別に開閉できる一種の複合弁である。このため差動回路を構成することができ、プレス、減容機などの大形の装置に使用される。

3. 機械操作切換弁

図7にロータリ形、図8にカム操作形の切換弁を示す。装置側のカムや手動によりレバーを機械的に操作し、スプールを回転または直線運動させる弁である。スプールをレバー操作位置に保つデテント形式と、レバーを離すとばねにより中立位置に戻るスプリング形式がある。

図8のカム操作弁は、プレス装置で安全扉が開いている状態では、プレス工程の主回路の圧油を遮断するための安全回路などに使用される。

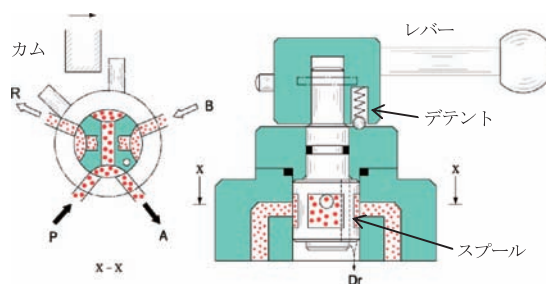


図7 ロータリ形切換弁

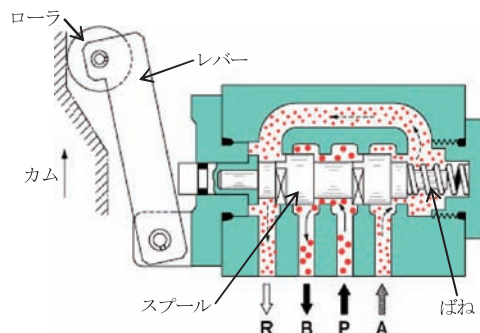


図8 カム操作形切換弁

4. チェック弁

4.1 チェック弁

チェック弁は、一方向に油を自由に流し、逆方向には完全に止める作用をする。回路中の逆流防止目的のほか、圧力および流量制御弁などに組み込み、一方向にだけ弁を作動させ、逆方向はバイパスさせる目的に用いる。

図9は、インライン形チェック弁であり、入口側の流れがポペットに作用してばねに打勝つと、ポペットが開く。この開き始めの圧力はクラッキング圧力と呼ばれる。流量に対する圧力降下値とともに、選定時には注意が必要な特性である。

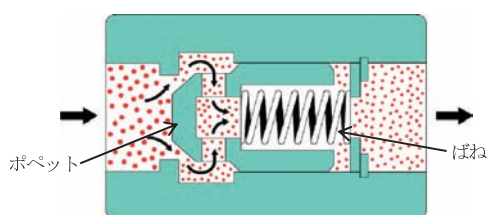


図9 チェック弁（インライン形）

4.2 パイロット操作チェック弁

図10、図11にパイロット操作チェック弁の断面を示す。外部からのパイロット圧により閉状態のポペットを強制的に押し上げ、逆自由流れを可能にするチェック弁である。図10左図のように、下部のパイロットポートに圧油を導き、ピストンとピストンロッドを上昇させポペットを押す構造である。図10右図は、パイロット圧力が作用していない自由流れ時の状態を示す。

図11は、ピストンロッドが最初にデコンプレッションポペットを押上げ、圧力を低下させてから主ポペットを開く構造で、デコンプレッション形と称される。プレスなどの戻り工程で、加圧室の急激な圧力開放により発生するショックを減じる。

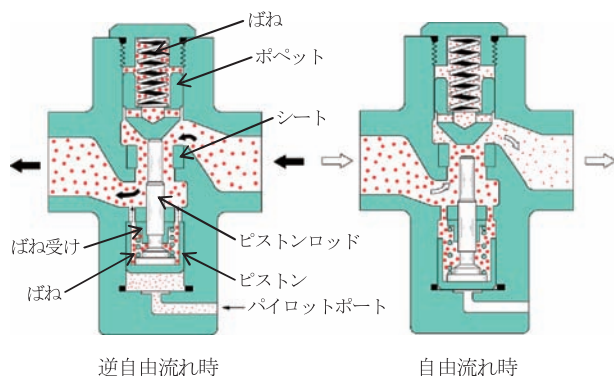


図10 パイロット操作チェック弁

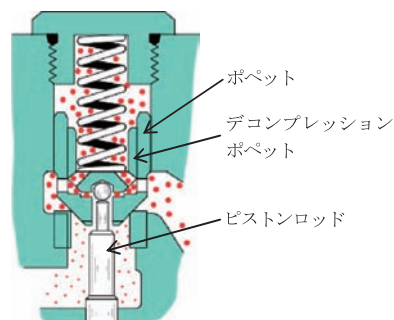


図11 デコンプレッション形パイロット操作チェック弁

パイロット操作チェック弁は、荷物の昇降装置などにおいて上昇行程の途中で停止させ、チェック弁の圧力保持機能によりシリンダを位置保持する使用方法で、下降時に動作させる。

図12は、メータアウト制御により荷物（W）の下降速度を調整する回路例である。切換弁が右位置となりシリンダのキャップ側圧力が上昇すると、その圧力をパイロット圧としてチェック弁を開く。図の場合、チェック弁出口 P_1 部がタンクに接続されているため内部ドレン形の弁を用いる。一方、流量調整弁を電磁弁とチェック弁の間に配置する場合は、背圧が作用するため外部ドレン形を用いてポペットの開動作を確実にする必要がある。

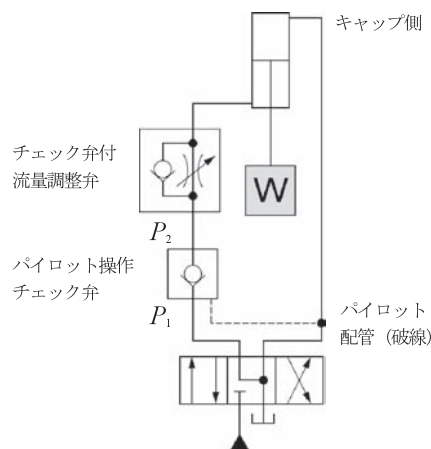


図12 パイロット操作チェック弁使用例

[著者紹介]

おおはし 彰 君

1972年静岡大学大学院修士課程修了。1972年油研工業入社。主に、油圧ポンプ・モータの開発、営業技術、商品企画、経営企画などの業務に従事。

E-mail : ak.ohashi@yuken.co.

教 室

おもしろ空気圧「高分子膜式エアドライヤ」*

桑 名 伸 好**

1. 高分子膜式エアドライヤとは

圧縮空気中に含まれる水分を除去して乾燥空気を得るための機器は、エアドライヤと呼ばれ、高分子膜式エアドライヤは、水蒸気は透過しやすく、空気（酸素と窒素）は透過し難いという性質の分離膜（高分子材料）を使用したエアドライヤで、大気圧露点が $-15 \sim -60^{\circ}\text{C}$ までの低露点を得られる。機械的な可動部がないため信頼性が高く、電源不要のため配線の手間を省き、図1に示すようにフィルタ感覚で簡単に配管途中に取り付けができる。

2. 構造と原理

2.1 構造

分離膜は、いくつかの気体（または液体）の混ざっている中から特定の分子だけを選んで取り出すのに利用される。

高分子膜式エアドライヤは、分離膜を細いストロー形状（中空糸と呼ぶ）にした膜を束（モジュール）にして使用する。中空糸の外径は、数100ミクロン（髪の毛の太さくらい）で、高い圧力に向く。

中空糸の長さ束（モジュール）にすることで、処理能力が決まる。

2.2 除湿原理

図2に高分子膜除湿原理¹⁾、図3に高分子膜式エアドライヤのエアフローを示す。

中空糸の内側へ湿った圧縮空気を流すと、中空糸の外側は大気のため、中空糸内外の圧力差（分圧差）によって圧縮空気中の気体はそれぞれ、より圧力（分圧）の低い中空糸の外側へ出ていこうとする。しかし、この分離膜は水蒸気だけは通すものの窒素や酸素はほとんど通さないため、水蒸気だけが圧力差（分圧差）によって中空糸の外側（大気中）へ移動し、その結果、圧縮空気中に含まれていた水分が減って乾燥エアになる。

一方、出口乾燥エアの一部をパージエアとして

中空糸外側へ流すことにより、外側へ移動してきた水蒸気はすみやかに大気中へ排出され、中空糸の外側が常に圧力（分圧）の低い状態に保たれ、連続して除湿が行われる。

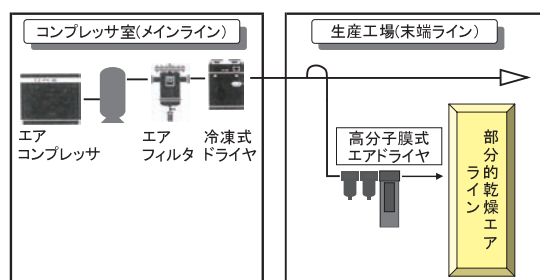


図1 高分子膜式エアドライヤの使用例

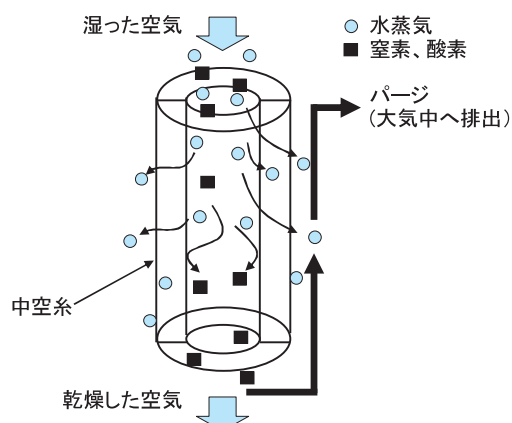


図2 高分子膜除湿原理図

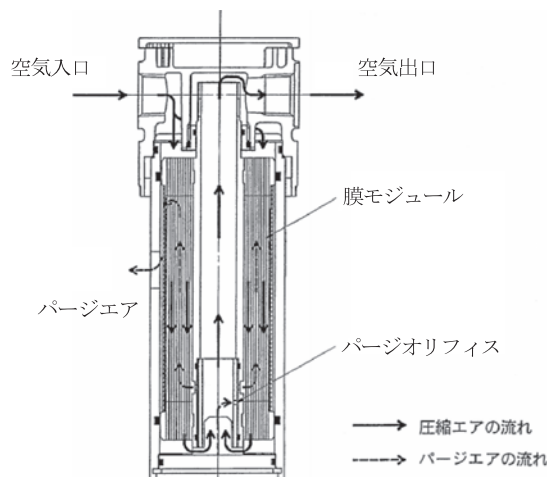


図3 高分子膜式エアドライヤのエアフロー

*平成24年2月6日 原稿受付

**CKD株式会社 生産本部 春日井事業所
(所在地 〒485-8551 小牧市応時二丁目250番地)

3. 圧力特性

水蒸気が高分子膜を通る現象は、透過と呼ぶ。この現象は、図4に示すように水蒸気が高分子膜表面に溶解してから、膜中を拡散し、高分子膜外側へ放散する。

水蒸気が高分子膜を透過する推進力は、中空糸内側と外側の水蒸気分圧差（圧力差、濃度差）である。入口空気圧力が高ければ、中空糸の内側と外側の圧力差（分圧差）が大きくなり、透過量も多くなる。

①出口空気流量が多く取れる。

②低露点を得る場合、パージ流量が少なくて済む。

4. 温度特性

高分子膜式エアドライヤの露点性能は、入口空気露点（入口水分量）によって決まるため、図5に示すように、入口空気露点25℃で出口空気大気圧露点-20℃の場合、入口空気露点が10℃になると、出口空気流量補正値が1.2になり、出口空気流量を20%増やせる。冷凍式エアドライヤや乾燥剤式ドライヤとの組合せで、出口空気流量を多くすることができる。

5. メンテナンス

除湿原理で述べたように、高分子膜と空気の接触面積（膜面積）によって処理能力が決まるが、高分子膜に流す空気に不純物（オイルミスト）が含まれると、膜内面に付着し接触面積を減少させ、露点性能はしだいに低下していく。

ダストおよび、オイルミストを除去した空気を供給することが前提になり、直前にエアフィルタ、オイルミストフィルタの設置を推奨している。

しかし、いかなるフィルタを用いても100%全てのオイルを除去することは不可能。

図6に示すように、わずかずつのオイルミストや粉塵なども長年蓄積されると膜の孔を塞ぐ原因となり、除湿性能に影響をおよぼす。

このようなことを避けるためにもフィルタエレメント同様に膜モジュールの定期的なメンテナンスも必要になる。

参 考 文 献

1) CKD製品カタログ

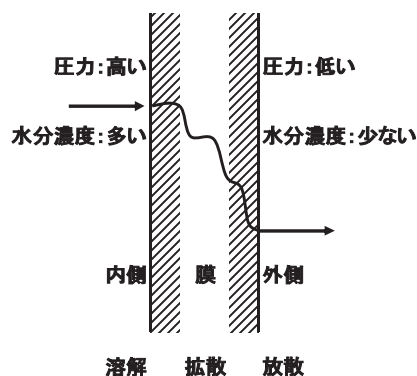


図4 透過モデル

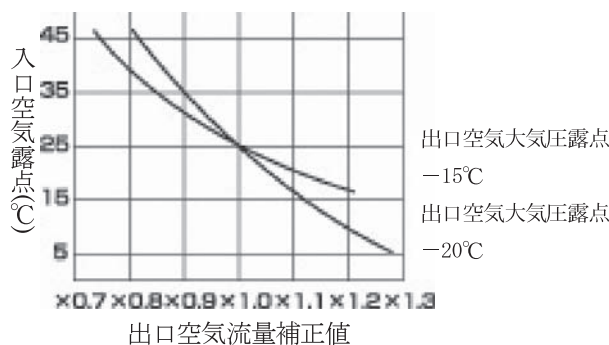


図5 出口空気流量の補正値¹⁾

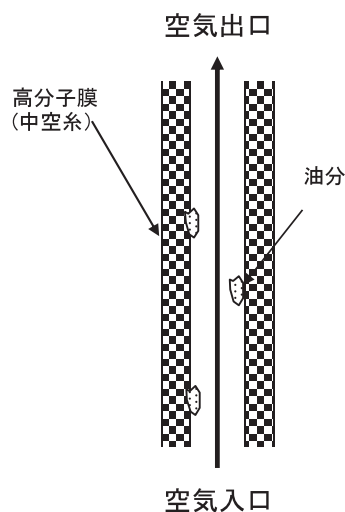


図6 中空糸モデル

[著 者 紹 介]

くわ な のぶ よし 君
桑 名 伸 好 君



1986年金沢工業大学工学部卒業。同年CKD株式会社入社。ドライヤの開発・設計に従事
E-mail: nobu-kuwana@ckd.co.jp

トピックス

産業オートメーション技術における国際標準化*

—CADデータ交換の諸問題とISO 10303 (STEP) 規格—

五 嶋 裕 之**

1. はじめに

CAD (Computer Aided Design) は1970年代、米国の航空機や自動車業界で二次元設計製図システムとして普及が始まり、計算機や三次元CG (Computer Graphics) の急速な進歩と共に、今日では製品設計情報を三次元形状モデルとして扱う三次元CADが一般的になっている。三次元CADは業務対象や取り扱える形状要素と価格帯により、ハイエンド、ミッドレンジなどと分類されており、多種多様なシステムが産業界で利用されている。たとえば自動車製造業では、設計を行う企業・部門と製造を受け持つ企業・部門が密接に連携・共同して開発を行うことが一般的になっている。したがって、設計情報を相互にスムーズに交換、共有できれば、業務効率が大幅に向上できる。しかし、各企業・部門では独自のCADシステムとデータ形式を使用しているため、他社のCADシステムやバージョンの異なるCADシステム間でのデータの交換が困難であるという大きな問題がある。ある調査¹⁾によれば、データ交換によるトラブルが年間25万件発生し、経済的損失は75億円以上になると試算されている。

本稿では、上記のような問題を解決することを目指すとして開発された、国際規格STEP (STandard for the Exchange of Product model data)²⁾の概要について解説を行い、主に機械系CADユーザの立場からからみた規格の有効活用方法について検討する。

2. CADデータ交換における問題

2.1 データ交換の形式

たとえば、自動車製造に関わるCADデータ交換は、自社内の異なるCADシステム、自動車メーカーと部品メーカー、あるいは部品メーカー間で行われる。現在行われているCADデータ交換の方法を整理すると以下に示すような3種類に分類できる。

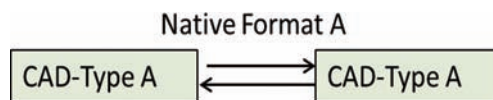


図1 CADデータ形式を統一

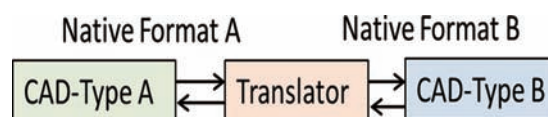


図2 直接変換

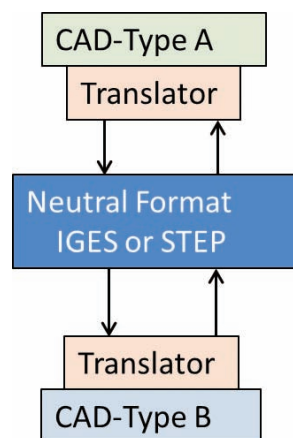


図3 中間ファイルの利用

(1) CADデータ形式を統一

図1に示すように、送り側・受け側が同一CADシステム、バージョンを使用し、同一データ形式に統一する。たとえば、米国大手航空機メーカーでは、関係する全企業が同一のハイエンドCADシステムを使用して開発を行なっている。これが一番確実であるが、社内ならともかく、前記のように関係するすべての企業・部門でまったく同一のCADシステムを使用することはあまり現実的でない。

(2) 直接変換

図2に示すように、二つのCAD Type AとBの間で、直接データ変換する方式。専用の変換ソフトウェアやシステムが商品化されており、一般的に高価であるが(1)の方式よりも実用的である。この方式では変換ソフトウェアやトランスレータが、AとB両方のCADのバージョンに対応する必要がある、一方のCADをバージョンアップしたために変換が

*平成24年2月10日 原稿受付

**機械振興協会技術研究所

(所在地 〒203-0042 東京都東久留米市八幡町1-1-12)

できない、データ変換形式の組み合わせによって変換精度が劣るといった問題が発生する危険がある。また使用しているCADによっては、専用の変換ソフトウェアやトランスレータが存在しないという問題もある。

(3) 中間ファイルの利用

図3に示すように、中間ファイルを介在させることにより、CADデータ交換を行う。CAD Type AとBとの間でCADデータ交換を行う場合は、CAD Type Aのトランスレータを使用して中間ファイルを生成、CAD Type Bのトランスレータを使用して中間ファイルよりCAD Type Bに取り込む。この方式はCADシステムのオプションとして、CADベンダ自身がトランスレータを提供しているケースが多いため、現状ではもっとも実用的である。変換精度は、トランスレータの性能に依存する。

2.2 データの長期保存³⁾

航空機や原子力プラントでは、安全な運用を確保するため、何万にも及ぶ図面や部品表、工程仕様書などの製品データを、数十年にもおよぶ製品のライフサイクルにわたって維持することが必須である。これは、製品データがCADにより電子的に作成・保管される現代においても不変である。さらに自動車や家電製品の場合、特許とPL法に向けた設計情報の長期管理が重要となってきた。このため従来、紙またはマイクロフィルムの形式で管理・保存していた図面データを、どのような形式・方法でCADデータとして長期間保存するかという問題がクローズアップされている。CADシステムはこれまでの経験から、数年も経てばバージョンアップにより大幅な変更が行われ、ベンダの一方的な都合により過去のファイル形式は問答無用に切り捨てられる場合がある。変化の激しいIT業界では、CADシステムやベンダの存続性にも重大な懸念がある。近年急速に普及している三次元CADの場合、紙への印刷は補助的な出力手段であり、マスターである三次元データそのものを長期間保存する方式の確立を必要としている。このためには、CADシステムに依存しない、STEP規格のような安定的で中立な保管形式や方法が必要である。

3. ISO 10303 (STEP) 規格とは

3.1 STEP規格概要

STEPとは、ISO 10303 (JIS B 3700) シリーズの規格群の通称である。正式な名称は、ISO 10303: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange (JIS B 3700: 産業オートメーションシステムおよびその

統合—製品データの表現および交換) という難解な名称のため、STEPのほうが一般的である。STEPはこれまで述べたデータ交換に関する諸問題を解決するため、1984年から前稿⁴⁾で解説したISO TC184/SC4 委員会を舞台にして25年以上にもおよぶ長期プロジェクトとして活動を行なっている。現在自動車業界を中心に普及しているデータ交換のデファクト標準として、アメリカ規格協会 (ANSI) のIGES (Initial Graphics Exchange Specification) 規格がある。米国のIGESに対して、ドイツ、フランスなどがIGESの欠点を克服しようとして始まったのがSTEPであるといわれている。IGESではたとえば根本的な問題として、寸法表記法がANSI規格に準拠しているため、ISO規格やJIS規格と異なる、三次元のソリッドデータの交換が困難であるなど実用上の制約や問題がある。

STEP規格は、前記のようなIGESの制約を解決し確実なデータ交換を可能にするため「情報表現」と「情報交換」に関する規格を定めて、特定のCADシステムに依存しない形式で、製品のライフサイクル全体に渡る情報の共有および交換を可能とするインターフェースを提供するものである。三次元形状データのみならず長期間のデータ保管に必要な構成管理や運用管理までも含んだデータおよび手順を交換する、統合的な国際標準規格を目指している。

ISO 10303を構成する個々の規格の詳細は表1に示すように、記述法、実装法、適合性試験の方法および枠組み、統合総称リソース、統合アプリケーションリソース、アプリケーションプロトコル、抽象試験スイート、アプリケーション解釈済み構成体に分類される。STEPは、図4に示すような8つの部分に分類することができる。現在、規格の総ページ数は数千ページになり、TC184委員会で開発された規格で最大かつもっとも難解なものとなっている。

表1 STEP規格の構成

Part	名称	ISO 10303	JIS規格
1	概要及び基本原理	ISO 10303-1	JIS B 3700-1
11	記述法	ISO 10303-11	
21, 22	実装法	ISO 10303-21, 22	JIS B 3700-21, 22
31, 32, 34	適合性試験の方法及び枠組み	ISO 10303-31, 32, 34	JIS B 3700-31, 32, 34
41 ~	統合総称リソース	ISO 10303-41 ~ 47, 49	JIS B 3700-41 ~ 47, 49
101 ~	統合アプリケーションリソース	ISO 10303-101 ~	JIS B 3700-101, 105
201 ~	アプリケーションプロトコル	ISO 10303-201 ~	JIS B 3700-201 ~
301 ~	抽象試験スイート		
501 ~	アプリケーション解釈済み構成体	ISO 10303-501 ~	

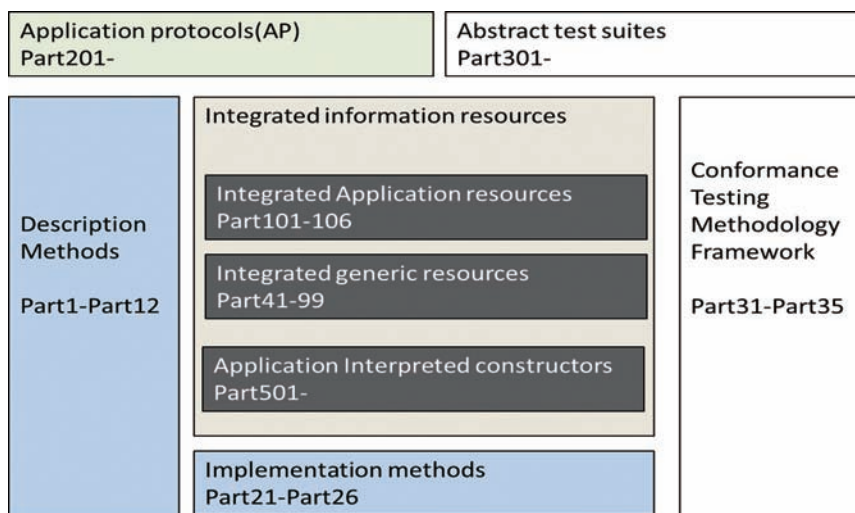


図4 ISO 10303の構成概要

3.2 アプリケーションプロトコル

ISO 10303シリーズは上記のように非常に多数の規格から構成されている。STEPによるデータ交換を理解しようとして上記規格をPART 1から読み始めると、おそらく数ページを眺めて挫折することになる。多くの技術者から、STEPは規格書を読んだだけではわからない、規格が複雑かつ膨大すぎてどこを読めば良いのかわからないと指摘されている。著者の個人的な見解として、特定の目的のために、規格のどの部分を読めば良いのかにわかりにくく、また記述が複数の規格書に分散しているため、分散した情報を再構築するのが困難であるように思う。

STEPを実務で利用しようとするCADユーザの立場から考えると、実際のデータ交換で主に用いられる規格は、アプリケーションプロトコル（AP：Application Protocol）と呼ばれる規格である。データ交換を行おうとする機械系のCADユーザにとってこのAPを理解し使いこなすことが、STEPによるデータ交換を成功させる鍵となる。APとは、自動車モデル、造船、プラント設計といった特定のアプリケーション分野における、製品モデルデータを交換するためのSTEPの基本概念である。今回は引き続きこのAPの概要、実際の利用方法について解説を行う予定である。

4. おわりに

本稿では、異機種CADシステム間で確実なデータの交換を実現するための諸問題を整理し、その問題を解決するために開発された、国際標準STEP規格の概要について紹介した。次回は、引き続きSTEP規格の解説として、実際のCADデータ交換に用いられるアプリケーションプロトコル（AP）とその利用方法について、できるだけ平易に紹介する。

参 考 文 献

- 1) 多賀和春:PDQ標準化活動の紹介, 電子情報フォーラム資料, (社)日本自動車工業会(2006)
- 2) ISO 10303: Industrial automation systems and integration—Product data representation and exchange (JIS B 3700: 産業オートメーションシステム及びその統合—製品データの表現及び交換), (財)日本規格協会
- 3) CADデータ長期保存プロジェクト,CADデータ長期保存研究会(1999)
(<http://www.mosla.org/main-j.html>)
- 4) 五嶋裕之: 産業オートメーション技術における国際標準化,フルードパワーシステム,Vol.43, No.1, pp.49-51 (2012)

[著 者 紹 介]

こ とう ひろ ゆき 五 嶋 裕 之 君



1987年神奈川大学大学院工学研究科修士課程, 2010年法政大学大学院システムデザイン研究科博士後期課程修了, 博士(工学)(法政大学)。1987年株式会社日立製作所, 1990年機械振興協会技術研究所, 現在, 同所生産技術部 部長代理, 法政大学兼任講師(非常勤)。ISO/TC184/SC5/WG2, WG5, WG6国内対策委員を経て, 現在, 産業オートメーション標準化推進委員会委員, ISO/TC184/SC5/WG6国内対策委員会主査, 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。
email: goto@tri.jspmi.or.jp

トピックス

ア メ リ カ 駐 在 日 記*

山 田 真の介**

1. はじめに

私は、アメリカにある親会社の商品を学ぶ研修として、2007年の1年間、親会社の事業所を訪問した。生活や文化の違いからさなざまな経験ができたと思う。今回、駐在時に印象に残ったことを中心に紹介する。

2. アメリカについて

駐在前のアメリカの印象は、国土が日本の約25倍であるとか、人口が約3億であるとか、多民族国家であるなどの基本的な知識のみしかなく、生活水準は日本とあまり変わらないだろうと漠然と思っていた。

海外に訪問したことがある人は感じたことがあると思うが、実際に訪問してみると宗教の価値観がまったく違うことに違和感を覚えた。日本人では宗教を本格的に信仰している人は少数派だが、アメリカ人は休日の朝に教会へ行くのが一般的な習慣だ。

言語については、もちろん英語が公用語だが、日本語の方言のように地域によってイントネーションが異なっていて、北部から中部に移動したときは、2、3日の間、英語が聞き取れなかったのを覚えている。

アメリカに住み始めて特に困ったのが単位だ。たとえば、長さ：1インチ=25.39mm、距離：1マイル=1.61km、重さ：1ポンド=454g、量：1ガロン=3.8Lなどがあるが、一番慣れなかったのが温度：°Fだ。風土としてISOの国際単位なんて全然気にしてない様子だった。

3. 赴 任

私が赴任したのは、2007年の1月だった。アメリカ本土の東北部でも特に雪の多いオハイオ州の州都クリーブランド近くにある工場で研修がスタートした。当然のことながら、研修はすべて英語にて行わ

れ、慣れない言語に四苦八苦しながら、商品の勉強をしていった。

また、寒い吹雪の中を車で通勤していたのをよく覚えてる。



写真1 冬の風景

日本は、国土の関係からか道路の幅も狭く、車の大きさも制限されているが、アメリカでは、トラックなどの大きさがまったく違うので、初めて見たときはとても驚いた。また車社会だが、日本と違い年中同じタイヤで走ってる。特に積雪がある地方では、除雪車が走り回って雪を道路の脇に除ける作業が見られる。ちなみに除雪車はアマゾンドットコムでも販売していた。



写真2 標準的な除雪車

*平成24年2月10日 原稿受付

**株式会社TAIYO 技術部

(所在地 〒533-0002 大阪市東淀川区北江口1-1-1)

3. 気 候

このアメリカ本土北東部は、冬は寒いが、夏はかなり暑くなる。日本でいえば、札幌のような気候でシカゴ、デトロイトなどが代表的な都市だ。

天気予報で冬の時期によく耳にした言葉は、Winter StormとSnow Stormだ。猛烈な雪と風で視界がほとんど見ないこともあり、飛行機も欠航したり、学校も休みとなったりしたこともあった。

また、Foggy（霧）もよく聞いた。気温が0℃以下の場合、湖や池などが多い地域では良く水蒸気が発生し、霧が出てくることがあるようだ。学生時代に経験があるのだが、霧の中を車で走行すると道を見失ったり、突然、対向車が現れてきたりするので、慎重に運転する必要がある。

比較的暖かくなってきてからは、Thunderstorm（激しい雷雨）なども経験したが、特に中南部でTornado（竜巻）の話題が多く出てきた。カリブ海などではHurricane（大形の台風）なども発生しやすく、陸地が比較的近いため、風水害が発生しやすいなど、恐ろしい自然災害に対する防災警報や地下シェルターなども準備している家も多いと聞いた。

4. 家 族

駐在は1年間という比較的短い期間だったので、基本的に単身赴任だった。出発前は結婚してわずか2年。1歳の娘が居てとても離れがたかったのだが、仕事と割り切ってアメリカへ渡った。駐在中の連絡のやり取りは、現在では良く使用されているかもしれないが、電話ではなく無料のSkype（P2P技術を利用したインターネット電話サービス）を使い、日本とアメリカをつないで毎日連絡を取合って寂しさを紛らわせていた。駐在前までは、長期出張といっても2週間程度で長い間家を離れることはなかったのだが、英語にちょっと慣れてきた駐在2ヶ月くらいでホームシックにかかってしまった。それまでは、仕事や習慣に慣れるまでに奮闘していたけど、やっぱり寂しくなっていまい毎日愚痴をこぼしていた。

その寂しさを乗り越えようと仕事や同僚に対しても積極的に話しかけられるようになった。特に欧米などにおいては自分の主張を前に出すことで認めてもらえる。日本のような暗黙知などは、余り無いようすだし、喋らないことは、了解したと取られるので注意が必要だと感じたのもこのころであった。

駐在に慣れてきた半年後度、アメリカに家族を呼んだ。その当時はシカゴの郊外に住んでおり、2歳

になった娘と一緒に近く公園で日が暮れるまでよく遊んだ。日本とは違って公園にはウッドチップが敷き詰められていて子供にやさしい環境だと感じた事を覚えている。



写真3 公園にて

家族がシカゴに来た時には色々と観光をした。サファリパークは日本と異なり自然豊かであり、ゆったりと訪れることができたし、博物館では恐竜の化石などを見る機会があったり、水族館ではイルカなどをみたり、美術館では有名な絵画などを見まわって楽しんだ。



写真4 博物館にて

家族を呼んだタイミングはシカゴの日本人街で夏祭りが開催されていた時期でもあった。その時感じた事は、日本に住んでいる日本人よりも日本の風土を大切にしており、お互いの絆の大切さを感じた。シカゴの日本人街にあるコミュニティーにも参加した。現地では3か月ほどの短い付き合いでしたが、当時アメリカであった他社の駐在員や今もアメリカに住んでいる人たちとも交流が今も続いており、か

けがえのない友人関係を作れたと思っている。

5. 休 暇

連休休暇を利用して会社の友人とカナダのトロントに車で訪問しましたことがある。その際、カナダとアメリカの国境では、警備が厳しくなく、パスポートを見せて、2、3の質問を答えると簡単に通れたことに驚いた。島国の日本とは、まったく違う文化であると改めて感じた。

初めての訪れて感じたことは、道路標識（文字）が、読めなくなったと勘違いしてしまったことだ。実は、フランス語と英語の併記で書かれていたためであった。速度標識はkm/hourだし、温度は℃単位など、基本的にISO記号を使っていた。

ちょっと寄り道して、有名なナイアガラの水fallsも見に行った。訪問するまで知らなかったのだが、アメリカの水fallsとカナダの水fallsがあり、よく映像やテレビで目にするのはカナダの水fallsの方だった。この大瀑布の迫力はとても凄いものだった。この水fallsは、冬になると湖面の一部が凍結するため、水量が大幅に減ってしまい、夏の印象とはまったく違うものになってしまうようである。

トロントでもっとも印象的だったのは、メジャーリーグだ。一緒にいた会社の同僚とチケットを購入し訪れたロジャースセンター（Rogers Centre）で、初めて観戦した。この日の対戦カードは、Boston Red Sox vs. Toronto Blue Jaysで前日の雨天で一日試合が流れたため、Red Soxの先発は、メジャー挑戦一年目の松坂投手だった。その試合には、同じく岡島投手も参戦していた。



写真5 メジャーリーグ

試合内容としては、メジャーのホームランなどが飛び交う印象とは異なり、詰まる投手戦で手に汗握る試合展開となったが、同じ日本人が異国の地で頑張っているのを見て駐在中の私も励まされている気がして、とても感銘を受けたことを覚えている。

6. 仕 事

今回の駐在での主な仕事は、親会社の事業所を約10カ所回り、商品知識を蓄え、日本国内に展開していくと共に、自社の技術が北米へ展開できるかどうかを探るものであった。研修当初は、言葉の壁が大きく立ちはだかっていたが、半年ほどすれば、それなりに意思の疎通もできるようになってきた。

その時感じたことはやはり習うより慣れろであった。どの事業所の方たちも積極的に問いかけると真摯に答えてくれるし、今でも仕事でお世話になることもあり、現在私にとっての財産となっている。

後輩たちが同じようなことを経験するときにもアドバイスしてあげたいと思っている。

7. おわりに

帰国した今、駐在時のことを思い出しながら、この原稿を書いた。駐在時は確かに苦しいことや嫌なこともあったが今振り返って考えると得るものが大きかった。おそらく、現地で知り合った日本人の方とは一生の付き合いができると思うし、世話になった人たちも今後も付き合いしていくと思う。

最後にこのような機会を与えてくれた上司や関係者、そして支えてくれた家族に対して感謝の気持ちを伝えたいと思う。

[著 者 紹 介]

やま だ まさのすけ
山 田 真の介 君



2001年大分大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、株式会社TAIYOに入社、主に研究開発に従事、2007年の1年間アメリカに駐在。日本フルードパワーシステム学会会員。

E-mail : myamada@taiyo-ltd.co.jp

トピックス

TCP/IPを用いたネットワーク通信の基礎*

内堀 晃彦**

1. はじめに

近年、インターネットを始めとするネットワーク技術は、社会に欠かせないインフラとなっている。産業界においても、情報関連の業務だけではなく、産業機器の制御や管理に応用されつつある。このような状況を鑑み、インターネットの、特にTCP/IPを用いたネットワーク通信に関する技術をトピックスとして取り上げることで、フルードパワーの発展に寄与することができればと考えている。

本稿では、TCP/IPの基礎的な技術を解説し、次稿以降でネットワーク・プログラミングとそれらの応用例について解説する。

2. ネットワーク通信の例

2.1 TCP/IPを用いたネットワーク通信

TCP/IPとは、インターネットで用いられている主要な二つの通信プロトコルのことである¹⁾。3節で詳説するが、このプロトコル群は4つの階層から構成されており、世界中のネットワークを接続するための基盤技術となっている。以下で、このプロトコルを用いた通信の例と、その技術の基礎を解説する。

2.2 IPアドレスとポート番号

図1のネットワーク上で、Unix系のOSを搭載したPC（クライアント）からサーバーへtelnetで通信する場合を考えてみよう。図2の1行目に示すように、ネットワーク通信を行うには、クライアントであるPCは、サーバーの名前とそこで提供されているサービスの番号（ポート番号）を指定して接続する必要がある。この例では、サーバーは、名前がwww.jfps.jpでWWWサービスをポート番号80で受け付けている³⁾。

図2に示す実行例の、3行目には接続の成功の報告が、5行目にはPCがサーバーへドキュメントを要求する通信内容が、6行目以降にはサーバーから

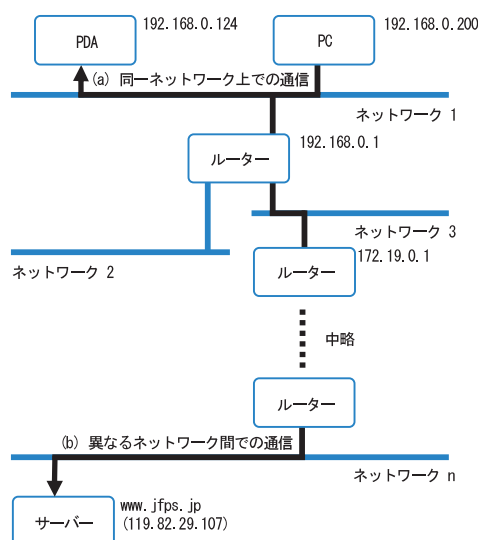


図1 本稿で扱うネットワークの構成

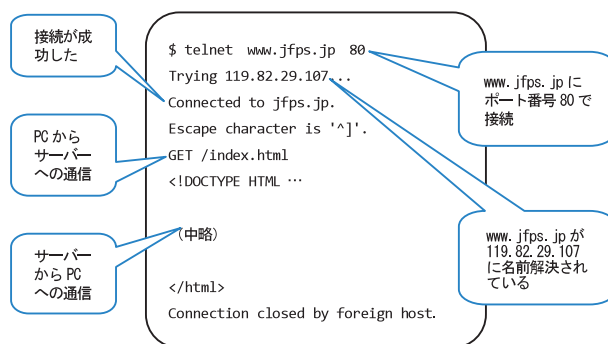


図2 telnetによるWWWサービスへの接続例

送信されたドキュメントの内容が表示されている。

2.2 名前解決

インターネット上では、ネットワークに接続されているノード（多くはコンピュータのネットワークインターフェイス）は、IPアドレスと呼ばれるもので識別されている。これは、32bit幅（IPv4）または、128bit幅（IPv6）の数値で、一般的には、119.82.29.107のように、8bitごとに区切って表現される。この表現は人間にとって憶えづらいものであるため、www.jfps.jpのような憶えやすい名前が代わりに用いられている。コンピュータが直接扱えるのは数値であるため、この名前とIPアドレスの関係を誰かが

*平成24年2月15日 原稿受付

**宇部工業高等専門学校

(所在地 〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-14-1)

憶えていて、必要に応じてそれを検索（名前解決）しなければならない。図2の2行目でも、www.jfps.jpが119.82.29.107に名前解決されている様子がわかる。この解決を行う代表的なものがDNS（Domain Name System）である。これは、nslookupというコマンドでこの機能を体験することができる。図3の実行例には、名前解決がIPアドレス172.16.0.20のDNSサーバーで行われ、www.jfps.jpのアドレスが119.82.29.107に解決されている様子が示されている。

```
$ nslookup www.jfps.jp
Server: 172.16.0.20
(中略)
Address: 119.82.29.107
```

図3 nslookupの実行例

2.3 パケット通信

サーバーとクライアント通信は、パケットと呼ばれるもので行われる。パケットとは、通信内容にIPアドレスやポート番号、チェックサム等のヘッダが付加された通信を行う単位のことである。図4に示すように、TCP/IPではプロトコルごとにパケットが定義されている。

クライアントで実行されているアプリケーションがユーザーデータを送るために、最初にこのデータにポート番号などを付加したTCPパケットを作成する。そのパケットにIPアドレスなどを付加してIPパケットを作成する。これを、実際の物理的なネットワーク環境に合わせるためにさらに加工する。Ethernetでネットワークに接続されている場合、MACアドレス（Media Access Control address）と呼ばれる識別子が付加されたEthernetフレームに加工される。

MACアドレスとは、ネットワークのノードにつ

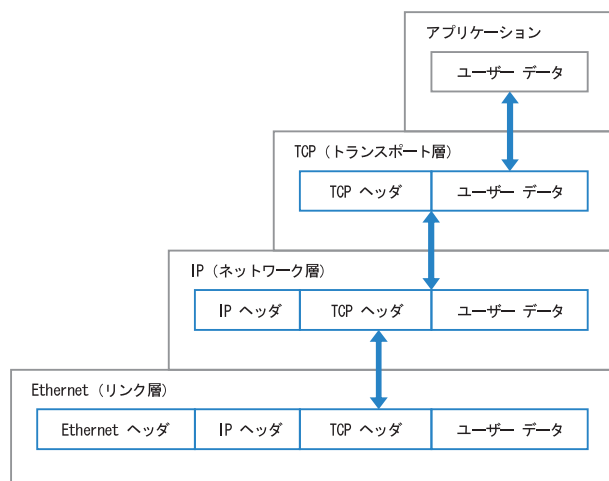


図4 パケットの階層構造

けられたアドレスで、Ethernet上ではこのアドレスをもとに通信が行われる。そのため、このMACアドレスとIPアドレスの関係も解決しなければならず、このためのプロトコルとしてARP（Address Resolution Protocol）が使用される。Unixではarpコマンドで確認することができる。

```
$ arp -a
(中略)
? (192.168.0.1) at 0:a:85:3:10:97 on en0 ifscope [ethernet]
? (192.168.0.124) at 0:c6:10:ae:ff:ff on en0 ifscope [ethernet]
(後略)
```

図5 arpの実行例

IPアドレス192.168.0.1を持つデバイスのMACアドレスが0:a:85:3:10:97で、IPアドレス192.168.0.124のMACアドレスが0:c6:10:ae:ff:ffであることが分かる。

2.4 ルーティング

図1(a)のように、サーバーとクライアントが同一のネットワーク上にあれば、そのネットワークにパケットを送り出すことで、通信相手にそれを拾ってもらえることができる。しかし、図1(b)のように、異なるネットワーク間での通信の場合、いくつかのルーターにパケットリレーしてもらい、相手のネットワークまでパケットを届ける必要がある。適切な候補を特定できない場合、デフォルトルーター（デフォルトゲートウェイ）といわれるものが最初のリレーの相手となる。パケットを受け取ったルーターは、自分に接続されているどのネットワークにそのパケットを流せば、効率よく確実に通信相手に届けられるかを判断し、パケットを再放流する。これをルーティングという²⁾。

```
$ traceroute www.jfps.jp
traceroute to jfps.jp (119.82.29.107), 64 hops max, 52 byte packets
 1  192.168.0.1 (192.168.0.1)  0.848 ms  0.420 ms  0.332 ms
 2  172.19.0.1 (172.19.0.1)  17.586 ms  18.480 ms  15.883 ms
(中略)
 6  hiroshima1-dc-rm-ge-6-2-0-101.sinet.ad.jp (150.99.188.5)  8.789 ms ...
 7  osaka-dc-rm-ae1-vlan10.s4.sinet.ad.jp (150.99.2.37)  17.044 ms ...
 8  osaka-dc-gm1-ae0-vlan10.s4.sinet.ad.jp (150.99.2.58)  17.032 ms ...
(中略)
18  dev.jfps.or.jp (119.82.29.107)  30.079 ms  29.634 ms  30.099 ms
```

図6 tracerouteの実行例

ルーティングがどのように行われているかを確認するためのツールとしては、tracerouteが有用である。図6の実行例では、デフォルトルーター

(192.168.0.1) からSINETなどのいくつかのノードを通過して119.82.29.107まで到達するルートと、それに要している時間が観察できる。ネットワーク通信に何か問題が生じ、それがルーティングや途中のノードに起因している場合には、その原因追及に役立つものである。

2.5 パケットの再構築

サーバーに届いたEtherフレームはIPパケットに再構築され、さらにそこからTCPパケットが再構築される。TCPでは未到達パケットのチェックや到着順序の確認などが行われ、到着していないパケットが存在することがわかった場合、クライアントへの再送要求がなされる。すべてのパケットがそろった後、アプリケーションにデータが渡される。

3. TCP/IPのアーキテクチャ

TCP/IPと呼ばれるプロトコル群は、アプリケーション層、トランスポート層、ネットワーク層、リンク層からなる階層構造を取っている。一見すると、無駄に複雑な構造を持っているように見えるが、これは、インターネットが、多くのローカルネットワークを繋ぐことで、世界中を繋ぐ大きなネットワークを構築することを目的としていることに起因する。誌面の制限から学術的な議論は専門書に譲るとして、実務的な利点としては、たとえば、

- ・リンク層に属する世界中の物理ネットワークには、Ethernetの他にトークリングなどさまざまなものが存在する。そのため、独立した層に分離した方が効率的な管理運営ができる、
- ・ルーターは、IPアドレスに基づいてルーティングを行うため、ネットワーク層より上層の情報は必要としない。また通信の保証をトランスポート層の仕事にすることで、これらの機能からも解放される。これにより、世界中のネットワークを繋ぐルーターの実装をシンプルにすることができる。

等の理由が挙げられる。以下に各層の特徴について簡単にまとめる。

アプリケーション層

WWWや電子メールなど、ネットワークを利用したアプリケーションが実装する層である。プロトコルやパケットなどもアプリケーションごとに定義されている。

トランスポート層

あるコンピュータ上のプロセス（アプリケーション）が他のコンピュータ上のプロセスと通信を行うための手段を提供している。高信頼性でコ

ネクション指向のTCPと低信頼性でコネクションレス指向のUDPが定義されている。TCPでは通信の確実性が保証されているが、これは遅延などの原因となる場合がある。通信の保証を独自で行う、もしくは通信の確実性より実時間性を重視するアプリケーションの場合、通信保証がない代わりに処理が軽いUDPを選択することがある。

ネットワーク層

通信パケットを、届け先まで配達する役割を負っている。そのためのアドレス定義とルーティングを行うIPと、通信管理のためのICMPといったプロトコルが定義されている。

リンク層

Ethernet, IEEE802.11b/g/nといったネットワークインターフェイスと、それらのデバイスドライバから構成される層である。

4. おわりに

TCP/IPを用いたネットワーク通信の例と、その技術の基礎について解説を行った。次回は、ネットワーク・プログラミングについて解説する予定である。

参考文献

- 1) Andrew S. Tanenbaum (著), 水野忠則 他 (訳), : コンピュータネットワーク 第4版, 日経BP, p. 54-56 (2003)
- 2) W. Richard Stevens (著), 橘康雄 (訳), 井上尚司 (監訳) : 詳解TCP/IP Vol. 1プロトコル, ピアソン・エデュケーション, p. 125-141 (2000)
- 3) <http://www.jfps.jp/>

[著者紹介]

うち ぼり あき ひこ
内 堀 晃 彦 君



1998年信州大学大学院工学系研究科博士課程単位取得退学。山口大学助手、宇部工業高等専門学校講師、同校准教授、沼津工業高等専門学校准教授を経て、現在、宇部工業高等専門学校准教授。ロボット工学、空気圧システムの開発に従事。日本フルードパワーシステム学会、電気学会等の会員。博士（工学）。

E-mail : uchibori@ube-k.ac.jp

トピックス

学生によるフルードパワー企業見学記*

阿 部 利 章**

1. はじめに

油圧システムは、流体の圧力エネルギーが制御しやすいことによる利点の多さから、航空機や自動車の部品からテーマパークのアトラクションのような意外な所にまで、社会のさまざまな分野で用いられ、私達の生活になくてはならない技術となっています。しかし、私達のような学生が大学の講義や研究において、その技術を学ぶ機会は少なく、実際に油圧機器を見たことのある学生も多くはありません。そこで今回は油圧技術の先駆者として、さまざまな分野の製品の開発、生産を行っているKYB株式会社相模工場を、平成23年12月21日に筆者を含む同じ大学の学生6名で見学し、学生の視点から見た油圧機器業界、メーカを紹介したいと思います。

2. 見学先フルードパワー企業の概要

KYB株式会社は1935年に萱場製作所として創業した油圧機器メーカで、自動車や建築に用いられる油圧緩衝器、建設機械や航空機に用いられる油圧機器などを製造し、それらを核としたシステム機器の開発にも優れています。また、近年では電動機器の分野にも事業を展開していますが、油圧技術には強いこだわりを持ち続けています。今回はKYB株式会社の史料館があり、建設機械や航空機の油圧機器を製造する工場がある相模工場を見学させていただきました。

3. 工場内および史料館見学

相模工場には新技術の研究、開発を行う基盤技術研究所、油圧機器の加工、組み立てを行う工場、航空機器の加工、組み立てを行う工場、KYBの製品および歴史を学ぶことのできる史料館などがあり、696名の従業員の方が働いています。今回の見学では主に、建設機械用の油圧機器が作られている工場と史料館を見学させていただきました。

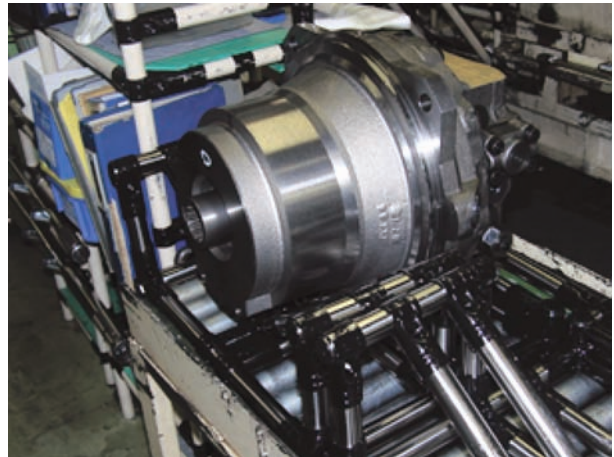


図1 組み立てられた油圧モータ

見学した工場の2階には油圧機器の組み立てラインがあり、その手前には、部品の入った棚の列が数多くありました。これは、この部品棚の中から部品を使っていき、なるべく在庫量を減らし、リードタイムを半分にするという目標のために設置されたものでした。この階の中央には大きなメイン通路があり、この通路に製品が集まって奥へと進んでいき出荷されていくため、部品の奥に組み立てライン、その奥に塗装のラインというように非常に効率的なつくりとなっていました。組み立てラインでは文字通り、建機の旋回モータや走行モータ（図1）が、多くの部品を用いて組み立てられており、人と機械との共同作業のラインとなっていました（図2）。その最たるものがボカよけというシステムです。これは、人がやったつもりになって、製品をつぎの工程に進ませてしまうことがないように、機械が確認しないとつぎの工程に製品を進ませることができないようになっている仕組みのことで、特にボルトの締め付けなどに関して厳重にチェックされていました。組み立てが終わると気密検査が行われていました。これは組みあがった製品に気体（空気やヘリウム）を入れ、漏れを確認する検査で、流体である油を使って物を動かす油圧機器における生命線となる検査であるように感じました。このような検査が終わると、最後に機械による性能検査が行われてから、製品は塗装ラインへと進んでいき、出荷となります。

*平成24年2月10日 原稿受付

**横浜国立大学大学院工学府

(所在地 〒240-8501 神奈川県横浜保土ヶ谷区79-1)

この階には建機の油圧機器の組み立てラインの他に新幹線のセミアクティブダンパの組み立てラインもあり、前述の製品同様厳しい検査の下で製品が組み立てられていました（図3）。



図2 組み立てラインの様子



図3 セミアクティブダンパ組み立ての様子

工場1階には2階で作られていたモータ用の加工ラインと、バルブの加工、組み立てラインがありました。組み立てラインが人と機械の共同作業で機能しているラインであるのに対して、加工ラインはほとんどが機械、ロボットによる自動のラインでした（図4）。モータ用のフランジなどの加工ラインでは、自動で寸法測定などの検査も行われ、すべてが完了するまでに1台当たり20分程度掛かるとのことでした。物の大きさから考えれば、人間には到底まねできない速さだと思いました。バルブの加工では、モータ用の部品とはまた違ったラインで、穴あけ精度がマイクロ単位という非常に精密な加工が行われていました。また、バルブは組み立てラインの漏れ検査においてもモータと異なり、水没式の検査が行われていました。これは、モータに比べバルブは内容積が多く、空気が圧縮され、モータと同様の検査方

法を適用できないためです。このように、バルブも精密な加工と厳密な検査の後、製品として出荷されます。



図4 加工ラインの様子

史料館に入ってまず目に飛び込んできたのは、大きな車輪の付いた油圧機器でした（図5）。これは「オレオ」と呼ばれるゼロ戦に付いていた主脚でKYBの初期の製品にあたる物です。史料館1階はこのオレオの他に、建機におけるエネルギーの回生を行うシステムなど、最新の製品についての説明を見ることができます。2階では、油圧機器として認知されている製品だけでなく、舞台の緞帳の上げ下げや、車いすに用いるダンパなど、普段目にしない製品が数多く展示されていました。また、製品の紹介だけに留まらず、EPS（電動パワーステアリング）やショックアブソーバの体験、免震技術のデモンストレーションなど、油圧機器の有用性について体験を通じて学ぶことができました。このように史料館では油圧機器が日常のどんなところで使われていて今の生活においてどれだけ重要なのかを知ることが



図5 史料館1階の様子

できます。

4. 見学を終えての感想

世間一般的に油圧と聞いてもすぐにピンときてどんなことに使われていると答えることができる人はほとんどいないと思います。これは私達のような工学部の学生にとっても同様で、研究室で油圧という分野を専門にしている学生でさえも、自分の研究に関わる部分以外はほとんど知らない分野だと思います。油圧と聞くと私は、大形の建機がそうであるように、大きなパワーを生み出すことができるという特徴を思い浮かべます。これは、私がそれに関する研究をしているからです。さらに、今回工場で見学させていただいた製品も建機のモータやバルブで、イメージ通りだと思いました。しかし、史料館や社員の方の製品説明を聞いていて、ショックアブソーバや免震技術、セミアクティブサスペンションなど、力を与えるだけでなく、力を減衰させることができるのも大きな特徴の1つだと知りました。もちろん、ショックアブソーバなども油圧機器の1つであることは前から知っていましたが、今回実際に製品を目で見て体験したことで、自分の知らなかった油圧機器の利便性を実感できたと思います。実際に物をみて、触れることの大事さを改めて学ぶことができました。



図6 社員の方との質疑応答の様子

社員の方々との質疑応答（図6）の中で現在研究が進んでいるという水圧の技術について話が及びました。実際油は、漏れたりすれば環境への被害が出ることから、扱う時の申請や取扱いが大変な危険物であるのに対し、水はクリーンかつ安く扱いやすいということでした。もちろんその分課題が多く、製品化はまだ先になるようですが、こういった研究がこれからのために必要になっていくのだろうと思い

ます。また、そういった新しい技術が必要とされている中で、建機では以前ワイヤーを使った機構で動いていたこと、そしてそれが油圧になってからは何十年とその形で落ち着いていることを聞き、油圧という技術の素晴らしさと有用性を実感しました。

今回の見学で一番強く感じたことは、油圧技術に対する自分も含めた世間一般での認知度の低さでした。たとえば、普段から多くの人が利用している自動車や飛行機、新幹線などの交通機関に用いられているのはもちろんのこと、遊園地のアトラクションや舞台の装置のような娯楽施設、建物の制震・免震技術等、実に多種多様な形で油圧技術は社会に存在しています。しかし、実際にこのような現場に来るまでに知っていた製品がどれだけあったのかと聞かれば、それは今回の見学で知った数に比べればかなり少ないものになってしまうと思います。見学を終えて、この経験を少しでも多くの人達に伝えて、油圧技術の大切さをわかってもらえたらなと強く思います。このような貴重な機会をくださった方々に、見学者一同（図7）深く感謝し、この場を借りて御礼申し上げます。ありがとうございました。



図7 見学者一同

[著 者 紹 介]

あべ とし のり
阿 部 利 章 君



2011年横浜国立大学工学部生産工学科卒。
同年横浜国立大学大学院工学府博士課程前期システム統合工学専攻機械システムコースに入学。日本フルードパワーシステム学会の学生会員。

E-mail : abe-toshinori-ry@ynu.jp

編集室

次号予告
—特集「未来に向けた省エネルギー技術」—

会長就任にあたって
「未来に向けた省エネルギー技術」発行にあたって
油圧システムの省エネルギー化技術の動向と展望
空気圧の省エネルギー技術と評価
水圧技術の省エネルギー化
油圧作動油の省エネルギー効果の評価方法
管路損失の低減法
スクリーコンプレッサシステムの最新制御
アキュムレータを用いたアイドリングストップ式油圧源の省エネルギー
再生可能エネルギーの普及と需要家の参画

—東京工業大学先進エネルギー国際研究センターの取り組みを事例に—

〔解説〕電気油圧サーボ式ダウンコイル

〔教室〕おもしろ油圧機構 第7回 電気-油圧サーボ弁

おもしろ空気圧「空気圧システムの結露」

〔トピックス〕産業オートメーション技術における国際標準化

—STEPアプリケーションプロトコル（AP）とその利用方法—

TCP/IPを用いたネットワーク通信のプログラミング

チェコ駐在員日記

〔研究室紹介〕沼津工業高等専門学校 大島研究室

〔企画行事〕平成23年度ウィンターセミナー開催報告

〔学会便り〕日中共同ワークショップ

香川 利春
内堀 晃彦
田中 豊
香川 利春, 蔡 茂林
伊藤 和寿
小曾戸 博, 大塚 正和
築地 徹浩
河合 仁
鈴木 勝正, 大田 真平, 杉村 健

小田 拓也
桑野 博明
大橋 彰
張 護平

五嶋 裕之
内堀 晃彦
石高 雄太
大島 茂
只野耕太郎
鈴木 健児

平成24年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 眞田 一志 (横浜国立大学)
副委員長 吉田 和弘 (東京工業大学)
委員 伊藤 雅則 (東京海洋大学)
内堀 晃彦 (宇部工業高等専門学校)
大橋 彰 (油研工業(株))
小倉 弘 (日立建機(株))
加藤 友規 (福岡工業大学)
木原 和幸 (助工業所有権協力センター)
金 俊完 (東京工業大学)
五嶋 裕之 (機械振興協会)
佐藤 恭一 (横浜国立大学)
妹尾 満 (SMC(株))
多田 昌弘 (CKD(株))
西海 孝夫 (防衛大学校)

委員 藤田 壽憲 (東京電機大学)
丸田 和弘 (株コマツ)
村松 久巳 (沼津工業高等専門学校)
柳田 秀記 (豊橋技術科学大学)
山田 真の介 (株TAIYO)
山田 敏夫 (株コガネイ)
山田 宏尚 (岐阜大学)
山之内 健司 (KYB(株))
吉満 俊拓 (神奈川工科大学)
担当理事 中野 政身 (東北大学)
早瀬 敏幸 (東北大学)
宮川 新平 (KYB(株))
編集事務局 藤谷 秀次 (学会事務局)
竹内 留美 (勝美印刷(株))

(あいうえお 順)

会 告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写してください。ただし(社)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。(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43巻, 第3号 (2012)

平成24年 5 月

特集号「人間を支援する空気圧の技術と研究」

目 次

研究論文

1. 空気圧ゴム人工筋を用いた二関節駆動を有する握力増幅グローブ
只野耕太郎, 赤井 正雄, 川嶋 健嗣, 尹 鍾皓, 香川 利春 48
2. 柔軟空気圧シリンダを用いた伸縮・湾曲機構の試作と組込みコントローラによる姿勢制御
赤木 徹也, 堂田 周治郎, 趙 菲菲, 藤川 敬広 55
3. 柔軟関節を用いた空気圧駆動鉗子マニピュレータの開発
(先端屈曲機構の簡略化と外力推定)
原口 大輔, 只野 耕太郎, 川嶋 健嗣 62
4. 突発的な負荷を考慮した6自由度人工筋肉マニピュレータの手先剛性制御
戸森 央貴, 田中 大資, 前原 正典, 加茂 大地, 中村 太郎 70
5. 軸方向繊維強化型人工筋肉を用いた小腸検査用多段式蠕動運動型ロボットの開発
(第1報, 小型ロボットにおける弾性管内の走行と内視鏡との切り離しに関する検討)
安達 和紀, 横島 真人, 樋高 裕也, 中村 太郎 77
6. 空気式パラレルマニピュレータを用いた手首リハビリテーション
～筋電位信号に基づく訓練動作の提案～
高岩 昌弘, 則次 俊郎, 佐々木 大輔 85

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.43, No.3

May 2012

Publish a Special Issue “Pneumatics Technology and Research to Support Human”
Contents

Paper

1. Grip Amplified Glove Using Bi-articular Mechanism with Pneumatic Artificial Rubber Muscle
Kotaro TADANO, Masao AKAI, Kenji KAWASHIMA,
Chongho YOUN, Toshiharu KAGAWA 48
2. Development of a Sliding and Bending Mechanism Using Flexible Pneumatic Cylinders and Attitude Control Using a Tiny Embedded Controller
Tetsuya AKAGI, Shujiro DOHTA, Feifei ZHAO, Takahiro FUJIKAWA 55
3. Development of a Pneumatically-Driven Forceps Manipulator Using a Flexible Joint (Simplification of the Joint Mechanism and External Force Estimation)
Daisuke HARAGUCHI, Kotaro TADANO, Kenji KAWASHIMA 62
4. End-Effector Stiffness Control of 6-DOF Artificial Muscle Manipulator Considering Instantaneous Load
Hiroki TOMORI, Daisuke TANAKA, Masanori MAEHARA,
Daichi KAMO, Taro NAKAMURA 70
5. Development of an Earthworm Robot Using Straight-Fibre-Type Artificial Muscle for the Small Intestine
(1st Report: A Study on the Locomotion of the Small-Sized Robot in the Elastic Tube and Separating the Robot and Endoscope)
Kazunori ADACHI, Masato YOKOJIMA, Yuya HIDAKA, Taro NAKAMURA 77
6. Wrist Rehabilitation Using Pneumatic Parallel Manipulator
~ Proposal of Rehabilitation Based on EMG Signal ~
Masahiro TAKAIWA, Toshiro NORITSUGU, Daisuke SASAKI 85

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

巻 頭 言

特集号「人間を支援する空気圧の技術と研究」発行にあたって

川 嶋 健 嗣

Publish a Special Issue “Pneumatics Technology and Research to Support Human”

Kenji KAWASHIMA

As a new attempt, the committee of publications has organized a special issue in order to promote activities in our society. At the end of the discussion by members of the committee, the topic of the issue is determined as can be seen in the title, since the field is active in recent years. Six interesting papers are accepted and published as the special issue.

Key words : Special Issue, Pneumatics, Human support

本学会論文集委員会では、論文集のさらなる充実と活性化を推進すべく、早川恭弘委員長の下で2010年から新たな試みとして、特集号を企画する案を議論してきた。はじめに分野別でその可能性について検討し、2つのワーキンググループを設置してさらに議論を行った。その結果、空気圧関連、特にロボティクス、メカトロニクス分野は最近の講演会での発表件数が多く特集号として適しているのではないかとの結論に至った。

そこで、空気圧関連の研究を広く網羅する特集号の題目案についてワーキンググループを中心に検討し、2010年10月に特集号名を「人間を支援する空気圧の技術と研究」とすることに決定した。次に時期について議論し、締め切りを2011年6月1日とした。論文の校閲プロセスについては、慎重に議論を進め、従来の論文と同じとすることとした。年内で校閲結果を通知し、採択された論文は2012年の5月号に掲載することとした。

以上の決定を踏まえて、2011年1月号の学会誌に下記の会告を掲載した。

「論文集委員会では、平成20年度春季講演会のOS企画「フルードパワーを利用したソフトメカニズム」、平成21年度春季講演会でのOS企画「フルードパワーを活用したロボティクス」、平成22年春季講演会でのOS企画「医工連携とフルードパワー」など、空気圧関連の研究開発が福祉工学分野、ロボティクス分野や医工連携分野等へとその領域を広げている現状を踏まえて、この度、「人間を支援する空気圧の技術と研究」をテーマとした特集号を企画することと致しました。標記テーマに該当する研究論文を幅広く募集致します。奮って投稿頂ければと

存じます。」

また、関連する先生方にはメールでも特集号の企画の通知を行った。

初の試みであり、実際に論文が集まるのか不安が大きかった。しかし、その不安は杞憂に終わり、多数の論文の投稿を頂いた。

厳正な論文校閲プロセスを経て、今回6本の論文が掲載される運びとなった。いずれの論文も空気圧アクチュエータの柔らかさ、人間親和性の高さを活かした研究成果である。大別するとパワーアシスト関連、医療応用関連、空気圧アクチュエータの制御に関するものがそれぞれ2本ずつとなった。

最近、特に大学では、人事評価において英語論文が推奨される傾向にある。筆者もその影響を多分に受けている。しかし、原発災害の処理や、高齢化社会など我が国が抱える多くの課題に対処し解決するためには、国内の研究者、技術者間の情報共有の重要性は益々高まっている。つまり、日本語での学術論文は必要不可欠であり、情報共有のための貴重なツールである。今回の特集号はいずれも大学関係者の研究成果であるが、本特集号が産学連携推進の一助になればと期待している。また、このような特集号の企画は今後も実施し、多くの方に論文集に論文を投稿頂ければと考えている。

最後に、本特集号はワーキンググループの沼津高専村松、中央大学中村、筆者の各委員が主に担当したが、早川委員長をはじめ論文集委員会委員各位、藤谷事務局長をはじめ事務局の多大なご協力をいただいた。ここに付記して謝意を表す。

(東京工業大学精密工学研究所准教授)

研究論文

空気圧ゴム人工筋を用いた二関節駆動を有する握力増幅グローブ

只 野 耕太郎**, 赤 井 正 雄***, 川 嶋 健 嗣**,
尹 鍾 皓**, 香 川 利 春**

Grip Amplified Glove using Bi-articular Mechanism with Pneumatic Artificial Rubber Muscle

Kotaro TADANO, Masao AKAI, Kenji KAWASHIMA,
Chongho YOUN, Toshiharu KAGAWA

In this paper, a grip amplified glove consists of pneumatic artificial rubber muscles (PARMs) which are covered with an exoskeleton structure is developed. A bi-articular mechanism with a PARM that is suitable for bending finger is realized. The glove has totally 10 DOFs consist of four units. To achieve power-assist motion properly, a PI control, which is based on the pressure value from the balloon sensor, is applied. Synchronized actuation of the PARMs adds to the user's own movements provides power and support the grasping. As the balloon type sensors are used, electric circuits can be separated from the finger parts that have advantage in the use of hostile environment. To evaluate the validity of the glove, the skin surface electromyography (EMG) signals of muscles are measured during grasping. These results demonstrate that the effectiveness of the power amplified glove.

Key words : Pneumatic artificial rubber muscles, Bi-articular mechanism, Power assist, Hand assist

1. 緒 言

近年、医療福祉分野や災害復旧での使用を想定して様々なパワーアシストロボットの研究開発が行われている^{1)~3)}。この分野の作業において最も使用される人体の部位の一つとして手が挙げられる。通常、手は作業対象に直接接触して、握る、持つ、摘まむなどの作業を行う。腕に物を抱える場合でも手が少なからず作業を分担している。よって、上肢を対象にしたパワーアシスト装置において、手先の負担の軽減が重要と考えられる。手の動作をアシストする研究として、伸展動作や屈曲動作が可能な空気圧ゴム人工筋を用いたものや^{4),5)}、チューブを螺旋状に配置することで湾曲を実現した空気圧アクチュエータを提案した研究⁶⁾、筋電信号を用いて装着者との同期を実現した研究が行われている⁷⁾。手の動作をアシストする装置には、多自由度が要求されること、耐水性等を有し、幅広い使用環境での使用が求められており、研究の余地が大きい分野である。

そこで本研究では、汎用性に優れ、多自由度を有する握力増幅グローブの研究開発を目的とする。握力増幅グローブを使用する際に作業環境の影響や自由度の制限を低減さ

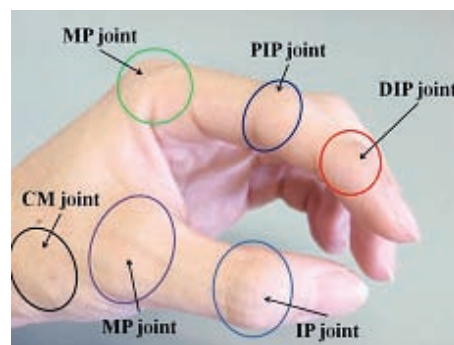


Fig. 1 Joints of fingers

せる必要があるため、電気的なセンサや精密、高剛性のアクチュエータは装着部に用いないこととする。アクチュエータは軽量、柔軟な繊維一体型の空気圧ゴム人工筋を採用し、握力増幅グローブの自由度は人体と同等のものを製作する。手に作用する外力に応じたアシスト力を供給するため、装着者の動きおよび外力を検出するセンサを製作し、これを利用した空気圧サーボ制御系を構築、実装する。また、製作した握力増幅グローブの各特性を測定し、実際に装着してその有用性を検証する。

2. 握力増幅グローブの製作

2.1 握力増幅グローブの構成

手は多くの関節を有し、複雑な動作が可能であるが、本研究では把持動作に焦点を当てる。Fig. 1に本研究で駆動をアシストする手の各関節を示す。親指を除く4指において

*平成23年6月3日 原稿受付

**東京工業大学精密工学研究所

(所在地 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

***オリンパス株式会社

(所在地 東京都八王子市石川町2951)

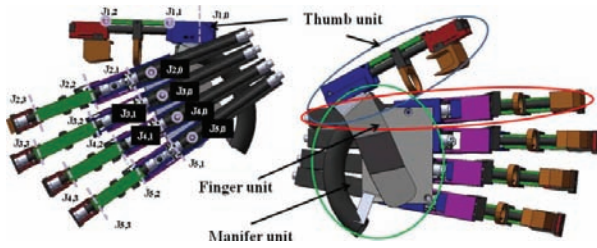


Fig. 2 Structure of power amplified glove

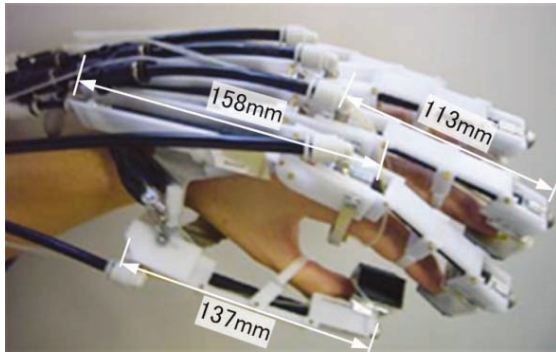


Fig. 3 Developed power amplified glove

は、指の付け根の中手指節関節（MP関節）およびその先に通常連動して動く近位指節間関節（PIP関節）と遠位指節間関節（DIP関節）の2自由度の動作を実現する。親指はMP関節と指節間関節（IP関節）の連動動作および手根中手関節（CM関節）の1自由度を合わせた2自由度を実現する。よって、各指2自由度5指合計で10自由度を有する。これら自由度を考慮して、握力増幅グローブを使用して握る、掴む、摘む動作における装着者の握力を増幅し、それらの動作を補助できる装置を設計する。Fig. 2に本研究で試作した握力増幅グローブの全体図、Fig. 3に試作した装置の写真を示す。本研究で製作した握力増幅グローブはポリアセタールとアルミ合金で構成され、全長は約256mm、全体重量が約550gと軽量である。各関節の駆動には内径5mmの空気圧ゴム人工筋を用いた。握力増幅グローブは、大きく分けて手甲ユニットとフィンガーユニットの二つから構成される。フィンガーユニットは装着者の指に被さるようになっており、それぞれの指に装着することができる。フィンガーユニットは手甲ユニットに固定されており、各指に対応する位置に配置されている。手甲ユニット自体は装着者の手の甲に被さるように取り付けられ、手首のクリップバンドと各フィンガーユニットのフィンガーホルダーで固定される。

親指を除くフィンガーユニットは各指ともに同一構造となっており、装着者の指部甲側に沿うように配置される。フィンガーユニットは二つのユニットで構成されており、それぞれ根本からMPユニット、DIP-PIPユニットと称する。それぞれの長さは158mm、113mmとなっている。親指のフィンガーユニットはMPユニットがなく、手甲ユニットの空

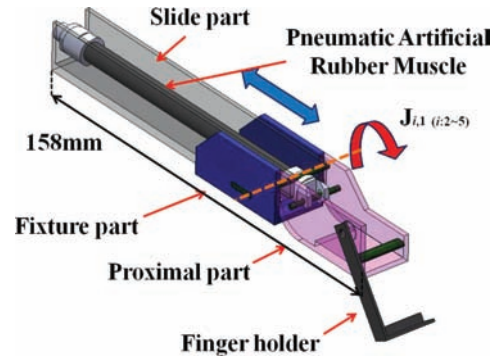


Fig. 4 MP unit

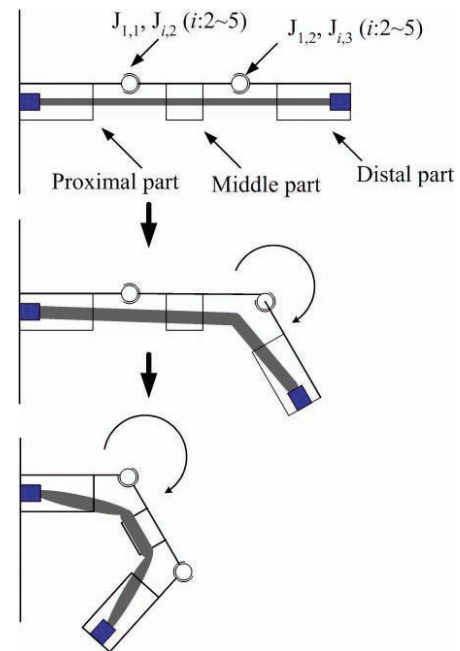


Fig. 5 Proposed bi-articular mechanism with a PARM

気圧ゴム人工筋と連結されている。長さは137mmとなっている。これらは個別に空気圧ゴム人工筋を実装しており、独立して駆動することができる。

2.2 各関節の駆動機構

MPユニットの模式図をFig. 4に示す。MPユニットは空気圧ゴム人工筋を内蔵するスライド部、屈曲する基節部、スライド部と手甲ユニットを接続する固定部から構成されている。空気圧ゴム人工筋はスライド部の端と、基節部のシャフトに固定されている。空気圧ゴム人工筋が収縮すると、基節部のシャフトが引っ張られ、空気圧ゴム人工筋の引張力が基節部の関節まわりのトルクに変換される。

PIPとDIP関節の駆動には、外骨格を利用することで1本のゴム人工筋により2関節の同時屈曲を実現する機構を提案実装した。空気圧ゴム人工筋は軸方向における単位長さ当たりの発生する力の合力が、出力として得られる。この特性により屈折、湾曲した場合でも圧縮空気が供給されていれば、部分的にも空気圧ゴム人工筋が収縮する。そこで、2関節連動機構はこの特性を活かし、1本の空気圧ゴム人

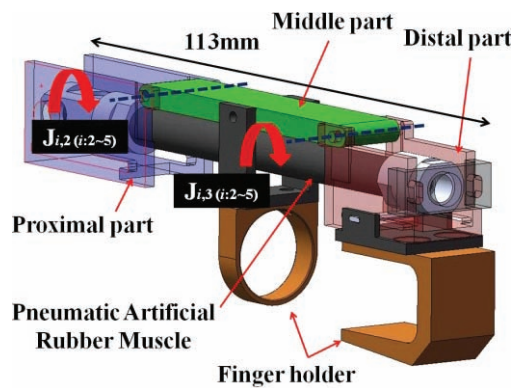


Fig. 6 Designed bi-articular mechanism (PIP-DIP joint)

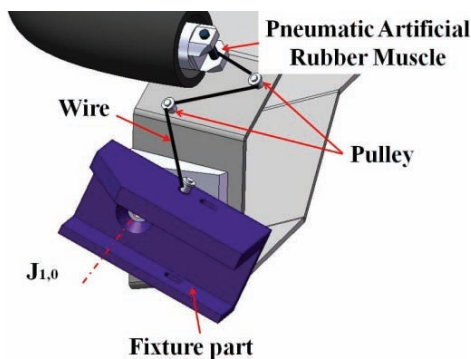


Fig. 7 Manifer unit

工筋の収縮を2つの関節の屈曲に利用した。Fig.5に2関節屈曲機構の模式図を示す。2関節連動機構はシリアルリンク機構の外骨格内に空気圧ゴム人工筋を内蔵し、その両端を固定した構造となっている。ただし、外骨格の関節は空気圧ゴム人工筋の同軸上に位置していない。この状態で圧縮空気を供給すると上図から下図のように変化しながら駆動を行う。空気圧ゴム人工筋が収縮することで外骨格の端(末節部)が引っ張られ、DIP関節が屈曲し始める。このとき、空気圧ゴム人工筋は中節部に接触していないので、その収縮力はPIP関節を屈曲させるトルクを生じない。DIP関節がある程度屈曲すると空気圧ゴム人工筋は屈曲した側のリンクに拘束され、その屈曲が抑制される。同時に空気圧人工筋が中節部の内側に接触し、基節部側で収縮を続けるため、PIP関節もDIP関節と同様に屈曲を始める。

Fig.6にFig.5に示した二関節同時駆動を実現した指部の概略図を示す。親指の二関節同時駆動においても同様の機

Table 1 Specifications of finger units

Finger unit	Available angle [deg]	Maximum torque [Nm]
DIP-PIP unit	PIP : 20, DIP : 30	0.2
MP unit	80	0.5
Thumb IP-MP	MP : 20, IP : 20	0.2
Thumb CM	40	0.5

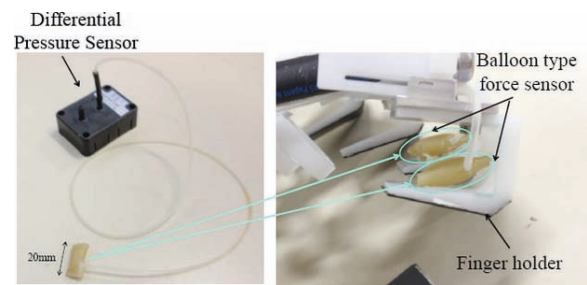


Fig. 8 Photograph of balloon sensor

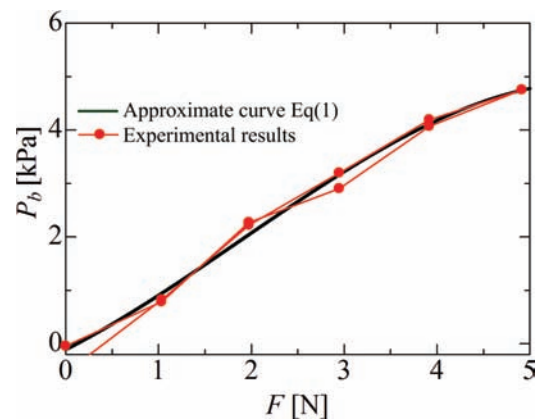


Fig. 9 Static characteristics of the balloon sensor

構を採用した。親指のフィンガーユニットの固定部はFig.7のように、手甲ユニットに固定された治具の軸回りに自由度を持っており、クリップ部の治具の回転軸に取り付けている。手甲ユニットの手首側の縁には、空気圧ゴム人工筋を内蔵した湾曲したプラスチックチューブが取り付けられている。空気圧ゴム人工筋はフィンガーユニット固定部とワイヤで繋がれており、空気圧ゴム人工筋が収縮するとプーリーを介して親指のフィンガーユニットを掌の方向に約40度旋回させることができる。

試作した握力増幅グローブの可動範囲と発生可能トルクをTable 1にまとめる。表中に示した角度は各関節が一直線上に伸びた状態からの屈曲角度を示している。Table 1に示す可動範囲によって、人差し指および中指を親指と対向して接触させることができるだけでなく、掌内の空間を直径30mm程度の円筒状までに狭めることができる。したがって、紙のように薄いものまでの摘み動作および直径30mm程度までの物体に対する握り動作が可能である。

2.3 バルーン型センサ

試作した握力増幅グローブを装着者と同期して動作させるためにFig.8に示すバルーン型力センサを試作し、装着者の指と装置の間に実装した。本センサはバルーン部とゴムチューブで接続された差圧センサ部から構成される。バルーン部は外径75mmのシリコンゴムチューブを20mmの長さで両端を封止し、空気圧配管用の内径1mmのゴムチューブを接続したものである。ゴムチューブの長さは装着部から電氣的なセンサを隔離したいことから625mmとした。バルー

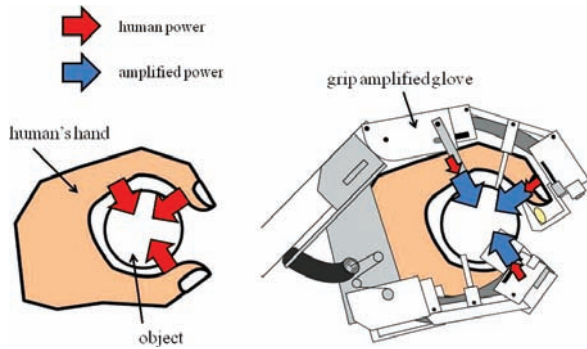


Fig. 10 Image of grasping with the developed device

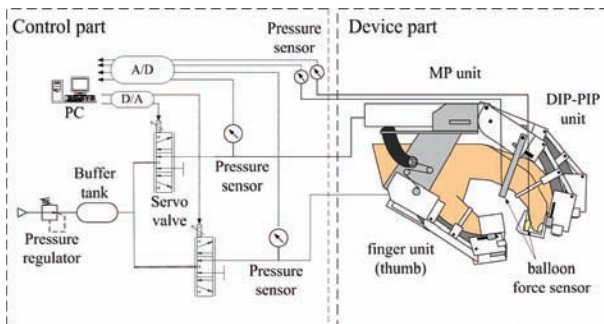


Fig. 11 System configuration of the power amplitude glove

ン部に作用した外力による内圧上昇を差圧センサで測定するものである。差圧センサには長野計器製KL-17を用いた。

Fig. 9に試作したセンサの静特性の実験結果を示す。横軸はバルーン部に加えた外力、縦軸はその時の内圧を示す。外力はバルーン部の指が当たる面に直径10mmの円柱を垂直に押し付けることで与えた。実験結果よりヒステリシスの影響は小さいことが分かる。

実験結果を次式で示す3次関数の近似曲線と与えた結果を図中の実線で示す。

$$P_b = -0.03F^3 + 0.16F^2 + 0.88F - 0.11 \quad (1)$$

本研究では、パワー増幅グローブと装着者の動きを同期させることも目的に本センサを使用することから、Fig. 9に示す近似曲線でその機能を満足すると考え、次章以下の制御系に用いた。

3. 握力増幅グローブの制御

3.1 装置構成

握力増幅グローブの駆動方式の概念図をFig. 10に示す。手による物体の把持動作は親指と対向する他の指によって行われる。素手で物体を把持している場合、指の表面は物体からの反力が作用している。握力増幅グローブを装着して物体を把持する場合、装着者は物体に接触せず、握力増幅グローブのフィンガーホルダが接触する。反力はフィンガーホルダ越しに装着者の指に作用する。Fig. 11に握力増幅グローブの装置の構成を示す。装置は大きく、右側ハンドデバイス部と左側制御部から成る。右側ハンドデバイス

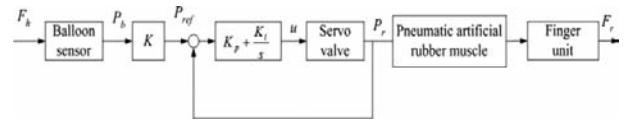


Fig. 12 Block diagram of the system

Table 2 Control parameters

	Thumb		Fore-finger		Mid-finger	
	IP-MP	CM	DIP-PIP	MP	DIP-PIP	MP
K [MPa/N]	5.0	25.0	8.0	22.0	15.0	40.0
K_p [V/MPa]	4.0	5.0	5.0	5.0	6.0	5.0
K_i [V/MPa/s]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.05

部に一切電氣的なセンサやアクチュエータが配置されていない点が特徴であり、防爆、防水性を有している。

ハンドデバイス部のフィンガーホルダには上述したバルーン型力センサが搭載されており、装着者の指の接触力を把持対象と接触した状態で検出する。本実験では、中指、薬指と小指の3指は連動して動作させた。よって、バルーン型力センサは親指、人差指、中指にそれぞれ2つ搭載されている。親指以外のフィンガーユニットにおいてはDIP-PIPユニットおよびMPユニットのフィンガーホルダに1つずつ取り付けられており、それぞれの駆動における装置への入力信号となる。親指のフィンガーユニットは先端のフィンガーホルダに2つ搭載され、親指の2方向の駆動に対応している。

Fig. 11の制御部に示すようにバルーン型センサの信号はADボードを介して制御用コンピュータに取り込まれ、制御信号がDAボードを通して各空気圧サーボ弁（FESTO社製MPYE SA）に与えられる。空気圧サーボ弁の制御ポートには空気圧ゴム人工筋内の圧力をフィードバック制御するための圧力センサが取り付けられている。ハンドは親指と人差指は独立に、中指、薬指と小指の3指は連動して動作させた。つまりそれら3指は1つの空気圧サーボ弁で駆動させ、バルーン型センサは薬指と小指には設置していない。Fig. 11では簡単のため親指部分の用いる空気圧サーボ弁とセンサのみ示しているが、親指、人差指、中指の各関節駆動のため、それぞれ2個、合計6個のバルブとセンサが配置されている。

3.2 制御系

Fig. 12に制御系ブロック線図を示す。制御の流れを以下に説明する。まず、装着者の指がフィンガーホルダを介して物体に触れ、このとき指の接触力 F_b をバルーン型力センサが検出する。バルーン型力センサは接触力に応じた信号

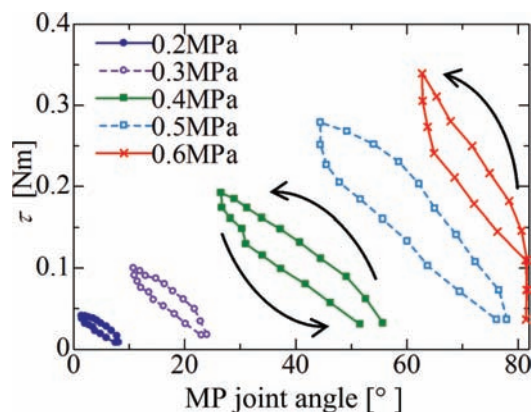


Fig. 13 Experimental results (MP joint angle vs. torque)

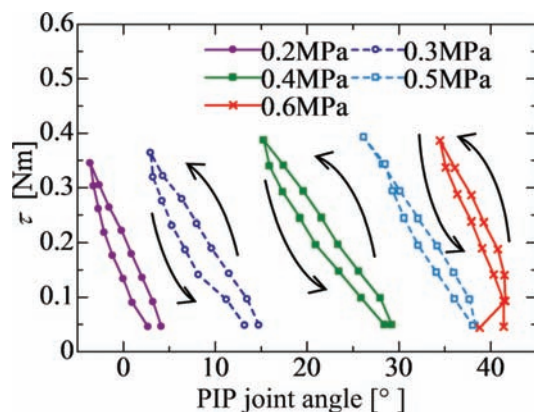


Fig. 14 Experimental results (PIP joint angle vs. torque)

P_b を出力し、これに比例ゲインをかけた圧力を空気圧ゴム人工筋の目標圧力 P_{ref} として与える。この目標圧力に対してPI制御系を構成する圧力制御を行い、パワー増幅グローブが動作する。制御に用いたパラメータをTable 2にまとめる。なお制御パラメータは安定性を保つことができる範囲内で、バルーン型センサへの力入力に対する空気圧ゴム人工筋の駆動力の応答が最も速くなるよう試行錯誤的に調整した。

4. 握力増幅グローブの実験結果

4.1 各関節の発生トルク

はじめに、各フィンガーユニットの関節角度-トルク特性を測定した。圧力レギュレータにより空気圧ゴム人工筋の内圧を一定とし、フィンガーユニットの先端に負荷をかけたときの各関節の角度をエンコーダを取り付けて測定した。Fig. 13に示す実験結果は、Fig. 4に示したMPユニットの空気圧ゴム人工筋を一定圧力に保持した際に、指先への負荷を変化させMP関節角度と屈曲トルク τ の関係を測定したものである。横軸の角度は関節が伸びた状態を0 degとしている。Fig. 13の実験結果より、MP関節は最大約80deg屈曲できることがわかる。また、負荷は先端に最大2.2kgまでのおもりを吊るすことで与えたため、角度によってトルクの最大値が異なっているが、測定範囲において屈曲角度40degのとき約0.15Nmの屈曲トルクが発生可能であ

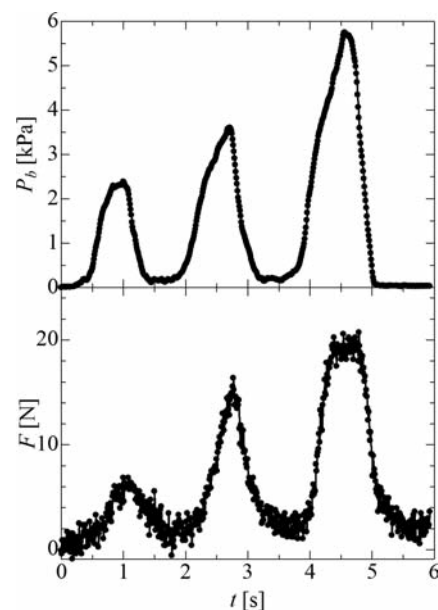


Fig. 15 Experimental results of grip amplify (DIP-PIP unit of forefinger)

ることが分かる。

次に、DIP-PIPユニットの実験結果を示す。連動して動作する2つの関節のうちPIP関節の結果をFig. 14に示す。実験方法および図の形式はFig. 13と同様である。MPユニットの実験と同様に1.6kgまでのおもりをユニット先端に吊るすことで負荷を与えているが、連動するDIP関節の角度と設置角度の関係により生じる最大トルクはほぼ一定となっている。Fig. 14よりPIP関節回りの屈曲トルクは比較的低圧でも0.35Nm以上発生可能であることが明らかとなった。PIP同様の実験によって、DIP関節回りの屈曲トルクは0.2Nmであることを確認した。いずれの結果においても、ヒステリシスが見られる。これは空気圧ゴム人工筋の特性に起因するものである。なお、本グローブは指を閉じる一方向での握力増幅を目標としており、ヒステリシスの影響は問題とはならない。

実験結果は示さないが、親指フィンガーユニットも同様な結果が得られ、IP関節、MP関節、CM関節でそれぞれ0.5Nm, 0.2Nm, 0.3Nmの最大トルク、ならびに50度、25度、40度の屈曲が確認された。

4.2 装着実験

試作したグローブを被験者(23歳、男性健常者)が装着して把持動作を行った。その際の人差指のDIP-PIP関節の実験結果をFig. 15に示す。横軸は時間、上図の縦軸はバルーン型力センサの出力 P_b 、下図の縦軸は力センサを用いて指の先端での発生力を測定した結果である。上図と下図を比較すると、バルーン型力センサの接触力に応じた力が発生していることがわかる。またその動作にはほとんど遅れが見られず、装着者と同期してパワー増幅が可能であることが明らかとなった。MP関節および他の指関節においても同様の結果を得た。



Fig. 16 Gripping a mass of 2kg in water

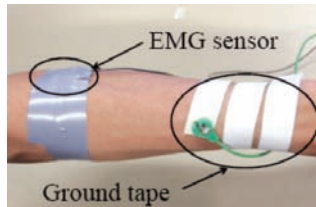


Fig. 17 Position of measured muscles with EMG sensor

本装置を用いて種々の対象物の把持実験を行い、500mlのペットボトル（握り動作）、直径65mmのボール（掴み動作）および本（摘み動作）などの形状の異なる様々な物体に対して、装置自身が妨げとならずに問題なく把持できることを確認した。さらに、Fig. 16に示すように2kgのおもりを水中で把持可能であることを確認した。実験は日を分けて計10回行ったが、装置に不具合等は生じなかった。

4.3 筋電計測による評価

握力増幅グローブを装着して物体を把持した際の装着者の負担軽減効果を評価するために、装着者の腕の筋電位を測定した。2kgのおもりを持ちあげ、10秒程度把持したときの筋電位を筋電位測定センサで測定した。センサはFig. 17のように長橈側手根伸筋または短橈側手根伸筋の位置に取り付けた。指を直接屈曲させる筋肉は浅指屈筋や深指屈筋などであるが、これらの筋肉は手首を掌屈させる作用も有している。したがって、実際には手首の角度を保ったまま把持を行うために、手首の背屈や橈屈を担う長（短）橈側手根伸筋も緊張し疲労する。

Fig. 18に筋電図（electromyogram：EMG）を示す。縦軸に測定された筋電位 E 、横軸を時間 t を示す。上図から素手での把持、グローブを装着はしているがアシスト無し、アシスト有りの結果である。アシスト無しおよび素手での把持の場合には、筋電図の振幅が大きくなっているに対して、握力増幅グローブを装着した場合の筋電図の振幅は明らかに小さくなっている。筋電位の強さが筋活動の強さと相関していることから、筋肉の負担が軽減されることがこの結果から明らかとなった。したがって、開発したグローブによって、素手では疲労のため長時間続けることが困難な作業を長時間持続できるなどの効果が期待できる。

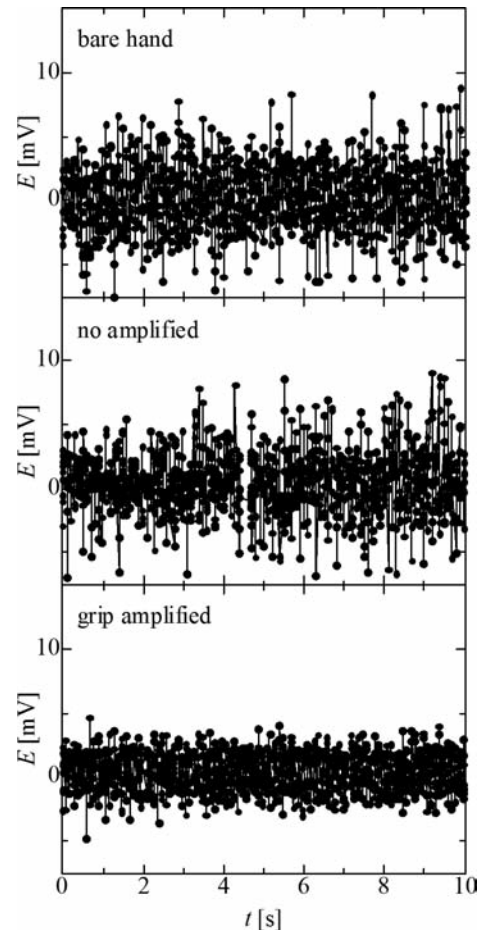


Fig. 18 Measured results of EMG signals

5. 結 言

本論文では、作業時における手先の負担を軽減させるために、直接手に装着する多自由度の握力増幅グローブを研究開発した。空気圧ゴム人工筋をアクチュエータとして利用し、装着者との協調性が得られる機構として、二関節屈曲機構を提案、握力増幅グローブに実装した。また、装着者の発生力を検出するため、バルーン型力センサを製作し、握力増幅システムを構築した。製作した握力増幅グローブの基本特性を測定し、さらに実際に装着してその評価を行った。筋電の測定結果より、握力増幅グローブを装着することで手先の負担を軽減できることが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 山本圭治郎, 兵頭和人, 石井峰雄, 松尾崇, 介護用パワーアシストスーツの開発, 日本機械学会論文集C, Vol. 67, No. 657, p. 1499-1506 (2001)
- 2) 則次俊郎, 安東文典, 山中孝治, ゴム人工筋を用いたリハビリテーション支援ロボット (第1報 インピーダンス制御による訓練運動モードの実現): 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 1, p. 141-148 (1995)
- 3) H. Kobayashi, H. Suzuki, H. Nozaki, T. Tsuji, Development

- of Power Assist System for Manual Worker by Muscle Suit, IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2007), p. 332-337 (2007)
- 4) D. Sasaki, T. Noritugu, M. takizawa, H. Yamamoto, Wearable Power Assist Device for Hand Grasping Using Pneumatic Artificial Rubber Muscle, IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2004), p. 655-660 (2004).
- 5) 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘, 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 5, p. 640-646 (2006)
- 6) H. Tsukagoshi, A. Kitagawa, Y. Kamata, Wearable Fluid Power Composed of Transformed Flat Tube Actuators, Proceedings of IROS2002, p. 1178-1183 (2002).
- 7) Y. Hasegawa, Y. Mikami, K. Watanabe, Y. Sankai, Five-fingered assistive hand with mechanical compliance of human finger, Proc. IEEE ICAR, p. 718-724 (2008).

研究論文

柔軟空気圧シリンダを用いた伸縮・湾曲機構の試作と
組込みコントローラによる姿勢制御*

赤木 徹也**, 堂田 周治郎**, 趙 菲菲***, 藤川 敬広****

Development of a Sliding and Bending Mechanism Using Flexible Pneumatic
Cylinders and Attitude Control Using a Tiny Embedded Controller

Tetsuya AKAGI, Shujiro DOHTA, Feifei ZHAO, Takahiro FUJIKAWA

A rod-less type flexible pneumatic cylinder is a novel soft actuator. In this paper, a sliding and bending mechanism composed of these flexible pneumatic cylinders is described. Due to its simple structure and flexibility, the tested mechanism can generate a natural flowing movement with multi-motion such as bending, expanding and contracting. A master-slave attitude control method for the mechanism is proposed and tested. An analytical model of the mechanism is also proposed for the attitude control. In addition, an inexpensive quasi-servo valve using on/off control valves and a tiny embedded controller are utilized in the attitude control system to improve the control performance. As a result, the usability of the proposed mechanism and the effectiveness of the attitude control method by using the analytical model and the quasi-servo valve are confirmed. This mechanism will be applied to a rehabilitation device for a human wrist as our future work.

Key words : Flexible mechanism, Flexible pneumatic cylinder, Quasi-servo valve, Tiny embedded controller, Attitude control

1. 緒 言

現在、介護支援機器やリハビリ機器の開発が活発に行われている^{1)~4)}。そのようなシステムで用いられるウェアラブル機器は小型、軽量、柔軟性、安全性が要求される。特に空気圧駆動機器の場合、駆動機構本体より弁やコントローラ等の周辺機器が大きくなるなど周辺機器を含めたシステムの小型化に対して多くの問題を有する。そこで本研究では、以前の研究で開発した柔軟空気圧シリンダ⁵⁾や小型疑似サーボ弁⁶⁾などのウェアラブル制御機器を用い、さらにローコストの小さな組込みコントローラを用いた手首を含む腕のリハビリテーション機器の開発を最終目標とする。すなわち、装置自身が柔軟性を有し、コンプライアンス制御等を加えなくとも、急激な負荷に対して装置が変形することで手首等に伝わる負荷を緩和できる安価・簡単な構造でしなやかな動きができる柔軟ロボットアームやリハ

ビリテーション機器の開発をめざす。具体的には、ロッドレス型柔軟空気圧シリンダを3本用いて、円筒形の柔軟湾曲機構を試作し、マスタースレーブ方式の姿勢制御を試みる。また、それを伸縮・湾曲機構に発展させ、姿勢制御を行うとともに、他動運動などを行うリハビリ機器を想定した試作機構の軌道制御のモデル化およびローエンド（低価格・低性能）組込みコントローラを用いた軌道制御を行う。

2. 柔軟空気圧シリンダと小型疑似サーボ弁

2.1 柔軟空気圧シリンダ

Fig. 1に本研究で使用するロッドレス型柔軟空気圧シリンダ⁵⁾の構造を示す。シリンダは、柔軟チューブ（株式会社SMC製 TUS1208）と、直径9mmの鋼球、チューブ外側より直径4mmの真鍮製ローラにより締付けられたアクリル樹脂製ステージから構成される。またローラの両側は直径3mmの鋼球で支えられ、ステージにはチューブを保持する役割の直

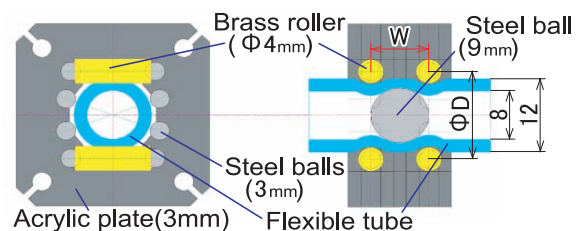


Fig. 1 Construction of rod-less type flexible cylinder

*平成23年6月8日 原稿受付

**岡山理科大学工学部知能機械工学科

(所在地 岡山県岡山市北区理大町1-1)

(E-mail: akagi@are.ous.ac.jp)

***津山工業高等専門学校電子制御工学科

(所在地 岡山県津山市沼624-1)

****三機工業株式会社

(所在地 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

径3mmの鋼球が4個設けられている。動作原理は片側の圧力室を加圧すると内部の鋼球($\phi 9\text{mm}$)が押され、それに伴いローラが押され、ステージが動くというものである。内部鋼球の保持や駆動が可能で最低駆動圧力の低い最適形状パラメータはローラ軸間距離 $D=144\text{mm}$ 、ローラ中心軸間距離 $W=10\text{mm}$ である⁵⁾。この時の最低駆動圧力は120kPaである。

2.2 小型疑似サーボ弁

従来、上述のようなシリンダの位置決め制御に対して、比例弁であるサーボ弁を使用するが、ソレノイドによって動かされるアーマチュアが容積と重量の大型化につながり、さらに高価であるため小型で簡易な駆動システムの開発の障害になっていた。そこで、小型で比較的安価なサーボ弁の開発をめざし、以前の研究で、疑似アナログ的に流量の調整が可能な疑似サーボ弁を開発した⁶⁾。開発した小型制御弁をFig. 2に示す。試作弁は $35 \times 20 \times 10\text{mm}$ の小型On/Off弁(株Koganei製G010E1)を2個繋ぎ合わせ、供給源側の弁を給排気弁(2位置3ポート弁)、アクチュエータ側の弁を流量調整のための可変絞りのPWM駆動弁(2位置2ポート弁)として使用する。このPWM弁によって、デューティ比を変えることで開口面積を制御し、圧力や流量をアナログ的に調整することが可能となり、On/Off弁では難しかった比例制御などのアナログ制御則の適用が可能となる。具体的な弁の動作としては、制御入力(の正負によって、給排気弁をオン、オフすることで給排気を切替え、制御入力(の大きさによって、PWM弁の入力デューティ比を変える。このOn/Off弁の最大流量は20/min(0.5MPa印加時)、質量は15gであり、専用コネクタを用いた弁のサイズは $40 \times 42 \times 10\text{mm}$ 、質量38gのサーボ弁を構成できる。弁は後述する組み込みコントローラ(株Renesas製H8/3664F)で駆動される。またPWM駆動弁単体に比べ、常に給排気を繰り返さないため消費空気が小さく、排気音による動作音が小さいという利点がある。動作音の計測実験により、弁から50cm付近での動作音は従来のPWM駆動弁の場合80～90dB

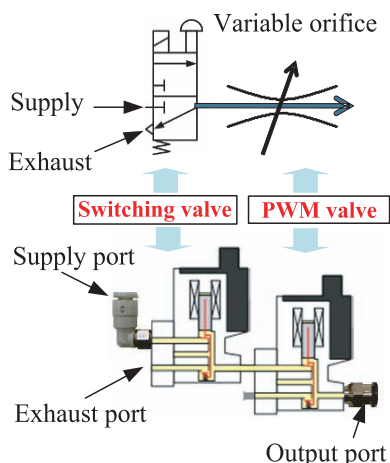


Fig. 2 Tested quasi-servo valve using on/off valves

(A)であるのに対して、Fig. 2の疑似サーボ弁では50～60dB(A)と小さくなることを確認している。これは、音の原因である排気流量が絞られているためである。

3. 伸縮・湾曲機構の姿勢制御システム

3.1 伸縮・湾曲機構

試作した伸縮・湾曲機構の構造をFig. 3に示す。構造は直径100mmのリング状ステージを2つ有し、下側のリング状ステージには、3本のロッドレス型柔軟空気圧シリンダ(ストローク250mm)のスライドステージを中心から直径66mm、角度120degの位置に取り付けている。スライドステージとシリンダ端がついた2つのリング状ステージの中央部に背骨チューブ(内径8mm、外径12mm、全長250mm: SMC, TUS1208)を配置している。これは長さを固定すると湾曲動作だけとなり、自由にすると高さ計測用チューブになり湾曲伸縮が可能となる。また、伸縮・湾曲機構の姿勢制御を行うためにリング状ステージの中心に3軸加速度センサ(株Kionix製KXM52-1050)を取り付けている。

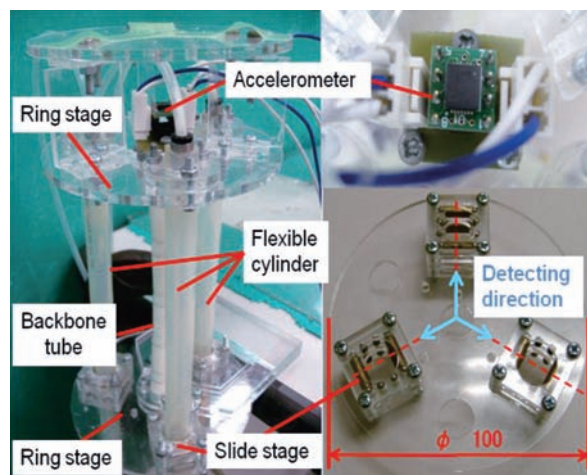
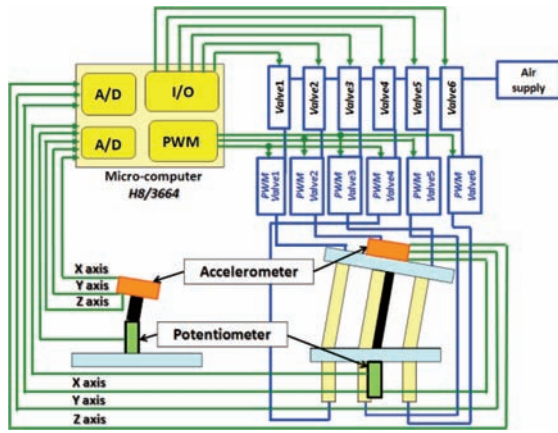


Fig. 3 Expand and bending mechanism

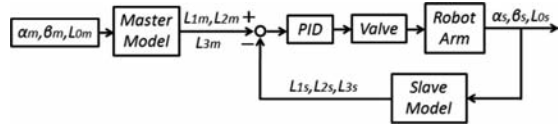
3.2 姿勢制御システム

伸縮・湾曲機構のマスタースレーブ制御システムの構成とブロック線図をそれぞれ、Fig. 4 (a), (b) に示す。スレーブ側は試作湾曲機構、加速度センサ、ポテンシオメータ、3本の柔軟空気圧シリンダを駆動するための6つの疑似サーボ弁と、制御器となるマイクロコンピュータ(株Renesas製H8/3664)から構成される。マスター側は、柔軟チューブに直径100mmの円板と目標値入力用の加速度センサとポテンシオメータを取り付けたものである。ここでは、加速度センサは姿勢角センサとして用いる。マスタースレーブ姿勢制御は以下に行われる。マスター側とスレーブ側の加速度センサとポテンシオメータからの出力電圧をマイコン内のA/D変換器を介して取り込み、後述する解析モデルを用いてマイコン内で、湾曲方向角 α 、湾曲角 β 、上下ステージ間のシリンダ距離 L (シリンダ長さと呼ぶこ

とにする)を計算する。そして、マスター側とスレーブ側のシリンダ長さの偏差をもとに制御則に基づき、疑似サーボ弁を駆動し、シリンダの位置決め制御を行い湾曲伸縮の姿勢を制御する。



(a) Schematic diagram of control system



(b) Block diagram of master-slave control system

Fig. 4 Control system of tested flexible mechanism

3.3 姿勢制御のための解析モデル

Fig. 5 (a) にアームの姿勢制御を行うための解析モデルを示し、Fig. 5 (b) に湾曲角と加速度センサに加わる重力加速度の各成分に相当する出力電圧との幾何学的関係を示す。アームが湾曲した時の柔軟シリンダの形状が円弧であると仮定すると、幾何学的関係から次式を得る。以下の式において添字 i は $i = m, s$ である。

$$L_{1i} = (R_i - r \cdot \cos(\alpha_i)) \cdot \beta_i \quad (1)$$

$$L_{2i} = \left\{ R_i - r \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \alpha_i\right) \right\} \cdot \beta_i \quad (2)$$

$$L_{3i} = \left\{ R_i - r \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \alpha_i\right) \right\} \cdot \beta_i \quad (3)$$

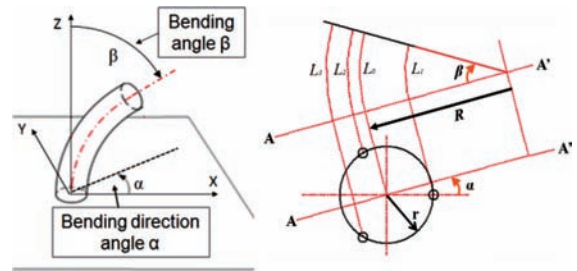
$$R_i = L_{0i} / \beta_i \quad (4)$$

ここで、 L_1, L_2, L_3 は上下ステージ間の各シリンダ長さ、 L_0 は背骨チューブの上下ステージ間距離である。添字 m, s はそれぞれ、マスター側 (目標値)、スレーブ側を示す。 R は湾曲アームの曲率半径、 r はステージ中心から各シリンダ中心までの距離 (33mm) である。一方、湾曲方向角 α と湾曲角 β は加速度センサからの出力を用いて、以下の式で与えられる。

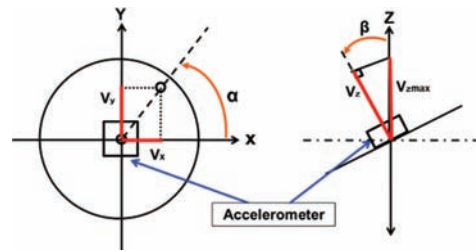
$$\alpha_i = \cos^{-1} \frac{V_{xi}}{\sqrt{V_{xi}^2 + V_{yi}^2}} \quad (5)$$

$$\beta_i = \cos^{-1} \left(\frac{V_{zi}}{V_{zmaxi}} \right) \quad (6)$$

ここで、 V_x, V_y, V_z は加速度センサの初期値からの差電圧であり、Fig. 5 (b) に示すように加速度センサに加わる重力加速度の各成分に相当するセンサ出力電圧である。 V_x, V_y は水平面からの角度、 V_z は鉛直面からの角度に対応するものである。なお、 V_{zmax} はステージが水平と鉛直になる場合の V_z の差電圧である。加速度がない状態での予備実験により、(5)、(6) 式による α と β の計算値とカメラによる計測値との誤差は 1 度以内であることを確認している。



(a) Analytical model of tested flexible mechanism



(b) Geometric relation between bending angle and output voltage from the accelerometer

Fig. 5 Analytical model for attitude control

4. 伸縮・湾曲機構の姿勢制御システム

4.1 組込みコントローラによる制御

マスタースレーブ制御は以下のPID制御則に基づいて制御を行った。

$$e_j = L_{jm} - L_{js} \quad (7)$$

$$u_j = K_p e_j + K_i \int e_j dt + K_d \frac{de_j}{dt} \quad (8)$$

ここで、添字 j は $j = 1, 2, 3$ でシリンダ番号、 e_j は偏差、 u_j は制御入力 (弁のデューティ比%) である。また、PIDゲインである K_p ($= 1.5\% / \text{mm}$)、 K_i ($= 0.003\% / \text{mm} / \text{s}$)、 K_d ($= 0.025\% \text{ s} / \text{mm}$) は限界感度法をもとに調整した。なお、PWM周期は10msを使用し、低いデューティ比ではOn/Off弁の動作遅れ (約3ms) により動作しない範囲があるため、(7)式で得られる制御入力に常に23%を上乗せして制御を行った。また、使用したマイコン (H8/3664) はタイマー割り込みのあるPWMポートが3ポートしかないため、3本のシリンダつまり、6つの圧力室を制御するには、上位機種のマイコンもしくはもう一つマイコンを追加するなどの措置が必要になる。しかし、本研究ではウェアラブルデ

バイスとして使用し、できるだけ低価格なコントローラの製作を考えているため、制御中、1本のシリンダの両圧力室のPWM駆動側弁の開口面積は同じになると仮定し、Fig 4 (a) に示すように、1つのPWMポートで2つの弁の開度を調整している。また、マイコン内のA/D変換器を介して得られる加速度センサ出力は10回の移動平均をとることでノイズの影響を軽減している。なお、制御のサンプリング周期は33msである。

4.2 制御結果

制御結果である湾曲方向角 α と各シリンダ長さ L_i (計算による推定値) の時間変化をFig. 6に示す。これらは、外付けの10bitシリアルD/A変換IC (株Linear Technology製LTC 1660) を介し、データレコーダ (株Graphtec製GL200) で計測した結果である。図において破線はマスター側、実線はスレーブ側を示す。ここで、比較のために、On/Off弁のみ使用したOn/Off制御則による応答結果をFig. 7に示す。Fig. 6とFig. 7からOn/Off制御結果に比べ、疑似サーボ弁を使用したシステムでは、振動はほとんどないことがわかる。しかしながら、スレーブ側 (実線) の姿勢角やシリンダ長さが階段状に変化しており、制御性能を改善する必要がある。これは、ロッドレスシリンダの摩擦の影響が大きいと考えている。以上のように、高価で質量の大きい市販のサーボ弁を使用しなくとも、安価なOn/Off弁やマイコン (組込みコントローラ) を用いることで、ウェアラブルな空気圧駆動システムを構成することが可能である。

また、マスター側 (目標値) の湾曲方向角 α_m 、湾曲角 β_m 、シリンダ長さ L_{0m} を同時に正弦波状 (α_m : 180degを中心に

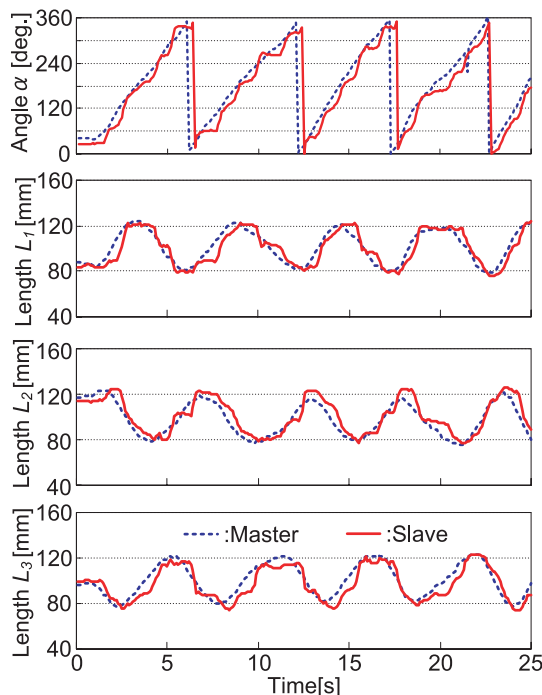


Fig. 6 Transient responses of tested mechanism using tested valve

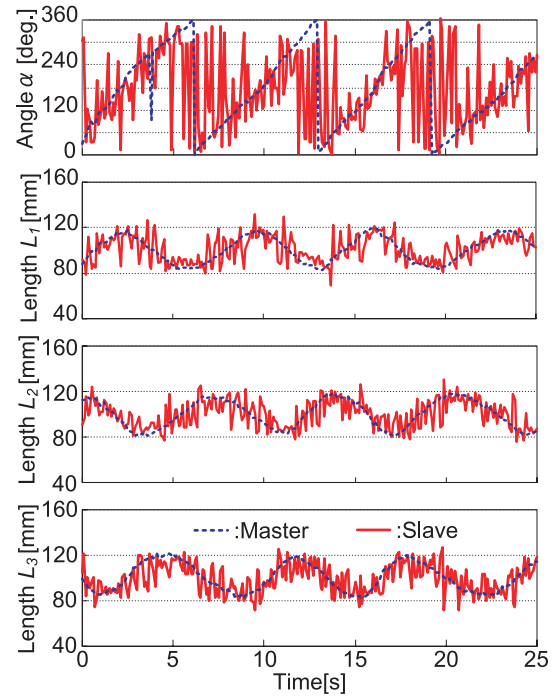


Fig. 7 Transient responses of tested mechanism using On/Off valve

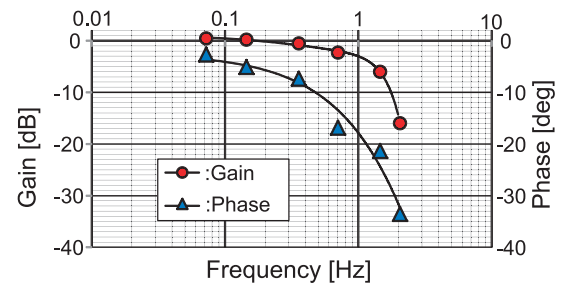


Fig. 8 Frequency response of tube length L_0

振幅60deg, β_m : 30degを中心に振幅15deg, L_{0m} : 100mmを中心に振幅15mm) に変えて周波数応答実験を行った。その時の上下ステージ間距離に相当するシリンダ長さ L_0 のボード線図をFig. 8に示す。Fig. 8よりバンド幅周波数が0.8Hz程度であることがわかる。

5. 軌道制御

5.1 軌道制御のためのモデル化

Fig. 9に湾曲・伸縮ロボットアームを用いた軌道制御のための解析モデルを示す。3.3節と同様に、湾曲時のアーム形状を円弧として仮定し、Fig. 9において、幾何学的関係より、アーム先端座標 (X_c , Y_c , Z_c) と曲率半径 R は以下の式で与えられる。

$$X_c = R \cdot (1 - \cos \beta) \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

$$Y_c = R \cdot (1 - \cos \beta) \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

$$Z_c = R \cdot \sin \beta \quad (11)$$

$$R = \frac{L_0}{\beta} \quad (12)$$

以上の式を数値計算で解くことにより軌道制御は可能であるが、一意に座標が計算できないことや、使用したローエンドのコントローラでは計算に時間がかかるなどの問題がある。そこでこれらの式を用いて、軌道制御のための線形化を行う。すなわち、 $X_c = X_{c0} + \delta X_c$, $\alpha = \alpha_0 + \delta\alpha$, $\beta = \beta_0 + \delta\beta$, $L_0 = L_{00} + \delta L_0$ とし、平衡点まわりでの微小挙動を考え、 $\delta\alpha \approx 0$, $\delta\beta \approx 0$ として線形近似 ($\sin\delta\alpha \approx \delta\alpha$, $\sin\delta\beta \approx \delta\beta$, $\cos\delta\alpha \approx 1$, $\cos\delta\beta \approx 1$)を行うと以下の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \delta X_c \\ \delta Y_c \\ \delta Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\alpha \\ \delta\beta \\ \delta L_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで行列の各要素は以下の通りである。

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{L_{00} \cdot \sin\alpha_0 \cdot (\cos\beta_0 - 1)}{\beta_0}, & A_{12} &= \frac{(L_{00} \cdot \sin\beta_0 \cdot \cos\alpha_0 - X_{c0})}{\beta_0} \\ A_{13} &= \frac{(1 - \cos\beta_0) \cdot \cos\alpha_0}{\beta_0}, & A_{21} &= \frac{L_{00} \cdot \cos\alpha_0 \cdot (1 - \cos\beta_0)}{\beta_0} \\ A_{22} &= \frac{(L_{00} \cdot \sin\beta_0 \cdot \sin\alpha_0 - Y_{c0})}{\beta_0}, & A_{23} &= \frac{(1 - \cos\beta_0) \cdot \sin\alpha_0}{\beta_0} \\ A_{31} &= 0, & A_{32} &= \frac{(L_{00} \cdot \cos\beta_0 - Z_{c0})}{\beta_0}, & A_{33} &= \frac{\sin\beta_0}{\beta_0} \end{aligned}$$

最後に、先端座標の変化量 (δX_c , δY_c , δZ_c) から湾曲角などの変化量 ($\delta\alpha$, $\delta\beta$, δL_0) を求めるために、上式の両辺に左から A^{-1} をかけると、次式が得られる。これを用いて、軌道制御を行う。

$$\begin{bmatrix} \delta\alpha \\ \delta\beta \\ \delta L_0 \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \delta X_c \\ \delta Y_c \\ \delta Z_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

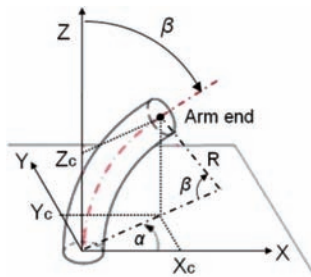


Fig. 9 Analytical model for trajectory control

5.2 制御方法と制御結果

前述の解析モデルを用いた軌道制御方法として、マイコン内部で構成する制御システムのブロック線図をFig. 10に示す。制御は以下の手順で行う。

- 1) はじめに、伸縮・湾曲機構先端の目標軌道を生成する。
- 2) センサから入力し、(5), (6)式などを用いて、 α , β , L_0 を求める。同時に(1)~(4)式を用いて上下ステージ間の各シリンダ長さ L_1 , L_2 , L_3 を計算しておく。
- 3) 現在の位置と目標位置から先端変化量 δX_c , δY_c , δZ_c を求め、(14)式から、 $\delta\alpha$, $\delta\beta$, δL_0 を求め、目標先端位置を得る α_i , β_i , L_i を求める。さらにこれを用いて目標値となる上下ステージ間の各シリンダ長さ L_{1i} , L_{2i} , L_{3i} を求める。
- 4) 最後に、各シリンダ長さの偏差を求め、PID制御則などを用いてシリンダ長さを制御し、機構先端を目標位置にもっていく。そして、2)以降を繰り返すことによって軌道制御を行う。

以上の計算をクロック周波数16MHz (ROM容量32k Bytes, RAM容量 2 kBytes, 10bitA/D変換 8ch, PWMポート 3ch) のタイニーマイコンを用いて行う。

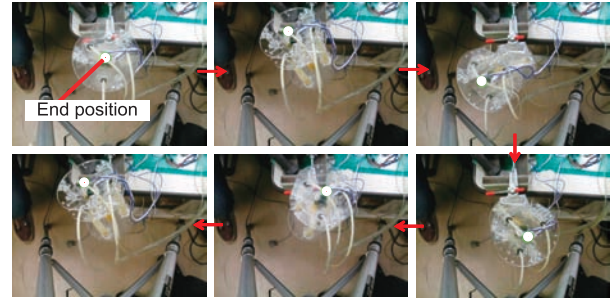


Fig. 11 View of movement of the tested mechanism

軌道制御の一例として、高さ一定で、一辺60mmの正方形を一定の速度 (6 mm/s) で描くように目標軌道を与えた場合の動作の様子をFig. 11に示す。制御則は、PID制御則を用い、各ゲインは3.1節で述べた値を用いた。制御のサンプリング周期は33ms、弁のPWM周期は10msである。また、目標軌道の計算は、3回の姿勢制御毎に行った。つまり、3サンプル (99ms) 毎に目標軌道を変えられることになる。Fig. 11は真上から見た写真であり、中央の丸印・が手先位

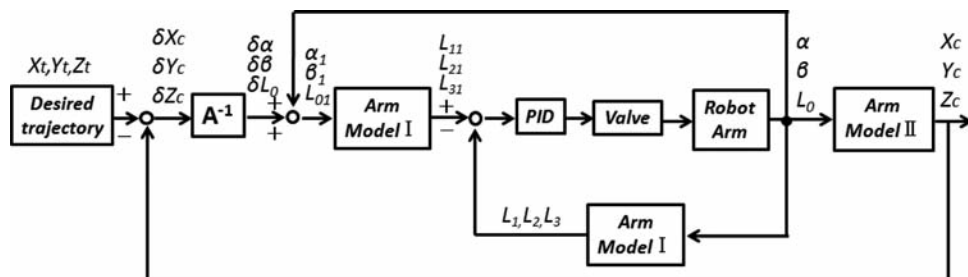
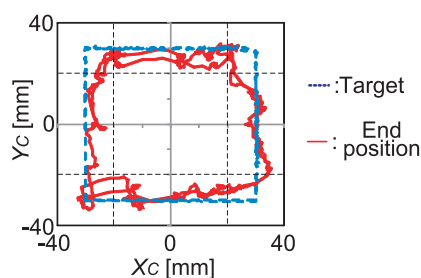
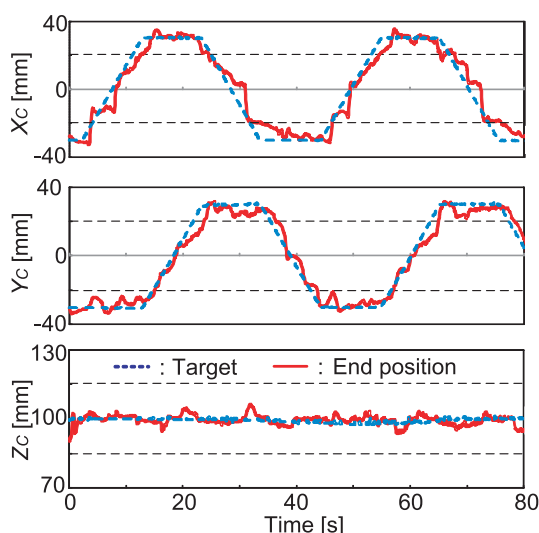


Fig. 10 Block diagram of trajectory control



(a) Track of the mechanism



(b) Transient response of end position of the mechanism

Fig. 12 Experimental results of the attitude control

置である。写真のように、まず手先位置は初期位置 $(X_c, Y_c, Z_c) = (0, 0, 100\text{mm})$ にあり、その後、 $(-30, -30, 100)$ へ移動し、2秒間停止したあと、一定速度で、 $(30, -30, 100)$, $(30, 30, 100)$, $(-30, 30, 100)$, $(-30, -30, 100)$ へと動き、それを繰り返す。

制御実験結果である伸縮・湾曲機構の手先座標 (X_c, Y_c) の軌跡と、手先座標 X_c, Y_c, Z_c の時間変化をそれぞれ Fig. 12 (a), (b) に示す。図の破線は目標軌道、実線は前述のモデルを用いてマイコンにより計算されたロボットの手先座標である。図においては、初期位置から左下 $(-30, -30, 100)$ への軌跡は略している。Fig. 12 (a) を見ると、ロボット手先は正方形を描こうとしているが、正方形の角の所は目標軌道からかなりずれている。また、全体的に正方形が目標軌道より内側に入っていることがわかる。この理由として、このロボットアームの場合、湾曲が大きくなる毎に各シリンダの摩擦が大きくなり、線形の制御則 (PID 制御) では偏差が残ってしまうためではないかと考えられる。次に、Fig. 12 (b) の時間変化を見ると、 X_c, Y_c 位置の場合、目標軌道に対してロボットアームの手先座標がほぼ追従している様に見えるが、手先座標が階段状に変化しており、シリンダの摩擦によるステック・スリップ現象が生じていることが確認できる。一方、 Z 座標も、所々で 5 mm

程度、目標軌道 (100mm で一定) からずれることがある。これは、摩擦の影響に加え、加速度センサのノイズの影響もあると思われる。これらは、本来の目的である手首のリハビリテーションで、手首をロボット上面にのせることで、多少は減少できるものと考えられるが、今後、制御性能の改善のためには重力加速度に頼らない、ロボットの姿勢角検出が必要である。

6. 結 言

弁やコントローラなどの周辺機器が小容積で、安価で柔軟な手首を含む腕の他動運動を行うリハビリ装置の開発を目指した本研究は以下のように要約される。

- 1) ロッドレス型の柔軟空気圧シリンダを用いて簡単な構造の柔軟な伸縮・湾曲機構を試作した。そして、加速度センサ、疑似サーボ弁、ローエンドの組込みコントローラを用いた安価でコンパクトなマスタースレーブ制御システムを構築し、制御性能に対する疑似サーボ弁の有効性を確認した。
- 2) 加速度センサと解析モデルを用いた仮想姿勢角やシリンダ長さによるマスタースレーブ姿勢制御実験を行った結果、0.8Hz 程度までは良好な追従制御ができることを確認した。
- 3) 試作した伸縮・湾曲機構の軌道制御を行うための解析モデルを提案し、ローエンドの組込みコントローラを用いた軌道制御システムを提案・試作した。また、軌道制御を行った結果、使用するシリンダの摩擦特性に起因する追従誤差を生じるものの、低価格の制御システムが実現できた。

さらなる制御性能の向上やリハビリテーション機器への本格的な応用は今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 山本圭治郎, 兵頭和人, 石井峰雄, 松尾崇: 介護用パワーアシストスーツの開発, 日本機械学会論文集 (C), Vol.67, No. 657, p. 1499-1506 (2001)
- 2) Kobayashi, H., Shiiba, T., Ishida, Y.: Realization of all 7 motions for the upper limb by a muscle suit, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 16, No. 5, p. 504-512 (2004)
- 3) Noritsugu, T., Takaiwa, M., Sasaki, D.: Development of Power Assist Wear Using Pneumatic Rubber Artificial Muscles, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 21, No. 5, p. 607-613 (2009)
- 4) 高岩昌弘, 則次俊郎: 空気式パラレルマニピュレータを用いた手首部リハビリ支援装置の開発—多自由度リハビリ動作の実現—, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 6, p. 747-753 (2006)
- 5) 赤木徹也, 堂田周治郎: ロッドレス型柔軟空気圧シリ

ンダの開発とその応用, 日本機械学会論文集 (C),
Vol. 73, No. 731, p. 2108-2114 (2007)

タ用小型疑似サーボ弁の試作と解析, 日本機械学会論
文集 (C), Vol. 76, No. 772, p. 3665-3671 (2010)

6) 趙菲菲, 堂田周治郎, 赤木徹也: 柔軟湾曲アクチュエー

研究論文

柔軟関節を用いた空気圧駆動鉗子マニピュレータの開発* (先端屈曲機構の簡略化と外力推定)

原 口 大 輔**, 只 野 耕太郎***, 川 嶋 健 嗣***

Development of a Pneumatically-Driven Forceps Manipulator Using a Flexible Joint (Simplification of the Joint Mechanism and External Force Estimation)

Daisuke HARAGUCHI, Kotaro TADANO, Kenji KAWASHIMA

This paper presents the first prototype of a pneumatically-driven forceps manipulator using a simple flexible joint for enhanced practicalities. A high performance spring component with wire actuation is employed for a two-degree of freedom (DOF) bending joint, and a two-DOF tendon drive system is implemented using four pneumatic cylinders. The kinematics is described using a continuum model and the dynamics are described as a linear elastic rod with the friction of wires. For the control system, a cascade controller with two control loops of the joint position and a pneumatic driving force is designed, which shows good performance at a sufficient working frequency for surgical operations. In addition, the forceps manipulator can estimate external forces using a disturbance observer. A link approximation model is introduced to design the observer for an intuitive approach. As the first step, the effectiveness of the force estimation is experimentally verified in the basic straight posture of the flexible joint.

Key words : Medical Equipment, Pneumatics, Forceps Manipulator, Flexible Joint, Force Estimation

1. 緒 言

ロボット支援環境下における低侵襲手術において近年、術創（切開創）の最小化はもとより、単孔式内視鏡手術や微細手術への適用を目的として、高度に小型化・多自由度化されたマニピュレータが開発されている^{1),2)}。これらの多くは関節の機構に剛体リンクを用いているが、一般に構造が複雑で部品点数も多くなり、整備性の悪化や製造コストの増大といった問題を生じる。このため関節機構の簡略化が実用上重要な課題である。

弾性体や連続体を主構造とする柔軟関節は、剛体リンク機構に比べはるかに構造が単純である。柔軟関節にはシャフト、ベアリング、プーリなどの部品が一切無く、内部のスペースを広く使えるという利点があるため、主として内視鏡の屈曲機構に用いられている^{3),4)}。これらは構造が非常に単純なため、本来小型化・多自由度化に適した構造であるが、マニピュレータに適用するためには機構の剛性を

高めることが必要となる。先行研究においては、超弾性合金ワイヤを多数のディスクで連結した屈曲機構が提案され、外径5mm前後の多自由度マニピュレータが開発された^{5),6)}。しかしこの機構においては、屈曲可動域および剛性を確保するための構成部品が多く必要であり、組み立てにも労力を要すると考えられる。

そこで本研究では、関節の主構造に切削加工型の高性能スプリングを採用し、その内部に超弾性合金の補強を施すことによって、最小限の構成部品で剛性の高い屈曲機構を提案する。本機構を用いて、屈曲2自由度を持つ鉗子マニピュレータを開発する。

また筆者らはこれまでに、力覚提示機能を有する空気圧駆動の鉗子マニピュレータを開発してきた^{7),8)}。最大の特徴は、空気圧駆動システムの持つ高いバックドライバビリティによって、鉗子先端に力センサを搭載することなく外力を推定できることである。本研究においてもマニピュレータに空気圧駆動システムを採用し、外乱オブザーバによる外力推定機能を実装する。オブザーバの設計にあたっては、柔軟関節を剛体リンク機構に近似した運動学モデルを導入し、より直観的で簡易なアルゴリズムによって外力推定を実現する。

*平成23年6月9日原稿受付

**東京工業大学大学院メカノマイクロ工学専攻
(所在地 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)
(E-mail: haraguchi.daa@m.titech.ac.jp)

***東京工業大学精密工学研究所
(所在地 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

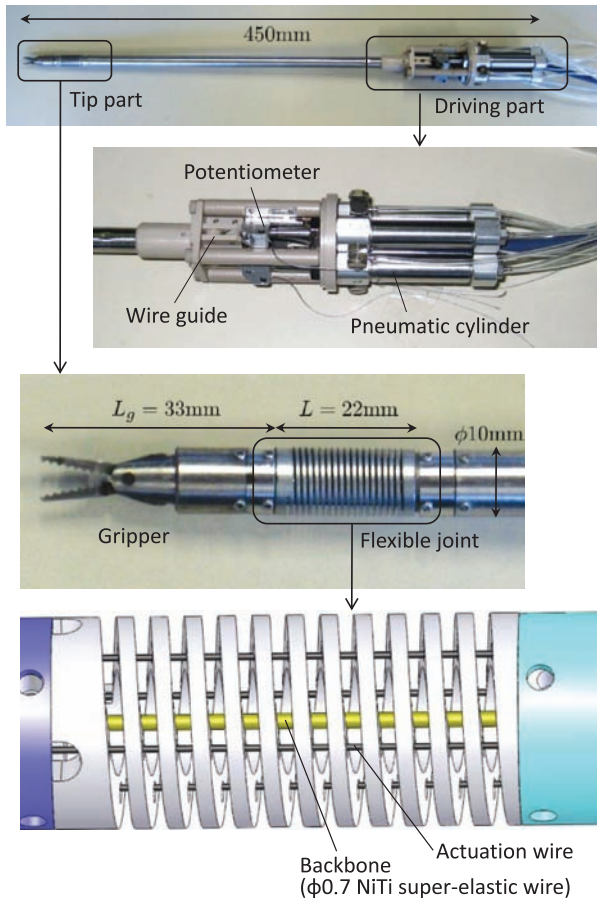


Fig. 1 Overview and joint mechanism of the forceps manipulator

Table 1 Properties of the spring component

Material	SUS303
Whole length	27mm
Outer diameter	10mm
Spring constant	2.5N/mm
Bending range	$\pm 60\text{deg}$

2. 鉗子マニピュレータの設計

試作した鉗子マニピュレータの外観および機構をFig. 1に示す。駆動部に4本の空気圧シリンダ（SMC社製，CJ2QB10-15）およびロッド位置計測のためのポテンシオメータを搭載し，先端部の柔軟関節をワイヤを介して駆動する。柔軟関節は，外殻のスプリングに4本のワイヤを通した構造となっており，拮抗駆動によって2自由度の屈曲が可能である。ここで外殻構造として用いたスプリング部材は，一般的な巻きばねと異なり，切削加工によって取付部やワイヤ通し穴などを含めて一体成型されている（Table 1参照）。この高性能スプリングによって，機構の部品点数を大幅に削減するとともに，屈曲機構の高い安定性を実現

した。ただし，駆動ワイヤの張力によってスプリング全体が圧縮してしまうと，屈曲可動域が確保できなくなることから，直径0.7mmのニッケルチタン超弾性合金ワイヤを中心に部に補強し圧縮に対する剛性を確保している。また，先端には空気圧グリッパ⁷⁾を採用しているため，関節の屈曲とグリッパの把持動作とが互いに干渉することはない。なお，本鉗子マニピュレータは先行研究⁷⁾において開発された4自由度の保持マニピュレータに搭載して操作することができる。

3. 空気圧駆動システム

3.1 システム概要

Fig. 2は，本鉗子マニピュレータの空気圧駆動システム全体の模式図である。ポテンシオメータからのシリンダ位置信号と，サーボ弁の出力ポートにおける圧力信号を制御用コンピュータに取り込み，サーボ弁への入力電圧を計算して出力するシステムである。シリンダの駆動力を計測するための圧力センサを制御システム側に配置することで，マニピュレータ側はセンサレスで駆動力を推定できるようになっている。

3.2 空気圧シリンダによる柔軟関節の拮抗駆動

本鉗子マニピュレータは，4本の空気圧シリンダによって2自由度のワイヤ拮抗駆動系を備えている。Fig. 3はそのうち1自由度の拮抗駆動系の模式図であり，各シリンダをそれぞれ1個の5ポート型サーボ弁（FESTO社製，MPYE-M5-B SA）により制御するシステムである。ここで拮抗駆動の2自由度状態変数として，各シリンダロッド位置 X から得られる変位パラメータ $d=[d_x, d_y]^T$ ，および各シリンダの駆動力 F から得られる駆動力パラメータ（拮抗駆動力） $w=[w_x, w_y]^T$ を導入する。 d は拮抗駆動をなすそれぞれのシリンダ組において，ワイヤをより引っ張る側のシリンダロッド位置で与える。これにより，駆動時のワイヤの弛みが関節の位置情報に及ぼす誤差を最小限に抑えることができる。また w はそれぞれのシリンダ組における駆動力の差として計算するものとする。具体的にFig. 3の場合で考えると，上記で導入した状態変数は次のように与えられる。

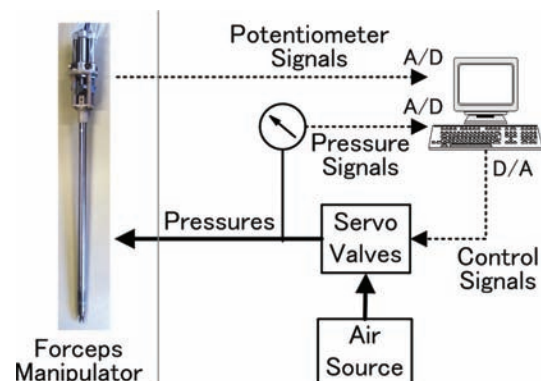


Fig. 2 Schematic diagram of the pneumatic driving system

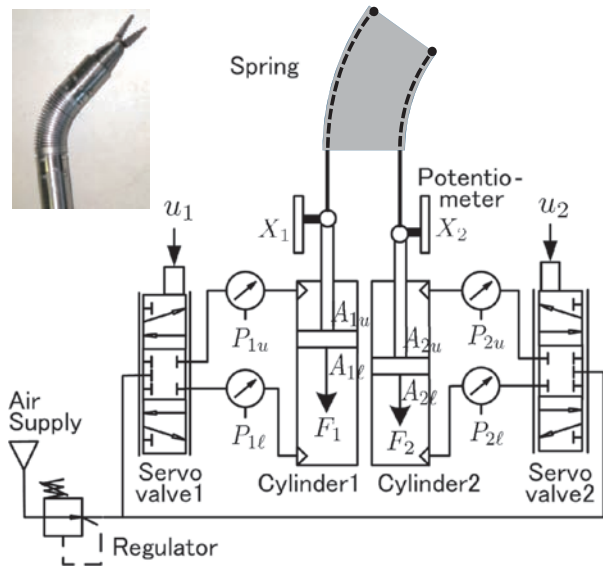


Fig. 3 Schematic of one-DOF tendon drive system

$$dx = \begin{cases} X_1 & (X_1 \leq X_2) \\ -X_2 & (X_1 > X_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$w_x = F_1 - F_2 \quad (2)$$

上式においてシリンダロッド位置 X_1 , X_2 はポテンシオメータにより直接計測され, またシリンダ駆動力 F_1 , F_2 は次の式により得られる.

$$F_1 = A_{1u}P_{1u} - A_{1l}P_{1l} \quad (3)$$

$$F_2 = A_{2u}P_{2u} - A_{2l}P_{2l}$$

ここで記号 A はシリンダの受圧面積を, P はサーボ弁の出力ポートにて計測される圧力をそれぞれ表わしている. なおサーボ弁からシリンダまでの配管内空気の動特性に係る影響については, 本研究では無視できると仮定する. またシリンダ摺動部の摩擦については上式で考慮していないが, 拮抗駆動の動力学モデル式(8)においてシステム全体の摩擦項に含める形でモデル化しているため, 位置制御や外力推定を行う上では問題とならない.

一方, 拮抗駆動のための各シリンダ駆動力 F の制御則は, 以下に示すような拮抗駆動力 w の分配則によって与えられる. 次式はFig. 3に示した1自由度の場合で,

$$F_{1ref} = F_0 + \frac{|w_{xref}| + w_{xref}}{2} \quad (4)$$

$$F_{2ref} = F_0 + \frac{|w_{xref}| - w_{xref}}{2}$$

となる. 式中の添え字refは制御目標値であることを示す. なお拮抗駆動力の目標値 w_{xref} の計算については, 5.1節で説明する. この分配則によってシリンダ駆動力は常に F_0 以上の値となり, シリンダの摩擦などを無視すれば駆動ワイヤの張力は理論上 F_0 以上に保たれる. つまりワイヤの弛みを排除することにより位置制御の剛性を高めると同時に, 外力推定に不可欠な機構のバックドライバビリティを高く維持することができる. 実装においては, あらかじめ関節の

直線状態でワイヤ最低張力 F_0 を作用させ, 弛みを取り除いてからシリンダ位置 X (ポテンシオメータ)を初期化しているため, 式(1)で表わされる位置パラメータ d が不連続となることはない.

4. 柔軟関節のモデル化

4.1 運動学モデル

柔軟関節の運動学は, 連続体モデル⁹⁾により記述できる. 本モデルでは柔軟関節の2自由度屈曲を表すため, 角度に関する位置座標 $q = [\delta, \theta]^T$ を定義する. Fig. 4に示すように, δ は屈曲方向, θ は屈曲角度として独立に与えられる. また本モデルにおいて, 柔軟関節は中心長さ L が変わることなく理想的な円弧状に屈曲するものと仮定する. 以上の条件により, 前項で定義した拮抗駆動系の変位 d と, 関節位置 q との運動学的関係が次式で与えられる.

$$d = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\theta \cos \delta \\ r\theta \sin \delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中の r は各ワイヤの配置円の半径(本試作機では4mm)を表す. 次に関節位置を拮抗駆動系の各自由度に独立に対応させて記述するため, 新たな角度パラメータ $\phi = [\phi_x, \phi_y]^T$ を用いて以下のように書きかえる.

$$d = r\phi, \quad (6)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \cos \delta \\ \theta \sin \delta \end{bmatrix} \quad (0 \leq \delta < 2\pi, 0 \geq \theta) \quad (7)$$

これにより柔軟関節の位置座標を, 拮抗駆動系に対応するリンク機構の角度のように取り扱うことができる. ただし関節が直線状態($\phi_x = \phi_y = 0$)のとき式(7)より $\theta = 0$ となるが, δ の解が無数に存在する. このときは形式的に $\delta = \delta_{ref}$ (制御目標値)とすることにより関節位置座標を一意に決定する. 本研究ではこの角度パラメータ ϕ を, 位置制御系における制御状態量として利用する.

さらにFig. 4に示すように, いくつかのローカル座標系を定義しておく. ベース座標系 $\{x_b, y_b, z_b\}$ は柔軟関節の根元中心部に位置し, x_b, y_b 軸がそれぞれ1番, 3番のワイヤ穴上を通るように定義する. これがマニピュレータの運動を記述する際の慣性座標系にあたる. 次に屈曲平面座標系

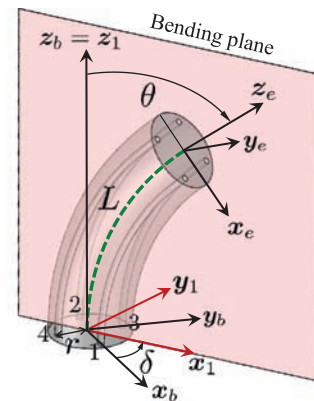


Fig. 4 Nomenclature and coordinates of a continuum model

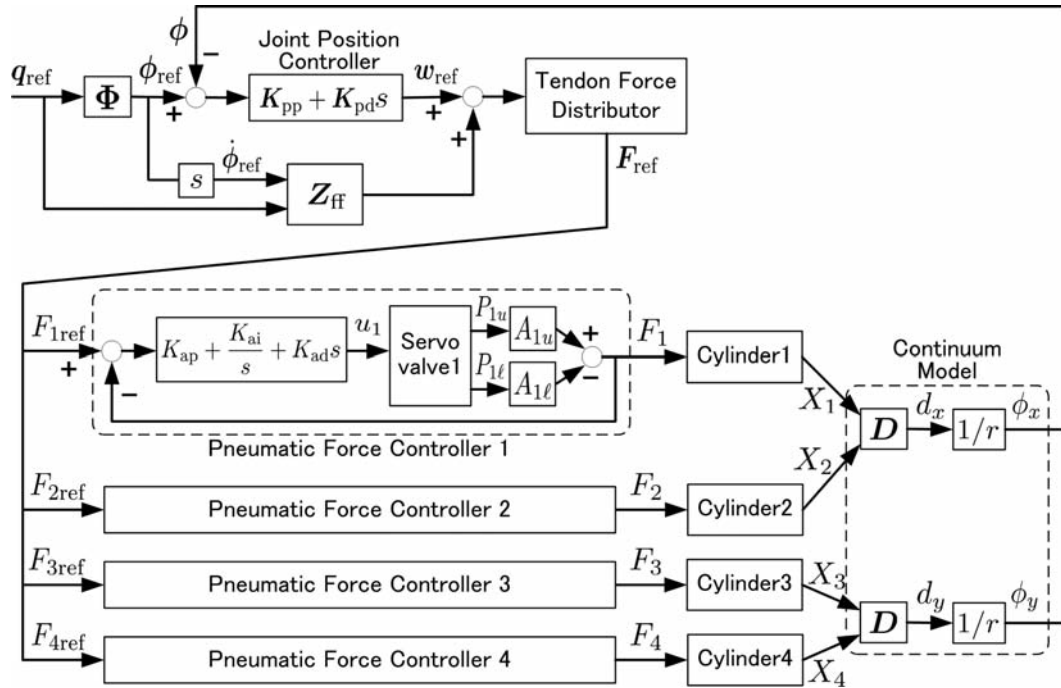


Fig. 5 Block diagram of the joint position control system

$\{x_1, y_1, z_1\}$ は、ベース座標系を z_0 軸まわりに δ だけ回転させた座標系であり、すなわち x_1-z_1 平面が関節の屈曲方向平面をなす。そしてエンド座標系 $\{x_e, y_e, z_e\}$ は柔軟関節の先端中心部に位置し、屈曲平面座標系を y_1 軸まわりに θ だけ回転させた座標系である。以上により定義した座標系は、次節で説明する外乱オブザーバの構築に際して必要となる。

4.2 動力学モデル

関節の動力学についても位置座標と同じく拮抗駆動系で記述する。拮抗駆動系の機械インピーダンス Z を、関節位置座標 ϕ および q の関数として次式で与えるものとする。

$$Z = M\ddot{\phi} + C\dot{\phi} + D\text{sign}(\dot{\phi}) + K(q) \quad (8)$$

式中の第1項は慣性項である。マニピュレータ先端の質量は小さく比較的低速での駆動を想定していることから、他の項に比べて影響が非常に小さいと考えられるため、ここでは慣性項を無視する。同様に重力加速度の影響も考えないものとする。第2項は粘性摩擦、第3項はクーロン摩擦に関する項であり、具体的にはシリンダの摺動摩擦および機構ワイヤ間の摩擦を表している。それぞれの係数 C および D は定数として実験的に決定した。第4項は弾性力項であり柔軟関節の静力学に由来する。柔軟関節の静力学は仮想仕事の原理を用いて以下のように求められる。まず式(5)を時間微分することにより、ヤコビ行列 J_d を得る。

$$\dot{d} = J_d \dot{q}, \quad J_d = \begin{bmatrix} r \theta \sin \delta & -r \cos \delta \\ -r \theta \cos \delta & -r \sin \delta \end{bmatrix} \quad (9)$$

次に、関節位置座標 q についての一般化力 $\tau_q = [\tau_\delta, \tau_\theta]^T$ を考えると、仮想仕事の原理により τ_q と拮抗駆動力 w の関係を次式で表わすことができる。

$$\tau_q = J_d^T w \quad (10)$$

柔軟関節を等方的な曲げ剛性を持つ弾性ロッドと仮定すると、関節の弾性エネルギーは屈曲角度 θ のみに依存して変化する。つまり式(10)を、 $\tau_\delta = 0$ の条件のもとに w について解くことにより、柔軟関節の静力学が得られる。

$$w = \frac{\tau_\theta}{r} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} = K(q) \quad (11)$$

なお本研究では、 τ_θ を線形近似により実験的に同定した。

5. 柔軟関節の運動制御

5.1 位置制御システムの設計

Fig.5は、柔軟関節の位置制御系ブロック線図である。関節位置制御ループの内側に空気圧駆動力の制御ループを組み込み、カスケード制御系を構築した。なおシステムの制御周期は1msで、本鉗子マニピュレータの位置および駆動力制御には十分高速である。以下に制御の流れについて説明する。

まず与えられた目標位置 q_{ref} を、式(7)で表わされる関数 Φ によって角度パラメータ ϕ に変換する。位置制御ループにおいては ϕ を制御変数に用いており、PD制御則により拮抗駆動力の目標値 w_{ref} を計算する。また式(8)で示した関節の動力学モデルに基づき、拮抗駆動力のフィードフォワード補償 Z_{ff} を実装し応答性を向上させている。次に式(4)に示した分配則によって、拮抗駆動力 w_{ref} から各シリンダの目標駆動力 F_{ref} を決定する。それぞれの駆動力制御ループにおいては、PID制御則によりサーボ弁への入力電圧を計算し、式(3)のように推定されるシリンダ駆動力 F を制御する。そして計測された各シリンダ変位 X から、式(1)のように表

Table 2 Gain parameters used in the experiments

K_{pp}	2.0	N/rad	(For both x and y axis)
K_{pd}	0.01	Ns/rad	
K_{ap}	0.20	V/N	(For all cylinders)
K_{ai}	2.0	V/Ns	
K_{ad}	0.001	Vs/N	

Table 3 Reference inputs applied in the experiments

	δ_{ref} [deg]	θ_{ref} [deg]
Case 1	30 (const.)	$50 \sin \pi t$ (0.5Hz)
Case 2	30 (const.)	$50 \sin 4\pi t$ (2.0Hz)
Case 3	$85 \sin 2\pi t$ (1.0Hz)	30 (const.)

わされる関数 D によって拮抗駆動系の変位 d を求め、式(6)に示した柔軟関節の運動学により現在の関節角度 ϕ を得ている。

5.2 位置制御実験

設計した制御システムを用いて位置制御実験を行い、応答性の検証を行った。制御システムにおける各ゲインパラメータ (Fig.5参照) はTable 2のように設定し、関節の目標位置入力を3種類のケースについてTable 3のように与えた。また、式(4)に示した拮抗駆動におけるワイヤの最低張力 F_0 を0.5Nに設定した。

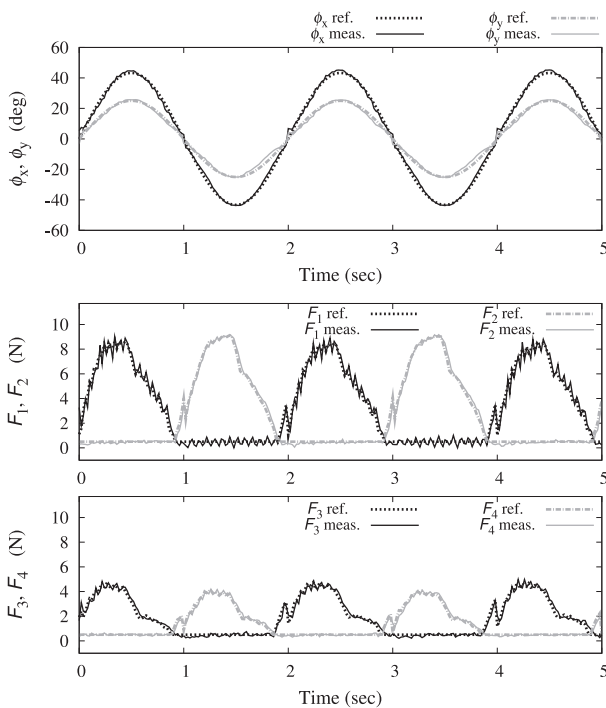


Fig. 6 Experimental results of the joint position control in the case 1: the joint positions (upper) and the pneumatic driving forces (middle, lower)

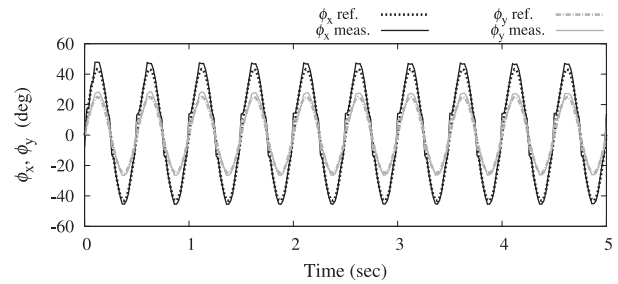


Fig. 7 Experimental results of the joint position control in the case 2

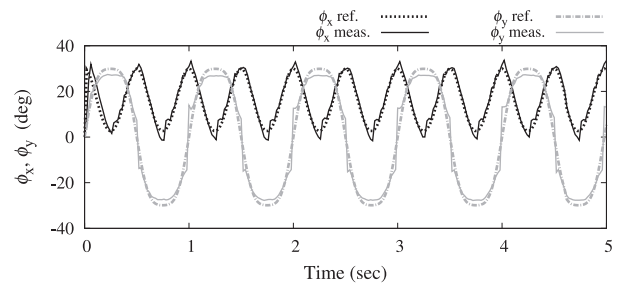


Fig. 8 Experimental results of the joint position control in the case 3

まずFig. 6は、Case 1における関節位置及びシリンダ駆動力の時間応答のグラフである。関節位置については、拮抗駆動の状態を示すため ϕ_x 、 ϕ_y を用いて表わしており、本ケースでは非常に滑らかで良好な目標追従性を確認できる。しかし屈曲角度が 0° 付近で、わずかだが急激に変化する現象が見られる。これは柔軟関節内部の超弾性合金が、外殻スプリングの復元力やワイヤ張力を受けて座屈し、屈曲方向の飛び移りを引き起こしたことが原因と考えられる。また駆動力については、サーボ弁によっては応答がやや振動的になるものの、全体として良好な目標追従性を確認できる。すべての駆動力が常に最低張力以上に保たれており、ワイヤが過度に弛むことなく拮抗駆動が実現できたと考えられる。

次にFig. 7は、Case 2における関節位置の時間応答を示している。本ケースは、位置目標入力の周波数をCase 1より大きくしたものである。結果としては、関節の最大屈曲点において若干のオーバーシュートが見られるものの、位相が遅れることはなく全体として良好な追従性が得られている。一般的な手術タスクに必要な動作周波数は最大でも2~3 Hz程度であることから、制御系自体の帯域幅は十分であると言える。

次にFig. 8は、Case 3における関節位置の時間応答を示している。本ケースは、各拮抗駆動の動作周波数および動作中心が異なる複雑な動きである。結果をみると、屈曲角度 0° を中心とする広い範囲で、前述の飛び移り現象が顕著に表れている。この原因としては、複雑に変化するワイヤ駆動力に対して関節内部の超弾性合金が所望の方向にスムーズに屈曲できず、拮抗駆動の自由度間の干渉が大き

なったことが挙げられる。また ϕ_y 方向の最大屈曲角が目標値に届かず、顕著な位置偏差となっている。これは柔軟関節の動力学モデル、特に弾性力モデルの誤差によって、拮抗駆動力に対するフィードフォワード補償が適切に行われなくなったためと考えられる。なお空気圧シリンダの静止摩擦（0.5N程度）も原因の一つではあるが、これは関節の屈曲に要する駆動力に比べると十分小さく、Fig. 6およびFig. 7の結果を踏まえると今回の位置偏差に対する影響は少ないものと考えられる。

以上の位置制御実験により、構築した制御システムの有効性を確認した。しかし関節構造である超弾性合金の座屈に起因して、位置制御精度が悪化する問題点も明らかとなった。

6. 外力の推定

6.1 外乱オブザーバ

本研究では外乱オブザーバを用いて、マニピュレータ先端にかかる外力の推定を行う。以下にオブザーバの設計方法について述べる。

まず関節の運動方程式を、拮抗駆動系で以下のように記述する。

$$\dot{w} + w_{\text{ext}} = Z \quad (12)$$

式中の $w_{\text{ext}} = [w_{x_e}, w_{y_e}]^T$ は拮抗駆動系にかかる外力を表す。拮抗駆動力 w は各シリンダ駆動力 F から得ることができ、また関節の動力学 Z は前節で示した理論モデルにより $\hat{Z}$ として同定すれば、拮抗駆動系の外力を次式により推定することができる。

$$\dot{w}_{\text{ext}} = \hat{Z} - J_a F \quad (13)$$

なお J_a は F から w への変換行列である。次に、求めた外力 $\dot{w}_{\text{ext}}$ は式(10)により関節座標系の一般化力 $\hat{\tau}_{\text{ext}} = [\tau_{\delta_e}, \tau_{\theta_e}]^T$ に変換できる。

$$\hat{\tau}_{\text{ext}} = J_d^T \dot{w}_{\text{ext}} \quad (14)$$

マニピュレータ先端にかかる外力 $\hat{f}_{\text{ext}} = [f_x, f_y, f_z]^T$ を得るためには、関節座標 q から先端座標 p_t へのヤコビ行列 J_t (3×2)を用いる方法が理論上厳密である。しかしこの方法は擬似逆行列の計算を必要とするため、マニピュレータの特異点である $\theta = 0^\circ$ 付近での計算精度が悪化するという問題がある。

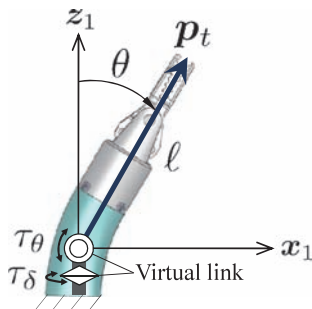


Fig. 9 Concept of the link approximation in force estimation

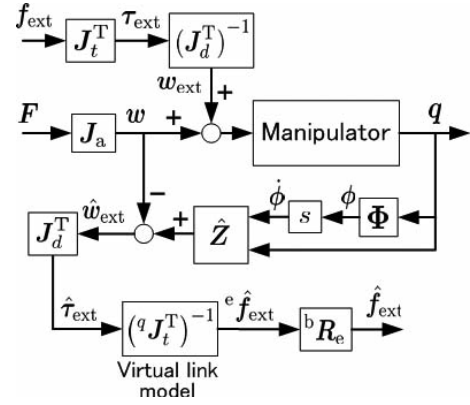


Fig. 10 Block diagram of the disturbance observer

る。そこで本研究では外力推定の第一段階として、連続体モデルの代わりに近似的なリンクモデルを導入し、少ない計算量でより直観的な解を得ることを試みる。リンク近似モデルの概念図をFig. 9に示す。このモデルにおいては、柔軟関節の中心に仮想的な回転および屈曲のリンク機構があると仮定する。この仮定によれば、関節座標系における一般化力 τ_δ, τ_θ は、仮想リンクまわりのトルクに対応している。すると、先端にかかる外力の各リンク方向成分 $\hat{f}_{\text{ext}} = [f_{\delta_e}, f_{\theta_e}]^T$ が、対角ヤコビ行列 ${}^q J_t$ を用いて解析的に求められる。

$$\begin{aligned} \hat{f}_{\text{ext}} &= ({}^q J_t^T)^{-1} \hat{\tau}_{\text{ext}} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{r\theta}{\ell \sin \theta} (w_x \sin \delta - w_y \cos \delta) \\ -\frac{r}{\ell} (w_x \cos \delta + w_y \sin \delta) \end{bmatrix}, \\ {}^q J_t &= \begin{bmatrix} \ell \sin \theta & 0 \\ 0 & \ell \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

式中の ℓ はFig. 9に示した仮想リンク長である。モデルの定義によれば、 ℓ は柔軟関節の長さ L およびグリッパ部長さ L_g を用いて $\ell = L/2 + L_g$ と表わせる。本研究においては、Fig. 1より $\ell = 44\text{mm}$ となる。ちなみに、 $\hat{f}_{\text{ext}}$ は特異点 $\theta = 0^\circ$ においても、 $\delta = \delta_{\text{ret}}$ としてロピタルの定理を適用することにより求めることができる。求めた外力成分 $f_{\delta_e}, f_{\theta_e}$ はそれぞれ y_e 軸、 x_e 軸方向の成分であるから（Fig. 4参照）、次式の座標変換によって慣性系（ここではベース座標系）で表わした外力ベクトル $\hat{f}_{\text{ext}}$ を得ることができる。

$$\hat{f}_{\text{ext}} = {}^b R_e {}^q \hat{f}_{\text{ext}} \quad (16)$$

上式において ${}^b R_e$ はエンド座標系 $\{x_e, y_e, z_e\}$ からベース座標系 $\{x_b, y_b, z_b\}$ への回転行列を表す。以上の考え方によって構築した外乱オブザーバのブロック線図をFig. 10に示している。

6.2 外力推定実験

前項で構築したオブザーバの有効性を実験により評価する。本研究ではリンク近似モデルに対する評価の第1段階として、単一自由度（ ϕ_x ）方向についての外力推定実験を

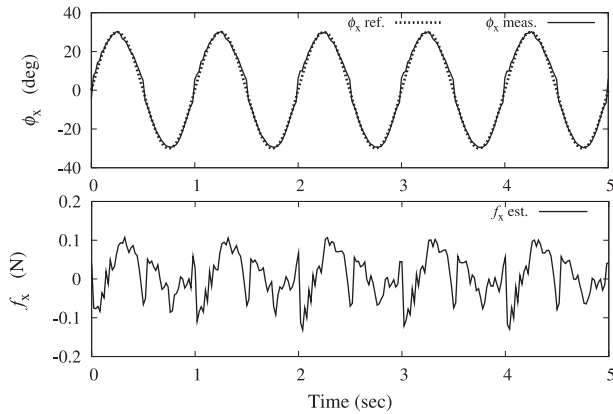


Fig. 11 Experimental results of the external force estimation during the one-DOF free motion : the joint position (upper) and the estimated force (lower)

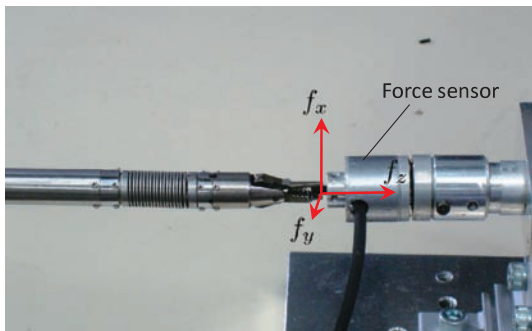


Fig. 12 Experimental setup for force measurement

行った。本実験は制御系の各ゲインおよび拮抗駆動の最低張力 F_0 を52節と同様に設定し、以下に示す位置制御入力を与えて外力推定を行うものとした。

$$\begin{aligned}\delta_{\text{ref}} &= 0 \quad [\text{deg}] \\ \theta_{\text{ref}} &= 30\sin 2\pi t \quad [\text{deg}]\end{aligned}\quad (17)$$

まずFig. 11は、鉗子マニピュレータを無負荷で自由運動させたときの位置および外力推定値の時間変化を示す。この実験における所望の外力推定値は0Nであるから、実際には $\pm 0.1\text{N}$ 程度の推定誤差が生じていることになる。これはオブザーバに用いた動力学モデルの誤差に起因するものであり、精度向上のためにはより厳密なモデル化を行う必要がある。

次にFig. 12に示すように、鉗子のグリップを力センサの受感部に噛ませて固定し、式(17)の位置目標を与えて実験を行った。このときの関節位置、オブザーバによる外力推定値および力センサの計測値をFig. 13に示す。この実験においては、外力の計測値と推定値とで局所的に最大0.2N程度の誤差が生じている。これは先端を固定したことによって関節内の超弾性合金が座屈し、屈曲方向の飛び移り（52節参照）の影響が大きくなったためと考える。しかしそれ以外の部分では $\pm 0.1\text{N}$ 程度の誤差範囲内に収まっており、自由運動時と同じ推定精度が得られている。すなわち外力推定の簡易アルゴリズムとして導入したリンク近似モデルは、

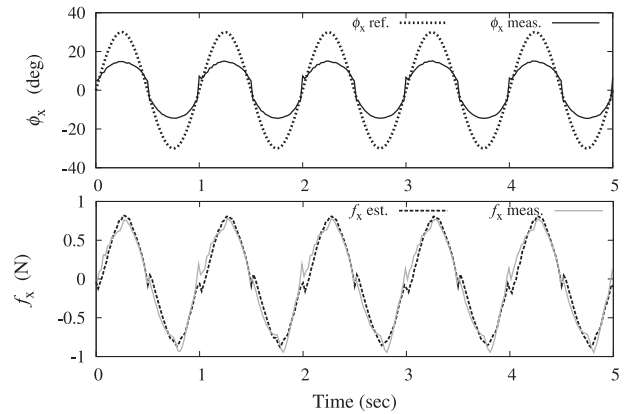


Fig. 13 Experimental results of the external force estimation : the joint position (upper), the estimated and the measured force (lower)

本実験のような1自由度方向の外力検出に対して有効であると言える。

7. 結 言

本研究では小型化・実用化に適した2自由度の柔軟屈曲関節を用いて、空気圧駆動による鉗子マニピュレータを開発した。

- 1) 柔軟関節の構造は、外殻の高性能スプリング部材に超弾性合金ワイヤの補強を加えたもので、従来の構造に比べ大幅な部品点数の削減を達成した。
- 2) 空気圧シリンダによって2自由度の拮抗駆動をマニピュレータに実装し、連続体モデルを用いて位置制御システムを設計した。位置制御実験の結果、制御系としては手術タスクに十分な応答性を持つことを確認したが、関節構造である超弾性合金の座屈変形により位置制御精度が悪化する問題点も明らかとなった。
- 3) リンク近似モデルを用いて外乱オブザーバを設計し、第1段階として関節の直線姿勢における外力推定の有効性を確認した。

今後の課題としては、任意の屈曲状態における外力推定精度の検証が挙げられる。リンク近似モデルにおいては、関節の屈曲角度が増加するにつれて柔軟体モデルとの先端位置誤差が増加するため、これに起因する外力推定誤差の定量的な評価が必要と考える。ただし現試作機においては、超弾性合金の座屈に起因する動力学の非線形要因の影響が大きくなると予想されることから、まずハードウェアの改良を行い座屈の起こりにくい関節構造とする必要がある。具体的には、スプリング中心の穴径を小さくすることによって超弾性合金を周囲から支持し、圧縮応力を均一に分散させる方法を検討している。

謝 辞

本研究に際し、東京工業大学・香川利春教授に多くのご助言をいただいた。ここに記し感謝の意を表する。また本研究は、科学研究補助金基盤研究B（課題番号：21360114）およびJST CREST（研究課題名：「知覚中心ヒューマンインターフェースの開発」）の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) Ikuta, K., Sasaki, K., Yamamoto, K., Shimada, T. : Remote Microsurgery System for Deep and Narrow Space-Development of New Surgical Procedure and Micro-robotic Tool, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2002, Vol. 2488 of Lecture Notes in Computer Science, p. 163-172 (2002)
- 2) Yamashita, H., Matsumiya, K., Masamune, K., Liao, H., Chiba, T., Dohi, T. : Two-DOFs Bending Forceps Manipulator of 3.5-mm diameter for Intrauterine Fetus Surgery : Feasibility Evaluation, the 20th International Congress and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery (2006)
- 3) Hirose, S. : Biologically Inspired Robots : Serpentine Locomotors and Manipulators, Oxford University Press (1993)
- 4) Choi, D.-G., Yi, B.-J., Kim, W.-K. : Design of a spring backbone micro endoscope, Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, p. 1815-1821 (2007)
- 5) Simaan, N. : Snake-Like Units Using Flexible Backbones and Actuation Redundancy for Enhanced Miniaturization, Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on, p. 3012-3017 (2005)
- 6) Wei, W., Xu, K., Simaan, N. : A Compact Two-armed Slave Manipulator for Minimally Invasive Surgery of the Throat, Biomedical Robotics and Biomechanics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on, p. 769-774 (2006)
- 7) Tadano, K., Kawashima, K., Kojima, K., Tanaka, N. : Development of a Pneumatic Surgical Manipulator IBIS IV, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 2, p. 179-188 (2010)
- 8) Tadano, K., Kawashima, K. : Development of a Master Slave System with Force-Sensing Abilities Using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery, Advanced Robotics, Vol. 24, No. 12, p. 1763-1783 (2010)
- 9) Xu, K., Goldman, R., Ding, J., Allen, P., Fowler, D., Simaan, N. : System design of an Insertable Robotic Effector Platform for Single Port Access (SPA) Surgery, Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on, p. 5546-5552 (2009)

研究論文

突発的な負荷を考慮した 6 自由度人工筋肉マニピュレータの手先剛性制御*

戸 森 央 貴**, 田 中 大 資**, 前 原 正 典**,
加 茂 大 地**, 中 村 太 郎***

End-Effector Stiffness Control of 6-DOF Artificial Muscle Manipulator Considering Instantaneous Load

Hiroki TOMORI, Daisuke TANAKA, Masanori MAEHARA, Daichi KAMO, Taro NAKAMURA

Robots have entered human life, and closer relationships are being formed between humans and robots. It is desirable that these robots be flexible and lightweight. For this reason, we studied and developed an artificial muscle actuator using straight-fiber-type artificial muscles derived from the McKibben-type muscles, which have excellent contraction rate and force characteristics. Therefore, we developed a 6-DOF artificial muscle manipulator, which has a wider moveable range than that using McKibben-type artificial muscle. However, this manipulator vibrates when receiving a sudden load, because the artificial muscle is flexible. For this problem, we suggest that control of joint stiffness is effective. In this paper, we controlled joint stiffness of the 6-DOF artificial muscle manipulator, and obtained a compliance ellipse of the end-effector. In addition, this manipulator controlled vibration of the end-effector by changing joint stiffness depending on the position of the end-effector.

Key words : Hydraulic system, Pneumatic system, Water hydraulic system

1. 緒 言

近年、ロボットが様々な場面で人間生活に進出している。特に、高齢化社会を迎えるにつれて、介護・リハビリテーションロボットの需要は年々増加している。これらのロボットは人間と密接に接した環境で活動するため、人間と接触した際の安全確保や、人間と同じ動作特性を持つことが求められている。現在このような人間共存型ロボットの仕様を実現させるアクチュエータとして一般的にMcKibben型空気圧ゴム人工筋肉^{1)~4)}が注目されている。この人工筋肉は人間に近い筋特性を持ち、柔軟である特徴を有しているため、人間と近い環境で活躍するロボットのアクチュエータとして適していると考え、一方、著者らが開発し、本研究で使用している軸方向繊維強化型人工筋肉^{5)~10)}は、従来のMcKibben型ゴム人工筋肉比べ収縮率や収縮力が高く、寿命が長いという長所を有している¹¹⁾。したがって、本人工筋肉をマニピュレータに適用することで可動領域や剛性制御の範囲が広がることを期待できる。

現在まで、空気圧人工筋肉を用いた多自由度マニピュレータに関する研究はいくつか報告されている。岡崎ら¹²⁾はMcKibben型人工筋肉を用いた 6 自由度のマニピュレータを開発している。また則次ら¹³⁾や川嶋^{14),15)}はそれぞれ理学療法や災害現場での適用を想定したマニピュレータを開発している。さらに、Tonduraらはヒューマノイドロボットのための 7 自由度のマニピュレータの開発をおこなっている¹⁶⁾。しかしながら、いずれの研究もMcKibben型人工筋肉を用いているため、アームの稼動範囲が狭いといった課題がある。また、人工筋肉はその柔軟性ゆえに、位置制御が非常に困難である。岡崎ら¹²⁾や藤本ら¹⁷⁾によって剛性制御を含めた位置制御に関する検討は行われているものの、十分とは言えない。したがって、人工筋肉の柔軟性により外乱の影響を受けやすく、手先に突発的な負荷が加わった際にマニピュレータが不安定化する問題があった。一般的には、アームにかかる負荷トルクを補償する制御が広く用いられているが、負荷トルクの変動時に手先の位置が変動してしまう。一方、剛性制御を用いた場合は、負荷トルクの変動にかかわらず手先を維持することができるという利点がある。

これまでに、著者らは単関節を有する人工筋肉マニピュレータを用いて関節剛性制御を検討した¹⁸⁾。また、前述のような人間とロボットを取り巻く環境を鑑みると、マニピュレータの多自由度化は重要な事項である。そこで、著者らは軸方向繊維強化型人工筋肉を用いた6-DOFマニピュ

*平成23年 6 月29日 原稿受付

**中央大学大学院理工学研究科

(所在地 東京都文京区春日 1-13-27)

(E-mail : h_tomori@bio.mech.chuo-u.ac.jp)

***中央大学

(所在地 東京都文京区春日 1-13-27)

レータの開発とその位置制御手法の検討をおこない、人間の腕と同等の広い可動範囲を持つマニピュレータの開発に成功している^{6),19)}。しかしながら、本マニピュレータの各関節剛性によって生まれる手先の剛性については未検討である。本マニピュレータが人間と共同作業をおこなう場合に最も人間と接触する部分は手先であるため、手先の剛性制御は有用である。また、人工筋肉マニピュレータにより高度な動作（手先で字を描いたり、人間と一緒にものを運ぶといった協調作業）をさせるためには、周辺環境に応じて各関節剛性を変化させる必要がある。人工筋肉を用いた剛性制御としては、大島らが二関節筋を有する2関節マニピュレータによって手先の剛性楕円体を解析しているが、生物学的知見からの検証にとどまっている²⁰⁾。

そこで、本研究では6自由度マニピュレータに手先の関節剛性制御を取り入れる。まず、ヤコビ行列から各関節の剛性 K_j を導出する。また、手先の変位量をシミュレーションで算出し、各関節剛性を变化させた際の剛性楕円体を求め、実際に手先に負荷を加える実験を行い、シミュレーションと比較を行った。さらに、高剛性領域を設定して、一定負荷時の押し付け力の検討と負荷に対する安定性の検討を行う。

2. 軸方向繊維強化型人工筋肉

2.1 本人工筋肉の概要

本研究で使用した軸方向繊維強化型人工筋肉の概略図をFig.1に示す。本人工筋肉は素材に天然ラテックスゴムを使用しており、ゴムをチューブ状に成形し、ゴム内部の軸方向へカーボンロービング繊維を内包した構造を有する。このとき、層状に繊維を配置することで一部のゴムの過膨張を防ぎ、耐久性、効率を向上させている。

本人工筋肉に空気圧を供給すると、ゴム膜は膨張するが、繊維は伸びないため軸方向の長さは拘束される。その結果、人工筋肉は半径方向に膨張して軸方向に収縮する。このときの収縮力をアクチュエータとして利用する。ここで、軸方向繊維強化型人工筋肉とMcKibben型人工筋肉の収縮力をFig.2に示す。比較に用いた人工筋肉は両者とも同じ寸法であり、内径10mm、長さ180mmである。Fig.2より、本人工筋肉はMcKibben型人工筋幾に比べ大きな収縮力を発生できることがわかる。また、本人工筋肉は非常に軽量であり、

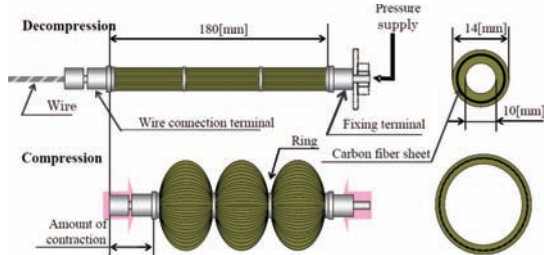


Fig. 1 Straight-fiber-type artificial muscle

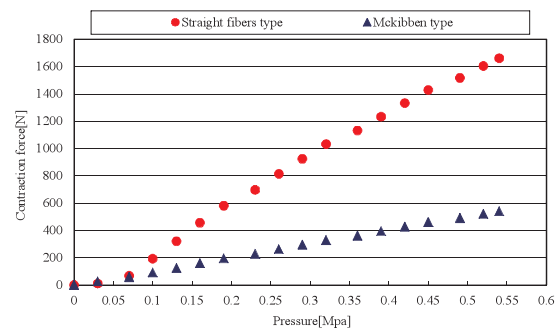


Fig. 2 Relationship between pressure and contraction force

柔軟性と衝撃吸収能力を有しており、構造的に安全なロボットの実現が可能である。しかし、外乱の影響を受けやすく、非線形特性も有するため、制御が難しいという面も持っている。

2.2 6-DOF人工筋肉マニピュレータ

本研究で使用した6-DOF 人工筋肉マニピュレータの概要をFig.3に示す。本マニピュレータは一つの関節に対してプーリを介して人工筋肉を拮抗させる構造をとっており、本構造と各人工筋肉の圧力を制御することにより関節角度と剛性を独立に制御することができる。また、制御システムに力学的平衡モデルを導入することで、非線形特性と外乱の影響を補償し制御性能を向上させている²¹⁾。さらに、手先が任意の位置・姿勢がとれるように、肩3自由度、肘1自由度、手首2自由度と設定して、人間の腕に近い関節配置になるように設計した。

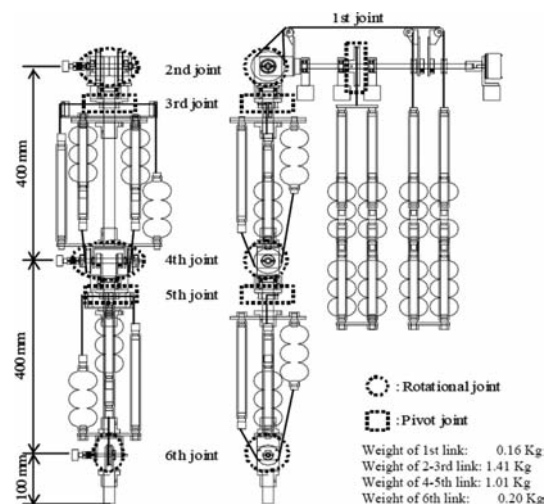


Fig. 3 Schematic diagram of 6-DOF manipulator actuated with straight-fiber-type artificial muscle

3. 1 自由度マニピュレータの剛性制御

3.1 1 自由度マニピュレータ関節剛性モデル

Fig. 3の人工筋肉間の配置を考慮すると、Fig. 4のように関節は2つのバネとプーリにより構成されているとみなせる。本モデルに基づき人工筋肉の関節剛性条件式²²⁾を求めると、力学的平衡関係から式(1)の関係が成り立つ。また、本人工筋肉の剛性 k_i は一定の収縮範囲内において、印加圧力に対し線形的に変化する。そこで、 k_i を k_{ai} と P を用いて表し、式(2)を得る。しかし、本人工筋肉は粘弾性を有しており、剛性の整定には0.2s程度を要する⁸⁾。そのため、これを上回る速度でマニピュレータを動作させると式(2)が成立しない場合が生じる。

$$\Delta\tau = (k_1\Delta\theta - k_2\Delta\theta) \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (1)$$

$$k_j = \frac{\Delta\tau}{\Delta\theta} = (k_{a1}P_1 + k_{a2}P_2) \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2)$$

ここで、 k_{ai} は人工筋肉のバネ要素の剛性係数であり、負荷トルクがかからない場合の拮抗力を F とし、そのときのバネの伸びは x 、 d はプーリ直径、 $\Delta\tau$ は負荷トルク、 Δx_i は負荷トルクによるバネの変位量、 F_i はバネの発生力、 $\Delta\theta$ は負荷による変位角、 K_j は関節剛性を表す。

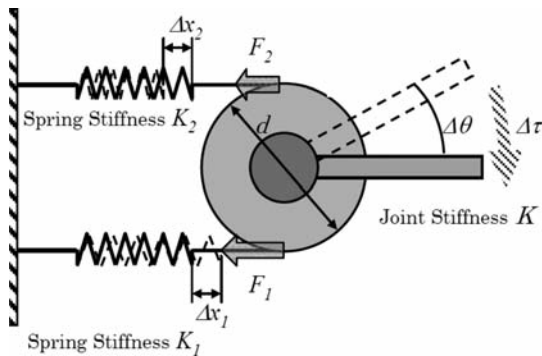


Fig. 4 Schematic diagram of a spring model of the joint

3.2 フィードフォワード制御

本研究で使用した1 自由度人工筋肉マニピュレータの実験システムをFig. 5に示す。また本制御系のブロック線図をFig. 6に示す。力学的平衡モデル (Mechanical Equilibrium Model) は関節角度 θ_d 、目標関節剛性、負荷トルクに対応する圧力 P_1 、 P_2 を算出することができる。負荷トルクはFig. 5のLoad sensorによって計測された負荷から算出し、力学的平衡モデルへ入力する。また、角度制御を行うため、関節角度を目標角度とする。これをフィードフォワード制御として関節角度制御に使用することで、目標角度と出力角度の線形化を行う。また、同時に任意に関節剛性を変動させることも可能となる。

Fig. 7に定常状態における一定剛性 ($K_j = 0.15 \text{ Nm/deg}$, 0.2 Nm/deg , 0.25 Nm/deg) で負荷を変化させたときの実験

結果を示す。実験結果より負荷が増加すると誤差が大きくなっていることから、フィードフォワード制御のみでは十分に剛性制御ができないことが分かる。

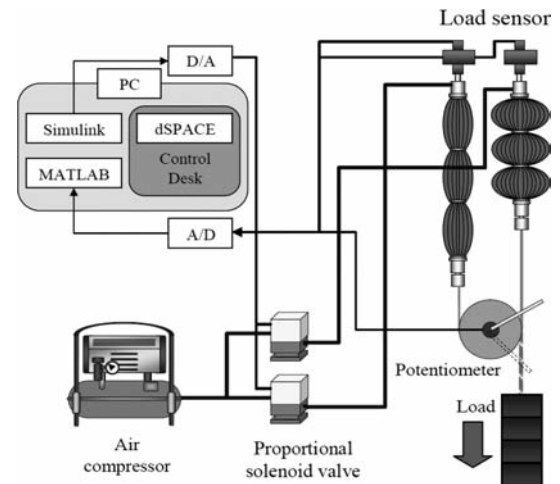


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental system

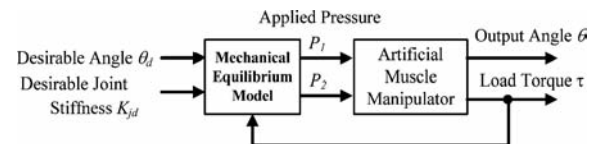


Fig. 6 A block diagram of feedforward control using the mechanical equilibrium model

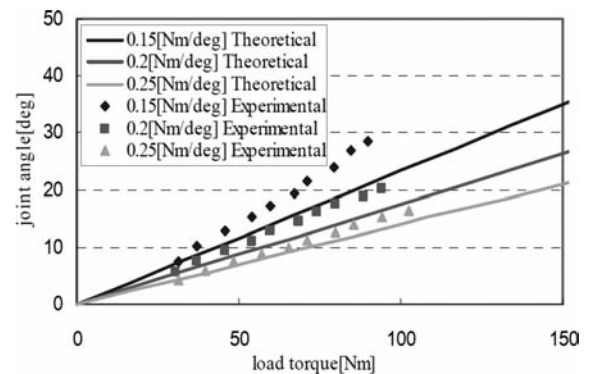


Fig. 7 Relationship between joint angle and load torque in the steady-state (feedforward)

3.3 トルクベース型制御

トルクベース型制御は一般的な剛性制御手法であり、位置制御により剛性を制御するため、その動作特性は角度制御に依存する。また、外力によるトルク変化がなければ剛性を測定することはできない。式(1)に基づき、本人工筋肉のトルクベース型制御を構成した。本制御系のブロック線図をFig. 8に示す。本制御系において、PI制御のパラメータは試行錯誤的に決定した。また、Fig. 9に定常状態における一定剛性 ($K_j = 0.15 \text{ Nm/deg}$, 0.2 Nm/deg , 0.25 Nm/deg) で負荷を変化させたときの実験結果を示す。実験結果より、

負荷を変化させても関節角度が目標角度に収束していることが分かる。よって、トルクベース型制御は定常状態においては剛性を制御できていると考える。

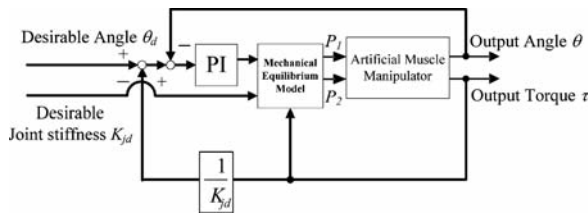


Fig. 8 Block diagram of the torque-based method for stiffness control

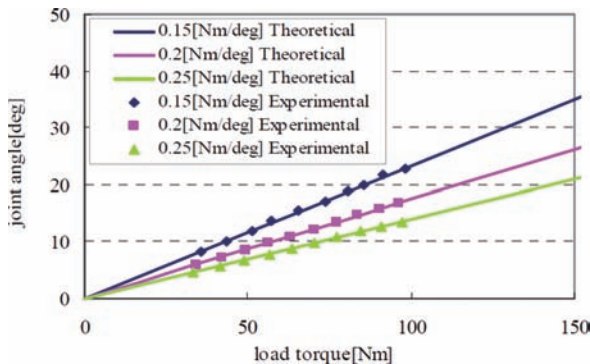


Fig. 9 Relationship between joint angle and load torque in the steady-state (torque-based method)

4. 6自由度人工筋肉マニピュレータの剛性制御

4.1 ヤコビ行列を用いた目標関節剛性の導入

ここでは手先力から各関節の剛性を算出するためのヤコビ行列を用いた方法を示す。まず各関節の剛性 k_i とトルク τ_i と変位量 $\Delta\theta_i$ の関係は式(3)のようになる。また、マニピュレータの全関節の関節トルクベクトル τ と関節変位ベクトル $\Delta\theta$ は式(4)のように表すことができる。

$$\tau_i = k_i \Delta\theta_i \quad (i=1 \sim 6) \quad (3)$$

$$\tau = K_j \Delta\theta \quad (4)$$

ただし、 $K_j = \text{diag}[k_i]$ である。

次に手先剛性と関節剛性の関係に着目する。マニピュレータ先端の剛性マトリクスを K とすると、

$$F = K \Delta x \quad (5)$$

さらに、関節トルクをヤコビ行列と式(5)を用いて表すと、式(6)となる。

$$\tau = J^T F \quad (6)$$

これより、式(6)に式(5)を代入すると関節トルクは式(7)のように表せる。

$$\tau = J^T K \Delta x \quad (7)$$

また、手先速度と関節角加速度の関係から

$$\Delta x = J \Delta \theta \quad (8)$$

よって、式(8)を式(7)に代入すると

$$\tau = (J^T K J) \Delta \theta \quad (9)$$

最後に式(7)と式(9)から手先剛性 K を実現するための各関節剛性 K_j は式(10)のように表せる。

$$K = J^T K_j J \quad (10)$$

4.2 剛性楕円体の導出

ここでは、4.1より手先に加わる外力から各関節トルクを求めることができ、手先の位置をプロットした剛性楕円体を求める。6自由度人工筋肉マニピュレータの姿勢をFig. 10のように設定し、手先に一定の外力をXY平面上の12方向から与える。そして、XY平面とXZ平面に対して定常状態になった時の手先の位置をシミュレーションで求めた。マニピュレータの各関節剛性の値をTable 1のように設定し、シミュレーション結果をFig. 11に示す。

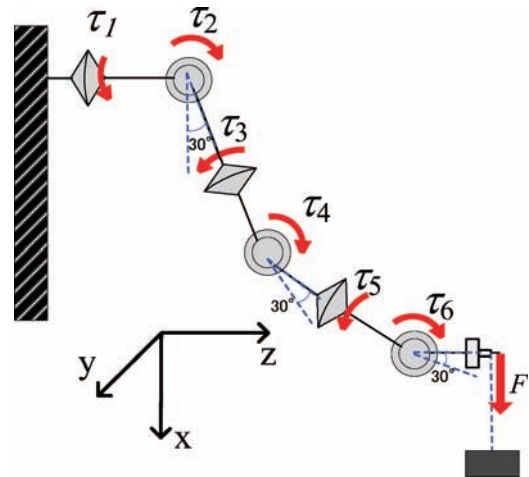


Fig. 10 A Schematic diagram of experiment

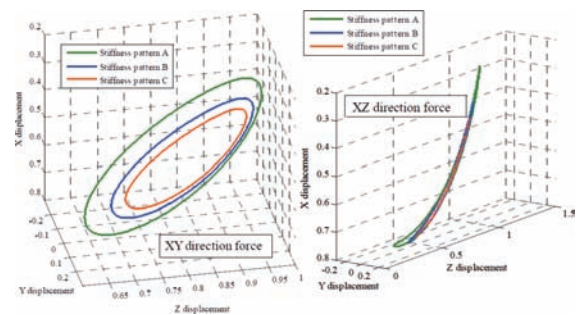


Fig. 11 Compliance ellipse changed joint stiffness

Table 1 Parameters of joint stiffness (A,B,C)

	1st joint [Nm/deg]	2nd joint [Nm/deg]	3rd joint [Nm/deg]	4th joint [Nm/deg]	5th joint [Nm/deg]	6th joint [Nm/deg]
A	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.1
B	0.4	0.35	0.15	0.4	0.1	0.1
C	0.5	0.4	0.2	0.6	0.15	0.15

5. 6自由度マニピュレータの剛性制御実験

5.1 マニピュレータの手先剛性実験

まず実際に6自由度マニピュレータの手先にXY平面とXZ平面において外力を加え、4.2で求めた剛性楕円体と比較する。手先剛性のパターンはTable 1を用いて、それぞれ12方向に8.33Nを加え手先位置をプロットする。実験の制御ブロック線図をFig. 12に、実験結果をFig. 13に示す。

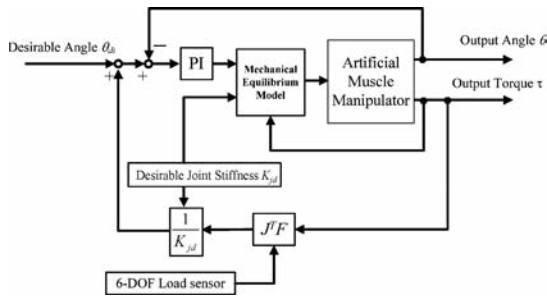


Fig. 12 Block diagram of stiffness control for the 6-DOF manipulator

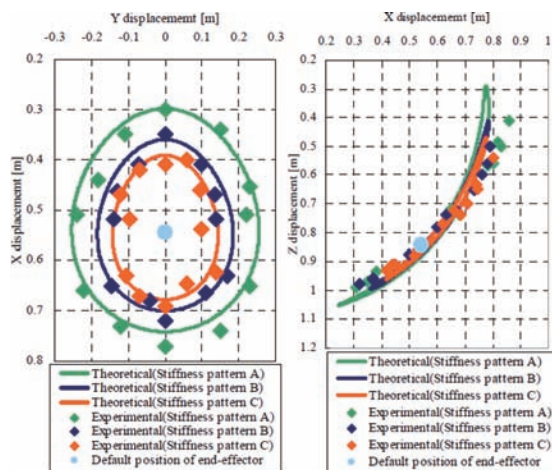


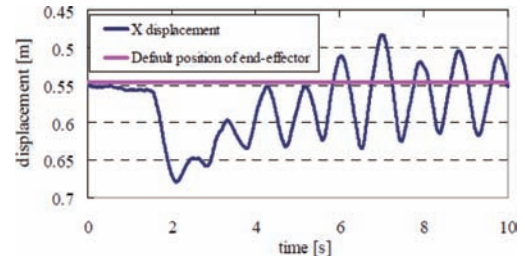
Fig. 13 Relationship between compliance ellipse and end-effector position

Fig. 13より、全てのパターンにおいて手先位置が求めた剛性楕円に近い値になっていることが分かる。しかし、XY平面では特にY軸方向の位置の誤差が大きいことが分かる。また、XZ平面においては重力方向に外力が加わった際にX軸方向に手先位置が下がっていることが分かる。本マニピュレータはねじりの動作を行うために、人工筋肉の軸方向の収縮力をプーリにより回転運動に変換しており、外力が加わった際にワイヤーとプーリが干渉して、ねじり関節の変位量が減少したことが原因だと考える。ねじり変位量が減少することで結果的に剛性が高くなり、剛性楕円体の内側に手先位置が測定されたことが分かる。これを改善するためには、マニピュレータのねじり関節機構を変える必要があると考える。今後、ワイヤーとの干渉が少ない位置にプーリを設置することを検討し、また関節にかさ

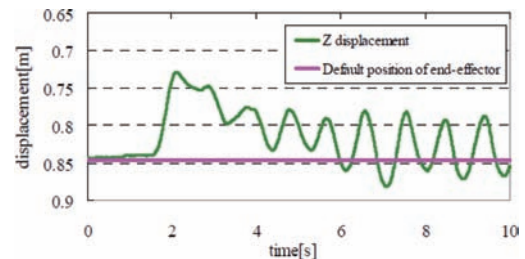
車を用いた機構を取り入れることで改善できると考える。

5.2 剛性を変化させた際の動特性の検討

構造的に柔らかい人工筋肉マニピュレータは外力の影響を受けやすく、突発的な負荷に対して振動的な挙動を示すといった欠点がある。そこで、まずTable 1のパターンAとパターンCにおいて負荷印加時の動特性を検討する。Fig. 10のように8.33Nの負荷を手先に加えてX軸方向にステップ状の負荷を与える実験を行った。パターンAの実験結果をFig. 14、パターンCの実験結果をFig. 15に示す。本実

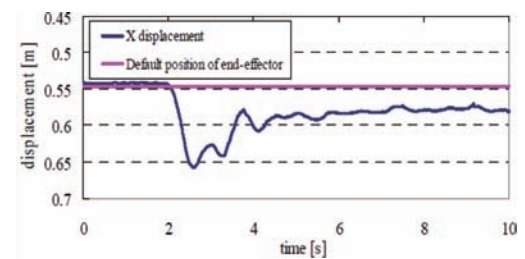


(a) X axis direction

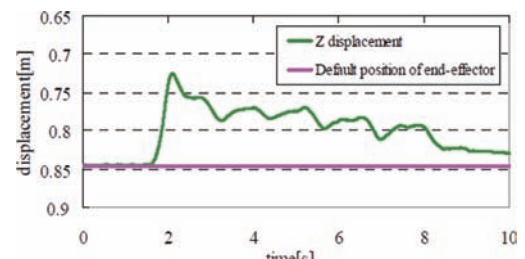


(b) Z axis direction

Fig. 14 Dynamic characteristic of 6-DOF manipulator when applying instantaneous load (pattern A)



(a) X axis direction



(b) Z axis direction

Fig. 15 Dynamic characteristic of 6-DOF manipulator when applying instantaneous load (pattern C)

験において、負荷は1.6sで与えている。Fig. 14より関節の剛性が低いと振動の振幅が大きく、手先が不安定になっていることが分かる。しかし、Fig. 15より関節の剛性を高く設定することで外力の影響が低減されて振動の振幅が小さくなっていることが分かる。

次にマニピュレータの手先がある領域に入ると剛性が高くなるように設定し、その時のアームの応答について検討する。実験は設定領域が $X \geq 0.60\text{m}$ 、 $X \geq 0.57\text{m}$ の2パターンで行い、各関節剛性をTable 1のパターンAからパターンCに変化させる。設定領域が $X \geq 0.60\text{m}$ の実験結果をFig. 16、設定領域が $X \geq 0.57\text{m}$ の実験結果をFig. 17に示す。ここで、Fig. 16では1.6sで負荷を与え、Fig. 17では1.1sで負荷を与えている。実験結果より、高剛性領域を設定することで、負荷による振動を抑制できることが分かる。また、Fig. 17より高剛性領域を負荷直後に設定することで、手先位置がすばやく定常状態に戻っていることが分かる。したがって、一定の領域を設定して各関節剛性を高める制御はマニピュレータが物を持って動作する際でも有効であると考えられる。

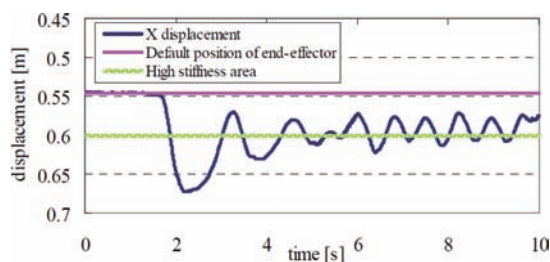


Fig. 16 Comparison with X displacement and default position ($X \geq 0.60$)

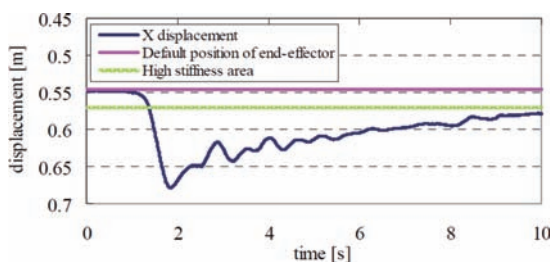


Fig. 17 Comparison with X displacement and default position ($X \geq 0.57$)

5.3 マニピュレータの手先押し付け実験

5.2で領域を設定して突発的な負荷に対する安定性を検討したが、この実験ではX軸方向に定常的な負荷を加える押し付け動作について検討を行う。高剛性領域は $X \geq 0.60\text{m}$ の時にパターンAからパターンCに変化するように設定して、領域を設定しないパターンAと比較する。押し付け力1Nごとに変位量をプロットして力と変位量の関係をFig. 18に示す。

Fig. 18より高剛性領域を越えた後、変位量が0.07mの付近

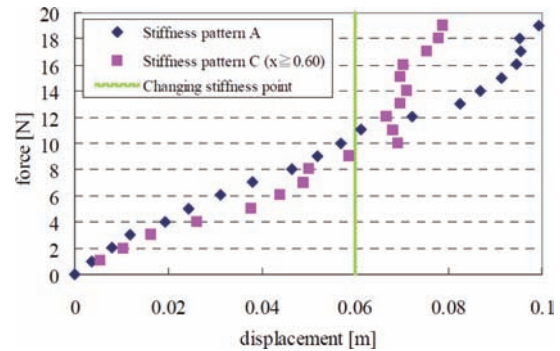


Fig. 18 Relationship between force and displacement in the steady-state

で、同じ変位量でも高剛性領域を設定した場合の押し付け力の方が大きい値をとっており、グラフの傾きが増加し、X軸方向の剛性が高まっていることが分かる。

6. 結 言

1自由度マニピュレータの関節剛性の制御手法を提案し、負荷が加わった際の関節剛性の精度の実験を行った。手先剛性の制御手法を示し、剛性楕円体を求めて実験で負荷時の手先変位量と比較を行った。手先の変位量を制御することでX、Y、Z軸の3方向の剛性を制御することができた。また、剛性を高める領域を設定して、各関節剛性を変化した際の6自由度マニピュレータの動特性の検討と押し付け力の実験を行った。領域を設定して関節剛性を高めることで負荷時の振動を抑制することができた。

謝 辞

本研究にあたっては、中央大学理工学研究所2009年度研究プロジェクト共同研究第2類の援助により推進されましたことを述べ、謝辞に代えます。

参 考 文 献

- 1) B. Tondu, V. Boitier, P. Lopez : Naturally compliant robot-arms actuated by McKibben artificial muscles, Systems, Man, and Cybernetics, 1994. 'Humans, Information and Technology', Vol. 3, p. 2635-2640 (1994)
- 2) G. K. Klute, J. M. Czernieki and B. Hannaford : McKibben Artificial Muscles : Pneumatic Actuators with Biomechanical Intelligence, Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, p. 221-226 (1999)
- 3) C. Ming-kun : An adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a 2-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actuators, Control Eng Pract, Vol.18, No. 1, p. 13-22 (2010)
- 4) M. Mori, K. Suzumori, S. Wakimoto, T. Kanda, M. Takahashi, T. Hosoya and E. Takematu : Development of power

- robot hand with shape adaptability using hydraulic McKibben muscles, ICRA, p. 1162-1168 (2010)
- 5) T. Nakamura, N. Saga and K. Yaegashi : Development of Pneumatic Artificial Muscle based on Biomechanical Characteristics, in Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2003), p. 729-734 (2003)
 - 6) T. Nakamura, H. Maeda and H. Nagai : Development of a 6-DOF Manipulator Actuated with a Straight-Fiber-Type Artificial Muscle, in Proc. The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent RObots and Systems - IROS2009, (2009)
 - 7) T. Nakamura and H. Shinohara : Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007), p.4361-4366 (2007)
 - 8) T. Nakamura, D. Tanaka, H. Maeda : Joint Stiffness and Position Control of an Artificial Muscle Manipulator for Instantaneous Loads Using a Mechanical Equilibrium Model, *Advanced Robotics*, Vol. 25, No. 3, p. 387-406 (2011)
 - 9) D. Tanaka, H. Maeda, T. Nakamura : Joint stiffness and position control of an artificial muscle manipulator considering instantaneous load, IECON'09, p. 2259-2264 (2009)
 - 10) H. Maeda, H. Nagai, H. Saito and T. Nakamura : Position and compliance control of an artificial muscle manipulator using a mechanical equilibrium model, IECON2008, p. 3431-3436 (2008)
 - 11) T. Nakamura, "Experimental Comparisons between McKibben type Artificial Muscles and Straight Fibers Type Artificial Muscles," SPIE International Conference on Smart Structures, Devices and Systems III, (2006)
 - 12) Y. Okazaki, M. Yamamoto, M. Komatsu, Y. Tsusaka and Y. Adachi : Development of a Human Safe, Multi-Degree-of-Freedom Robot Arm Technology using Pneumatic Muscles, JRSJ, Vol. 28, No. 3, p. 302-310 (2010)
 - 13) T. Noritsugu and T. Tanaka : Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol. 2, No. 4, p. 259-267 (1997)
 - 14) N. Nakamura, M. Sekiguchi, K. Kawashima, T. Fujita and T. Kagawa : Developing a robot arm using pneumatic artificial rubber muscles, *Power Transmission and Motion Control*, p. 365-375 (2002)
 - 15) K. Kawashima, T. Sasaki, T. Miyata, N. Nakamura, M. Sekiguchi and T. Kagawa : Development of robot using pneumatic artificial rubber muscles to operate construction machines, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16, No. 1, p. 8-15 (2004)
 - 16) B. Tondu, S. Ippolito, J. Guiochet and A. Daidie : A seven-degrees-of-freedom robot-arm driven by pneumatic artificial muscle for humanoid robots, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 4, p. 257-274 (2005)
 - 17) S. Fujimoto, T. Ono, K. Ohsaka and Z. Zhao : Modeling of Artificial Muscle Actuator and Control Design for Antagonistic Drive System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 730, p. 171-179 (2007)
 - 18) T. Nakamura, D. Tanaka and H. Maeda : Joint Stiffness and Position Control of an Artificial Muscle Manipulator for Instantaneous Loads Using a Mechanical Equilibrium Model, *Advanced Robotics*, (2010) (in press).
 - 19) H. Tomori, H. Maeda and T. Nakamura : Orbit tracking control of 6-DOF rubber artificial muscle manipulator considering nonlinear dynamics model, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, (in press)
 - 20) T. Oshima and M. Kumamoto : Robot Arm Constructed with Bi-Articular Muscles (Stiffness Properties of Bi-Articular Muscles and Its Effect), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 61, No. 592, p. 122-129 (1995)
 - 21) T. Nakamura and H. Shinohara : Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007) p. 4361-4366 (2007)
 - 22) T. Nakamura and H. Maeda : Position and Compliance Control of an Artificial Muscle Manipulator using a Mechanical Equilibrium Model, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (IECON2008) p. 3431-3436 (2008)

研究論文

軸方向繊維強化型人工筋肉を用いた小腸検査用多段式蠕動運動型ロボットの開発*
(第1報、小型ロボットにおける弾性管内の走行と内視鏡との切り離しに関する検討)

安達 和紀**, 横島 真人**, 樋高 裕也**, 中村 太郎***

Development of an Earthworm Robot Using Straight-Fibre-Type Artificial
Muscle for the Small Intestine(1st Report: A Study on the Locomotion of the Small-Sized Robot in the Elastic Tube and
Separating the Robot and Endoscope)

Kazunori ADACHI, Masato YOKOJIMA, Yuya HIDAKA, Taro NAKAMURA

There are diseases of the small intestine such as Crohn's disease or Polyp that cause Intussusception. These diseases were not discovered before using a conventional endoscope and the small intestine was called "The Dark Continent". Recently, these diseases are inspected by a Double-Balloon Endoscope or Capsule Endoscope. However, the method used for these inspections have a few problems. Therefore, we proposed a new method of inspecting the small intestine. Utilizing our past research, we developed a robot for the small intestine using peristaltic crawling. The robot is attached to a conventional endoscope. When the endoscope reaches the small intestine, the robot is detached from the endoscope and moves forward and observes and treats the afflictions. In this paper, we fabricated the prototype and experimented in an acrylic pipe and elastic tube. In addition, we confirmed that the robot and endoscope can be separated in any place.

Key Words : Medical Equipment, Pneumatic Power Source, Robot

1. 緒 言

小腸は、その全容の把握のしづらさから、「暗黒の臓器」と呼ばれている。小腸の代表的な疾病としてはクローン病や腸重積症 (Fig. 1) がある。クローン病は小腸のうちで大腸側にある回腸に多く見られ、若い成人に多く発症している。クローン病の発症部位は様々だが、このうち小腸の占める割合は40%以上である。腸重積症は主にポリープによって発生する。腸重積症は、小腸内腔に突出したポリープが、腸内容の流れに引かれて重積先進部として作用し、重積が進行するというものである。

これらの疾病の治療、またはポリープを除去するために、ダブルバルーン内視鏡¹⁾やカプセル内視鏡²⁾が使用されている^{3),4)}。ダブルバルーン内視鏡は既存の内視鏡に装着させるため、内視鏡の機能である送気・送水や治療処置、さ

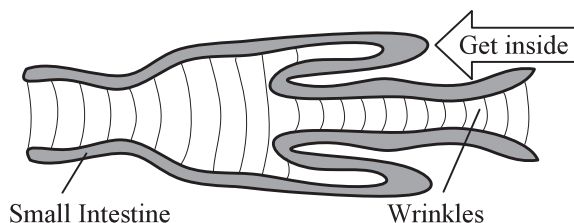


Fig. 1 Intussusception

らに組織検査が可能である。

ダブルバルーン内視鏡は、2つのバルーンを用いて小腸を手繰り寄せ、小腸の奥を検査可能とした方法である。しかしながら、操作には2人以上の医師が必要となってしまう。また、小腸は長さが約6mもあるため、口から内視鏡を挿入し小腸の上半分を検査し、さらに肛門からも挿入して残り半分を検査するという方法をとらなければ、全容は把握できない。そのため検査時間も長くなり、それに伴い患者の不快感も増してしまう。

カプセル内視鏡を用いた検査では、ビタミン剤ほどのカプセルを飲み込むだけなので、ダブルバルーン内視鏡の問題であった、患者の負担や不快感が少ない。その上、通常の内視鏡がなくても小腸の全容が把握できる。しかしながら、観察のみで治療処置が行えない、体内に停留する可能性がある、移動が腸の蠕動運動に依存しているため、能動

*平成23年6月29日 原稿受付

**中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻

(所在地 東京都文京区春日1-13-27)

(E-mail: k_adachi@biomech.chuo-u.ac.jp)

***中央大学理工学部精密機械工学科

(所在地 東京都文京区春日1-13-27)

(E-mail: nakamura@mech.chuo-u.ac.jp)

的な移動ができないといった問題がある。

これらカプセル内視鏡の問題を解決するために、様々なカプセル内視鏡ロボットが開発されてきた⁵⁾⁻⁸⁾。しかしながら、これらのロボットに多く用いられているSMA (Shape Memory Alloy) アクチュエータ⁵⁾⁻⁷⁾は応答が遅い。また、ピエゾ素子を用いたロボット⁸⁾には高電圧が必要なため、やはり人体に使用するには危険である。またこれらのロボットは、カプセル内視鏡よりも大きくなってしまうことがあり、飲み込む際に不快感を伴う可能性が高い。その上、これらのロボットでは観察は可能ではあるが、治療処置を行うことはできない。

カプセル内視鏡だけではなく、既存の内視鏡の推進の問題を解決するために、内視鏡ロボットも多く開発されている⁹⁾⁻¹³⁾。しかしながら、それらのロボットは移動機構のみで、治療処置を行うことはできない。また、移動速度も遅く、小腸の奥深くまで見ることも困難であると考えられる。

これまで本研究室では、蠕動運動に関する研究を行ってきており¹⁴⁾⁻¹⁷⁾、とりわけ大腸内視鏡に搭載する蠕動運動ロボットにおいて、大腸内での前進、大腸内に存在するたるみ部の直線化に成功してきた¹⁸⁾⁻²⁰⁾。そこで著者らは、目標を小腸まで拡張し、既存の内視鏡の先端に装着する多段式の内視鏡ロボットとそれを用いた新たな検査方法を提案する。これまで作製してきたロボットは、内視鏡をロボットの中心に配置し、大腸内を観察・治療するためのものであった。

本ロボットはそれ自体が内視鏡としての役割を果たすだけでなく、小腸の観察・治療も行うことができ、さらに肛門からの内視鏡の挿入のみで検査を終えることができると考える。検査の手順は、以下の通りである。

- 1) ロボットを内視鏡の先端に取付ける。
- 2) 内視鏡を肛門から挿入する。
- 3) 内視鏡が小腸に到達したところで、ロボットを切り離す (Fig. 2)。
- 4) ロボットは自動で前進し、観察と治療を行う。

また、蠕動運動の再現には、本研究室で開発した軸方向繊維強化型人工筋肉を用いる²¹⁾⁻²³⁾。本人工筋肉は、空気を提供することで、膨張と収縮を行い、柔軟、軽量、安価、高生体適合性といった特徴を持つ。これらの特徴から、本アクチュエータを用いて、ミミズの蠕動運動を再現する。

以上のことから、本ロボットは、能動的かつ自動的に走行ができ、検査だけではなく治療処置なども可能になると考える。

本報ではとりわけ、新たな小腸検査方法を提案し、小型ロボットの開発を行う。また、小腸とみため弾性管内での走行と、内視鏡とロボットの能動的な切り離しについても検討を行う。

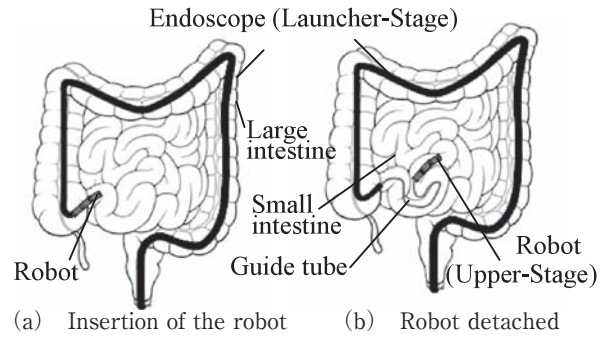


Fig. 2 Operation of the robot

2. 蠕動運動の概要

2.1 蠕動運動の概要

蠕動運動はミミズなどが行う移動様式である。ミミズはまず、頭部の体節を縮める。次にその収縮を後ろの体節に送り、同時に頭部の体節を伸張させる。収縮した体節は地面との間に摩擦力を生み出し、その摩擦力は前に伸びるための反力となる。以上のように「太く短く」「細く長く」という伸縮の繰り返しによって縦波進行波が起り、ミミズは前進することができる。蠕動運動には、蛇行運動などに比べて運動に必要な空間が小さい、また運動する際の接地面積が大きいといった利点があり、蠕動運動は小腸のような円筒物体内を、安定して走行することができると考えられる。

2.2 蠕動運動の動作パターン

Fig. 3に、実験で用いる3つの動作パターンを示す。

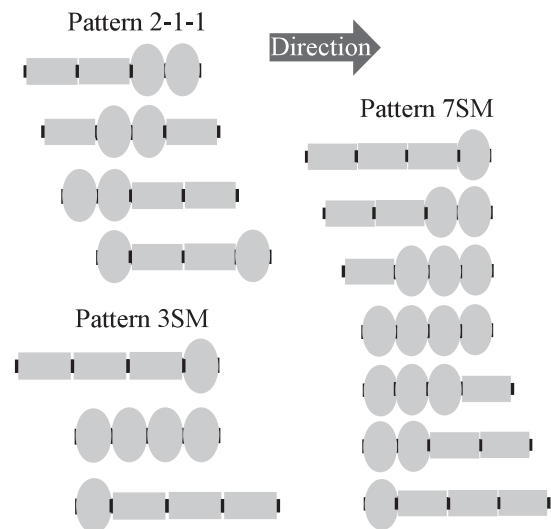


Fig. 3 Movement pattern of peristaltic crawling

上の動作パターンにおいて、2-1-1はミミズを、また3SMと7SMは尺取り虫を模倣している。2-1-1はそれぞれ、波長・送り・波数を表している。波長とは膨張しているユニットの数を、送りは次のモーションに行く際にどれだけ膨張したユニットを後方へ伝播するかを、そして波数は膨張しているユニットの山を表す。一方で、7SMは3SMを

7つのステップモーション (Step Motion) に分解したものである。

3. 軸方向繊維強化型人工筋肉

3.1 人工筋肉概要

ミミズの体節に相当する伸縮部には、本研究室で開発した軸方向繊維強化型人工筋肉を用いる^{21),22)}。その概要をFig. 4に示す。人工筋肉の素材として低アンモニア天然ゴムラテックス (LA-NRLATEX) を用いる。本素材をチューブ状に成形し、ゴム膜内の軸方向へマイクロカーボン層を内包した構造を有する。マイクロカーボン層は数ミクロンレベルの細さを持つカーボンロービング繊維をシート状にしたもので、ゴム膜の変形に合わせて繊維幅も広がる。本人工筋肉に空気圧を供給すると、ゴム膜は膨張するが、繊維はほとんど伸びないため軸方向に拘束される。その結果、人工筋肉は半径方向に膨張して軸方向に収縮する。このときの収縮力をアクチュエータとして利用する。

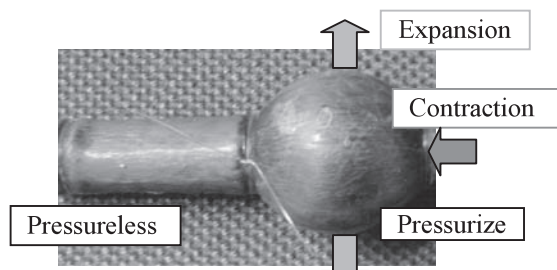


Fig. 4 Schematic diagram of artificial muscle

3.2 人工筋肉の基礎特性

人工筋肉の特性として、圧力-収縮率、圧力-膨張率の2点について測定を行った。軸方向繊維強化型人工筋肉の圧力-収縮量特性・圧力-膨張量特性をFig. 5にそれぞれ示す。なお収縮率は $\{([自然長]-[収縮時の長さ])/([自然長])\} \times 100$ 、膨張率は $\{([膨張時の半径]-[自然長時の半径])/([自然長時の半径])\} \times 100$ と定義する。

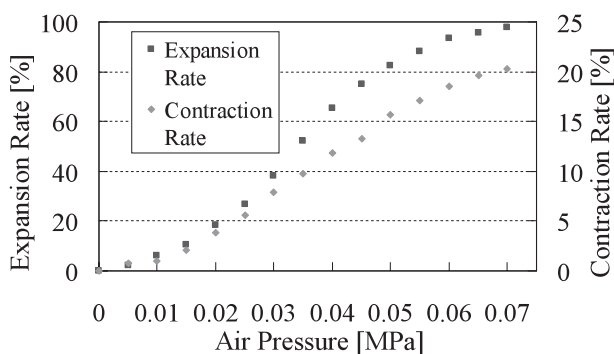


Fig. 5 Relationship between air pressure and contraction rate/expansion rate

Fig. 5から、本人工筋肉は圧力の増加に伴って収縮率・膨

張率ともに上昇しており、印加圧力の増減によって「細く長く」「太く短く」を繰り返すことで、膨張時に周辺環境と摩擦を生じ、伸長する際の力を推進力として用いることができ、ミミズの体節と同様の挙動を示していることが確認できる。また、本人工筋肉はヒステリシス特性を有する²³⁾が、本ロボットの運動には影響しないほど小さいと考えられる。

人間の小腸の内径はおよそ28mmである。また蠕動運動において、膨張したアクチュエータが管を把持できれば、ロボットは走行が可能である。本アクチュエータは、0.07MPaにおいて膨張外径28mmを達成しており、小腸の把持が可能である。これより本ロボットは蠕動運動により小腸内を走行可能であると考えられる。

4. 蠕動運動ロボット

4.1 ロボットの概要

Fig. 6に完成予定図を示す。このロボットは、カメラと処置具を内包可能としているために、小腸内にある腫瘍やポリープなどを観察でき、さらに治療処置を施すことができる。また、本ロボットは4つのユニットを持ち、それぞれのユニットに空気を印加することによって膨張し、蠕動運動を行うことができる。これによって小腸内を能動的かつ自動的に走行できる。

ロボットがカメラと処置具を内包するために、ロボットの中心はこれらの構成物を配置するため中空であること、また構成物がロボットの動きを妨げないことが必要となる。そこで、本研究室で開発した「チューブスライド機構」を用いる^{19),20)}。Fig. 7にこの機構を、Fig. 8にロボットの部品を示す。ロボットは、フランジによって4つのユニットに区切られる。ユニットは、外側から人工筋肉、ベローズ、空気チューブの順に構成されている。人工筋肉とベローズの間がチャンバであり、Fig. 8のようにベローズを貫通してきた空気チューブから空気がチャンバ内に封入されると、人工筋肉によって半径方向に膨張し、軸方向に収縮する。このとき、ベローズによって軸方向への収縮は妨げられることはない。

また、空気チューブはベローズの内側に配置されており、Fig. 8のように固定されているのはチューブの先端だけである。Fig. 7のような状態では、2ユニット目に空気が封入されている。ロボットの先端が固定されているとすると、2ユニット目が膨張した際、後方2つのユニット、ここでは3ユニット目と4ユニット目が前方にスライドする。このとき、空気チューブ上をフランジがスライドするため、動作時に空気チューブが運動の妨げになることはない。また、中心にはカメラや処置具を配置するための空間を確保している。

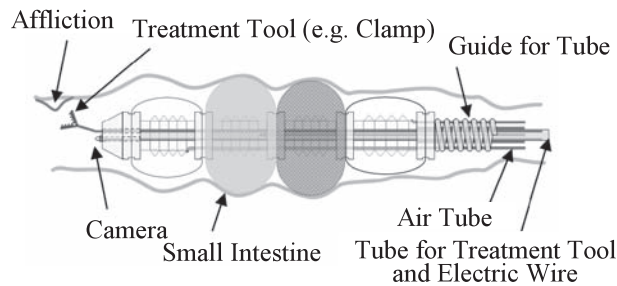


Fig. 6 Conceptual drawing of the completed robot

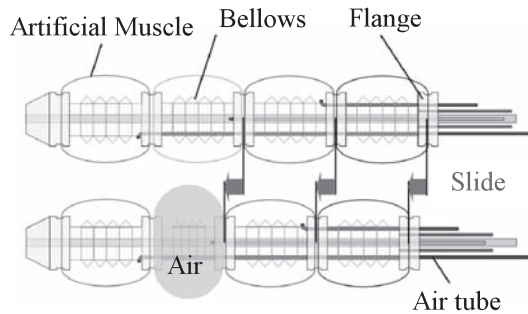


Fig. 7 Sectional view of the mechanism

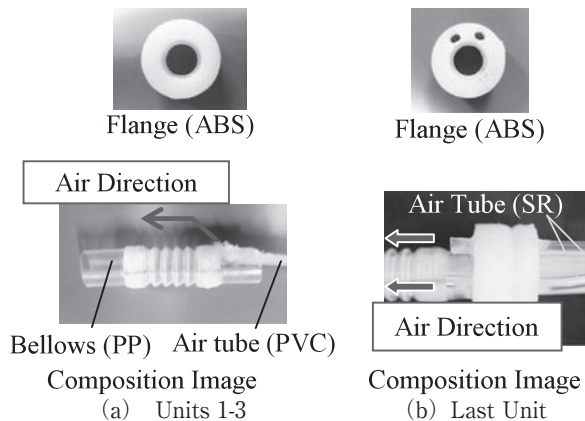


Fig. 8 Structures of the robot's parts

4.2 試作機の作製

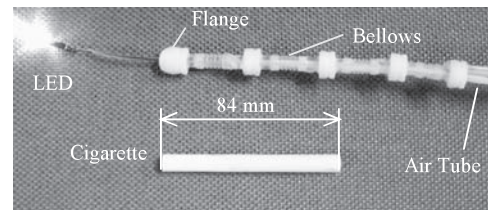
表1に試作機の1ユニットの、内径28 [mm] のアクリル管内での仕様を示す。また、Fig. 9に試作機の外観を、Fig. 10に試作機先端を示す。また既存の内視鏡の直径は12.5mmであり、処置具に必要な空間は直径およそ3mmの穴である。Table 1から、試作機の内径が6mmであり、処置具の配置も十分可能であることがわかった。

試作機の外径は既存の内視鏡とほぼ同じであるため、そのため内視鏡の先端に取り付けることが可能であると考え

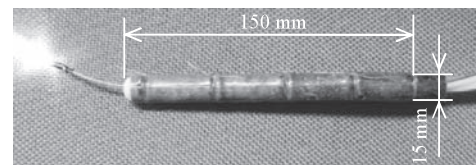
Table 1 Specifications of one unit

Length [mm]	Max	320
	Min (0.07MPa)	280
Width [mm]	Max (0.07MPa)	280
	Min	150
Inside Diameter [mm]	6	

る。また今回、処置具用の穴に円筒形状のカバーチューブを通し、そのチューブをLEDの配線のためのガイドとしている。また、ロボットの重量は23gであった。



(a) Internal Structure of the Robot



(b) Peristaltic Robot with Artificial Muscle

Fig. 9 Exterior of the robot

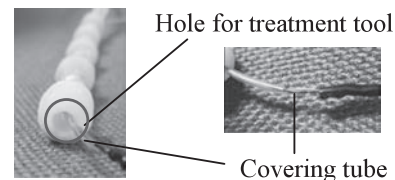


Fig. 10 Head of the robot

4.3 ロボットの動作方法

Fig. 11にロボットの制御システムを示す。H8マイコン(3052F)からデジタル信号が出力され、D/Aコンバータ(MCT, MCP4920)によってアナログ信号に変換され、比例電磁弁(SMC, TV0030-2M)に入力される。入力電圧に比例した空気圧がコンプレッサ(JUN AIR, 6-12)からロボットのそれぞれのユニットに空気が供給され、各ユニットが独立して伸縮できる。

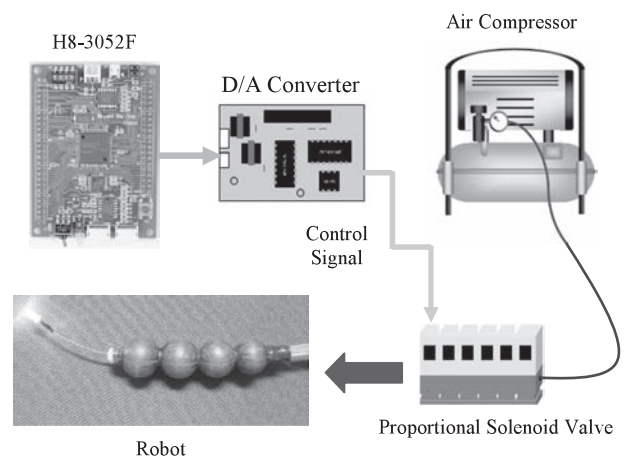


Fig. 11 Robot's locomotion system

5. ロボットの走行実験

5.1 アクリル管内走行実験

まず、人間の小腸の平均内径と等しいアクリル管において、ロボットが走行可能であるのかを実験によって確認する。完成した蠕動運動ロボットを用いて、机上に固定した内径25A (28-28.4mm) のアクリル円筒管内で走行実験を行った。実験環境をFig. 12に示す。このアクリル円筒管の内径は、小腸の平均内径程度の大きさである。走行評価を行うために、評点をロボット後端に取り付け、MOVIAS Pro (NAC Image Technology, Inc) を用いて動画解析を行った。また、動作中にロボット内部の構成物が動作に影響しないかを確認するため、走行中はLEDを点灯している。実験にはFig. 3に示した3つの動作パターンと2つの動作間周期 (0.10s, 0.15s) を用いた。

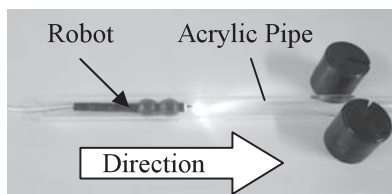


Fig. 12 Experimental apparatus for traveling in the acrylic tube

Fig. 13に、動作パターン2-1-1、動作間周期0.15sのときの実験結果を示す。また、Fig. 14に動作パターンと動作間周期ごとの速度比較の結果を示す。

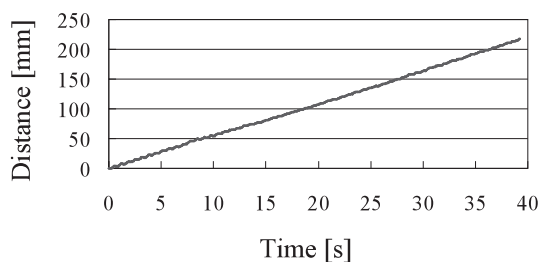


Fig. 13 Experimental result for forward motion in the acrylic pipe by using motion pattern 2-1-1 (0.15 s)

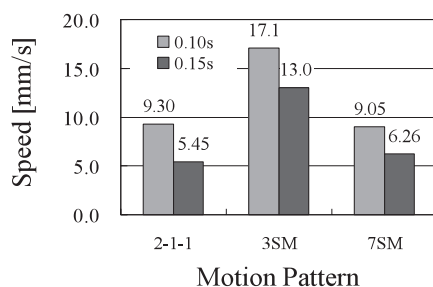


Fig. 14 Experimental comparison of robot speeds in the acrylic pipe

Fig. 13より、ロボットは滑ることなく前進できているこ

とがわかる。これは、ロボットの膨張外径が管を把持するのに十分な量であったからだと考える。

またFig. 14から、アクリル管内での最大速度は、動作パターン 3 SM、動作間周期0.10sの時に17mm/sであった。また、LEDは実験の間点灯し続け、配線がロボットの速度を低下させることはなかった。このことから、ロボットの内側に配置される構成物は、動作の妨げにならないと考える。

5.2 弾性管内走行実験

次に、内径はアクリル管と等しいが、弾性体であり、ロボットに貼り付くという、小腸と同じような特性を持つ管内において実験を行う。小腸を模した弾性管にはLA-NR. LATEXを用いた。この管は内径26mm、厚さ0.03-0.05mmである。この弾性管をより小腸の環境に近づけるために、管内に潤滑液 (京都科学製) を満たした。Fig. 15に示すように、潤滑液を満たした弾性管はロボットに密着し、実際の小腸に近い環境となる。実験の際には管の両端を固定した。走行中はLEDを点灯させ、5.1と同様に、MOVIAS Proによって速度解析を行った。

Fig. 16に動作パターン2-1-1、動作間周期0.15sの時の実験結果を示す。また、Fig. 17に2つの動作パターン (2-1-1, 7 SM) と2つの動作間周期での速度比較を示す。

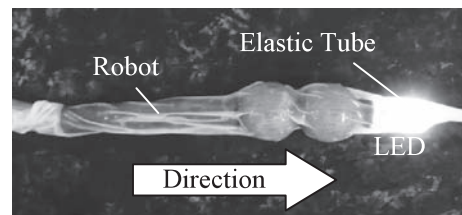


Fig. 15 Experimental apparatus for travel in the elastic tube

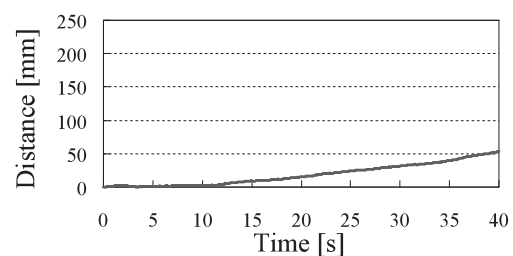


Fig. 16 Experimental result of forward motion in the elastic tube by using movement pattern 2-1-1 (0.15 s)

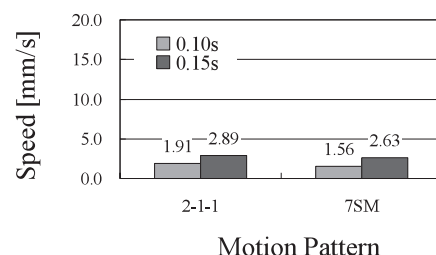


Fig. 17 Experimental comparison of robot speeds in the elastic tube

Fig. 16とFig. 17より、弾性管内においては速度が低下しているが、前進可能であることがわかった。

Fig. 16, Fig. 17は弾性管内での速度はFig. 14, Fig. 15の亚克力管内での速度よりも低下していることを示している。蠕動運動で前進するために必要な力は摩擦力であり、この摩擦力は垂直抗力に依存する。ロボットは亚克力管では十分な垂直抗力を得ることができたが、弾性管では得られなかった。これは、弾性管は伸びるという特性を持っているからである。このためロボットは十分な垂直抗力を得られず、摩擦力の低下に伴い滑りが起きて速度の低下が起きたのだと考える。また、5.1と同様、2つの動作パターンにおいて速度の違いは見られなかった。しかしながら、動作間周期が短いと速度は低下した。動作間周期が短い時には、次の動作への切り替えが速くなる。ところが周期が短すぎると伸縮の途中で次の動作に移ってしまう。そのため、摩擦力が低下し、滑りが生じてしまう。よって、弾性管内では効率的な動作を行うためにロボットに十分な伸縮をさせるような動作間周期を選択する必要がある。弾性管内において、動作パターン3 SMでは動作できなかった。これはステップ2から3 (Fig. 3) に移る際に収縮しているユニットが少ないために、重心が前に移動することで生じる慣性力で滑ってしまうからである。弾性管内での前進速度は検査するために十分とはいえない。よって今後は速度向上のため、引用文献24) に示されているような空気噴射装置を応用することで、膨張時に摩擦力を増加させ伸長時に摩擦力を低減し、より効率的な走行が可能になると考える。

5.3 ロボット切り離し実験

最後に、切り離し実験を行う。今回は、切り離しが任意の位置で行えるのか、また切り離し後にコネクタ部が邪魔をせず、安定した動作ができるのかということを確認する。内視鏡とロボットを繋ぐコネクタ部を作製し、亚克力管内において切り離し実験を行った。コネクタ部にはバルーンを使用して、ロボットの把持を行う。

バルーンには、軸方向繊維強化型人工筋肉と同じLA-NR LATEXを使用した。厚さはおおよそ1mmである。このバルーンに印加した空気を手動で解除することで、任意の位置でロボットを切り離すことができる。ロボットが離れた後、コネクタ部は内視鏡に残る。Fig. 18とFig. 19にコネクタ部の外観を示す。またFig. 19に切り離し実験の様子を示す。LEDが点灯したときにロボットを切り離した。また、バルーンには0.25MPaを印加した。

Fig. 20より、ロボットは任意の位置で切り離され、そこから蠕動運動によって走行できることを確認した。これによって、通常の大腸内視鏡検査から、小腸検査まで拡張可能となる。そのため、従来二度にわたって検査が必要であったが、切り離すことにより一度で検査することができると考える。

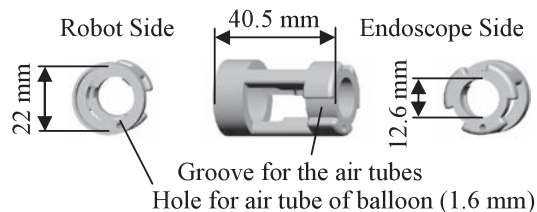


Fig. 18 Appearance of connect flange

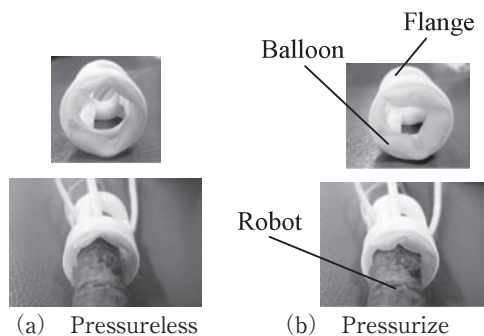


Fig. 19 Appearance of balloon

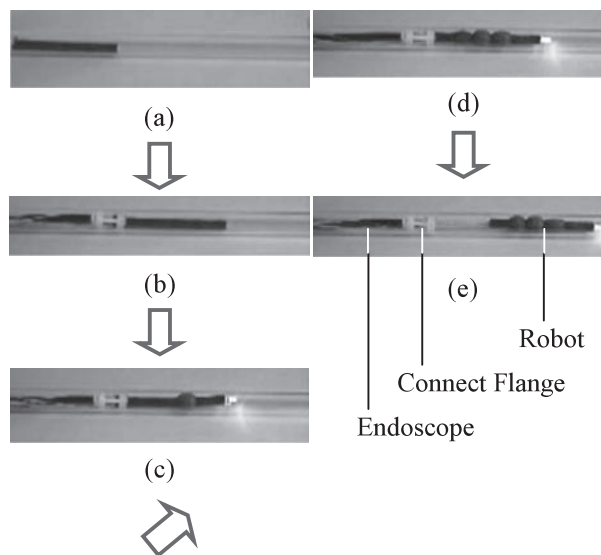


Fig. 20 Experiment of separating the robot

6. 結 言

6.1 ま と め

新たな小腸検査方法を提案した。また、軸方向繊維強化型人工筋肉を用いて蠕動運動を再現し、ミミズロボットを作製した。亚克力管と弾性管においてロボットの動作を確認した。また、コネクタ部を用いることによってロボットと内視鏡を接続した。さらに、コネクタ部のバルーンによって任意の位置でロボットと内視鏡を分離することができた。

6.2 今後の展望

本論文の試作機は曲管に対応しておらず、現段階では直線部しか前進することができない。また内視鏡の先端は屈曲が可能であるため、現状ではその動きを阻害する可能性がある。そこで今後は、アクチュエータの形状を変更するなどして各ユニットの柔軟性を向上し、曲管に対応させ、

内視鏡の動きを阻害させない必要がある。また小腸は複雑に曲がっているため、ロボットを能動的に屈曲可能とする機構を備える。その上で、人間の小腸の環境に似ている、死んだ豚の小腸内において、前進および切り離し実験を行う。さらに、人間の小腸と似ている豚の小腸内の摩擦力を測定し、それによってロボットが推進するために必要な膨張外径やロボットの摩擦係数などを決定し、それに従ってロボットを作製する。また、大腸内視鏡用ロボットと組み合わせることで、ロボットのみによって大腸から小腸への到達を試みる。

参考文献

- 1) 藤森俊二, 江原彰仁, 小林剛, 瀬尾継彦, 三井啓吾, 田中周, 辰口篤志, 坂本長逸: Peutz-Jeghers症候群の小腸ポリープ, 日医大医会誌, p.164-165 (2007)
- 2) 渡部憲治, 細見周平, 平田直人, 末包剛久, 青松和輝, 鎌田紀子, 十河光栄, 山上博一, 押谷伸英, 荒川哲男: 炎症性腸疾患における小腸内視鏡検査の意義と課題〜クローン病を中心に〜, 日本大腸肛門病会誌 60, p. 958-963 (2007)
- 3) Yamamoto, H(MD), Sekine, Y(MD), Sato, Y(MD), Higashizawa, T(MD), Miyata, T(MD), Iino, S(MD), Ido, K(MD), Sugano, K(MD): Total Endoscopy with a Non-surgical Steerable Double-Balloon Method, GASTRO-INTESTINAL ENDOSCOPY, Vol. 53, No. 2, p. 216-220 (2001)
- 4) Ueda, Y(OLYMPUS): Micromachine: Possibility of Capsule Endoscope and Pancreatic Endoscope, Clinical digestive tract internal medicine, Vol. 12, No. 7, p. 1059-1064 (1997)
- 5) Li, W. D., Guo, W., Li, M. T., Zhu, Y. H.: Design and Test of a Capsule Type Endoscope Robot with Novel Locomotion Principle, Proceedings of IEEE 9th International Conference on Control, Automation, Robotics, and Vision (ICARCV 2006)
- 6) Quirini, M., Mencias, A., Scapellato, S., Stefanini, C., Dario, P.: Design and Fabrication of a Motor Legged Capsule for the Active Exploration of the Gastrointestinal tract, Proceedings of IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13, No. 2, p. 169-179 (2008)
- 7) Glass, P., Cheung, E., Sitti, M.: A Legged Anchoring Mechanism for Capsule Endoscope Using Micropatterned Adhesives, Proceedings of IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 55, No. 12, p. 2759-2767 (2008)
- 8) Kim, B., Park, S., Yoon, S. J.: An Earthworm-Like Locomotive Mechanism for Capsule Endoscope, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)
- 9) Mangan, E. V., Kingsley, D. A., Quinn, R. D., Chiel, H. J.: Development of a Peristaltic Endoscope, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 347-352 (2002)
- 10) Yan, G., Wang, K.: A Wireless Robot for Gastrointestine, Proceedings of IEEE Transaction on Robotics, Vol. 24, p. 206-210
- 11) Shinkai, M., Murai, N., Itoh, K., Ishii, H., Takanashi, A., Tanoue, K., Ieiri, S., Konishi, K., Hasizume, M.: Development of a Robotic Endoscope that Locomotes in the Colon with Flexible Helical Fins, 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS, p. 5126-5129 (2009)
- 12) Wakimoto, S., Nishioka, Y., Suzumori, K.: Fabrication and Basic Experiments of Pneumatic Multi-chamber Rubber Tube Actuator for Assisting Colonoscope Insertion, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 3260-3265 (2010)
- 13) Saga, N., Nakamura, T.: Elucidation of Propulsive force of micro-robot using magnetic fluid, Journal of Applied Physics, Vol. 91, No. 10, Parts 2 and 3, p. 7003-7005 (2002)
- 14) Saga, N., Nakamura, T.: A prototype of peristaltic robot using pneumatic artificial muscle, Intelligent automation system, No. 8, p. 85-95 (2004)
- 15) Saga, N., Nakamura, T.: Development of peristaltic-crawling robot using magnetic fluid on the basis of locomotion mechanism of earthworm, Smart Material and Structure, Vol. 13, No. 3, p. 85-95 (2004)
- 16) Nakamura, T., Kato, T., Iwanaga, T., Muranaka, Y.: Development of a peristaltic crawling robot using servomotors based on the locomotion mechanism of earthworms, in Proc. Of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 4342-4344 (2006)
- 17) Nakamura, T., Kato, T., Iwanaga, T., Muranaka, Y.: Development of a Peristaltic Crawling Robot Based on Earthworm Locomotion, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 18, No. 3, p. 299-304 (2006)
- 18) 横島真人, 樋高裕也, 中村太郎: 軸方向繊維強化型人工筋肉を用いた大腸内視鏡搭載型推進機構の開発, 平成22年度春期フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 106-108 (2010)
- 19) Hidaka, Y., Yokojima, M., Nakamura, T.: Peristaltic Crawling Robot with Artificial Rubber Muscles Attached to Large Intestine Endoscope, Proceedings of 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics (2010)
- 20) Y. Hidaka, T. Nakamura and Y. Hori: Peristaltic

- crawling robot with artificial rubber muscles for large intestine endoscopy, Proceedings of 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR), p. 225-232 (2009)
- 21) Nakamura, T., Shinohara, H. : Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscle Reinforced by Straight Glass Fibers, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 4361-4366 (2007)
- 22) Nakamura, T., Saga, N., Yaegashi, K. : Development of Pneumatic Artificial Muscle based on Biomechanical Characteristics, Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), p. 729-734 (2003)
- 23) Nakamura, T. : Experimental Comparisons between McKibben type Artificial Muscles and Straight Fibers Type Artificial Muscles, SPIE International Conference on Smart Structures, Devices and Systems III (2006)
- 24) 横島真人, 樋高裕也, 安達和紀, 中村太郎 : 大腸内視鏡搭載型ロボットの開発と死んだ豚の大腸内動作実験, 日本機械学会年次大会DVD-ROM論文集 (2011)

研究論文

空気式パラレルマニピュレータを用いた手首リハビリテーション*

～筋電位信号に基づく訓練動作の提案～

高岩 昌弘**, 則次 俊郎**, 佐々木 大輔**

Wrist Rehabilitation Using Pneumatic Parallel Manipulator
 ～ Proposal of Rehabilitation Based on EMG Signal ～
 Masahiro TAKAIWA, Toshiro NORITSUGU, Daisuke SASAKI

In this study, we focus on a rehabilitation motion of human wrist joint and aim at supporting these rehabilitation training by introducing a mechanical system like a robot. A pneumatic parallel manipulator is introduced since it can drive enough D.O.F to correspond to a wrist motion and has inherent compliance characteristics resulted from air compressibility. We propose a new training method for a muscle strengthening training based on electromyography (EMG), where a pay-load is set between joint angle and the muscle we want to train directly. In addition, we propose a method to detect muscle fatigue based on a frequency analysis of EMG. The effectiveness of the proposed method is confirmed through some experiments.

Key words : Wrist Joint, Rehabilitation, Pneumatic Parallel Manipulator, EMG

1. 緒 言

現在、我が国における理学療法士（以下、P.T.）の数は、約35,000人であり、理学療法関連施設は約12,000箇所ある。このうち約4,000箇所の施設にはP.T.が1人しか在籍していない¹⁾。このようなP.T.の絶対数不足に加えて、平成14年4月の健康保険法等の改正により、診療期間が180日に限定されている。このような状況に対して、リハビリ分野へのロボット技術の導入が期待されており、上肢の運動を対象とするもののみでも種々の装置が開発されている^{2)~5)}。

本研究では、食事や着替えなどの日常動作に不可欠な手首の動作に着目し、これのリハビリを支援する装置として空気式パラレルマニピュレータを導入する。本装置は、コンパクトな構造ながら多自由度（6自由度）を有するため、手首の複雑な動作に対応できるとともに、空気の圧縮性に起因した柔軟性が衝撃吸収等の安全性として機能する。また、小型・軽量であるため、施設での診療期間終了後も引き続き在宅でリハビリ訓練を継続できる。

リハビリ訓練には、可動域改善訓練、筋力増強訓練、協調動作訓練等の様々な訓練がある⁶⁾が、本研究では可動域改善訓練、筋力増強訓練に着目し、これまで、機械インピーダンス制御の導入によるリハビリ動作の実現⁷⁾や、P.T.の徒手訓練動作を装置に獲得させ、その後、獲得した動作を装置により患者に実行する手法^{8),9)}を提案してきた。

従来の機械システムによるリハビリ訓練では手首関節トルクに基づく手法が一般的であるが、本稿では、トルクを生成する上腕部の筋肉を直接訓練する手法を提案する。具体的には、近年、比較的容易かつ安価に利用できるようになってきた表面筋電位センサを用い、関節角度と訓練したい筋肉の筋力との間に直接負荷を装置により設定することで筋力増強訓練を実施するものである。本手法により以下の効果が期待できる。

(1) 選択的かつ集中的な筋力訓練が可能

筋電位センサを貼っていない筋肉が生成したトルクはマニピュレータに対して外乱として作用し、位置制御系の外乱抑圧特性により、その影響は低減される。本手法では筋電位センサを貼付した筋肉からの信号のみに基づきマニピュレータは動作するため、訓練したい筋肉に対して負荷を設定した訓練を行なうことができる。

(2) トリックモーションの回避

トリックモーションとは、疲労などにより、訓練すべき関節の運動を他の筋の運動で代行してしまうことで、例えば手首屈曲／伸展動作を上腕部全体の動作（肩部の動作）で代行する等が相当する。従来の関節トルクに基づく方法では、関節トルクが発生されれば訓練として成立するため、トリックモーションを見分けることは容易でないが、本手法では、筋力が発生しない限り装置は動作せず、そもそもトリックモーションが起らない。

(3) 疲労度の定量的評価

筋が疲労すると筋電位信号の平均周波数（Mean Power Frequency, 以下MPF）が低周波数域に移行していくことが知られている¹⁰⁾。訓練動作に平行して筋電位信号を周波数解析することで、患者の疲労具合をリアルタイムかつ定

*平成23年6月9日 原稿受付

**岡山大学大学院自然科学研究科

(所在地 岡山市北区津島中3-1-1)

(E-mail: takaiwa@sys.okayama-u.ac.jp)

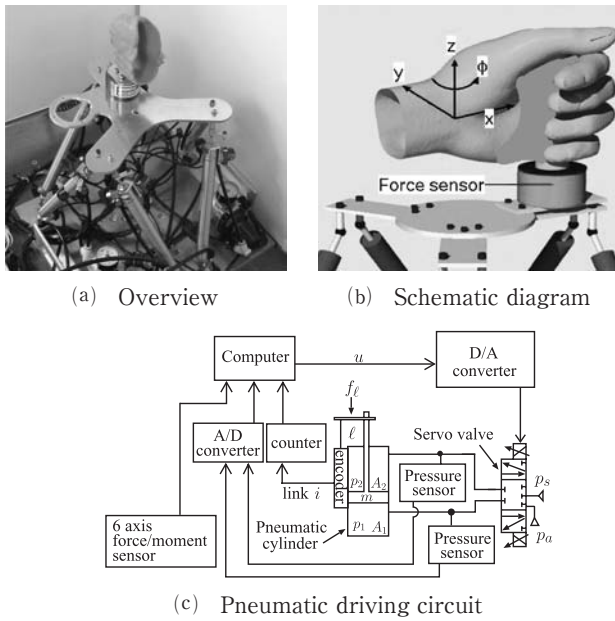


Fig. 1 Pneumatic parallel manipulator

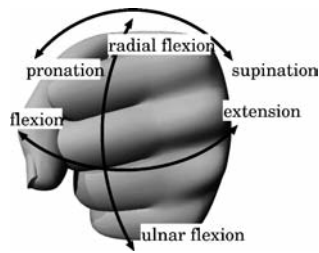


Fig. 2 Wrist motion (case of left hand)

量的に把握することができ、疲労具合に応じた訓練動作の調整などが可能となる。

以下では、提案する手法の効果を実験により検証したので報告する。

2. 手首部リハビリ支援装置の概要

2.1 空気式パラレルマニピュレータ

空気式パラレルマニピュレータの概観をFig. 1(a)に示す。Stewart型のパラレルリンク機構を有しており、下部、およ

び上部プラットフォームの半径はそれぞれ、176.0mm, 110.3mmである。各リンクには低摩擦タイプの複動式空気圧シリンダ（株Airpel製、内径9.3mm、ストローク150.0mm）を用いている。ピストンロッドの伸縮に伴い、上部プラットフォームは6自由度の運動を行う。

Fig. 1(b)に示すように、マニピュレータが基準姿勢（全シリンダのロッド長がストローク中点となる姿勢）時の手首関節中心位置に原点が一致するように手先座標系 $h = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ を設定する。ここで、回転角はロール、ピッチ、ヨー角で表現している。患者の印加力 $f_h = [f_{he}^T | \tau_{he}^T]^T = [f_x, f_y, f_z | \tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi]^T$ は6軸力センサの測定値 $f_s = [f_{se}^T | \tau_{se}^T]^T$ から次式により計算される。

$$f_{he} = R f_{se} \quad (1)$$

$$\tau_{he} = R \tau_{se} + P_h \times (R f_{se}) \quad (2)$$

ここで、 $R [3 \times 3]$, P_h はそれぞれ、姿勢角により求められる回転行列、および座標系原点からセンサまでの位置ベクトルを示す。

Table 1 Control parameters

p_a	Atmospheric pressure [Pa]
p_s	Supplied pressure [Pa]
p_1	Pressure in rear side [Pa]
p_2	Pressure in rod side [Pa]
ℓ	Displacement of piston rod [m]
A_1	Effective cross section area in rear side [m ²]
A_2	Effective cross section area in rod side [m ²]
f_ℓ	External force applied on a link [N]
u	Control signal
m, m_n	Equivalent mass for one cylinder [kg]
b, b_n	Viscous coefficient [Ns/m]
f_h	Force/moment applied by patient [N]
f_s	Force/moment measured by a sensor [N]
J	Jacobi matrix
T_q	Time constant of filter [s]

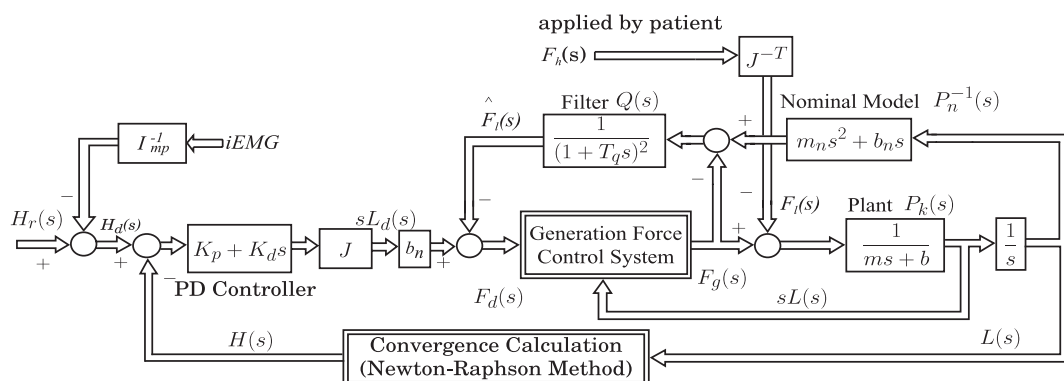


Fig. 3 Rehabilitation control system based on EMG



Fig. 4 Aspect of rehabilitation based on EMG

Fig. 1(c)にリンク単体の空気圧駆動回路を示す。ピストンロッド変位 ℓ はワイヤ式ロータリーエンコーダ（株式会社武藤工業製，DS-025，分解能0.025mm）で測定し，上部および下部シリンダ室内圧力 p_1 ， p_2 を圧力センサ（株式会社キーエンス製，AP-43）で検出する。また，両シリンダ室圧力をサーボバルブ（FESTO社製，MPYE-5-M5-010-B）により調節する。制御則は実時間Linux（RT-AI）上で構築しており，サーボバルブへの印加電圧に相当する制御信号 u はサンプリング周期 5 ms ごとに計算される。

シリンダ室内圧力 p_1 の状態方程式は次式で与えられる。なお， p_2 についても同様である。

$$T_p \frac{d}{dt} p_1 = -p_1 + K_p u - K_v \frac{d\ell}{dt} \quad (3)$$

ここで， T_p ， K_p ， K_v はそれぞれ，圧力応答の時定数，および圧力に及ぼす制御信号，ピストン速度の影響を表す係数である。 p_2 に関しても同様の式で求められる。

一方，ピストンの運動方程式は次式で与えられる。

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 = m \frac{d^2 \ell}{dt^2} + b \frac{d\ell}{dt} + f_\ell \quad (4)$$

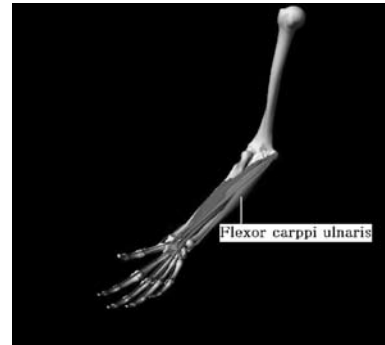
ここで， m はリンクあたりの等価慣性質量， b は粘性摩擦係数， f_ℓ はリンクに作用する外力を表している。

手首の運動には，Fig. 2に示すようにflexion/extension（屈曲/伸展），radial flexion/ulnar flexion（橈屈/尺屈），pronation/supination（回内/回外）動作があり，それぞれ回転角 ϕ ， θ ， ψ に対応する。

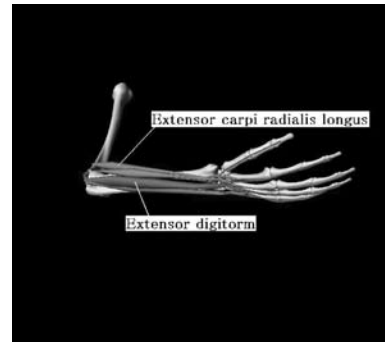
3. 筋電位信号に基づくリハビリテーション

Fig. 3に筋電位信号に基づくリハビリ支援システムの制御系を示す。また，Fig. 4に本装置によりリハビリ訓練を行う様子を示す。対象とする筋肉は尺側手根屈筋（Flexor carpi ulnaris，Fig. 5(a)）／長橈側手根伸筋（Extensor carpi radialis longus，Fig. 5(b)）とし，それらの上の皮膚表面に筋電位センサの電極を貼り実験を行った。

Fig. 3中の $iEMG$ は式(5)に示す筋電位信号の移動積分値であり，筋力との間に直線あるいは二次曲線的な関係があることがわかっている¹¹⁾。本研究では，これを筋力の指標として導入する。



(a) Muscle for Flexion



(b) Muscle for Extension

Fig. 5 Muscle for Flexion/Extension

$$iEMG(t) = \int_{t-T}^t |EMG(p)| dp \quad (5)$$

ここで， EMG は表面筋電位信号であり，積分時間 T は筋力の発生に対する計算値の遅れや計算値に生じる振動成分等の影響を考慮して 1.0s に設定する。筋力と関節角度/角速度間に負荷を設定するため， $iEMG$ に負荷となる機械インピーダンスの逆数 I_{mp}^{-1} をかけてフィードバックし，内部に位置制御系を構成した位置ベース型の制御系を構築する。位置制御部には前置き補償器として PD コントローラを用い，その出力を手先座標系での速度の目標値と考え，これにヤコビ行列 J をかけてリンクの速度の目標値に変換し，速度サーボを構成する。ここで，制御パラメータを Table 1 に示す。なお，目標位置・姿勢 h_i は原点としている。

4. 実験結果および考察

4.1 負荷として剛性を設定した場合

Fig. 3に示す制御系のインピーダンスモデル I_{mp} として剛性 K を設定し，筋電位信号に基づく剛性制御を実施する。動作方向を手関節屈曲／伸展方向とし，インピーダンスモデルへの入力には，その方向の運動に対して拮抗筋として作用する長橈側手根伸筋の $iEMG$ と尺側手根屈筋の $iEMG$ の差を用いている。実験結果を Fig. 6 に示す。ここで， $K = 0.02 \text{ vs/rad}$ としている。なお，以下の実験は健康な 20 代男性を被験者として実施している。同図(a)において実線は屈曲／伸展方向の関節角度を，点線はインピーダンスモデルの出力であり，関節角度の目標値（Fig. 3における H_d ）に相

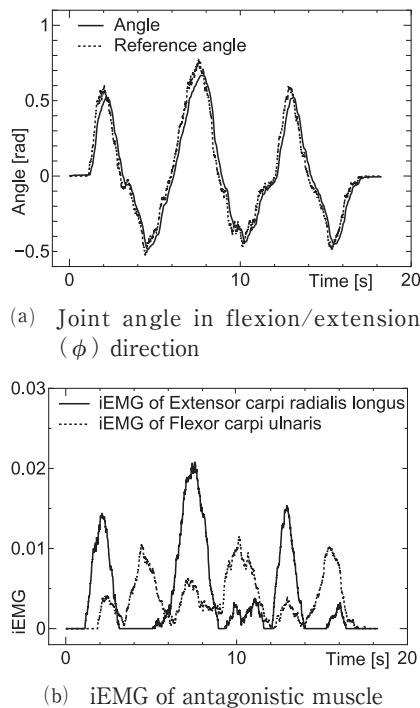


Fig. 6 Rehabilitation for dominant muscle (stiffness control)

当する。これら両者はよく一致しており、設定した剛性が実現できていることがわかる。同図(b)において、実線は長橈側手根伸筋の*iEMG*、点線は尺側手根屈筋の*iEMG*を示す。屈曲と伸展方向の動作に対応して、両拮抗筋が交互に出力している様子がわかる。このように拮抗筋の筋力を用いることで、屈曲/伸展両方向に対して運動を実施できることがわかる。このような筋力と関節角度に比例関係を設定し剛性特性を実現する実験は、橈屈/尺屈方向に対しても実施しており、設定剛性が正しく実現されることを確認している。

4.2 設定剛性の調整による訓練動作の実現

実際の訓練現場では、RM (Repetition Maximum) 法等により負荷の大きさ及び運動回数が決定されている。RM法は通常、RMの前に数字をつけて「～RM」と表記し、「～回反復できる最大の負荷」を意味する¹²⁾。例えば、「1RM (最大筋力) の70%の筋力で5回反復する事を1セットとし、2分間の休憩をはさみ3セット行う」等の動作が訓練現場で実施されている。このようなRM法に基づく訓練動作を、前節で示した筋力に基づく負荷設定による手法により実現する。具体的には、前もって患者のIRM (最大筋力) を測定し、ある割合 (例えば70%) の筋力が最大可動域で達成されるように剛性値を設定する。患者個人の最大筋力は、RM法の実施に必要なだけでなく、回復度の直感的な指標ともなるため患者自身のモチベーション維持・向上に貢献すると考える。

最大筋力を測定するために、Fig. 3を力制御モードに変更する。具体的にはFig. 3のPDコントローラの入力信号として、運動させたい方向 (例えば伸展方向であれば ϕ 方向) に対す

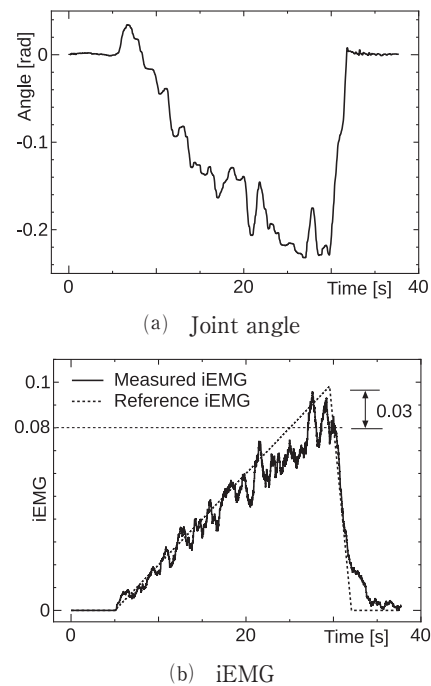


Fig. 7 Measurement of maximum muscle force

る要素に、目標とする*iEMG*と訓練したい筋肉の*iEMG*の偏差を入力し、その他の要素は0を入力する。患者には等尺動作 (装置からの印加力に抗して関節角度を一定に保つ) を指示し、目標*iEMG*をランプ状に増加させていく。目標*iEMG*と被験者の*iEMG*の差がある閾値を越えた時の筋力を最大筋力とし、目標*iEMG*をランプ状に減少させ測定を終了する。

Fig. 7に伸展方向の運動における左手長橈側手根伸筋の最大筋力を計測した結果を示す。同図(a)(b)はそれぞれ、伸展方向の角度変化、*iEMG*の出力を示す。目標*iEMG*との偏差の閾値は0.03Vsとした。同図(b)よりランプ状に増加する目標*iEMG*に対して被験者は徐々に対応できなくなり、時刻約30秒で偏差が閾値を越えたところで終了し、その時の値0.08Vsを被験者の最大筋力とする。

Fig. 8はRM法に基づく訓練動作を行なった結果を示す。運動は左手伸展方向のみとし、対象は左手長橈側手根伸筋のみとした。伸展方向の最大可動域0.6radにおいて、先に測定した左手長橈側手根伸筋の最大筋力の70%を発揮するように設定剛性を $K=0.09Vs/rad$ とした。同図(a)より、点線で示す目標角度 (インピーダンスモデルの出力) と実線で示す実際の角度はよく一致し、設定した剛性が実現できていることがわかる。また、同図(b)において、同図(a)に示す最大可動域である0.6radまで伸展させた時に、最大筋力0.08Vsの70%である0.056Vsをほぼ出力していることがわかる。

4.3 トリックモーションとその回避

Fig. 9は、Fig. 6と同様に、手首関節伸展方向に対して剛性特性を与えた結果であるが、Fig. 3に示す制御系におい

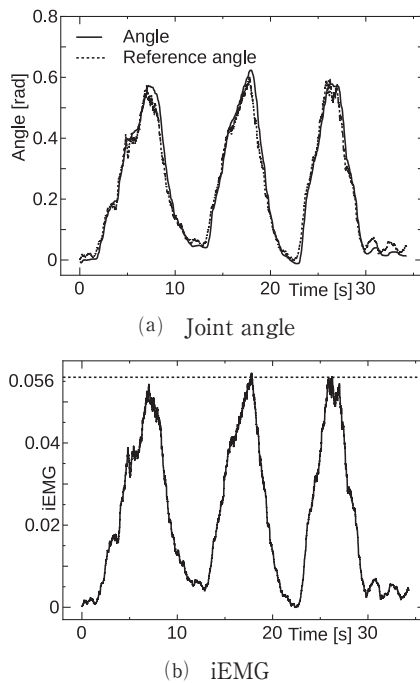


Fig. 8 Training based on RM method

て、インピーダンスモデル I_{mp} への入力として、従来の関節トルクに基づく手法のように式(1)、(2)で求められた伸展方向のトルクを用いていることに注意されたい。正常な手首屈曲動作を生成するように行ったので、同図(a)に示す回転角度に見合ったトルク、ならびに長橈側手根伸筋のiEMGが同図(b)から読み取れる。一方、Fig. 10は故意にトリックモーションを起こして同様の実験を行った結果である。具体的には肩関節を動作させて結果的に手首関節に回転変位及びトルクを発生させた。正常な訓練動作を行ったFig. 9と比較すると、手首関節変位、トルクともほぼ同等の値を示しているが、当然ながら長橈側手根伸筋のiEMGは小さく、訓練効果が期待できない。

Fig. 11はFig. 3におけるインピーダンスモデルの入力を長橈側手根伸筋のiEMGに戻し、Fig. 10と同様に故意にトリックモーションを起こした際の結果を示す。Fig. 10と同等の手首トルクが発生しているが、長橈側手根伸筋のiEMGが小さいため関節角度も小さく訓練動作が実施されない。本装置のような機械システムを用いた訓練動作では、安全性の観点から上腕部を拘束することは得策でない。その結果、上記のようなトリックモーションが生じる可能性があるが、本手法によればトリックモーション時に訓練動作自体が成立しないため、根本的に防止することができる。

4.4 筋疲労の評価

リハビリ訓練では、長時間、一連の訓練動作を繰り返す行なうため、筋肉に疲労が生じる。一旦疲労が生じると訓練効果が低下するため、訓練動作中に筋肉の疲労度が測定できれば、それに合わせて訓練メニューを調整することができる等都合がよい。

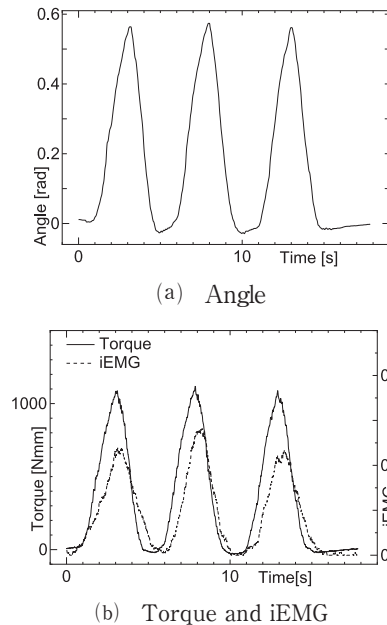


Fig. 9 Without trick motion (control with torque)

筋が疲労すると、表面筋電位信号のパワースペクトル密度 (Power Spectral Density, 以下PSD) が低周波数域に移行していくことが知られている¹⁰⁾。そのため、PSDより平均周波数を算出し、それを疲労度の指標とする。本研究では、筋肉の疲労度に応じて訓練動作を調整する機能を将来的に付与したいと考えており、そのために筋肉の疲労度をリアルタイムに測定する。

本制御システムが使用しているLinuxのマルチタスク機能と共有メモリを用いたプロセス間でのデータ通信機能を利用する。リハビリ訓練動作を実行する制御用プロセスとは別に、FFT処理用のプロセスを平行して動作させる。ここで、FFT処理には、GSL (GNU Science Library) を採用しており、双方のプロセスは、共有メモリによりデータ共有している。制御用プロセスでは1秒毎に過去1秒間のEMGデータを共有メモリに書き込む。FFT処理用プロセスは共有メモリに書き込みがあるとFFT演算を行いMPFを導出して共有メモリ内のMPF値を更新する。

以下の手順に従い筋疲労計測実験を行った結果をFig. 12に示す。対象は長橈側手根屈筋とした。

- 1) 5秒間 (0～5s) 静止した後に5秒間 (5～10s) かけて本装置よりランプ状に負荷を2000Nmmになるように印加する
- 2) 負荷を2秒間 (10～130s) 2000Nmmで維持し、その後5秒間 (130～135s) かけて負荷を0Nmmまで減少させる
- 3) 1分間のインターバルをはさみ手順1) から手順2) を計5回繰り返す

Fig. 12(a)のグレーの線は1回目の計測で取得したEMGを、

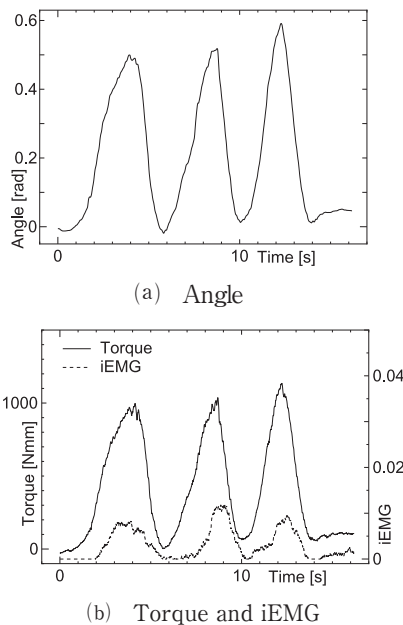


Fig. 10 With trick motion (control with torque)

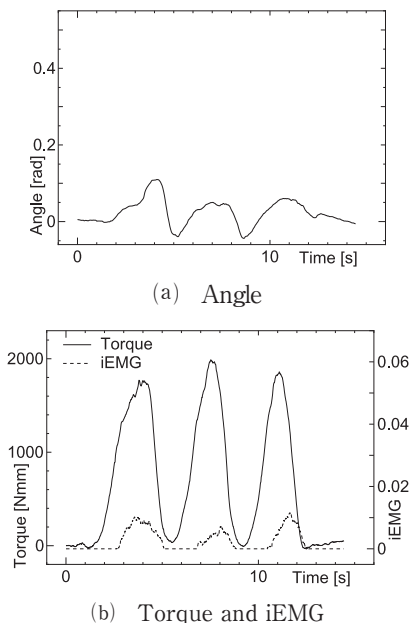


Fig. 11 With trick motion (control with EMG)

黒色の実線はMPFを示している。また、Fig. 12(b)の黒色およびグレーの実線は、それぞれ、1回目、および5回目の計測時におけるMPFを示している。Fig. 12(a)より、2分間ほぼ一定の筋力を出力しており、これに伴いMPFが時間とともに減少している事が分かる。また、Fig. 12(b)より、1回目のMPF値に比べ5回目のMPF値の方が、急速に減少して行く様子が確認できる。一定の負荷が印加されている10～130s間の最小二乗法により一次近似した傾きは、1回目が -0.046Hz/s 、5回目が -0.089Hz/s であった。試行を重ねる毎に筋肉は早く疲労していくことがわかる。このようにFig. 12に示すようにリアルタイムに検出したMPFは、試行後、120秒間蓄積したEMGデータをオフラインで周波数

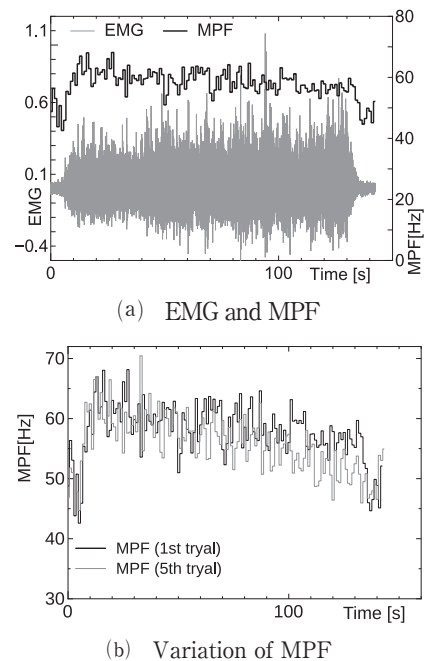


Fig. 12 Fatigue index with MPF

解析 (GNU Octaveを使用) して求めた結果ともよく一致しており、リアルタイムに計算する妥当性を確認している。このように訓練動作と平行して患者の疲労具合を検出できることがわかる。

5. 結 言

本稿では、リハビリ訓練における筋力増強訓練に着目し、訓練したい筋肉を選択かつ集中的に訓練するために、空気式パラレルマニピュレータを用いて、筋力と関節角度/角速度の関係において負荷を設定する訓練手法を提案し、その基本的な制御性能を実験により検証し、以下の結論を得た。

- 1) 本手法では、患者は筋力を発生しない限りマニピュレータが動作しないため、従来の関節トルクに基づく方法では回避が容易でないトリックモーションを基本的に防止することができる。
- 2) 本装置は多自由度であるため、動作方向を任意に設定できる。このため、ある運動方向に対して、本来その運動方向には支配的でない筋肉との組み合わせにおいても負荷を設定した訓練を行なうことが可能であり、運動に対する種々の筋肉の貢献度を考慮した訓練が実施できる。
- 3) 本装置により、最大筋力を前もって測定しておくことで、RM法等の従来より実施されているリハビリ訓練を本手法で実行できる。
- 4) 筋電位信号の平均周波数が疲労に伴い低周波数域に移行することを利用し、訓練動作に並行してリアルタイムに疲労度を検出する手法を提案した。

参 考 文 献

- 1) (社)日本理学療法士協会編：理学療法白書, (社)日本理学療法士協会 (2005)
- 2) 古荘純次, 小柳健一, 片岡次郎, 笠 潮, 井上昭夫, 竹中重和：三次元上肢リハビリ訓練システムの開発 (第1報：ERアクチュエータを用いた機構およびシステム全体の開発), 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 5, p. 123-130 (2005)
- 3) Abhishit Gupta, Marcia K. O'Malley, Volkan Patoglu and Charles Bugar : Design, Control and Performance of RiceWrist, The International Journal of Robotics Research, Vol. 27, No. 2, p. 233-251 (2008)
- 4) S. Hesse, G.S. Tigges, M. Konrad, A. Bardeleben and C. Werner : Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 84-6, p. 915-920 (2003)
- 5) H.I. Krebs, B.T. Volpe, D. Williams, J. Celestino, S.K. Charles, D.L. Lynch, and N. Hogan: Robot-Aided Neurorehabilitation: A Robot for Wrist Rehabilitation, IEEE Trans. on Neural System and Rehabilitation, Vol. 15, No. 3, p. 327-335 (2007)
- 6) 上田敏, 大川嗣雄, 明石謙：標準リハビリテーション医学, 医学書院 (1986)
- 7) 高岩昌弘, 則次俊郎：空気式パラレルマニピュレータを用いた手首部リハビリテーション支援装置の開発—多自由度リハビリ動作の実現—, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 6, p. 747-753 (2006)
- 8) M. Takaiwa, T. Noritsugu : Wrist Rehabilitation Equipment Using Pneumatic Parallel Manipulator —Acquisition and Implementation of P.T.'s Motion—, Proc. of World Automation Conference, ISORA, 223 (2010)
- 9) 高岩昌弘, 則次俊郎, 正子洋二, 佐々木大輔：空気式パラレルマニピュレータを用いた手首リハビリ支援装置の開発—療法士の徒手訓練動作の獲得と手首特性の多自由度計測—, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 8, p. 110-112 (2007)
- 10) Mamaghani Nasser Kolehini et. al : Changes in Surface EMG and Acoustic myogram Parameters During Static Fatiguing Contractions until Exhaustion : Influence of Elbow Joint Angles, Journal of physiological anthropology and applied human science 20(2), p. 131-140 (2001)
- 11) 赤沢堅造, 梶山三郎, 藤井克彦：ヒト上肢筋の力学的特性の測定, バイオメカニズム 4, 東京大学出版会, P. 49 (1978)
- 12) 有賀誠司：基礎から学ぶ！筋力トレーニング, ベースボール・マガジン社 (2008)

〒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
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 FAX(〇三)三四三三―八四四二

東京都文京区小石川一―三―七
印刷所 勝美印刷株式会社