高付加価値歩行訓練システムに関する研究

長渡知明*,早川恭弘*

Development of High-Value-Added Walking Training System

Toshiaki NAGATO * and Yasuhiro HAYAKAWA *

The purpose of this study is to develop a walking training system for elderly people. This system consists of three components: a wearable walking assist device, a high-performance shoes, and an active walker. In this study, a wearable walking assist device to support them is developed. Their walking speed and step can be improved by supporting a flexing action of hip joint. The device is required to have a lightweight, simple structure, and portability. Therefore a pneumatic rubber artificial muscle which has a lightweight and high power-weight ratio is used as an actuator. Further, CO2 gas cartridge tank is used to realize a portability instead of air compressor as air pressure source. In the experiment, myogenic potential is measured when subject wearing the wearable walking assist device walks on a treadmill. The number subject is five students (healthy adult males). From some experimental results with respect to both walking speed and step, similar waveforms are obtained. When the assist function is on state, the average maximum value of myogenic potential decreases as compared with turned off state. In other words, it became clear that this device can perform similar walking even with small muscular strength. Therefore, it can be said that the wearable walking assist device has a walking assistance function. In the future, we will actually experiment with the elderly people, and improve with the opinions of them. In this paper, descriptions on the development of high-value-added walking training system, the structure of the wearable walking assist device, and experimental results and their evaluation are described.

Key Words: Walking Training, Rehabilitation, walking assist device, Air Pressure, Pneumatic Rubber Artificial Muscle

1. 緒言

近年,日本では急速な少子高齢化が問題となって いる¹⁾. 1960年代には総人口の6%に満たなかった 高齢者人口割合が,2007年には21%を越えて超高齢 社会となった.加えて,2010年を境に日本の総人口 は減少を始めており,2050年には1億人を下回り, 生産年齢人口は総人口の約52%になると推計されて いる.リハビリテーション(以下,リハビリ)の目 的の中で一番多いものが身体機能の維持管理である. っまり,今後需要の高まるリハビリの中で,少子高 齢化の問題が大きく表れるのはこの内容を担当する 理学療法士である.すなわち,理学療法士1人に対 して高齢者が複数人という状況が発生し,理学療法 士の負担が増加すること,さらに,高齢者のリハビ リ充実度,いわゆるQOL(Quality of Life)の低下に繋 がると危惧されている.

これらの課題に対し、高齢者の歩行訓練補助を目 的とした機器は様々な研究がれている。例えば、芝 浦工業大学の山本²⁾らは免荷装置とトレッドミルを 併用し、空気圧ゴム人工筋を用いた免荷式歩行訓練

* 奈良工業高等専門学校

(〒639-1080 奈良県大和郡山市矢田町 22 番地) (E-mail: hayakawa@ctrl.nara-k.ac.jp) システムを開発した. 筑波大学の山海ら³⁾は人の動 作意志に対応した生体電位信号を用いて人の運動能 力を補助する生体駆動装着型ロボットスーツ HAL に関する研究を行っている.しかし,これらの機器 は非常に高価あるいは使用環境を限定してしまう.

そこで我々は、高齢者が自身で歩行訓練を行うこ とが出来、かつ使用環境を限定することのない高付 加価値歩行訓練システムの開発を行う.

2. 高付加価値歩行訓練システム

本研究で開発を行う高付加価値歩行訓練システム の,使用時の想定概観図を Fig.1 に示す.具体的な 動作としては,高機能靴により歩行状態を確認しな がら,歩行補助装具により歩行アシストを行う.



Fig.1 Walking Training Image

3. 歩行アシスト装具

歩行アシスト装具のシステム構成図を Fig.2 に示 す.歩行アシスト装具は、股装具に取り付けた空気 圧ゴム人工筋を収縮させることにより、歩行動作に おける屈曲、つまり、足を前に持ち上げる動作のア シストを行う.また、印加する空気圧の最大値を変 化させ、アシスト力を変えることで、装着者の状態 に合わせた歩行動作アシストを行う.

一般に,空気圧機器を使用する際,圧力源の確保 が大きな課題となってくる.圧力源にコンプレッサ を用いると,それ自体が巨大で重いため,軽量で小 型の機器を開発できても,配管チューブ等が原因で 携帯性に欠けるという点がある.そのため,我々は 圧力源として市販されている炭酸ガスボンベを使用 することで,携帯性を欠くことなく,緩衝効果や防 爆性,過負荷に対する安全性を有する機器の研究開 発を行う.しかし,炭酸ガスボンベは使用環境によ って内圧の変化が生じ,制御弁に想定外の負荷をか けてしまう可能性が考えられる.そこで,CKD 株 式会社で開発されている炭酸ガスレギュレータを用 いて,制御弁側に流入する気体の圧力を一定に保つ ことで機器の破損対策を講じる.







(a) CO2 Gas Regulator (b) CO2 Gas Cartridge Tank Fig.3 Air Pressure Source

	C' []	Weight	Output Pressure
	Size [mm]	[g]	[MPa]
CO2 Gas Regulator	φ 29 x 63	169	0~0.7
CO2 Gas Cartridge	440 122	294	7.0
Tank	φ40 x 133	(220)	(25.5°C)

4. 歩行アシスト実験

歩行アシスト装具を装着した状態で、トレッドミル上を歩行した際の腸腰筋筋電位と股関節角度の測定結果として、被験者の内1名のグラフをFig.4, Fig.5に示す.さらに、最大筋電位と股関節角度を Table2にまとめる.股関節角度のグラフにおいて、 正方向が屈曲方向、負方向が伸展方向である.



Fig.5 Hip Joint Angle

Table2 Experimental Result

	Maximum Myoelectric Potential [mV]	Maximum Flexion Angle [deg]	Maximum Extension Angle [deg]
ASSIST OFF	1.36	21.0	17.5
ASSIST ON	0.79	22.5	15.8

これらの結果より、歩行動作を行う上で発生した 腸腰筋の最大筋電位は平均で 36.2%の減少が見られ た.また、股関節角度の最大屈曲・伸展角度は大き く変化していないことがわかる.

5. 結言

本研究では、ゴム人工筋により股関節屈曲動作の 補助を行う歩行アシスト装具を開発した.実験によ り、補助機能を用いると小さな筋力で補助なしの時 と同様の歩行を行えることを明らかにした.

- 1) 内閣府,"平成28年版高齡社会白書(全体版)"
- 柴田芳幸,今井進吾,住友達哉,三好扶,山本紳一郎,"免荷式歩行訓練システムエアゲイトの開発",活生命支援医療福祉工学系学会連合大会講演論文集,pp.OMBUNNO.3E2-6,2010
- 3) 河本浩明,有安諒平,久保田茂希,山脇香奈 子,江口清正,山海嘉之,"ロボットスーツ HAL の探索的臨床試験",ロボティクス・メ カトロニクス講演会講演概要集, pp.1A2-C02(1)"-"1A2-C02(2)",2013

エアタービンスピンドルの回転数制御と工具損耗推定方法

加藤友規*

Rotation Control of Air Turbine Spindle and Tool Wear Estimation

Tomonori KATO*

In this article, a disturbance-compensating and energy-saving rotation control method of an air turbine spindle is explained. The method utilizes rotation feedback control with disturbance force observer. In order to realize quick supply pressure control, a high precision quick response pneumatic pressure regulator (HPR), which has been developed by the author and his group is used. In a former research, the superiority of the method is explained by experimental results using an air power meter, which is a device to evaluate the energy consumption of pneumatically driven elements. In this article, by applying the rotation control method to milling experiment, an in-process tool wear estimation method is proposed. The possibility of the proposed method is shown with some experimental results.

Key Words : Pneumatics, Air turbine spindle, Rotation control, Tool wear estimation

1. はじめに

超精密非球面加工機などの超精密加工機械におい て、高精度・高速対応・低摩擦・低振動などの優れ た特性を有する静圧空気軸受式のエアタービンスピ ンドルが広く使用されている.著者らの研究室では、 気体用超精密高速応答圧力レギュレータ(HPR)¹⁾ を供給空気の制御に用いることで、エアタービンス ピンドルの回転数を高速・安定的に制御することと、 省エネルギー化を実現することを目的として研究を 進めている.さらに、本方法を切削加工に適用する ことで、工具の逃げ面に生じる損耗をインプロセス において推定する方法を考案し、検証を行っている.

2. エアタービンスピンドルの回転数制御

従来,エアタービンスピンドルの回転数を計測・ 制御することは困難であった.そこで,切削加工時 に切り屑や切削油の影響を受けずに回転数Nを安定 的に計測するため,非接触方式の回転計をハウジン グ内に内蔵したエアタービンスピンドルを設計・製 作した(Fig.1).このエアタービンスピンドルの制 御系の構成をFig.2 に,制御ブロック線図をFig.3 に 示す.エアタービンへの供給圧 P の調節には HPR を使用し,消費エネルギーはエアパワーメータ

(APM)²によって測定される.制御系において, 回転数 N の計測値はフィードバックされ PI 制御される ほか,回転数 N と供給圧 P から外乱推定オブザーバ により,スピンドル先端に生じる外力が推定され補 償される.これまでの研究により,本制御方法を用 いることで,回転数の整定が従来よりも5倍程度早 く,時定数で約1.3 秒であることを確認している³.



Fig.1 Photograph of developed air turbine spindle



Fig.2 Configuration of proposed rotation control system



Fig.3 Block diagram of proposed rotation control system

^{*} 福岡工業大学工学部知能機械工学科

^{(〒811-0295} 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1)

⁽E-mail: t-kato@fit.ac.jp)

^{*} Fukuoka Institute of Technology

3. 切削加工実験と工具損耗に関する考察

前述のエアタービンスピンドルの制御方法を用いて,超硬ボールエンドミルで合金工具鋼(SKD61)を切削加工する実験を行った.実験の様子を Fig.4 に,実験の際の工具経路を Fig.5 に,実験条件を Table1 に示す.

実験結果について,観察された工具逃げ面摩耗の 写真(例)を Fig.6 に,切削距離と工具逃げ面摩耗 量の関係を Fig.7 に,HPR からエアタービンへの供 給圧力と工具逃げ面摩耗量の関係と相関を Fig.8 に それぞれ示す.これらの実験結果より,提案方法は 切削加工において有効であることと,HPR からエア タービンへの供給圧力と工具逃げ面の摩耗の推定量 には高い相関があることが明らかとなった⁴⁾.



Fig.4 Milling experiment



Fig.5 Tool trajectory in milling experiment

-		
Tool	Ball end mill	
Tool radius [mm]	1	
Number of cutting tooth	2	
Size $(L \times W \times H)$ [mm]	300×150×30	
Machine tool	Rakuraku-mill 3V	
Lubricated condition	Semi-dry	
Type of milling	Down cut	
Rotation speed N [min ⁻¹]	20,000	
Axial depth of cut aa [mm]	0.2 0.15	
Pick feed P _f [mm]	0.3 0.1	
Feed rate <i>f</i> [mm/min]	2.000	

Table 1 Specification in milling experiment



Fig.6 Observed flank wear in milling experiment



Fig.8 Experimental results (Pressure difference and Flank wear)

これらの結果より,提案方法による切削加工において, HPR による供給圧力を測定することで工具寿命を推定できる可能性を示した.

- 川嶋健嗣,加藤友規,山崎俊平,香川利春:気体 用の超精密高速応答圧力レギュレータの開発,日 本フルードパワーシステム学会論文集,38-2, 17/22 (2007)
- 小林敏也: 圧縮空気のエネルギー測定装置,油空 圧技術(日本工業出版), Vol.52, No.11, 82/87, (2013)
- 3) Tomonori Kato, Genki Higashijima, Takanori Yazawa, Tatsuki Otsubo, Katsutoshi Tanaka : Proposal of Disturbance-Compensating and Energy-Saving Control Method of Air Turbine Spindle and Evaluation of Its Energy Consumption, Precision Engineering, Vol.43, 439/447 (2016)
- 4) Yusuke Okamoto, Takanori Yazawa, Tomonori Kato, Kazuya Nishida, Shinya Moriyama, Yukio Maeda, Tatsuki Otsubo : Study on Tool Wear In-process Estimation for Ball End Mill using Rotation Control Air Turbine Spindle, Key Engineering Materials, Vol.749, 94/100 (2017)

空気式パワーアシストロボットの開発

○佐々木大輔*

Development of Pneumatic Power Assist Robot

Daisuke SASAKI*

The purpose of this study is to develop power assist device, which is easy to use like normal clothes and does not restrict movement, and portable air supply system. User can be assisted by wearing this one on which the pneumatic soft actuator, which has a high power weight ratio and a light weight, is put. The developed air supply system, which can retrieve compressed air from an actuator, is effective to decrease energy consumption. This air supply system is effective to downsize whole system. In addition, the developed valve has features such as small size and light weight, by using pneumatic soft actuator. In this paper, outlines of the developed power assist wear, and portable air supply system, air-operated valve are described.

Key Words : Pneumatic, Wearable robot, Soft actuator, Compressor, Energy saving

1. はじめに

本研究は衣服と同程度の着用性をもつパワーアシ ストロボットの実現に取り組んでいる.衣服と同程 度の着用性を実現するため開発したパワーアシスト ロボットの駆動には,布材料およびゴム風船から構 成される空気圧ソフトアクチュエータを使用してい る.このソフトアクチュエータを衣服生地内に配置 することで,外観や装着性は通常の衣服でありなが ら使用者の動作補助が可能な内骨格型のパワーアシ ストウェアを実現している.

また,空気圧アクチュエータの駆動には,コンプ レッサ,ポンプなどの空気源ならびにエアバルブな どで構成される空気圧供給システムが必要である. 上記のパワーアシストウェアを日常生活で使用する ためには,空気圧供給システムにも携帯性が求めら れる.携帯性に優れる空気源を実現するため,駆動 対象から排気される圧縮空気を回生可能な空気圧供 給システムならびに軽量なエアバルブを開発した.

以下では,パワーアシストウェアならびに小型空 気圧供給システムおよびエアオペレートバルブにつ いて紹介する.

2. 膝・腰関節用パワーアシストウェア

Fig.1 に開発したパワーアシストウェア¹⁾の外観を 示す.本ウェアは同図(b)の様にアクチュエータ,張 力伝達用布材,上着,インナーウェア,アウターウ ェア,靴から構成されている.靴を除いたウェア全 体の重量は約 1800[g]であり,通常の衣類と同程度で ある.使用した空気圧ソフトアクチュエータの外観 を Fig.2 に示す.本アクチュエータはゴム風船を布

(〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

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

膝関節前面,背中に配置したソフトアクチュエー タの膨張力を張力伝達用布材により身体各部に伝達 することで,膝関節および股関節,腰関節の負担軽 減が可能であることを実験的に確認している¹⁾.









(a)Initial state (b)Pressurized state Fig.2 Soft actuator for power assist wear

^{*} 香川大学工学部

⁽E-mail: daisuke@eng.kagawa-u.ac.jp)

^{*} Faculty of Eng., Kagawa University

3. 小型空気圧供給システム

本研究で提案する空気圧供給システム²⁾³の構成 を Fig.3 に示す. Fig.3 中の太い実線は配管を表して いる.本システムは,従来の空気圧供給システムに ある供給機構に加えて,アクチュエータから排気さ れる圧縮空気を回収して再利用する回生機構を付与 したシステムである.そのため,本システムではア クチュエータの上,下流側にそれぞれ供給タンク, 回収タンクを1台ずつ配置する.開発したシステム の性能を測定した結果,ゴム材料を使用した容積可 変タンクを用いることで,従来の固定タンクを使用 する場合と比較して大幅に消費エネルギーを低減で きることを確認した²⁾.

空気圧ソフトアクチュエータを用いた エアオペレートバルブ

試作したバルブ⁴の内部構造,外観を Fig.4 に示 す.ポリウレタンチューブ(内径 2.5[mm],外径 4[mm])を両端に取り付けたシリコーンチューブ (内径 3[mm] 外径 5[mm]),ABS 製固定・駆動パ ーツ,ソフトアクチュエータ(樹脂ベローズ)によっ て構成されている.樹脂ベローズの伸縮によりリン ク機構を駆動することで,シリコーンチューブを屈 曲,伸展させて圧縮空気の流れを切り替える.一本 のチューブで管路を構成しているため,有効断面積 増大による通過流量を多くすることが期待できる.

4. おわりに

膝・腰関節用パワーアシストウェアならびに小型 空気圧供給システム,エアオペレートバルブについ



(a) Structure



(b) Overview Fig.3 Air supply system for wearable power assist device

て述べた.内骨格型パワーアシストロボットおよび その携帯型空気源の実現可能性は確認できたため, これらの知見を活用し,スタンドアローンで利用可 能な空気圧供給システムを内蔵したパワーアシスト ウェアを実現していきたい.

参考文献

- Daisuke Sasaki, Masahiro Takaiwa : Development of Pneumatic Power Assist Wear to Reduce Physical Burden, Proc. of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 626/631 (2014)
- 2) 佐々木大輔、則次俊郎、高岩昌弘、岩脇辰侑: 空気圧駆動ウェアラブルデバイスのための小型 空気圧供給システムの開発、日本ロボット学会 誌、31-7,659/668(2013)
- 3) 佐々木大輔,高岩昌弘,瀧翔太:空気圧駆動ウ ェアラブルデバイスのための小型空気圧供給シ ステムの開発-第2報:空気圧エネルギーの推定 と空気圧供給システムの制御-,日本ロボット学 会誌,33-7,490/496(2015)
- 4) 井上豊, 佐々木大輔, 高岩昌弘:空気圧ソフト アクチュエータを用いたエアオペレートバルブ の開発, 第17回計測自動制御学会システムイン テグレーション部門講演会(SI2016) 講演論文集, 2302/2304(2016)



(a) Structure



(b) Overview Fig.4 Overview of developed valve

レスキュー用アシストスーツの開発

○吉満俊拓*,田地悠甫*,今野直也*,藤田尚樹*

Development of Assist Suit for Rescue

Toshihiro YOSHIMITSU^{*}, Yusuke TAJI^{*}, Naoya KONNO^{*}, Naoki FUJITA^{*}

In recent years, loss of lives and rescue has increased for nature disaster for example Mt.Ontake eruption. In rescue operations what active "long hour", "outdoor" and "hill", is broken out exhaustion and injury. Then, we invented to Assist Suit for outdoor activities because it'll be effective in preventing injury and tired. Assist Suit we invented uses a pneumatic cylinder different of a lot of Assist Suit including HAL the representative Assist Suit made by Cyber Dyne use an electric motor helped joint torque. Using pneumatic cylinder for Assist Suit, it has advantaged at weight and long hour activities we thought. In this study, we putted stress to making control system for Assist Suit and inserting a spring element in power source experimentally.

Thereby we found some good result of experiments, measuring of damping torque, range of motion and sensing system for Assist Suit's control system. Now introduce that.

Key Words : Pneumatic Cylinder, Power Assist, Robotics

1. はじめに

近年,御岳山の噴火などの自然災害による人的被 害やそれに伴う救助活動が増加している.救助活動 においては「長時間」「屋外で」「不整地・傾斜地帯 を」活動する場合が多々あるため脚部,特に膝部に 加わる負荷が大きくなり,それに起因する疲労や怪 我の発生が危惧されている.

屋内用アシストスーツで採用されている機構は 「自由度が少なくアシストが必要な方向を支える機 能がある」か「関節に自由度はあるが,関節を支え る機能はない」のどちらかに分類される.不整地・ 傾斜地では活動を妨げない自由な動きと,怪我・捻 挫が起きないように関節の動きを補助する,といっ た相反する効果を実装させなければならない.

2. アシストスーツ

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

- ・軽量化
- ・斜面での下肢の負担軽減・怪我の防止
- ・長時間の活動

が挙げられる.

 * 神奈川工科大学院工学研究科 ロボット・メカトロニクスシステム専攻
 (〒243 – 0292) 神奈川県厚木市下荻野 1030
 (E-mail: s1486005@ccce.kanagawa-it.ac.jp)
 * Kanagawa Institute of Technology 本研究室では、山岳救助や土砂災害時など,不整地・ 傾斜地で継続的に作業を行なわなければならない状 況において、身体的負荷の軽減・活動時間の延長と 救助者自身の怪我防止を目的とした下肢パワーアシ ストスーツを開発している.

当研究室では、下記2種の屋外活動用アシストス ーツを開発しその有意性の検討を行っている. 屋外活動用アシストスーツ概要図および諸元を以下 の Fig.1, Table1 に示す.

TYPE I では軽量化に重点を置いた設計を行った. 受動要素(ガススプリング)の導入により空気圧シリ ンダ径を小さくすることでアシスト部の重量を減ら すことができると考えられる.



TYPE ITYPE IIFig.1 Assist suit for rescue

Elements	τγρε Ι	ΤΥΡΕ 🛙	
Size [mm]	816×368×252	973×475×266	
Weight	3.6kg	7.1kg	
	Pneumatic	Proumatic	
Power Source	Cylinder(ϕ 16)	Culinder(+22)	
	Gas Spring (98N)	Cylinder(ϕ 32)	
Knee range of motion	90Degrees	120Degrees	

Table1 Specification table

受動要素として、金属バネ・ガススプリングなど があるが、板ばねやねじりバネでは取り付け位置に よって変位が制限されてしまう. 一方, ガススプリ ングは空気圧シリンダとほぼ同じ形状をしており, 取り付けも容易なため TYPE I にて採用した.

TYPEIIでは稼働域の拡大と各関節の疲労軽減に 重点を置いた設計を行った. アシスト用に大径の空 気圧シリンダを用いストロークを伸ばし取り付け位 置を変更することで関節稼働域を拡大し, 傾斜地で の活動が容易なると考えられる.降坂時に膝関節へ 加わる衝撃を空気圧シリンダ等のアシスト部で吸収 することを目標とし、シリンダのロッド速度をスピ ードコントローラで調整することで衝撃吸収を行っ ている. TYPE II では空気圧シリンダのみが取り付 けられている. 直径 32mm の空気圧シリンダを用い ている TYPE II と発揮力を同等かそれ以上とするた め, 直径 16mm の空気圧シリンダとストローク 100mm、ガス反力 98N のガススプリングを使用して いる.

3. アシスト制御

降坂時における膝関節の衝撃吸収をするにあたっ てアシストスーツ本体がセンシングシステムによっ て下り坂を認識し、適切な減衰力を発生できるよう 自己で調整できることが好ましい. アシストスーツ におけるセンシング方法としては筋電位測定や関節 部に取り付けられたモータの回転角を計測する方法 などが挙げられる.

本研究においては屋外活動時でも環境や身体状況 に左右されることなくセンシングが可能であること 等の目的からアシストスーツの股関節可動部に屈 曲・伸展角度を計測するポテンショメータ、腰部に 装着者の姿勢・移動速度等を計測する9軸センサを 取り付け、制御に必要な傾斜角等のセンシングを行 う.以上のセンシングによって得られたデータは組 み込みマイコンを中心とした制御システムに出力さ れる.

スピードコントローラ開度に関しては、その時の 傾斜角に応じたきめ細やかな制御を行うことはせず, Table.2 に示す段階的な開度変化を持たせる. なお、 平地から上り坂にかけてはスピードコントローラの

開度を全開とし、ダンパ機能を持たせていない.

Table 2 Speed Controller Aperture

Slope angle	Aperture
$0 deg < \theta$	Open
$-5 \text{deg} < \theta \leq 0 \text{deg}$	1/4Close
-10deg $< \theta \leq$ -5deg	1/2Close
-15deg $< \theta \leq$ -10deg	3/4Close
$\theta \leq -15 \deg$	Close

Table 3 Experimental results of stepping exercise Decision for experiment 0

\bigcirc : good \circ : pass	Δ : difficult	\times : unable
----------------------------------	----------------------	-------------------

	Туре	Step	One step pass	Two step pass
ID	TYPE I	0	\triangle	\triangle
UP	TYPEII	0	0	0
DOWN	TYPE I	0	\triangle	×
DOWN	TYPEII	0	0	0

このように段階的な変化とした理由として人に対 してアシストカの変化を明示することを目的として いる.またこのような制御を行うことでノイズに対 しても多少の耐性が得られると考えられる.

関節可動域と段差におけるアシストスーツ動作の 可否について実験した.一段あたり高さ182mm×奥 行 301mm の階段に対し、一段昇降・一段飛ばし昇 降・二段飛ばし昇降の3パターンの判定を行った. 実験の結果を Table.3 に示す.

4. まとめ

当研究室ではレスキュー活動など屋外での活動 の補助を目的としたアシストスーツの開発を行って いる. 空気圧アクチュエータに可変絞り機構を加え たレスキュー用下肢パワーアシストスーツを提案し ている.アシスト力を発揮する部位にガススプリン グを追加したことは減衰トルク等の面から一定の妥 当性があると考えられる. その一方でアシスト部位 の発揮力の調整や膝関節可動域の狭窄などの機構的 な面においてまだ考慮の余地が残されている.

制御面に関してはアシストスーツを着用して稼働 させることが可能なシステムを構築することができ た. 可変絞り機構により、状況に応じて下肢関節に 補助を与え、災害救助時における救助者の身体的負 荷や疲労が軽減され

- 活動時間の延長
- ・救助者自身の怪我防止 が期待できる.

拇指の拘縮・痙縮を予防するソフトリハビリテーション装置

谷口浩成*,青山塁斗**

Rehabilitation Device to Prevent Contractures of the Thumb Joint

Hironari TANIGUCHI^{*}, Ruito AOYAMA^{**}

Contracture may occur in joints when the body is paralyzed due to accidents or diseases. It takes a lot of time to treat the contracture, and it also involves pain. Therefore, it is known that it is important to prevent contractures. We have developed a range of motion (ROM) training device using pneumatic soft actuators to prevent contractures. The proposed pneumatic soft actuator with soft material has many advantages such as low mass, flexibility, safety and user-friendliness. In this paper, we describe the results of ROM test using the device that can perform ROM training for joints of the thumb.

Key Words : Soft actuator, Rehabilitation, ROM exercise, Pneumatics

1. はじめに

脳卒中の後遺症として見られる症状の1つに,手 や足がつっぱり、曲がってしまう痙縮がある. 痙縮 を長時間放置していると、筋肉が固まり関節に拘縮 という症状が生じる.手指関節に痙縮や拘縮が生じ ると、物をつかむ際に指を動かすことが困難となり、 痛みが生じる. 痙縮や拘縮の治療には、作業療法士 などによる関節可動域(以下, ROM と略す)運動 が有効であるが、それには多くの時間が必要なだけ でなく、激しい痛みを伴う場合もあり患者の肉体的 なストレスや、介助者に対しての負い目から精神的 なストレスを感じる患者も少なくない. そこで, 痙 縮や拘縮を予防することが重要であると考えられて いる.本研究では、手の中でも拇指に注目して、拇 指の痙縮や拘縮の予防を目的とした ROM 運動装置 を提案する.本稿では,装置の構造,試作および評 価試験の結果について述べる.

2. 拇指リハビリテーション装置

ROM 運動とは,寝たきりの患者などに作業療法 士等が行う施術であり,関節の拘縮を予防し正常な 関節可動域に近づけ維持するために,最大可動域ま で動かす運動療法である.病院施設などでは,手指 関節の ROM 運動は,作業療法士が両手を使い,ゆ っくり時間をかけて手指関節を動かす.また,個人 によって関節の可動域は異なるため,痛みなどが生

- * 大阪工業大学ロボティクス&デザイン工学部 ロボット工学科
- *** 大阪工業大学大学院ロボティクス&デザイン工学 研究科ロボティクス&デザイン工学専攻
- (〒530-8568 大阪府大阪市北区茶屋町1-45)
- (E-mail: hironari.taniguchi@oit.ac.jp)
- * Osaka Institute of Technology
- ** Graduate School of Robotics and Design, O. I. T.

じないようにする必要がある.提案する拇指リハビ リテーション装置は,指の長さや,手の大きさなど の個人の手の寸法によらず様々な患者に使用できる ことを目標としている.そこで我々の研究グループ では,独自に開発した空気圧ソフトアクチュエータ を装置の駆動源とすることで,作業療法士が行う施 術を再現するような ROM 運動を試みている^{1) 2)}. 図1に試作した拇指の ROM 運動装置を示す.図1 のように,拇指が上に向くように手を挿入する.装 置には,18 セットの空気圧ソフトアクチュエータが 取り付けられており,これらのアクチュエータを直 接掌や指に作用させて ROM 運動を実現する.



Fig.1 Prototype of rehabilitation device for the thumb joints.

アクチュエータの駆動は、コンプレッサと、真空 ポンプによって空気圧を調整することで行う. 拇指 に対して空気圧ソフトアクチュエータを接触させた 際に、アクチュエータの接触面が拇指の形に膨らむ. また、必要以上の力が拇指に作用した際は、アクチ ュエータが拇指から逃れるように装置内に空間を設 けている.本 ROM 運動装置では、複数の空気圧ソ フトアクチュエータを同時に作用させ指を包み込む ような動作を行う際に、アクチュエータ同士が干渉 しても ROM 運動動作に影響がないようにしている.

3. 関節可動域運動の方法

拇指の ROM 運動は、掌側外転、掌側内転、橈側 外転、尺側内転、屈曲、伸展、アーチの7種類があ る. ROM 運動の手順を、掌側外転を例として説明 する(図 2).説明する動作は、右手を対象として ROM 運動を行っているものとする.始めに図 2①の ように手の甲にあるアクチュエータを動かす.これ は、拇指にアクチュエータを動作させた際に、手が 右方向にずれないようにするためである.次に図 2 ②のように装置上部のアクチュエータを動かした後、 図 2③のように拇指の下側にあるアクチュエータと、 装置上部のアクチュエータの先に取り付けているア クチュエータを動かし拇指を挟み込む.この動作を 行うことで、指を横に倒す.最後に、図 2④のよう に装置奥側にあるアクチュエータを空気圧印加する ことで掌側外転動作を行う.



Fig. 2 The operation of the actuator used for palmar abduction

4. 関節可動域運動試験

評価試験を行うにあたって,事前に大阪工業大学 倫理委員会の承認(承認番号 2016-25)を得た. 被験 者は,関節可動域に制限のない健常者 3 名とした. また,アクチュエータに印加する圧力は 20kPa とし た.

ROM 訓練動作の実験方法について説明する.ま ず始めに ROM 訓練動作を行う前の手の初期位置は, 拇指の CM 関節が装置上部のアクチュエータの下に 置き,またその他の4指を装置奥のアクチュエータ の間に挟むようにした.その後,被験者は手に力を 入れず楽な状態にしてもらい,アクチュエータを動 作させた.そして,装置背面側の隙間からビデオカ メラによる撮影を行いながら,動作一回ごとに被験 者に指の位置がどこにあるのか,痛みなどは無いか などの質問に対する回答を得た.

従来 ROM 運動の評価は, 関節の参考可動域(掌 側外転は 90 度, 掌側内転は 0 度)まで動作できた かを角度計や分度器, ゴニオメータなどを用いて測 定する. 今回の評価試験では, 拇指の参考可動域の 70%以上であれば「動作ができている」と評価した. また, 参考可動域が 70%以下の場合や, 拇指が行っ ている訓練動作から明らかに外れた動きを観測した 場合は「動作できなかった」として評価した. 評価 試験の結果を表1に示す.

	Subject NO.1	Subject NO.2	Subject NO.3
palmar abduction	No Good	Good	No Good
palmar adduction	Good	Good	Good

5. まとめ

本稿では、拘縮や痙縮の予防を目的とした拇指の ROM 運動装置ついて述べた.空気圧ソフトアクチ ュエータを駆動源として用いることで、装置を小型 かつ軽量で構成することができ、複数の拇指の ROM 運動を実現できる点が特長である.今回は、 掌側外転・内転動作の評価試験の結果について述べ た.今後は、今回行っていない動作の評価と、掌側 外転動作の見直しを行い、被験者の数を増やした試 験を行う.

謝辞

本研究は、公益財団法人 JKA 機械工業振興補助 事業(競輪)の補助(補助事業番号:27-147,事業名: 空圧式ハンドリハビリシステムの研究開発)を受け て実施されました.

- 1)谷口浩成,内藤祐介, "筋リラクゼーションと関 節可動域を両立する手指関節拘縮予防リハビリシ ステムの開発",日本機械学会 2015 年度年次大会 講演論文集, S1150203, (2015)
- 2) 荒木翔歩,谷口浩成,"拇指の関節可動域訓練を目的とした空気圧リハビリシステムの開発",日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, pp.907-1-907-2,(2016)

空気圧ソフトアクチュエータを用いた足関節の関節可動域訓練装置

谷口浩成*,大江祥生*

CPM Device for Ankle Joints using Pneumatic Soft Actuators

Hironari TANIGUCHI^{*}. Sachio OHE

The onset of a stroke often causes movement disabilities like partial paralysis. If the condition does not improve, contractures may occur in some joints and muscles. Therefore, it makes daily life difficult for the patients. Normally, range of motion (ROM) exercise is prescribed by therapists to prevent the joints contracture and improve the patient's symptoms. However, the patients cannot receive enough rehabilitation, because the time of therapy from the therapist is limited. Thus, the purpose of this study is to develop a rehabilitation device for ankle joints. In this paper, we report the methods of ROM exercises for ankle joints using pneumatic soft actuators. We fabricated an experimental device with mechanism elements and pneumatic equipment. We also confirmed the performance of our proposal through the experiments.

Key Words : Soft actuator, ROM exercise, Ankle joint, Pneumatics

1. はじめに

事故や病気により体が麻痺し、関節を動かすこと ができない状態が長く続いてしまうと関節に拘縮が 現れる. 拘縮が進行すると, 強直に移行する場合が あり, 強直になると正常な状態に改善することが非 常に困難となるため、拘縮を予防することが重要で あると考えられている.また、拘縮になることによ り、身体の可動関節の他動・自動運動による生理的 関節可動域が欠け、生活活動が著しく抑止される状 態を関節可動域制限と呼ぶ.関節可動域制限は、様々 な関節に発症するが、その中でも足関節は日常生活 において重要な関節である. そこで我々の研究グル ープでは、複数の動作が可能な足関節の関節可動域 訓練装置に関する研究を実施してきた1,2).本稿では, 柔軟、軽量といった特長を持った空気圧ソフトアク チュエータを駆動源とし,底背屈動作,内外転動作 を行える足関節の関節可動域訓練装置について紹介 する.

2. 足関節の関節可動域訓練装置

足関節の関節可動域訓練は,底屈,背屈,内転, 外転, 内返し, 外返し, 回外, 回内などの動作があ る.底屈および背屈動作は、主に距腿関節の可動に よる動作であり、内転、外転、内返し、外返しは、 主に距骨下関節の可動による動作である.また,底 屈, 内転, 内返しの複合運動として回外があり, 背 屈,外転,外返しの複合運動として回内がある.本

(〒530-8568 大阪府大阪市北区茶屋町1-45)

装置では、これら複数の動作を、空気圧ソフトアク チュエータによって実現することを目指している.

病院での調査において、作業療法士および理学療 法士から,足関節の関節可動域訓練を実施するとき は、足の先端を動かすのではなく根元から動かすこ と、しっかりと踵を包み込んで足を動かすこと、膝 を固定して実施すること、内外返し単体で施術する ことは少なく複合運動である回内や回外を施術する ことがあるなどの意見を得た.これらを踏まえ,空 気圧ソフトアクチュエータを用いた足関節の関節可 動域訓練装置を検討した. 図1に試作した装置を示 す. 各動作や機能を達成するために 15 種類のアク チュエータを組み合わせて用いた.



Fig.1 Prototype of CPM device for ankle joints

3. 関節可動域訓練試験

足関節の参考可動域角度に対する関節可動域訓練 の到達度を確認するため,成人男性9名を被験者と し、右足を対象にして関節可動域訓練を行った.ア クチュエータの印加圧力を 20kPa とし、仰向けの状

大阪工業大学ロボティクス&デザイン工学部 ロボット工学科

⁽E-mail: hironari.taniguchi@oit.ac.jp) * Osaka Institute of Technology

態で背屈用アクチュエータに対して足関節が 90 度 になるように装置に足を挿入した.測定する動作は, 背屈,底屈,内転,外転の4動作とし,各動作をデ ジタル角度計により測定した.測定結果は,足の大 きさ順に並べており,被験者1が一番足のサイズが 大きく,被験者9が一番足のサイズが小さい.

底屈動作の測定結果を図2に示す.測定は3回実施した.赤い破線は,参考可動域角度の45度を表している.底屈動作の平均角度は35.4度となり,参考可動域角度を100%とした達成度は78.7%であった.被験者5番,6番,8番は,他の被験者と比べて達成度が低い結果となった.これは,底屈用アクチュエータが足部に作用する際,股関節が可動し,膝が前に移動することが原因の1つであると考えられる.図3に底屈動作の様子を示す.





Fig. 2 The measurement results of plantar flexion motion.

Fig. 3 Plantar flexion motion

次に,外転動作の測定結果を図4に示す.外転動 作の参考可動域角度は20度である.実験結果より, 外転動作の平均角度は20.5度となり,達成度は 102.4%であった.図4より,被験者による測定結果 のばらつきも少なく,大きさの異なる足に対して十 分に外転動作を実施できることがわかった.外転動 作の様子を図5に示す.



Fig. 4 The measurement results of abduction motion.



Fig. 5 Abduction motion

4. まとめ

本稿では、空気圧ソフトアクチュエータを用いた 足関節の関節可動域訓練装置について、一部の動作 を例に挙げて紹介した.関節可動域動作実験の結果、 角度測定が可能であった背屈、底屈、内転、外転の 4動作では、75%以上の達成度を確認した.しかし ながら、被験者による関節可動域角度のばらつきが 確認され、安定した運動を提供するためにはまだ不 十分であるため、今後改善していく.

- Hironari Taniguchi, Noriko Tsutsui, and Yoshiaki Takano, Feasibility Test of Range of Motion Exercises for Ankle Joints Rehabilitation using Pneumatic Soft Actuators, Lecture Notes in Electrical Engineering, pp. 159-165(2015)
- 2)谷口浩成,高野義章,筒井法子,空気圧ソフトア クチュエータを用いた足関節拘縮予防機器の試作, 平成 27 年度春季フルードパワーシステム講演会 論文集,pp.46-48(2015).

○村松 久巳*,渡部 実苗 **

Evaluations of Standing Position on Soft Object and Shift of Center of Gravity in Elderly Utilized Pneumatic Apparatus

Hisami MURAMATSU^{*}, Minae WATANABE^{**}

A pneumatic equipment for postural balance in an elderly has been developed. In this paper, the pneumatic equipment is improved and usefulness for a pseude-elderly is confirmed in two points of view; standing position and shift of center to the left and to the right. Firstly total locus length and area of sway of center of pressure in the pseude-elderly utilized the pneumatic apparatus are reduced in the case of standing position. It is shown that standing position becomes stable. Secondly a trajectory of shift of center to the left and to the right in the pseude-elderly is occurred at the forefeet. On the other hand the trajectory in the pseude-elderly utilized the pneumatic apparatus shifts at the center of the foot. Moreover, the trajectory swing width toward back and force decreases. It is cleared that the trajectory is close to that of the support person.

Key Words : Pneumatics, Rehabilitation, Center of pressure, Stabilometer, Sway length, Area of sway

1. はじめに

高齢者の身体の筋量と筋力の状態を改善または残存す る機能を維持するリハビリテーションを目的として,著者 らは立位保持装置と重心移動装置から構成される空気圧 装置を研究開発してきた1)~4).これらの研究では平行棒 に取り付けた空気圧装置が剛性の高い床面上に静止立位 した被験者を支援する場合についてその有用性を明らか にしてきたが,柔軟な床面上に立つ被験者の支援に関する 研究は行われていない.柔軟な床面には、カーペット、絨 毯,布団など日常生活で多く存在し,静止立位を保持する ためには、より高い身体の調整能力が必要とされる.

安定した静止立位の状態が保持できると, つぎの段階に 進む.剛性の高い床面上で外乱が高齢者に加えられても立 位を保持するステッピング方略や歩行開始のための重心 移動の訓練を行う.空気圧装置を重心移動の訓練に活用す るためには,前後に加えて左右に移動する機能が必要であ り,空気圧装置には空気圧シリンダを用いて身体を前方に 送り出す機能に加えて,空気圧ゴム人工筋肉を用いて身体 を前後に傾斜する機能と左右に移動する機能がある. し かし左右の移動を支援する空気圧ゴム人工筋肉は収縮量 を得るために平行棒の幅より長いため改良が求められる.

本研究では,空気圧装置を改良して2項目について検討 する.はじめに柔軟な床面上に高齢者が静止立位を保持す る場合における姿勢の安定性を重心動揺から検討する.つ ぎに剛性の高い床面上で静止立位から左右方向の移動を 重心移動から実験的に明らかにする.

2. 実験装置及び方法

はじめに成人健常者に装具を装着した疑似高齢者は開 眼状態で両足をロンベルクの状態で 60 秒間立位する.柔 軟な床面を模擬してラバーマットを重心動揺計の上に置 いた. 被験者の立位の状態における重心動揺は, 重心動揺 計を用いて計測する. つぎに理学療法士の支援動作を模擬 する介助者が背後から疑似高齢者の重心移動を支援する 様子をFig.1に示す.重心動揺計の上に立つ疑似高齢者は, 開眼状態で30秒間に左右方向に身体を動かす. さらに介 助者の代わりに疑似高齢者に空気装置を装着し支援する. 従来の左右方向移動用の空気圧ゴム人工筋肉を低速用空 気圧シリンダに変更した. さらにバックグリッパが支持棒 の把持した状態を維持して、低速用空気圧シリンダにより ショルダーだけが左右方向に移動する機能を付加し、コン パクトな構造に変更した.この改良を行った空気圧装置の 部分を Fig.2 に示す. 低速用空気圧シリンダのストローク は立位側方リーチを参照して 75mm とし,理学療法士の 訓練5)に基づき2秒で1往復するピストン速度に設定し た.以上の実験に被験者として健常な成人6人が参加して おり、実験の主旨を説明し同意を得ている.

3. 静止立位の重心動揺

重心動揺を圧中心 COP の軌跡から求め、これより算出

^{*} 沼津工業高等専門学校 機械工学科 (〒410-8501静岡県沼津市大岡 3600) (E-mail: muramatu@numazu-ct.ac.jp) ** ジーシー株式会社

^{*} National Institute Technology, Numazu College ** GC Corporation

した総軌跡長(LNG),矩形面積(RECAREA),実効値面 積(RMSAREA)の被験者 6人の平均値を Fig.3 に示す.疑 似高齢者と健常者ともに,Fig.3(a)に示すラバーマットを 使用した不安定面では,Fig.3(b)に示すラバーマットがな い,すなわち剛性の高い面上と比べて総軌跡長が長く,矩 形面積および実効値面積が大きい.特にラバーマット上で 疑似高齢者の重心の動揺が顕著に大きい.この状態に改良 した空気圧装置を装着すると,装着しない総軌跡長の約 15%に減少し,2つの面積も著しく小さくなった.



Fig. 1 Pesude-elderly assisted by a physical therapist in weight shift laterally







Fig. 3 LNG and areas of with and without a rubber mat

4. 左右方向の重心移動

Fig.2 に示した疑似高齢者が左右方向に重心移動した 場合の COP の軌跡を Fig.4 に示す. 被験者が自ら左右方 向に身体を動かした COP の軌跡が Fig.4(a)であり,介助 者による支援がある結果が Fig.4(b)である.介助者の支援 がある場合, COP の軌跡は足の前後幅のほぼ中心にあり, 繰り返された軌跡の前後方向の幅は狭い. Fig.5 は改良し た空気圧装置による COP の軌跡を示す. Fig.4(b)の結果 と類似の傾向が認められるが,左右方向の COP 最大振幅 が小さい.この原因は立位側方リーチの結果は左右の片方 向だけに移動した場合の重心移動量であり, Fig.4(b)の結 果と同様な重心移動のためには空気圧シリンダのストロ ーク不足が生じたためである.



Fig. 4 Trajectories of COP



Fig. 5 Trajectory of COP

5. おわりに

柔軟な床面上での疑似高齢者の重心動揺が大きいこと 示し,改良した空気圧装置が立位支援に役立つことを示し た.今後,空気圧シリンダのストロークを変更して,左右 方向への重心移動範囲を広げて支援できるように改良を 進める.

- 村松久巳,柴野顕裕,小笠原和也:空気圧ゴム人工筋 肉を用いた立位保持装置の開発,平成24年春季フル ードパワーシステム講演会講演論文集,55/57(2012)
- 村松久巳、山本繁樹、千葉玲央:人間の歩行開始時の 運動を支援する空気圧装置の開発、日本設計工学会秋 季大会研究発表講演会講演論文集,193/194 (2013)
- 3) Hisami MURAMATSU, Shigeki YAMAMOTO, Reo CHIBA: Pneumatic Device for Postural Balance in Elderly, Proceedings of the 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, Matsue, 546/549 (2014)
- 4) 村松久巳,寺内澪央:高齢者の姿勢保持と重心移動の ための空気圧装置の開発,第24回 IFPEX カレッジ研 究発表展示コーナー論文集, 61/62 (2014)
- 5) 武田功, 弓岡光徳, 廣瀬浩照:基本動作の評価と治療 アプローチ, メディカルレビュー社, p.40(2015)

パワーアシストスーツ

山本 圭治郎*, 茂垣 知江**, 手塚崇之**

Power Assist Suit

Keijirou YAMAMOTO*, Chie MOGAKI**, Takayuki TEZUKA**

Wearable power assist suit which utilized pneumatic bellows actuators is developed. The suit is able to work at low air pressure and is to be slim and lightweight. In addition, the waist unit of this suit has a waist joint and hip joints which are assisted by the actuators independently. The obstruction of walking is canceled by this construction and the suit become able to assist walking. Further, this suit is able to assist the wearer at the patient's transfer from a low-floor bed. In order to assist the legs, the newly developed pneumatic actuators are used to lift up the hip. This pneumatic actuator consists with bellows inserted in cylinders that slide with each other. This actuator has the large ratio of maximum length to minimum length, so the wearer of this suit is possible to transfer the patient on a low-floor bed.

Key Words : Power assist suit, Pneumatic bellows actuator, Lifting up the hip, Waist joint, Hip joints, Knee joints



Fig.1 Power assist suit using a bellows actuator and a cylinder actuator with a built-in bellows

1. はじめに

開発した新しいパワーアシストスーツを図1に示 す.腰ユニットは腰関節と股関節からなり,それぞ れ腰関節用および股関節用のベローズアクチュエー タを備え,着用者の腰関節の伸展運動および股関節 の伸展運動をそれぞれ独立にアシストできる.また 脚ユニットを伸展し直立する動作をアシストするた めにベローズ内蔵型エアシリンダアクチュエータを 備え、さらに臀部を持ち上げる働きをするベローズ 内蔵型エアシリンダアクチュエータを備えている.

(〒243‐0292 神奈川県厚木市下荻野 1030)

** 株式会社ソーラス地球事業部パワーアシスト部

** SORUS Corporation

ベッドに近接し腰を下ろして患者を抱き上げる動 作を可能とするためには両脚を開いてしゃがむ動作 が必要である.この動作を可能とするために股関節 の外転および外旋,足関節の外転をも可能にする構 造を開発した.腰装着部は腰ベルトとハーネスによ り装着者の腰に固定する方式であるが,動作時にお いても骨盤に確実に固定できるように,仙骨に沿い 尾骨を支えるサドル機能を持たせた尾骨部を設け臀 部を支える機構を開発した.

2. ベローズ内蔵型エアシリンダアクチュエータ

伸縮比2以上のエアシリンダアクチュエータ実現 するために,伸縮する多段シリンダ内にベローズを 挿入し給排気することによるベローズの伸縮に伴い, 多段シリンダが伸縮して出力する新方式のエアアク チュエータを開発した.図2に示すものは3段シリ ンダの例であり,櫛状の嵌挿片を持つ一対の円筒が

^{*} 神奈川工科大学スマートロボット研究センター

⁽E-mail: yamakei@rm.kanagawa-it.ac.jp)

^{(〒〒105-0002} 東京都港区愛宕 1-3-4 愛宕東洋ビル 5F) * Kanagawa Institute of Technology

中央の円筒の中を互いにスライドして移動するタイ プで伸縮比3弱を実現している.



Fig.2 Air cylinder actuator with built-in bellows

3. パワーアシストスーツ

新しく開発したパワーアシストスーツは,腰に対 する上半身のねじり角度範囲は左右方向にいずれも 25 ° であり,片膝を床につけた体勢をとることが 可能であり,しゃがみこんだ姿勢での腰関節ユニッ トの屈曲角度は 90 °,股関節ユニットの屈曲角度 は 40 ° である.また股関節ユニットの外旋角度は 90 °,外転角度は 45 °,膝関節の屈曲角度は 120 °,踝の屈曲角度および外転角度は共に 30 ° である.

両脚のアシストなしで、臀部のアシストのみで済 ませたタイプのパワーアシストスーツによる動作実 験の様子を図3に示す.ベローズ内蔵アクチュエー タの直径は100mmである.一連の動作において、 より深くしゃがみ込め,バランスが取りやすいこと が確認された.また,歩行時にはベローズを収縮さ せることにより歩行の妨げにならないことが確認さ れ実用可能性が実証された.この方式では臀部を アシストするアクチュエータとフリーとなった両脚 とでバランスがとりやすいので,スーツの脱着を着 用者が一人でできるようになり.大型のリフトに吊 るす必要がなくなるという利便性がある.

参考文献

山本圭治郎,石井峰雄,高橋勝美,兵頭和人,「ベローズによるパ ワーアシストスーツの開発」,日本機械学会 Dynamics and Design Conference2010 講演論文集, CD-ROM, Paper No.648, 2010

山本圭治郎, 佐藤 武, 石井峰雄, 茂垣知江, 高橋真紀子, ベ ローズアクチュエータによるパワーアシストスーツの開発, Dynamics and Design Conference2016 講演論文集(日本機械学 会), CD-ROM, Paper No.516, 2016.8

山本圭治郎,佐藤 武,石井峰雄,茂垣知江,高橋真紀子,高 橋勝美,空気圧ベローズアクチュエータによるパワーアシスト スーツの開発, Dynamics and Design Conference2017講演論文集 (日本機械学会),CD-ROM, Paper №D601, 2017.8

山本圭治郎 特願, PCT/JP2014/050309, 2014, 特許第 6105091 号, 2016

山本圭治郎, 特願 2016-237367, 2016



Fig.3 Care operation wearing suit with an air cylinder actuators of 100 mm ϕ .



Fig.4 The desorption work of power assist suit can be done by herself

パワーアシストハンド・レッグ

山本 圭治郎*, 手塚崇之**, 茂垣 知江**

Power Assist Hand and Leg

Keijirou YAMAMOTO*, Takayuki TEZUKA**, Chie MOGAKI**

The power assist hand and leg consist of bellows and plates which function as joints and bones. As human fingers and leg the plates sandwich the bellows between them. The thumb of the power assist hand is provided with the function of the saddle joint similar to a human finger. Therefore the thumb is able to abduction and adduction and that is also possible to flexion and extension. In addition, abduction and adduction between each finger and the curvature of the back of the hand are also enables. Lightweight artificial hand of the half of the human hand is achieved by housing the newly developed very small piezoelectric pump in the portion of the arm of the artificial hand.

Key Words : Power assist hand, Power assist leg, Robot hand, Pneumatics, Bellows

1. はじめに

麻痺した手指のリハビリを好きなとき好きなだけ できるリハ用アシストハンドを開発した. 軽くて柔 らかいプラスチック製のベローズ(蛇腹)をアクチ ュエータとして利用した「パワーアシストハンドお よびレッグ」を2010年に開発し実用化した(山本他, **2010)**. 各関節の上に配置した半透明のベローズの両 端を支持する部材の下端を弾性体でつなぐ事により, ベローズアクチュエータへの給・排気に伴う直線的 な動きを扇形の動きに変換して、関節を屈曲・伸展 させる回転力を発生する仕組みである. 小型で静粛 なダイヤフラムポンプにより、過大なトルクを発生 することなく本質安全で実用的な性能を有すること が実証され実用されている. この機構そのものが手 指と同じであることから、ロボットハンド・義手と しての有用性も期待され、実現すれば、軽くて柔ら かな動きの人工の手が実現されるものと期待される. 人の手と同じ自由度を持たせることを目標に、さら に多くのベローズを手背上に配置したものを開発し (山本, 手塚 2014), その実用可能性を実証した. 以 下のような基本理念の基に開発されている。

1) 安全なシステム:

ベローズの断面積と供給圧力との積を超える力は発 生しないので過剰な力を発生しない。ダイヤフラム ポンプなどの低圧ポンプにより吸・排気するシステ ムによれば本質的に安全なものと成り得る。 2)人の関節の動きと同様の動き:

人の関節は回転中心が一点ではなく、関節を曲げ ると関節間距離が変化する。ベローズを関節にする ことにより、人の関節と同様の動きを実現している。 3)軽量で柔らかい動き:

樹脂製のベローズと空気圧との組み合わせによる軽 量で柔らかなアクチュエータと樹脂や軽金属による フレームにより構成している。

2. 機構

手の背側から見た図1および手の甲側から見た図 2に示すように、ベローズを一対の平板部材により 挟み込んだ構造要素の連なりとベローズの一端を回 転リンクに取り付けた構造要素の組み合わせからな る.母指屈伸用ベローズ - 1,2,3および母指内外転 用ベローズ - 1,2により動きを再現している.四指 の屈伸および内外転は、屈伸用および内外転用ベロ ーズにより再現される.手の甲を湾曲は図2に示す ように湾曲用ベローズを配置することによる.



Fig.1 Bellows-type robot hand with the same degree of freedom as human hand, view from the back of the hand

^{*} 神奈川工科大学スマートロボット研究センター

^{(〒243‐0292} 神奈川県厚木市下荻野 1030)

⁽E-mail: yamakei@rm.kanagawa-it.ac.jp)

^{**} 株式会社ソーラス地球事業部パワーアシスト部 (〒〒105-0002 東京都港区愛宕 1-3-4 愛宕東洋ビル 5F)

^{*} Kanagawa Institute of Technology

^{**} SORUS Corporation



Fig.2 Bellows-type robot hand with the same degree of freedom as human hand, view from the palm



Fig.3 Master slave system of power assist hand

図3にリハビリ効果を向上するものとしてセン サグローブ(マスター側)とパワーアシストハンド (スレーブ側)を組み合わせたシステムを示す.

3. ピエゾポンプ駆動によるコンパクトハンド 義手は人の手と腕のサイズ内,かつ,重量も人の 手と腕のサイズ内,という制約がある.これを満た すものとして,ピエゾ振動子ダイヤフラムポンプに よりベローズをダイレクトドライブする方式を開発



Fig.4 Robot hand with built- in pumps

4. ロボットハンドで遠隔地の人と握手

この軽くて柔らかな人工の手であるロボットハンドを利用すれば、遠隔地にいる人と擬似的な握手ができる. 遠隔地の人にセンサグローブをはめてもらい握手動作をしてもらうと、身代わりとなるロボットハンドが自分の手を握るという擬似的な握手体験が可能となる. 自分もセンサグローブをはめて握れば、遠隔地にある自分の身代わりロボットハンドが遠隔地の人の手を握り返すので、お互いに相手の握力を感じながら握手することが出来る. 直径 50 mm のパイプを握った時、供給圧 60 kPa で、最大の把持力 23 N が得られる.



Fig.5 Bellows-type robot hand, shaking hands with people in remote locations



Fig.6 Power assist leg

参考文献

山本圭治郎,石井峰雄,高橋勝美,兵頭和人,「ベローズによるパ ワーアシストスーツの開発」,日本機械学会 Dynamics and Design Conference2010 講演論文集,CD-ROM, Paper №648, 2010

山本圭治郎,手塚崇之 特願 PCT/JP2014/76760

手塚崇之,山本圭治郎,桑江ルッカス哲也,石井峰雄、「空気 圧ベローズアクチュエータを用いた多自由度ロボットハンドの 開発」、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2016 講演論 文集,CD-ROM, Paper №213,2016

空気圧腱制御介護ロボットアーム

木村大地*, 箕輪行人*, 荒尾祥吾*, 小山 紀**

Pneumatically Actuated Tendon Drive Assist Robot Arm

Daichi KIMURA^{*}, Yukito MINOWA^{*}, Shogo ARAO^{*}, Osamu OYAMA^{**}

Currently, the declining of birthrate and the aging population are progressing in Japan. So it is necessary to reduce the burden of caregiver to elder populations. We focused the burden of caregiver when he assist the standing up motion of human from the seat position. In order to avoid the load stress to caregiver, this action may be substituted by the robot arm assist, of course it must be safe and comfort. In this report, we will show the pneumatically actuated tendon driven care robot arm assisting the human motion of stand up.

Key Words: Robot Arm, Pneumatic Controlling, Care Assistance, Psychological evaluation

1. はじめに

高齢者社会を迎え、介護者の負担を抑え被介護者 の自立を支援する器具の開発が急務となっている. 本研究は空気圧アクチュエータの特性と、腱制御の メリットを生かして、椅子などからの立ち上がりを 支援するロボットアームを開発するものである.

2. 空気圧腱制御ロボットアーム

操り人形は糸により離れた場所から操作されている.一般に重量のかさむアクチュエータを離れた場所に固定し,金属やナイロンの腱により動力を伝達する腱制御ロボットは可動部分を軽くすることができ,介護用に用いた場合被介護者との不意の衝突にも衝撃を無くすことができ安全である.また,腱制御により軸を駆動する場合、本質的に回転方向に対抗してアクチュエータを配置する構成が必要である. このアクチュエータを配置する構成が必要である.このアクチュエータに空気圧シリンダを用いれば,対抗するシリンダの内圧を調整するだけで軸回転方向の剛性が操作できる.

Fig.1 のように被介護者の椅子からの立ち上がり を支援するとき、まず介護者は被介護者に不安を与 えないためにも肘や肩の筋肉を固くし体重をしっか り支え、立ち上がり後期には被介護者が自由に重心 移動でき、安全な立位となるよう柔らかく支えてい る. すなわち介護用ロボットアームの動作軌道上で 軸剛性の連続的操作が必要である.

3. ロボットアームの製作と制御

試作した空気圧腱制御ロボットアームの概念図を Fig.2 に示している¹⁾²⁾. 肘関節軸および肩関節軸を 持つ2関節型アームで,それぞれの軸部を対抗する 空気圧シリンダからプーリを介して腱により駆動し ている.したがって空気圧シリンダおよび腱はそれ ぞれ計4本ある.腱には十分な張力強度を持つナイ ロン製のワイアロープを使っている.アーム自体の 大きさはほぼヒトと同一である.各軸にはポテンシ ョメータが取り付けられ,フィードバック制御によ りアームを目的軌道上に操作する.

立ち上がり支援に最適な目標軌道を設計するため, 被験者による椅子からの立ち上がり支援動作を観測 した. 肘部と肩部にマーカーを張り付け,立ち上が り支援動作における各関節の角度変化を計測した. その結果を Fig.3 に示している. 図中上部が肘関節 の角度変化で下が肩関節である. 横軸は支援動作開 始からの経過時間が示されている. 肩関節は支援開 始時に約 30°の角度にあるが,終了時は 50° にな る. 一方肘関節はほぼ 60° であまり大きな変化はな い.



Fig.1 Supporting action for human standing up

^{*} 明治大学大学院機械工学専攻博士前期課程

^{(〒214 - 8571} 神奈川県川崎市多摩区東三田 1−1−1)
** 明治大学理工学部

^{(〒214 - 8571} 神奈川県川崎市多摩区東三田 1−1−1) (E-mail:oyama@meiji.ac.jp)

^{*} Master Course, Graduation School of Meiji University

^{**} School of Science and Technology, Meiji University



Fig.2 Tendon drive robot arm



Fig.3 Trajectory of human arm joint

ロボットアームにはこの軌道を与えて動作させる ことにした.制御方式はアームおよび被介護者の重 力補償を考慮した PID 動作である.しかしロボット アームにはまだ剛性のリアルタイム調整を実行させ ていない.Fig.1でもわかるように立ち上がり支援に は腰部の動きが必要なため,現在は腰部の機構を設 計中である.現状では支援動作の開始タイミングを 検出する方式を検討している.例えば被介護者が体 重をアームに預けた時,動作開始タイミングが被介 護者の予期したものでないとき不安であろう.

アームに体重が加わったときこれを支えるため シリンダ内圧が増加する.この内圧変化はセンサと しての機能を持っており,空気圧アクチュエータを 利用する上での利点でもある.内圧変化は肩関節を 上方に支えるアクチュエータであるシリンダ1が顕 著であるため,シリンダ1の内圧変化がある閾値を 超えた瞬間にアームが動き始める方式の検討をおこ なっている.

5名の被験者が立ち上がりのためロボットアーム に体重を移したとき、どの閾値で動作開始したら快 適であったかアンケートにより回答してもらった. その結果を Table 1 に示している.シリンダ1の内圧 変化を体重の移動信号として利用し、アーム動作開 始時の閾値をそれぞれ変えて最大5の点数により動 作タイミングの快適さを評価してもらった. 被験者 は 62kg から 80kg と体重にばらつきがありその影響 も考慮すべきだが, 概して内圧の閾値が低い場合の 評価が悪い. 完全に体重を移し切らないうちに, ア ームが動作を開始するため不安を覚えるのであろう. 一方で閾値をさらに高くするとまた評価が悪くなる.

	-		
TESTER NO	40kPa	60kpa	80kpa
1	1	4	2
2	1	4	3
3	1	5	2
4	1	4	2
5	2	4	3

TABLE 1 Experimental result

3. まとめ

前述のように介護動作中にアーム剛性を連続的に 操作する効果はまだ確認できていない.しかし,あ る固定した軸角度においての試験では対抗するシリ ンダ内圧を変えて軸剛性が変えられること,そして この角度はアーム動作範囲で任意に選べることを確 認している.

- K .Daichi,O .Oyama,T. Yoshimitsu : Development of Tendon-Driven Care Assistance Robot Arm Driven by Air Pressure Controlling, Transaction of the Japan Fluid Power System Society, Vol.3, No.4, 2016
- T. Ishida, O. Oyama, T. Yoshimitsu: Development of Tendon-driven care assistance robot arm with Pneumatic Control, The 12th International Symposium on Fluid Control Measurement and Visualization, 2013

空気圧歩行支援装具

北島優一*, 久保宏平*, 長谷川 舜*, 小山 紀**

Pneumatically Walking Support Brace Equipment

Yuichi HITAJIMA*, Kohei KUBO*, Shun HASEGAWA*, Osamu OYAMA**

The working support brace equipment having a neutral mechanism that we develop is able to cut off the power transmission from rubber artificial muscle to driving joint of equipment and then it can release the movement of the knee joint. Therefore, moving of knee becomes free in swing phase of human leg. In the result, the human feelings of incongruity in walk that occurs when he/she uses walking support equipment can be reduced.

Key Words: Neutral mechanism, Artificial muscle, Pneumatics, Walking support, Care equipment

1. はじめに

1991 年から 5 年間,両下肢麻痺者の歩行を可能 とする荷重式歩行補助装置の開発プロジェクトが, 国立リバリテーションセンター・矢野英雄先生(当 時)を中心に実施された.脊椎損傷により両下肢が 動かせなくても,外殻により膝部および腰をしっか り固定し立位状態を保てるようにしておけば,片方 の下肢全体を遊脚させ前方に送り出しながら歩くこ とができる¹⁾.当研究室でも 1998 年から下肢を支 える装具と空気圧を使った歩行支援装置の研究を始 めた.

2. 空気圧シリンダを使った歩行支援装具

以前の研究では下肢を支える装具の伸展・固定を 補助するアクチュエータとして空気圧シリンダを使 っていた.空気圧シリンダは内圧操作により剛性が 広い範囲で変えられるので,必要に応じて硬さが変 わるヒトの膝関節機能を,空気圧シリンダの剛性調 整機能を利用して模擬させたとも言える.

装置全体は Fig.1 のように外殻式装具と,動力源 を含む必要な機材をすべて入れたザックとで構成さ れる.空気圧シリンダへの供気には北川らの提案す る二酸化炭素を利用したガス圧源 ³⁾を背中のザック に入れて用いている.0.5 [I]の容積のタンクに420 [g] のドライアイスを封入した場合,約 1200 歩の歩行が 可能であった³⁾.



Fig.1 Pneumatic Walking Assist Equipment

3. ニュートラル機構の実現

遊脚期初期,すなわち立脚を反対側に移し膝を前 に送り出す瞬間には膝関節のアシストは不要で,む しろ体重移動に合わせ膝が自由に進むようにしたほ うが自然な歩行ができる.

空気圧シリンダは動作しないときに駆動軸がニュ ートラルになる機構とするのは困難である.そこで Fig.2 に示す収縮型ゴム人工筋を使った駆動方法を 開発した⁴⁾. 駆動部は同図のように2つの収縮型人 工筋を対抗させて構成している. 駆動軸はタイミン グベルトとプーリにより人工筋と結合されるが,人 工筋が加圧されていないとき,すなわち自然長では ベルトはプーリと噛み合わず軸はフリーになる.

Fig.3 の左側に示すように立位状態では両側の人 工筋を加圧して動作させベルトをプーリに嚙み合わ せて膝関節を固定しているが,着用者が遊脚のため 反対側の脚に体重を移動させた瞬間に人工筋を減圧

^{*} 明治大学大学院機械工学専攻博士前期課程

 ^{(〒214-8571}神奈川県川崎市多摩区東三田1−1−1)
 ** 明治大学理工学部

^{(〒214 - 8571} 神奈川県川崎市多摩区東三田 1−1−1) (E-mail:ovama@meiji.ac.jp)

^{*} Master Course, Graduation School of Meiji University

^{**} School of Science and Technology, Meiji University

し,膝関節をニュートラルな状態にする. 遊脚期後 半の適当な時期に(膝は曲がった状態となっている) 人工筋を加圧し膝を固くして着地に備え,さらに着 地して後ろ側に蹴るときの補助をする(同図右).

ニュートラル機構は歩行支援装具に対し以下のメ リットを与えると思われる.

- 1. 部分的アシストによる自由で柔軟な歩行の実現
- アクチュエータの非動作時に膝関節は常時ニュ ートラルになっており、転倒など予期せぬ場合 での動きの自由や安全の確保
- 3. 人工筋がプーリに噛み合う初期位置を変更でき ることによる広範囲でのトルク調整

試作したニュートラル機構を持つ人工筋駆動アク チュエータを Fig.4 に示す.人工筋は自然長時には 内径 25 [mm],長さ 150[mm]で,プーリ径は 45[mm] である.構造部のほとんどは研究室の 3 D プリンタ で作成した.最大圧力 0.5[MPa]を加えた人工筋の最 大引張力は 540[N]と求められるので,膝関節軸の最 大トルクは約 12[Nm]になる.このトルクは遊脚を 支えるには十分だが,一般的なすべての脚動作を考 慮するとより大きなトルクが必要である.



Fig.2 Actuator Having Neutral Mechanism



Fig.3 Walking Assist Using Neutral Mechanism



Fig.5 Prototype of Actuator

4. まとめ

今回開発したニュートラル機構を持つアクチュエ ータには十分な有用性が認められるが,性能面に関 して満足というわけではない.階段の上り下りや椅 子からの立ち上がりなどのアシストではもっと大き な動作角度やトルクが必要となる.今後改良してゆ きたい.

- 藤谷ほか:両下肢麻痺用歩行補助装具,平成8年度春 季油空圧講演会論文集,pp.121-124(1996)
- 北川ほか:三重点における相変化を利用した携帯空圧 源の開発,日本フルードパワー学会論文 集,Vol.36No.6,pp.158-164(2005)
- 石塚ほか: Dry-Ice Power Cell の空気圧歩行支援システムへの導入,平成22年度秋季 JFPS 講演会論文集,pp.40-42(2010)北川ほか: 三重点における相変化を利用した携帯空圧源の開発,日本フルードパワー学会論文集,Vol.36No.6,pp.158-164(2005)
- 4) 久保ほか:ニュートラル機構搭載型補講支援装具,平成
 29 年度春季フルードパワーシステム講演会論文 集,7/9(2017)

空気圧駆動系を用いた人間支援システムの構築

高岩昌弘

Development of Human Support System Using Pneumatic Drive Masahiro TAKAIWA

In Japan, we are facing highly aged society, where robot technology is necessarily required to assist functionally deteriorated person or support nursing labors. We have been developing human support robot to be applied as rehabilitation or power assist work using pneumatic driving systems, since they have some advantages from view of human support applications. In the IFPEX 2017, some of the developed devices are displayed and introduced in this article.

Key words: Human support system, Rehabilitation, Power assist, Pneumatic drive

1. 研究室の紹介

超高齢社会であるわが国において,高齢者の QOLの維持・向上や若年労働力不足に対する生 産性の向上は重要な課題であり,ロボット等の機 械システムの導入はその解決策の一つとして期 待されています.

徳島大学理工学部機械システム制御学研究室 では空気圧システムの特徴を活用したリハビリ テーションやパワーアシスト等の人間支援シス テムの開発を行っています.本稿ではそれらの一 部について以下に紹介します.

2. 負圧を用いた力覚呈示装置の開発

空気圧アクチュエータは、圧縮された空気を大 気に放出する際に得られるエネルギーを用いて 機械的な仕事を行うのが一般的な使用方法です が、負圧により得られる面からの吸引力を調整す ることで摩擦力をコントロールすることができ、 デバイスの運動に対する抵抗力を調整する力覚 呈示装置として応用することができます[1].

筆者らは図1に示すように,指先に装着した デバイス内に空気室を設け,この中の負圧をコン トロールすることで面との吸引力,すなわち垂直

徳島大学大学院社会産業理工学研究部
(〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)
takaiwa@tokushima-u.ac.jp
Graduate School of Technology, Industrial and Social
Science, Tokushima University



図1 負圧を用いた指先力覚呈示装置

抗力を調整し,面上の水平方向の運動に対して抵 抗力を与えるパッシブ型の指先力覚呈示装置を 提案しています.カメラで捉えた指先位置に応じ て空気室内の負圧をコントロールすることで,仮 想壁への衝突のような VR 指向の応用や指の動 作に負荷抵抗を与えるリハビリ訓練などへの応 用を検討しています.

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

6軸のパラレルリンク機構を空気圧シリンダ でサーボ制御し,手首部のリハビリテーションを 支援する機器の開発を行っています.これまでは 機械インピーダンス制御のモードを変更するこ とで,種々の訓練モードを実施する方法や,理学 療法士が患者に対して施す徒手訓練動作をロボ ットに獲得させることで,患者に最適な徒手訓練 動作を実行する手法を提案しています[2].また, 近年では図2に示すように理学療法士自身の技 能向上を目的とし,マニピュレータに患者の手首 特性を実装することで患者の物理モデル(訓練用 シミュレータ)の構築に関する研究をすすめてい ます[3].



図2 手首リハビリ支援装置

4. 装着者の体重を利用した空気式歩行支援 シューズの開発



図3 歩行支援シューズ

歩行は高齢者の健康維持に不可欠ですが,高 齢者の事故要因の約8割が転倒によるものと報 告されています.これは、加齢に伴う前傾骨筋 の筋力低下により遊脚期に爪先が上がりにくく 歩行がすり足状となり僅かな段差でも躓きやす いことが要因の一つです.高齢者は転倒すると 若年者に比べて骨折しやすく,何らかの躓き防 止策が必要です.

本研究では、高齢者のつまずきによる転倒防 止のため,遊脚期になった際につま先を上に向 ける動作(背屈動作)を支援する機能を備えた歩 行支援シューズ(図 3)を開発しています.このよ うに能動的に支援動作を行うには何らかのエネ ルギー源が必要となりますが、従来の電動モー タ等を用いたのではコストや装置の複雑化を招 き、一般の外歩きシューズとして得策ではあり ません.そこで本研究では空気圧システムの特 徴を活用することで、装着者の体重(位置エネル ギー)の一部を機械的な仕事に変換する駆動方 法を提案しています.これらを小型化して靴に 組み込むことで、電気エネルギーを一切利用し ないエネルギー自律型の歩行支援シューズを開 発しています.

参考文献

[1] Masahiro Takaiwa, Toshiro Noritsugu, Daisuke Sasaki, and Takahiro Nogami, Fingertip Force Displaying Device Using Pneumatic Negative Pressure, International Journal of Automation Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 208-215, 2014.5

[2]高岩昌弘,則次俊郎,正子洋二,佐々木大輔: 空気式パラレルマニピュレータを用いた手首部 リハビリ支援装置の開発---理学療法士の徒手訓 練動作の獲得と手首特性の多自由度計測---,日本 ロボット学会誌, Vol.25, No.8, pp.107-114, 2007

[3] Masahiro Takaiwa, Wrist Rehabilitation Training Simulator for P.T. Using Pneumatic Parallel Manipulator, Proc. of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatoronics AIM 2016, WeAT4.4, 2016.7

[4] Masahiro Takaiwa, Toshiro Noritsugu, Development of Energy Autonomous Type Pneumatic Walking Support Shoes, Journal of Robotics and Mechatronics • Vol.21 • No.3 • 353-358 • 2009.6 サーボ弁の動特性を考慮した静圧軸受エアステージの軌道制御

直井 誠*, 杉山 洋樹**, 藤田 壽憲**

Trajectory Control of Pneumatic Stage with Air Bearings Considering Servo Valve Dynamic Characteristics

Makoto NAOI^{*}, Hiroki SUGIYAMA^{**}, Toshinori FUJITA^{**}

Previously, we developed the air servo stage available ultra-precise positioning where seals are removed from the pneumatic actuator to reduce the effects of friction force, and the slider of the actuator is mounted with air bearings. The air servo stage available is required not only positioning accuracy but tracking performance for trajectory, applying the pneumatic stage to semiconductor manufacturing equipment. However tracking performance in accelerating is not sufficient and considerable tracking error occur. One of reasons is target trajectory not considering the valve dynamic characteristics. The other reason is calculation delay of the controller using a micro-computer. This paper describes solutions for these problems and better trajectory control results applying solutions to air stage.

Key Words : Pneumatics, Ultra-precise control, Trajectory Control, Air Stage, Air Bearings

1. はじめに

著者らは先に、空気圧アクチュエータの精密位置 決めにおいて問題となるパッキンの摺動摩擦を低減 するために、静圧軸受により可動部を浮上させ駆動 するエアステージを実現した.このアクチュエータ は高い位置決め精度と速度安定性を有することから 次世代の半導体露光装置のステージとして期待され ている.露光のためには、加速から等速区間への切 換え時の整定性が重要である.しかしながら、加速 時の目標軌道との偏差が大きく、一定速度への整定 時間が長いことが問題としてある.

この問題の要因の一つとしてサーボ弁の動特性を 考慮して目標軌道の生成していないことがある.こ れまでは,空気圧アクチュエータの伝達関数が3次 系であることに基づいて,3次曲線の目標軌道を与 え軌道制御してきた.しかしながらサーボ弁の動特 性を考慮するとエアステージは5次系となる.もう 一つの理由はマイコンの演算遅れによる制御性の悪 化がある.エアステージもマイコンで制御される. 本エアステージが目指す高速かつ超精密な制御では この演算遅れも一因となる可能性がある.

(〒120-8551 東京都足立区千住旭町5)

- (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5)
- * Graduate School of Tokyo Denki University

このような背景から、本研究ではサーボ弁の動特 性を含め5次系であることを考慮した目標軌道生成 法について提案する.演算時間遅れについてはサー ボ弁の制御器を離散時間系として設計し演算時間遅 れを補償する方法を提案する.最後に提案した手法 をエアステージに適応し、その有効性について検討 する.

2. エアステージ

エアステージを駆動する空気圧アクチュエータの 構造を図1に示す.空気圧アクチュエータはガイド とスライダから構成されている.ガイドには静圧軸 受が設けられており、スライダを完全非接触で浮上 させているため、摺動摩擦は発生しない.スライダ 内部に設けられた 2 つの圧力室に空気を給排気し、 その圧力差によってスライダを駆動する.

Fig2 にエアステージの外観を,Fig.3 にエアステ ージの駆動方法を示す.エアステージには2本の空 気圧アクチュエータを用い,スライダに板を渡しス テージを構成した.このステージの各圧力室には直 動型スプールサーボ弁2台が接続されている.スライ ダの位置はスライダ上に設置された76[pm]の分解能 を持つレーザスケールにより検出する.検出信号はパ ルスカウンタを通して制御用 PC に送られる.PC で演 算された指令電圧が D/A 変換機を通して2台の電流ア ンプに送られ,各電流アンプは指令電圧に従い,接続 されたサーボ弁のスプール位置を制御し,各圧力室へ の空気の供給量を調節する.この結果生じる圧力差に よりスライダ位置を制御する.

^{*} 東京電機大学大学院 工学研究科

⁽E-mail: 14ef061@ms.dendai.ac.jp)

^{**} 東京電機大学 工学部

^{**} Tokyo Denki University



Fig.1 Internal Structure of Pneumatic Actuator



Fig. 2 Photo of Pneumatic Stage



Fig.3 Pneumatic Stage Drive System

3. 提案手法

Fig.4 に提案する目標軌道を示す. これまでの目 標軌道のジャークは方形波であったのに対し,提案 したジャークは5次曲線で構成されている. この曲 線はサーボ弁の動特性を考慮して決定した. これに よりサーボ弁はジャークに対して遅れがなくなる.

Fig.5にサーボ弁に対する演算遅れ補償法を示す. 現在,サンプリング時間は 0.2[ms]で行っている. この時間はほぼ制御演算時間であり,計測した位置 等から1サンプリング後に演算結果を出力している. これが図のむだ時間を表す.このむだ時間の影響を 小さくするためには図の破線のようにフィードバッ クすれば見掛け上,むだ時間の影響が小さくなる. 本研究では極配置により大きなフィードバックゲイ ンに設定し演算遅れを補償した.



Fig. 4 Proposed Reference Trajectory



Fig. 5 Control Algorithm for Servo Valve with Calculation Time Delay Feedback



Fig.6 Trajectory Control Result

4. 軌道制御結果とまとめ

提案した手法を用いて軌道制御を行った結果を Fig.6に示す.提案した手法により,加速時におけ るステージの最大位置偏差が約7[µm]減少した.こ れに伴い,わずかではあるが一定速度への整定時間 も短くでき,提案手法の有効性が確認できた.しか しながら,まだ最大30[µm]程度の偏差が残っており 今後も改善していく必要がある.

風力空気圧縮機に関する研究

金澤 直弥*, 藤田 壽憲**

Study on Wind-Powered Air Compressor

Naoya KANAZAWA^{*}, Toshinori FUJITA^{**}

Electrical air compressors consume 15% of energy used in industry. Now we must reduce the emission of greenhouse gases to prevent grovel warming. However, in an electric compressor, the further reduction of the greenhouse gas by energy saving, such as inverter drive or multi unit control technique, becomes difficult. As a method of the reduction of the greenhouse gas, the use of the wind power energy is advancing. This paper proposed the wind powered air compressor which produces compressed air by the wind energy. This paper describes Its detail. Finally, the prototype of wind powered air compressor could achieve adequate output pressure for industry use.

Key Words : Pneumatics, Air compressor, Windmill, Hydraulics, Energy Saving

1. 研究背景と目的

生産ラインでは洗浄や搬送などに圧縮空気が広く 利用されている.現在,圧縮空気のほとんどは電動 コンプレッサで作られている. 産業界で消費される エネルギの約80%は電気エネルギである. その内の 約20%が電動コンプレッサに使用されており大きな 割合を占めている.地球温暖化の主因である温室効 果ガスの削減が世界的な課題となっている今、電動 コンプレッサの消費電力削減が求められている¹⁾. そのためで電動コンプレッサにはインバータや台数 制御などの省エネルギ技術が導入されてきた. しか し、それによる削減量にも限界がある. 温室効果ガ ス削減の方策の一つとして再生可能エネルギの利用 が挙げられ、中でも風力発電はコスト面や構造の単 純さから利用が高まっている²⁾. しかし風力発電は 天候によって発電量が大きく変動する不安定かつ不 確実な発電方法である. そのため風力発電が供給で きる電力は需要の 10%程度が限界と言われている. また大型の風力発電機は送電ロスがある、小型のも のではインバータ等の送電装置が必要であり高価格 であるといった問題もある.

そこで本研究では、さらなる風力エネルギの有効 利用のために、コンプレッサの動力に風車を用いた、 風空気圧の供給例を Fig.1 に示す. コンプレッサは 複数台置かれ、供給ラインの圧力は変動する. 圧縮

- * 東京電機大学大学院 工学研究科
- (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番)
- (E-mail: 16kmf08@ms.dendai.ac.jp)
- ** 東京電機大学
- (〒120-8551東京都足立区千住旭町5番)
- * Graduate School of Tokyo Denki University
- ** Tokyo Denki University

空気を使用する機械も間欠的に動作するので,供給 需要とも絶えず変動する.このため風力コンプレッ サを増設しても風量の変動による影響は全く問題と ならない.風力発電によってコンプレッサを駆動す る場合と比べて簡単であり低コストでの導入が可能 である.また本機器は電力を使用しないため,工場 などで導入する場合に必要なのは配管の増設のみで ある.風力コンプレッサを実現できれば,工場の屋 根などの空きスペースに設置し,使用する圧縮空気 の一部を賄うことが可能で,電動コンプレッサの台 数を減らし,温室効果ガスの削減につながる.本研 究では提案する風力コンプレッサを製作し,最大吐 出圧力と効率の観点からその可能性について検討す ることを目的とする.

2. 製作した風力圧縮機

Fig.2 に製作した風力コンプレッサを示す. 図のように風車,減速機,コンプレッサによって構成される.風力コンプレッサでは空気の圧縮に大きな力が必要となる.このため風車の回転軸は減速機に接続されトルクを増幅した後,コンプレッサを駆動する. Fig.3 に圧縮機の詳細を示す. 圧縮機は構造が単純で空気漏れ対策も簡単なレシプロ方式とした.駆動ト



Fig.1 Use of wind-powered compressor in plants



Fig.2 Structure of Wind-Powered Air Compressor



Fig.3 Detail of air compressor

トルクの平滑化のために3本のシリンダを120度の 位相差を持つように配置したラジアルピストン構造 とした.シリンダのボア径14[mm],ストローク 8[mm]である.各シリンダには二つのチェック弁が 取り付けられており,上昇時にはこの空気が圧縮さ れ,吐出圧以上になるとが接続されており,ピスト ン下降時は空気が流入し,チェック弁が開き圧縮空 気が得られる.確実なシール性を保つためリード弁 ではなくチェック弁を用いた.

風力発電の場合と異なり、本装置の設置場所を考 えると、常に高風速の場所に設置できるとは限らな い.日本の年間平均風速である約3 [m/s]程度であり、 風力圧縮機は 2~5[m/s]の低風速で効率よく稼働する ことが必要である.そこで風車には低風速で高トル クが得られる多翼型風車を採用した.アルミ板製で 羽根枚数は6枚、ローター直径は570[mm]とした.

3. 風力圧縮機の特性

製作した風力圧縮機を風速3[m/s]駆動し,圧力流 量特性と効率を測定した. 結果をFig.4 に示す.測 定には状態変化を等温変化に保つ等温化圧力容器を 利用した.具体的には風力圧縮機を容器に接続し, その圧力を半導体圧力センサで計測し,その時間微 分値から気体の状態方程式より流量を得た.



Fig.4 P-Q characteristics and efficiency

図より最大吐出圧力は 0.36[MPa],最大効率は約 10%であることがわかる.市販の圧縮機の最大吐出 圧力は 0.8[MPa]前後であるのに比較すると低い.最 大吐出圧力が低い要因はピストン上死点におけるデ ットボリュームであり,これを削減できれば市販と 同等の最大吐出圧力となると予想される.

一方,ベッツの法則より風車の理論最大効率は 60%であり,現在のところ風車による最大発電効率 は40%程度である.また電動圧縮機の効率は50%前 後である.したがって,もし風力発電により電動コ ンプレッサを駆動したとすると20%程度であり,こ れと比較すると風力圧縮機の効率はまだ低いといえ る.効率が低いのは圧縮機負荷と風車特性がマッチ ングしていないためと考えられ,この点で改善の余 地がある.

4. 結 論

風力エネルギーで圧縮空気を発生する風力圧縮 機を提案・製作した.最大吐出圧力および最大効率 とも現在は低いが改善の余地があり,風力圧縮機の 実用化の可能性が十分にあることがわかった.

- 1) 妹尾:空気圧機器の省エネと省エア化,日本フル ードパワーシステム学会誌,41-5,280/283 (2010)
- 2) 牛山:風車工学入門, 森北出版 (2004)

高収縮率を有する Helical 形流体圧アクチュエータ

河野銀次郎*, 塚越秀行*

Helical Type Fluid Powered Actuator with High Traction Rate

Ginjiro KAWANO^{*}, Hideyuki TSUKAGOSHI^{*}

This paper describes a helical-actuator which can generate much higher contraction rate than conventional contraction actuator such as McKibben artificial muscle. Recent years, robots have entered human life, and the relationship between humans and robots is closer. So it is required that such robots are flexible and lightweight. For this reason, McKibben artificial muscle is widely used as an actuator to move such robots. However, McKibben artificial muscle has a problem that it can't generate high contraction rate. So, the driving range of the robots is limited. The helical-actuator we proposed this paper can solve that problem. We checked its property by various experiment and prove its effectiveness.

Key Words : Soft actuator, Pneumatics

1. はじめに

ロボット技術で介護の負荷軽減を行うことを目指 し,介護ロボットなどの開発が多く行われている¹⁾. このようなロボットは人間との接触が発生すること があるため,構造的に安全であることが要求される. 空気圧は軽量かつ柔軟であるという特徴を有して おり、高い出力を出すことが出来ることから非常に 有効であると考えられる.また,空気圧を利用する アクチュエータとして一般的に McKibben 型ゴム人 工筋肉が知られている²⁾. このアクチュエータは、 加圧することで人間の筋肉のように収縮するといっ た特徴があり、マニピュレータなどへの適用が多く 試みられている.しかし、収縮率が約20%程度と少 ないためアームの可動範囲が狭いといった課題があ る. また, 空気圧駆動の人工筋肉として軸方向繊維 強化型人工筋肉があるが、その収縮率も約30%程度 となっており、収縮方向への大きな変位を発生させ ることが出来ない³⁾.

本研究では, Fig.1 のように加圧することで螺旋を 巻くように変形し,大きな収縮量を発生させること が可能な Helical 形流体圧アクチュエータ⁴を紹介す る.はじめに,アクチュエータの構成方法や変形原 理を述べる.次に,収縮量や収縮力について様々な 実験を行うことで特性を紹介する.

2. アクチュエータの構成

Helical 形流体圧アクチュエータは、ゴムチューブ、 lway-stretch (一方向について伸びやすく直交する 方向には伸びにくい布),全方向に伸長しない布から 製作されている.具体的な構成をFig.2に示す.こ

* 東京工業大学

こで、1way-stretch は軸方向に対して斜めに伸びる ように張り合わされている.なお、2 つの布はゴム チューブに沿って縫い合わすことで作製している.



Fig.1 Principle of the proposed helical-actuator



Fig.2 Performance of the proposed actuator

螺旋形に変形するためには、ねじり変形、湾曲変 形が同時に発生することが求められる.加圧するこ とによりゴムチューブには軸方向に伸びる力と径方 向に広がる力が働くが、この力が布に伝わることで 1way-stretchが変形し、上記の2つの変形を同時に 引き起こす.以下にこの2つの変形が引き起こされ

^{(〒152-8552} 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁽E-mail: htsuka@cm.ctrl.titech.ac.jp)



Fig.3 Constitution of helical-actuator

る仕組みを説明する.

1way-stretch は一方向について伸びやすく, それ に直交する方向には伸びにくい布である. Fig.3 に示 すように伸長可能な布に対して一方向に繊維を織り 込むことで,繊維方向については伸びにくく,直交 する方向には伸びやすい構造になっている. つまり,

繊維方向のヤング率E_fは繊維直交方向のヤング率E_T

に対して大きな値となる.ねじり変形が引き起こさ れる仕組みとして、この異方性材料の特異な性質が 関わる.

3. 特性

Helical 形流体圧アクチュエータの収縮力及び収 縮率の関係の測定を行った.実験方法については, Fig.4 に示すようにリニアステージとフォースゲー ジを用いて測定を行った.アクチュエータは螺旋形 への変形の際にねじれるが,ねじれ方向の力がフォ ースゲージに伝わらないように糸を用いてアクチュ エータとフォースゲージを結び付けている.今回の 実験では、ヒステリシスを測定するために、各状態 から加圧し(i)の方向にリニアステージを動かした 後,(ii)の方向へ再度リニアステージを動かし測定 を行う.なお、アクチュエータの内径は8mmとなっ ており、無加圧時の長さは260mmである.



Fig.4 Experimental setup

実験結果を Fig.5 に示す. この結果から,(ii)の 方向に動かすときに収縮率に対して大きな収縮力を 出すことがわかった.これはアクチュエータの巻き 数が関係するためだと考えられる. Fig.6 に実験の様 子を示しているが,(ii)の状態では(i)の状態に比べ て巻き数が多いことが確認できる.アクチュエータ の最大限発揮可能な収縮力を測定するために,以降 の実験では一度収縮させた状態から(ii)の方向にリ ニアステージを動かすことで測定を行った.同じさ 材質・同サイズで構成されたマッキベン人工筋より 収縮率を2倍近く大きい動作を生成することが確認 できた.



Fig.5 Hysteresis of contraction force



Fig.6 State of each motion while pulling

4. まとめ

本稿では、大きな収縮量を持つアクチュエータの 創成を目指し、加圧することで螺旋形に変形する空 気圧アクチュエータの開発を行った.また、アクチ ュエータの収縮率及び収縮力の関係について実験し た結果を示した.収縮率 60%近くの動作を生成でき ることから、本特性を十分に生かした適用例を検討 していく予定である.

謝辞

本研究は管清工業株式会社のご協力により行われた.こ こに深謝の意を表する.

- 2田周治郎、ウエアラブル制御幾器の開発と生活支援機器 への応用、第22回バイオエンジニアリング講演会講演論 文集、特別公園1、(2010)、p.1.
- 2) Tondu, B., Boitier, V., Lopez, P., "Naturally compliant robot-arms actuated by McKibben artificial muscles", *Systems, Man, and Cybernetics*, 1994. 'Humans, Information and Technology', Vol.3, (1994), pp.2635-2640.
- 3) Nakamura, T. and Shinohara, H., "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), (2007), pp. 4361–4366
- 河野 銀次郎、塚越 秀行,高収縮率を有する Helical 形流 体圧アクチュエータ, ROBOMECH2017 in Fukushima (ロボ ティクス・メカトロニクス講演会)、2A1-B05(2017)

自励振動を誘発する柔軟小型バルブ

宮木悠二*, 塚越秀行*

Soft compact valve inducing self-excited vibration

Yuji MIYAKI^{*}, Hideyuki TSUKAGOSHI^{*},

This paper describes the development of a new valve that switches the pressurized modes by self-excited vibration instead of using electricity. Recently pneumatic soft robots are developed actively which can move narrow environments by taking advantage of its flexibility. Generally, solenoid valves are used to drive pneumatic soft robots, but they are hard to be used in environments where explosion-proof performance is required such as a chemical plant. Therefore, we developed a new valve and checked its function by experiments. Then we show the effectiveness of our method by realizing the propulsion of a pneumatic mobile robot in which installed the valve.

Key Words : Soft actuator, Pneumatics, Valve

1. はじめに

柔軟性を活かして狭隘地形などを安全に推進,情 報収集を行うことができるソフトロボットの研究が 近年盛んに行われている.なかでも空気圧を駆動源 としたソフトロボットは柔軟,軽量かつ出力密度が 高いため数多く研究されている¹⁾.

一般に,他自由度の運動を生成する空気圧ロボット制御するためには,自由度と同数の圧力供給チュ ーブと制御弁が必要となる.しかし,長距離移動の際には複数の供給チューブがもたらす捻じれや摩擦 などが運動を阻害する.

一方で、電磁弁をロボット本体に搭載することで 供給チューブを減らすという手法をとると、ソフト ロボット本来の柔軟性が損なわれるだけでなく、化 学プラントのような防爆性能が要求される環境での 使用が困難になる.

そこで本研究では、防爆性能が必要とされる環境 下での使用を目指した、電力を使用せずに自励的に 圧力切替を行うことのできる柔軟小型バルブ 4を開 発した(Fig.1).従来にも自励振動を生成する剛体 構造の弁は存在した²⁾.本研究で提案する弁はこれ とは異なり、弁自体が柔軟なチューブ構造のためア クチュエータ内部に収納しやすく、システム全体と して柔軟性を損ねる懸念がない.

本稿では、まず偏平チューブを用いた自励振動の 生成原理を紹介し、検証実験を行う.次にバルブと しての利用法を述べ、実験によってその特性を示す. 最後に、当該バルブにより流体圧を供給するだけで アクチュエータを高周波で駆動可能なことを示す.

* 東京工業大学

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

2. 偏平チューブを用いた自励振動現象

自励的に加圧モードの切り替えを行う手法として, 偏平チューブを用いた自励振動現象を提案する.2 本の偏平チューブを用いて流路を切り替える手法が, 塚越らによって開発されている³⁾.これを利用して, 一定圧力で流体を供給することで自励振動を生成す る原理を提案する.



Fig. 1 Soft compact valve



Fig. 2 Basic structure of the mechanism

⁽E-mail: htsuka@cm.ctrl.titech.ac.jp)

本機構は図2に示すように、小さな排気穴を開けた 2本の偏平チューブを拘束具によって束ねたものと 3 つのネオジウム磁石によって構成されている.自 励振動を生成する基本原理を Fig.2 に示す.右側か ら一定圧力で空気圧を供給し、偏平チューブ A、B の内圧をそれぞれ p_A, p_B と表すこととする.最初に、 中央の磁石が偏平チューブ A側の排気穴を磁力によ って塞ぐことで、 p_A が上昇する. $p_A > p_B$ となるこ とで、拘束部分で偏平チューブ B側の流路が遮断さ れる(Fig.2(i)).それによって、 p_A はさらに上昇し、 切替圧力に達すると排気とともに磁石が偏平チュー ブ B 側へ移動する(Fig.2(ii)).同様に p_B は上昇し (Fig.2(iii))、磁石は A 側へ移動する(Fig.2(iv)).この 一連の動作を繰り返すことで一定圧力供給のみで中 央の磁石が自励的に振動する.

3. 動作特性

実験装置による自励振動生成の様子を Fig.3 に示 す.一定圧力 150 [kPa]を供給することで原理通り中 央の磁石が自励的に振動した.また, Fig.4 に示すよ うに供給流量qに比例して振動の周波数fが上昇し ていくことが確認できた.Fig.5 に高周波で磁石が振 動している様子を示す.これによって圧力切替の周 期は供給流量によって制御可能であると考えられ る.しかしながら,供給流量が 1.6 [L/min]以下では 自励振動は生じなかった.これは拘束部分による流 路の遮断が完全ではなく,磁石によって閉じられて いない側の排気穴から空気漏れが生じているため である.今回は拘束具として 0.5 [mm]のスリットを 設けたポリアセタール樹脂を用いたが,今後空気漏 れを低減する改善が必要である.



Fig. 3 Self-excited vibration



Fig. 4 Relationship between frequency and flow rate



Fig. 5 Performance of the proposed valve

4. まとめ

電力を使用せずに目標の切替圧力で加減圧を行う 柔軟小型バルブを開発した.当該バルブを用いて, 1本の供給ラインで流体圧アクチュエータへの加減 圧を自動的に行えることをし,その有効性を示した. 今後はバルブを組み合わせることで3つ以上のチャ ンバの加減圧を行うことができる手法の検討や,よ り柔軟性を活かした移動ロボットの開発を行う予定 である.

- Daniela Rus, Michael T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots", Nature, vol 521, pp. 467-474, 2015.
- 2) 高山俊男、角悠介、"多重チューブ推進機構のための自励 式空圧流路切り替え装置"、日本機械学会ロボティクス・ メカトロニクス講演会(2016)、2A2-08b2、Jun、2016
- 家越秀行,田圃圭祐,北川能,"水道圧ステッピングモータ とその高速駆動を促すフルイディックチューブの動作原 理",平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論 文集, pp.161-163,

高速電磁弁を用いた空気圧シリンダのメータアウト駆動

川村 隼人*, 川上 幸男**

Meter-out Circuit of Pneumatic Cylinder with High Speed Solenoid Valve

Hayato KAWAMURA^{*}, Yukio KAWKAMI^{**}

In this study, we first investigate into the static characteristics by flow rate test when the high speed solenoid valve is controlled by PWM. As result, it has been found that the static characteristic of the high speed solenoid valve is linear. Next, the driving experiment of the pneumatic cylinder is carried out using the proposed meter-out circuit. As result, the measured equilibrium velocity became equal to theoretical value. From this, we have found that the meter-out circuit using the high speed solenoid valve proposed by this study is useful for the velocity control of the pneumatic cylinder.

Key Words : Pneumatic, High speed solenoid valve, Cylinder, Meter out, Velocity control, PWM control

1. はじめに

メータアウト回路は空気圧シリンダから排気され る空気の流量をスピードコントローラのニードル弁 の調整により速度制御を行う駆動方式であり,オー プンループ制御で安定した定速駆動を実現できるこ とから,古くから自動化装置の駆動部等に多用され ている.しかし,ニードル弁の開度とシリンダの速 度との関係に非線形性を有するため,速度の調整が 難しいといった問題が存在する.本研究ではスピー ドコントローラの代用となる機器として,近年,応 答時間が数 ms 以下と大幅に短縮された高速電磁弁 を用いた PWM 駆動によるメータアウト回路を提案 し,その有用性について検討した結果について報告 する.

2. 高速電磁弁を用いたメータアウト回路

一般的なメータアウト回路の構成は Fig.1 (a) の ように空気圧シリンダのヘッド側,ロッド側からの 排気を別々しているが,本研究では高速電磁弁を用 いて Fig.1 (b) のようにヘッド側,ロッド側からの排 気を共通としたメータアウト回路の構成を提案する. この提案するメータアウト回路により,ソフトウエ ア的に空気圧シリンダの速度制御が可能となること について以下に解説を加える.

3. PWM 駆動時の流量特性

Table 1 は本研究で使用した高速電磁弁 (コガネイ 社製:K3-100SA-04-R), スピードコントローラ (SMC 社製:AS1002F-06) の公称値である. Fig.2 はスピー

* 芝浦工業大学大学院

**芝浦工業大学システム理工学部

```
(〒337-8570 埼玉県さいたま市深作 207)
```

```
(E-mail: kawakami@shibaura-it.ac.jp)
```



(a) Separate exhaust type (b) Common exhaust Fig.1 Meter-out circuit

ドコントローラのニードル弁回転数と有効断面積の 関係を調べた試験結果であり,両者は強い非線形を 有していることが確認できる.Fig.3 は高速電磁弁を 10 および 20Hz の周波数で PWM 駆動したときの Duty 比と有効断面積の関係を調べた試験結果であ る.この結果から,高速電磁弁を用いて PWM 駆動 した場合,Duty 比に対して有効断面積を線形的に変 化させることが可能であることが判る.

Table 1 Nominal specification of equipment

Equipment	Effective area	Response time ms		Number
name	mm^2	ON	OFF	of ports
High speed solenoid valve	1.0	3.0±1.0	2.0	3
Speed controller	1.5			

4. メータアウト回路による駆動結果

提案する PWM 駆動の高速電磁弁を用いたメー タアウト回路による駆動結果を Fig.4 に示す. ピス トン変位,速度,シリンダ内圧力の時間応答につい て,PWM 周波数を 20Hz, Duty 比を 20%,80%とし た場合について併記した. さらに,Fig.5 に各 Duty

^{(〒337-8570} 埼玉県さいたま市深作 207)

^{*} Graduate School, Shibaura Institute of Technology

^{**} Systems Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology



Fig.2 Flow rate characteristics of speed controller



Fig.3 Flow rate characteristics of PWM solenoid valve

比における平衡速度の実測値および理論値について 整理した結果を示す.この結果より,平衡速度の理 論値は実測値とほぼ一致していることがわかり, Fig.3の流量特性と同様に Duty 比に対する平衡速度 の関係が線形に変化することがわかる.このことか ら,スピードコントローラと比較しても,空気圧シ リンダの速度制御に高速電磁弁を用いる方が速度の 調整が容易であることが確認できる.

5. おわりに

以上に示した結果から、本研究で提案する PWM 駆動させた高速電磁弁を用いたたメータアウト回路 において、空気圧シリンダの速度制御を行うことは 有効であると考える.また、一般的なメータアウト 回路では、スピードコントローラによる空気圧シリ ンダの速度の調整を試行錯誤的にマニュアル操作で 行うのに対して、本研究で提案する高速電磁弁を用 いたメータアウト回路は、高速電磁弁を PWM 駆動 させることでソフトウエア的に空気圧シリンダの速 度制御をすることができ、速度の調整が容易となる. したがって、メータアウト回路を構成する場合に、 スピードコントローラの代用となる機器として高速 電磁弁を用いることは十分実用的であると考える.





Fig.5 Result of equilibrium velocity of high speed solenoid valve

参考文献

 川村,村山,川上,塩田,堀川:高速電磁弁を用いた 空気圧シリンタの速度制御 に関する研究,日本機械 学会 2016 年度年次大会論文集 (2016)

エネルギ回収型増圧器に関する実験と考察

林鍾何*, 飯田航平**, 只野耕太郎*, 香川利春*

Analysis on Energy Efficiency of Booster Valve with Energy Recovery

Jongha LIM^{*}, Kohei IIDA^{**}, Kotaro TADANO^{*}, Toshiharu KAGAWA^{*}

This paper describes the result of an analysis on energy efficiency of booster valve with energy recovery. Pneumatic systems are widely used in variable industries such as automobile production line. Recently, those factories have reduced supply pressure for saving an energy consumption. Instead, pneumatic booster valves that usually amplify a pressure twice are applied to the process where a high pressure is still necessary. However, although the pneumatic booster valves let us save energy by setting air compressors at a low pressure, it wastes some energy by exhausting compressed air that occurs during its process. For this reason, an idea of a pneumatic booster valve with energy recovery, which recovers the energy by reusing the exhausted compressed air, is proposed by a patent 30 years ago. Furthermore, a research about an analysis on this new-type pneumatic booster valve is under examination by numerical simulation. Thus, in this study, we analyze a booster valve with energy recovery by experiment and discuss an energy efficiency.

Key Words : Pneumatics, Booster valve, Energy recovery, Air power, Energy efficiency

1. はじめに

空気圧は様々な理由で多くの産業で活用されてい る.維持費や管理費といったコストが安いというメ リットもあれば, 空気自体を利用するため使った後 大気中に放出しても良いなど安全性にも優れている. このような長所で特に多くの自動車生産工場で使わ れている.しかし、電力消費の面では良いとは限ら ない. エアコンプレッサーの消費電力は産業全体の 電力消費量の約20%を占めており、省エネルギにほ ど近いとは言えない. この問題を解決する方法とし ては供給圧力を下げることが考えられる.先行研究 によると0.1MPaを下げるごとに約7~9%のエネルギ ーが節約できる¹⁾.実際にトヨタは省エネルギー対 策の一環として自動車生産ラインの供給圧力を 0.6MPa から 0.3MPa に下げることにした. ところが, 強い力が用いられる工程やタクトタイムの縮小など 高圧を必要とするところで問題に直面する.この問 題を解決するため、部分的に圧力を増幅する増圧弁 が提案された.この増圧器は圧力を約2倍増圧する ことができ、現在多くの産業で広く使われている. これで空気圧に関する電力消費量は大幅に減少した. とは言え、この既存の増圧器に改善点がないとは限

* 東京工業大学未来産業技術研究所

- (〒226 8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)
- (E-mail: lim.j.aa@m.titech.ac.jp)
- ** 東京電機大学藤田研究室
- (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5)

* Laboratory for Future Interdisciplinary Research of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

** Tokyo Denki University

らない. 増圧器が増圧する途中には圧縮された空気 をそのまま放出してしまう過程が含まれているため, エネルギーの損失がある程度存在する. この損失を 防ぐためにエネルギ回収型増圧器が特許として提案 された²⁾. また,先行研究ではシミュレーションに よる検証が検討中である³⁾. しかしこの先行研究で は実験での検証は行われていない. したがって,本 研究では実験での検証を行う.

2. 増圧器の原理

従来の増圧器(PBV)と提案のエネルギ回収型増圧 器(PBV-R)の原理はある程度一致しているところが 多いが、「膨張室」というシリンダの有無が大きな違 いである.

まず、従来の増圧器を説明する.この増圧器は二 つのシリンダが連結しているような形である.最初 は1と6に空気が供給され、その圧力により3で空 気が高圧になり、その空気はタンクなどに流れ込ん でいく.ここで、2が4まで届くと空気圧回路の経



1. Drive Chamber A 2.Piston 3.Boost Chamber A 4.Direction Valve 5.Check Valve 6. Boost Chamber B 7.Piston Rod 8.Drive Chamber B 9.Regulator 10.Air Source

Fig 1. Schematic graphic of PBV

路が変わり3と8に空気が供給され、その圧力によ り6で空気が高圧になる.これを繰り返すことによ り高圧の空気が作られる.しかし、いずれも残り一 つのチャンバーから高圧の空気が捨てられてしまう.

次に,提案の増圧器について説明する.基本的に 従来と同じ原理であるが,「膨張室」が新しく追加さ れ,放出される空気の回収を担当する.最初は 10 から放出される空気を5に戻し,さらに圧力を加え させる.切換え弁で空気圧回路の経路が変わった時 は1から放出される空気を6に回収し、押す力とし て利用する.



 Drive chamber A 2.Piston 3.Boost Chamber A 4.Air source 5.Recovery chamber A 6. Recovery chamber B 7. Check Valve 8.Boost chamber B 9.Piston rod 10.Drive chamber B 11.Magnatic switch 12. Magnetic ring 13.Two-position seven-port solenoid valve 14. Regulator 15. Power source

Fig 2. Schematic graphic of PBV-R

3. エアパワー

エアパワーとは,圧縮空気の流動を伴う空気の有 効エネルギーの流束を評価するものである⁴⁾.エア

$$P = GRT_a \left[\ln \frac{p}{p_a} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{T}{T_a} - 1 - \ln \frac{T}{T_a} \right) \right]$$

パワーは以下の式で計算できる.

ここで P はエアパワー, G は質量流量, R は気体定数, p は絶対圧力, T は温度, κ は比熱比である. 添え字の a は大気を意味している.本研究では, エ アパワーを用いて空気のエネルギを評価する.

4. 実験結果

エネルギ回収型増圧器は研究 3)に基づいて設計 している. 膨張室のシリンダの直径は既存のシリン ダの直径より約 1.3 倍であるとき最も効率が良い貯



Fig 3. The experiment equipment

め,既存のシリンダの直径を63mm,膨張室のシリ ンダの直径を80mmとした.また,ストロークは両 方100mmで同じである.最後に増圧の空気を貯め るための容積30Lのタンクを繋げ実験を行った.供 給圧力は400kPaに設定し,10回繰り返して平均値 を算出したものをTable1に示す.

Table 1. Comparison between PBV and PBV-R

	PBV	PBV-R
Energy Efficiency[%]	32.89	42.42
Booster Ratio	1.72	1.90

従来の増圧器の手法でのエネルギ効率より提案の回 収型の手法でのエネルギ効率の方が 10%高いこと がわかる.また,増圧比の面でもエネルギ回収型増 圧器の方が約0.18高くなった.したがって,この実 験の結果から,提案の増圧器は従来のよりエネルギ 効率と増圧比が向上することがわかる.

5. 結論

本研究では、省エネルギの一環として誕生した増 圧器をエネルギ回収という概念を加えてさらにエネ ルギの効率が向上できることを実験的に検証した. しかしながら、この増圧器には騒音という問題が存 在している.増圧器の排出口からはチョーク流れに 基づいた音となり、耳を閉じなくては聞いていられ ない非常に大きい騒音が発生する.したがって、今 後の目標はエネルギ回収型増圧器に対する消音対策 を考慮することである.

- 省エネルギーセンター、省エネルギー技術ハンドブック
- 2)香川利春,高橋隆通.空々増圧器.特開平 8-21404. 1996-01-23.
- Yang, Fan, et al : Characteristics Analysis of Pneumatic Booster Valve With Energy Recovery, BATH/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control. American Society of Mechanical Engineers, (2016)
- Cai Maolin, Kenji Kawashima, and Toshiharu Kagawa : Power assessment of flowing compressed air. Journal of fluids engineering 128.2, 402-405 (2006)

流体動力のリアルタイム計測システム

眞田一志*

Real-Time Measurement System of Power of Fluid

Kazushi SANADA*

This study aims to develop a real-time measurement system of power of fluid flowing in a pipe. Power of fluid is a product of pressure and flow rate. In this system, uncompressible fluid flow is targeted. Unsteady flow rate is estimated by a Kalman filter which inputs pressure signals at three points along a pipe. No restrictor is used in this method. From the estimated transient flow rate and pressure, power of fluid flow in a pipe can be obtained. Computational efficiency and real-time calculation are technical issues of this system. An experimental circuit is used to validate the real-time measurement system.

Key Words : Mechanical measurement, Real-time measurement, Power measurement, Kalman filter

1. はじめに

本研究は、配管によって伝達される流体動力をリ アルタイムで計測するシステムを開発することを目 的とする.流体動力は流量と圧力の積であるが、本 手法は流れの抵抗となる流量センサを用いずに、圧 力センサだけを用いることが特徴である.管路動特 性の数学モデルをもとに構成したカルマンフィルタ によって非定常な流量を推定し、圧力センサ信号と の積を計算することで流体動力をリアルタイムで計 測する点が特徴である.

2. 管内流体動力推定用力ルマンフィルタ

管路動特性の数学モデルである最適化有限要素モ デルが考案されている¹⁾.図1に、管路内を流体が 流れる様子を示す.本研究では、非圧縮性流体を対 象とする.管内流れの運動方程式と連続の式は、次 式で表される.

$\frac{\partial q}{\partial t} = -$	$-\frac{A}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - p_f(q)$	(1)
$\frac{\partial p}{\partial t} = -$	$-\frac{\rho c^2}{A} \frac{\partial q}{\partial x}$	(2)

これらの式を Fig.2の交互格子系で有限要素近似 することにより,格子点における圧力と流量を状態 変数とする次式の連立常微分方程式が導出される.

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{p}}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{p}}\boldsymbol{\bar{p}} \tag{3}$$

管内流れの理論的な固有値と連立常微分方程式の 固有値の誤差が最小となるように格子点配置を最適 化した.本モデルは制御工学分野で用いられる状態 方程式で表せることから、制御理論を直接適用する ことができる.この特徴を活かして、Fig.3に示す カルマンフィルタによって、管路の非定常流量を推 定する手法を考案した^{2)~5)}.



Fig. 1 Fluid flow through a pipe







Fig. 3 Kalman filter system

カルマンフィルタは、予測ステップと修正ステッ プの2段の計算で構成される.ます、次式の予測ス テップで事前推定値を計算し、

$$\hat{x}^{-}[n] = A\hat{x}[n-1] + Bu[n-1]$$
 (4)

^{*} 横浜国立大学大学院工学研究院

^{(〒240-8501}神奈川都横浜市保土ケ谷区常盤台79-5)

⁽E-mail: sanada-kazushi-sn @ynu.ac.jp)

^{*} Yokohama National University

次に,最新のデータを用いて事後推定値を計算する.

$$\hat{x}[n] = \hat{x}^{-}[n] + K_T(y[n] - C\hat{x}^{-}[n])$$
 (5)

ここで, **K**rは, 定常カルマンゲインを用いる.

$$\boldsymbol{K}_T = \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T \left(\boldsymbol{R} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T\right)^{-1} \tag{6}$$

Pは次式の代数リカッチ方程式の解である.

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{A}(\boldsymbol{P} - \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^{T} [\boldsymbol{C}\boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^{T} + \boldsymbol{R}]^{-1} \boldsymbol{C}\boldsymbol{P}) \boldsymbol{A}^{T} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B}^{T} \quad (7)$$

3.実験の概要

カルマンフィルタ理論を適用し、管内流れの非定 常流量が推定できることを実験によって示した². この実験では、デスクトップパソコンを使用したオ フライン計測だった.そこで、本研究では、高速デ ジタル演算処理装置を使用してカルマンフィルタの 演算を実行することで非定常流量を推定し、圧力セ ンサの信号と乗じて流体動力をリアルタイムで計測 するシステムを実現する.

本研究で製作する計測システムを Fig. 4 に示す. 圧力センサの間隔である 330mm と 470mm は,管 路の音速測定の国際規格 ISO15068-2 で規定された 寸法に準じており,非定常流量だけでなく,同時に 音速測定も可能である. 圧力センサには,ダイヤフ ラムが露出している比較的安価なひずみゲージ式を 採用する. センサが流れを乱さないように,ダイヤ フラム面が配管の内壁面と一致するよう,計測孔を 工夫する.また,気泡が停留しないように,圧力セ ンサは鉛直下方から配管に取り付ける.



実験装置は Fig.5 に示す回路である.申請者の研 究室で所有している高速デジタル演算装置を用いて, カルマンフィルタのリアルタイム演算を実行する. この高速デジタル演算装置は,ブロック線図で作成 したモデルをコンパイル・実行し,実行中の変数の モニタリングも可能である.特に,リアルタイム演 算に特化したツールで,演算処理にかかる時間も測 ることができ,リアルタイム演算用に広く用いられ ている. 本実験装置で計測されたデータを用いて、本手法 のリアルタイム計測が可能であるか、検証する.カ ルマンフィルタで用いる管路のモデルを低次元化す ると計算効率が改善するが、その低次元化について も適切な方法を明らかにする.



実験油圧回路図



謝 辞

本研究は JSPS 科研費 17K06226 の助成を受け たものです.

- K Sanada, C W Richards, D K Longmore and D N Johnston, A finite element model of hydraulic pipelines using an optimized Fig.1 Figure caption nstn Mech Engrs, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, Vol.207, p.213/222, (1993)
- カルマンフィルタを用いた管内非定常流量・圧力の推定,小澤明,眞田一志,日本フルードパワーシステム学会論文集,査読有,Vol.44,No.1, p.8/15, (2013)
- 3) Estimating unsteady flow in a pipe using Kalman filter, Kazushi Sanada, International Journal of Automation Technology, 査読有,Vol.6, No.4, p.440/444, (2012)
- 4) An Indirect Measurement Method of Transient Pressure and Flow Rate in a Pipe using Unsteady State Kalman Filter, Akira OZAWA, Kazushi SANADA, Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, Okinawa 2011, Oct. 25-28, 2011, 査読有, p.104/109, 2011
- 5) 管路動特性の最適化有限要素モデルを用いたカルマンフィルタに関する研究,小澤明,眞田一志,日本フルードパワーシステム学会論文集,査読有,第42巻第5号, p.89/94, (2011)

油圧と空気圧と電気駆動

~ 伝送動力の優劣は? ~

風間俊治*

Hydraulics & Pneumatics & Electric Drives

- How Superiority or Inferiority of Transmission Power? -

Toshiharu KAZAMA*

In order to discuss relative merits of power transmission systems, transmitting power of the transmission elements in fluid power systems and electric drive systems is explored. A simple model of power transmission circuits, which are available in the market, are considered, excluding primary equipment and auxiliary components. The transmission power of hoses in hydraulic systems, the power of tubes in pneumatic systems, and the power of cables in electric drive systems are compared. The outer and inner diameter, the mass per unit length, the maximum working pressure, the mean flow velocity, the rated voltage, and the allowable current are surveyed on the basis of product catalogs from the manufacturers, and then the transmittable maximum power is estimated. The relationships of the power to the size and the mass of each element are shown when and the resistance and loss are negligible, the fittings and terminals are ignored, and the return lines and ground wires are not considered. The transmittable power of the elements can be approximated by the exponential function of mass per length and the outer diameter. The power of the hydraulic hoses is highest; followed by the electric cables, and the pneumatic tubes. In some cases the order of the hoses and the cables can be changed.

Key Words : Hydraulics, Pneumatics, Electrics, Piping, Wiring

1. はじめに

油圧システムは、空気圧および電気駆動(以下, 電動)を主とする他の動力伝達システムに比して, 高い動力密度を誇る.各種モータをはじめとするア クチュエータあるいはポンプ類を対象とした調査研 究を通して、工学的な側面からエネルギー変換装置 の動力密度や加速性能などについて検討されている. そこでは、単体の重量あるいは質量に対する、動力, 定格トルク、トルク慣性比、パワーレートなどに対 する比較が定量的に示されている.しかしながら, 機器のみならずシステムを構成する伝達要素、すな わち,配管や配線もまた無視し得ないと考えられる. なぜならば、建設機械の例をひとつに取ると、配管 系が一機に占める重量比は1割程度にも達するとの データが示されているからである.

本発表では、油圧システムや空気圧システムの配 管ならびに電動システムの電力配線に注目して、そ の特長や差異を概観し、特に伝達要素の伝送可能な 動力の視点で考察した結果⁽¹⁾の一部を紹介する.

2. 油圧, 空気圧, 電動の差異

油圧,空気圧,電動のいずれにおいても使途や製品群は無数にあり,規模や構成もまた多岐に亘る. そこで,油圧配管,空気圧配管,電力配線について,動力源からアクチュエータ機器までを単純化した回路を想定し,数多ある製品の中から抜粋した数値を用いて大局を眺める.例として,可搬型システムの伝達系を仮定し,一般的に入手可能で可撓性を有する汎用的な製品群を対象とする.なお,補器類や制御系をはじめ,配管には継手やバルブ等が,配線には端子や配電盤等が不可欠となるが,ここでは省略する.また,機器の効率や力率は100%を前提とし,戻り管路やアース線は考えず,流れの抵抗や損失は無視し,管摩擦や電圧降下はないものとする.

油圧システムのエネルギー伝達媒体は作動油であ り、この伝達要素は、鋼管とゴムホースで代表され る、配管となる.ここでは、油圧ホースメーカ3社 の 3.5~34.5 MPa の鉱油系作動油用の一般的な油圧 ゴムホースを取り上げる.ホースの外径 D_0 と伝送 動力 P との関係を図1に示す.なお、動力 P を計 算する際、管内の作動油の平均流速を 6 m/s とし、 流体圧力はホースの最高使用圧力を仮定する.図1 より、外径 D_0 および単位長さ当たりの質量 m' と 動力 P との関係は、概ねべき乗則で整理できるこ

^{*} 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域

^{(〒050-8585} 北海道室蘭市水元町 27-1)

⁽E-mail: kazama@mmm.muroran-it.ac.jp)

^{*} Muroran Institute of Technology

とが分かる.なお,油圧システムは閉回路を構成す るために戻り管路が必要なことや油圧ホース内の作 動油の質量が無視し得ないことを述べておく.

空気圧システムのエネルギー伝達媒体は圧縮空気 であり、この伝達要素は金属管や樹脂チューブなど の配管となる.ここでは、ナイロン製とウレタン製 のチューブを取り上げ、メーカ3社のデータを整理 して図2に示す.動力 Pを計算する際には、管内 の平均流速U = 6 m/s とし、流体圧力はホースの最 高使用圧力を仮定する.データ数がやや少なく、バ ラツキもやや大きいが、ナイロンの方がウレタンよ りもPは大きい.油圧ホースと類似の関係が見て 取れるが、空気圧チューブのPは油圧ホースに比 して約2桁小さい.

電動システムのエネルギー伝達媒体は電気であり、 この伝達要素はケーブルとコードに大別される、多 彩な電線による配線となる.ここでは一例として、 600V 用 3 芯の汎用キャブタイヤケーブルを取り上 げ、図 3 に示す.動力 *P* の算出には、各電線の定 格電圧と許容電流を用いている.油圧ホースや空気







図 2 空気圧チューブの単位長さ当りの質量と伝送 可能動力

圧チューブの関係に比して,バラツキは小さい.

上記を m' についてまとめると,図4になる.油 圧と空気圧の棲み分けが明瞭である.また,高動力 域では油圧が最高伝送動力を示す.ただし,油圧と 電動は拮抗しており,条件によっては逆転する.

3. むすび

油圧,空気圧,電動の動力伝達要素の伝送可能な 最大動力に着目して比較した.データは各社のホー ムページやカタログ等の公開資料を参考にした.

引用文献

 風間俊治:油圧・空気圧・電気駆動システムにおける 動力伝達要素のパワー密度に関する一考察,日本機械 学会 2016 年度年次大会講演論文集, J1110102, (2016).



図 3 電力ケーブルの外径および単位長さ当りの質 量と伝送可能電力



(*は配管内の作動油と戻り回路を考慮)

負荷質量の変動に対応した電気一空気圧ハイブリッドシステムの開発

桜井康雄*, 中田 毅**, 梶川博通***, 本間伸一***

Electro-pneumatic Hybrid System for Coping with Change of Load Mass

Yasuo SAKURAI*, Takeshi NAKADA**, Hiromichi KAJIKAWA***, Homma SHINICHI***

This paper deals with an electro-pneumatic hybrid system for coping with change of load mass. This system is composed of a pneumatic driving system and a servomotor as an electric driving system. The pneumatic driving system supplies pressure which is equivalent to the gravitational force acting on an inertial mass as a load. Therefore, the servomotor with small capacity is able to move the inertial mass vertically through a ball screw. Recently, parts with various mass convey in a product line. When this system is applied for such the production line, the pressure acting on the parts has to be controlled with the change of its mass. In the present study, an electro-pneumatic hybrid system is proposed, in which the pressure acting on a mass is controlled automatically without the information of the mass. To realize this, the control of the servomotor torque introduced. The electro-pneumatic hybrid system with the servomotor torque control is fabricated and its dynamic characteristics are investigated experimentally. Furthermore, to make the design of such the system easy, a simulation model for the system is proposed. Simulation is carried out by Amesim which is the software to simulate the dynamic characteristic of a multi-domain controlled system. By comparing the experimental results and simulated ones, the validity of the model is investigated. Consequently, it makes clear that the control of the servomotor torque is effective for coping with the change of load mass and the proposed simulation model is suitable to predict its dynamic characteristics.

Key Words : Pneumatics, Servomotor, Electro-pneumatic hybrid system, Torque control, Simulation

1.緒言

筆者らが開発している電気-空気圧ハイブリッド システム¹⁾では,負荷質量の荷重に見合う空気圧を常 に加えることにより,この負荷質量にかかる荷重を 打ち消し,容量の小さいサーボモータで慣性負荷を 鉛直上方に駆動する.

近年,ひとつの生産ラインに複数の製品を流す多 品種少量生産に適している混流生産が用いられてい る.このようなラインに本システムを適用し鉛直上 方に部品を持ち上げ保持する場合,その部品に見合 った空気圧をかける必要がある.これを負荷質量の 情報無しに可能とすると,生産ラインにおける情報 量の低減,情報入力のミスによる空気圧のかけ過ぎ や不足などの問題に対処できる.

そこで、ここでは、負荷質量が変わった場合でも この空気圧の調整を自動化するため、サーボモータ のトルクをある範囲内に制御するシステムを提案し、 実験的にその駆動特性について検討する.さらに、 このシステムの設計を効率的に行うことを可能とす

* Ashikaga Institute of Technology

るため、そのシステムの数学モデルを提案し、その モデルの妥当性について実験とシミュレーション結 果の比較により検討する.シミュレーションに際し ては、1Dマルチドメインソフト Amesim²⁾を用いる.

2. 電気-空気圧ハイブリッドシステム概要

トルク制御を付加した電気-空気圧ハイブリッド システムを Fig.1 に示す.このシステムでは、サー ボモータの回転運動をボールねじにより直線運動に 変換し負荷質量を駆動する.同時に、サーボモータ のトルクをある一定の範囲内に制御するよう電空レ ギュレータの入力を PI コントローラにより制御す る.ここではそのトルクの範囲を±0.05N·m とした.

3. 実験結果

対象とした電気-空気圧ハイブリッドシステムを 用い負荷質量を鉛直上方に駆動した場合の実験結果



with servomotor torque control

^{*}足利工業大学工学部創生工学科

^{(〒326-8558} 栃木県足利市大前町 268-1)

⁽E-mail:ysakurai@ashitech.ac.jp)

^{**}東京電機大学情報環境学部情報環境学科

⁽所在地 〒270 - 1382 千葉県印西市武西学園台 2-1200) ***SMC(株)

⁽所在地 〒300-2493 茨城県つくばみらい市絹の台 4-2-2)

^{**} Tokyo Denki University

^{***} SMC Corporation



Fig.2 Experimental results (K_p=1.6,K_i=0.12,M=12.5kg)



を Fig.2 に示す. この図で X は負荷質量の変位, P は空気圧シリンダロッド側圧力, T はサーボモータ のトルクである. この図より, 負荷質量駆動開始時 のサーボモータトルクのピークは約 0.2 N·m となる ものの, サーボモータのみで負荷質量を駆動した場 合のサーボモータトルクは 0.27N·m であったこと から, 制御を施した場合, その 1/5 にサーボモータ のトルクが抑えられていることがわかる.

Fig.3は1周期毎に負荷質量を変化させた場合の実験結果である.初期質量は12.5kgとし,次の周期では19.5kg,その次の周期には12.5kgと変化させた. この図からわかる通り,負荷質量の変化に追従して空気圧の値が変化し,その結果,サーボモータトルクが±0.05N・mの範囲に入るよう制御されていることがわける.よって,本実験の範囲内ではあるが,本システムは負荷質量の変化に十分対応可能であることが明らかとなった.

4. シミュレーション

本システムの設計の効率化を目的とし、シミュレ ーションを行った. Fig.4 に Amesim で作成した本シ ステムのモデルを示す.サーボモータの軸の弾性は モデルを成立させるために入れたモデルである.ま た、サーボモータの慣性質量にはボールねじの慣性 質量を含めた.なお、シミュレーションの第一段階 として、モータへの入力速度信号はステップ状の単 純な信号とし、負荷質量を持ち上げる場合を対象と した.

Fig.5 に負荷質量を 12.5kg としたときの結果を示



Fig.4 Simulation model of Electro-pneumatic hybrid system with servomotor torque control



Fig.5 Comparison of experimental and simulated results

す.この図より、シミュレーション結果は実験結果 を良好にシミュレートしており、特に負荷が動き始 めるときのサーボモータのトルクのピーク値および モータトルクが目標値の範囲内に到達する時間は実 験結果とシミュレーション結果でほぼ同じ値になっ ている.よって、本モデルにより、負荷質量を持ち 上げた場合の動特性のシミュレートが可能となった.

5. 結言

ここでは、トルク制御を付加した電気-空気圧ハ イブリッドシステムの駆動特性を実験的に検討した. さらに、そのシステムの数学モデルを提案し、その 妥当性を検討した.

その結果,ここで提案したシステムにより負荷質 量の大きさに従ってサーボモータのトルクを小さい 範囲に収めることが可能であること,提案した数学 モデルにより負荷質量を上昇させる場合のシミュレ ートが可能であることが明らかとなった.

おわりに,本研究にご協力いただいた当時足利工 業大学大学院生徐智峰君に謝意を表する.

- e.g. Y. Sakurai, K. Tanaka, T. nakada, Dynamic Characteristics on an Electro-pneumatic Hybrid Positioning System, Proc. of 7th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, (2003), 1/11
- 2) https://www.plm.automation.siemens.com/ja/products /lms/imagine-lab/amesim/

油圧システムの圧力脈動低減装置

桜井康雄*, 兵藤訓一**, 饗庭健一**

Component to Reduce Pressure Pulsation

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

This paper deals with a component to reduce pressure pulsation. In oil-hydraulic system, pressure pulsation is generated due to the use of positive displacement pump and causes oscillation, noise and so on. In general, an accumulator is interposed to suppress the pressure pulsation. However, since accumulators contain gas, regular maintenance is necessary to prevent its performance deterioration due to gas leakage. Therefore, it seems to be effective for improvement of an oil-hydraulic system to develop an oil-hydraulic component to prevent pressure pulsation, which its structure is simple and regular maintenance to keep its performance is not required. In this study, a component to reduce pressure pulsation in oil-hydraulic system is proposed. The proposed component is mainly composed of a pipe-shaped metal body and a silicone rubber tube. The component is fabricated and some experiments carry out to make clear its basic characteristics. In experiments, the pressure at the pump discharge port set about 3.5MPa, which is often used in oil-hydraulic systems in machine tools. Experimental results show that the variation width of the pressure pulsation is about ±0.29MPa when the component is not installed and the variation width of the pressure pulsation is about ± 0.028 MPa when it is employed. Consequently, it becomes clear that the proposed component works effectively to reduce pressure pulsation. Next step is to investigate the relation between the design parameters of the proposed component and its performance. Furthermore, it seems to be necessary to confirm the durability of the component.

Key Words : Oil-hydraulic, Pressure pulsation, Prototype, Component, Silicon

1. 緒言

容積式ポンプである油圧ポンプは有限個の固体壁 が移動することによりポンプ作用を行う.そのため, この機構に起因した流量脈動が発生するため,吐出 し圧力も脈動する.この圧力脈動は油圧ポンプに接 続されている機器の振動あるいは騒音の原因となる. そのため,油圧システムにおいてこの圧力脈動を低 減することが望まれている.

圧力脈動を低減するためには、一般的にアキュム レータが用いられる.しかしながら、アキュムレー タにはガスが封入されており、そのガスの漏れによ る設定圧力の変化を防ぐために定期的なメインテナ ンスが必要となる.

ここでは、その素子の構造を単純にした素子(以後、 圧力脈動抑制装置)を提案・試作し、工作機械でよく 利用されている圧力である 3.5MPa を対象として、その 性能を実験的に明らかとした結果を示す.

2. 提案する圧力脈動抑制装置の構造

Fig.1 に提案する圧力脈動抑制装置の構造を示す. この装置は、その特性が安定している温度が広範囲 であり耐薬品性にも優れているシリコーンゴムチュ ーブ(外径 38mm,内径 24mm,全長 58.5mm)とそ れを囲う管路形の金属の本体(内径 38mm,外径 55mm,全長 78mm)により構成されている.この装 置本体の側面には直径 20mmの穴が4つ開けられて いる.そのため、本体内部のシリコーンゴムチュー ブの側面はこの穴を通して大気に接している.これ により、シリコーンゴムチューブの変形量を大きく している.



(a)Pipe-shaped metal body



(b)Silicone rubber tube



(c)Assembly drawing Fig.1 Structure of proposed component

^{*}足利工業大学工学部創生工学科

^{(〒326 - 8558} 栃木県足利市大前町 268-1) (E-mail:ysakurai@ashitech.ac.jp)

^{**}東京計器(株)

^{(〒327-0816} 栃木県佐野市栄町1-1)

^{*} Ashikaga Institute of Technology

^{**} Tokyo Keiki Corporation



この圧力脈動抑制装置は配管の間に容易に取り付けることができる.圧力が上昇した場合はシリコー ンゴムチューブの本体の穴で大気に接している部分 が膨らみ、シリコーンゴムチューブの容積が大きく なり圧力上昇を防ぐ.また、圧力が低下した際には 圧力が上昇した際にシリコーンゴムに蓄えられた弾 性エネルギが作動油に伝わり圧力の低下を防ぐ.

3. 圧力脈動抑制装置の性能試験

Fig.2 に示した実験装置を用い,対象とする油圧ポンプで管路に送油した場合の圧力脈動を調べた.この実験装置は油圧ポンプ,可変絞り弁および気泡除去装置により構成されている.実験に際しては,作動油を十分循環させた後,絞り弁の開度を調整し対象とする圧力である 3.5MPa に圧力を設定し,半導体ひずみゲージ式圧力センサにより管路内の圧力を計測し,サンプリングタイム 0.1ms でデータロガーに記録した.なお,作動油の温度は約 25℃とし,作動油の流量は約 3.33×10⁴m³/s (20L/min)とした.

実験結果を Fig.3 に示す.この実験結果より,対象とした油圧システムの平均圧力は約3.49MPaとほぼ目標値となっていることがわかった.圧力の最大値は3.76MPa,最小値は3.18MPa,圧力脈動の平均的な変動幅は約±0.29MPaであることがわかった.

Fig.4 に示した実験装置を用い,提案・試作した圧 力脈動抑制装置の上流側および下流側の圧力を計測 することにより圧力脈動抑制効果を調べた.実験方 法および実験条件は上述した実験と同じである.

上流側の圧力の実験結果を Fig.5 に示す. これよ り,平均圧力は約 3.51MPa とほぼ目標値であり,圧 力の最大値は 3.78MPa,最小値は 3.22MPa,圧力脈 動の平均的な変動幅は約±0.28MPa であり,圧力脈 動抑制装置を取り付けない場合とほぼ同じ値である ことがわかる.



Fig.6 Experimental results (downstream)

下流側の圧力の実験結果を Fig.6 に示す. この実 験結果より,平均圧力は約3.47MPaとほぼ目標値で あり,圧力の最大値は3.50MPa,最小値は3.47MPa, 圧力脈動の平均的な変動幅は約±0.028MPa となり, 前述した圧力脈動抑制装置を取り付けない場合およ び上流側の圧力の脈動の平均的な変動幅の約 1/10 となることがわかる.よって,ここで提案・試作し た装置の有効性が明らかとなった.

4.結言

ここでは、ポンプの圧力脈動を抑制することを目 的とし簡単な構造を有する圧力脈動抑制装置を提 案・試作し、工作機械でよく利用されている圧力で ある 3.5MPa を対象として、その性能を実験的に検 討した.

その結果、本研究で提案した装置は圧力脈動を抑 制する効果は非常に高く、取り付けない場合に比べ 圧力脈動の幅は約1/10となった.これにより、本研 究で提案した装置の有効性が明らかとなった.

おわりに,本研究にご協力いただいた当時足利工 業大学大学院生王驍騁君に謝意を表する.

参考文献

桜井康雄、兵藤訓一, 饗庭健一: 平成 28 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 29/31(2016)

異径管接合 ECF ポンプの開発

桜井康雄*, 岡本拓也**, 中田 毅***, 枝村一弥****

Development of ECF-pump with Different Diameter Tube

Yasuo SAKURAI^{*}, Takuya OKAMOTO^{**}, Takeshi NAKADA^{***}, Kazuya EDAMURA^{****}

This paper describes a new pump for electro-conjugate fluid (ECF). An Electro-conjugate Fluid (ECF) is one of functional fluids, which has the characteristic that a strong jet flow is generated between electrodes when a high voltage is applied to ECF through electrodes. By utilizing this strong jet flow, an ECF-pump can be developed without a motor and an impeller. Therefore, in such the pump, neither vibration nor noise is generated. By using the ECF-pump, it seems to be possible to realize a new liquid cooling system for CPU of personal computer by ECF to cope with an increase of its thermal design power. Some of authors had proposed some ECF-pumps and fabricated new liquid cooling systems by ECF with the pumps. It had been shown that the system had sufficient performance. However, to actualize a personal computer with a liquid cooling system by ECF, it is necessary to develop a new ECF-pump which should be small and has simple structure. In this study, a new ECF-pump is proposed to realize these requirements. The body of the ECF-pump is an acrylic tube with different diameter and its electrodes are metallic meshes. The diameter of the pump body is 20mm and its length is 10mm. The gap between two metric meshes as electrode is set at 0.1mm. The proposed pump was fabricated and some experiments were carried out to investigate its basic characteristics. Based on the experimental results, it becomes clear that the maximum pump discharge is about 1.5cm³/s (90cc/min) when input voltage to the pump is 0.9kV and then the pump pressure is about 0.23kPa.

Key Words : Functional fluid, ECF, Pump, Mesh electrode, Tube with different diameter

1.緒言

電界共役流体(Electro Conjugate Fluid: ECF)¹⁾とは,機 能性流体の一種である.この液体に一対の電極により 直流高電圧を印加すると電極間で他の液体に比べ非常 に強いジェット流が発生するという特徴を有している. この現象を利用することにより,モータおよび羽根車 を必要としない単純な構造を持つ ECF 用のポンプ(以 後, ECF ポンプ)の開発が可能である.また,そのポ ンプは運動部が無いため振動および騒音が発生しない という特長を有する.

このようなポンプの用途の一つとして、近年、パー ソナルコンピュータの高性能化に伴う発熱量の増大が 問題となっている CPU あるいは DLP 方式のプロジェク タに用いられる DLP チップを ECF で冷やす新しい液冷 システムへの応用が考えられる.

このような背景の下,著者らは,数種類の ECF ポン プ^{2),3)}を提案してきた.しかしながら, ECF による新し

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

東邦車輛(株) (〒370-0614 群馬県邑楽郡邑楽町赤堀 4120 番地) *東京電機大学情報環境学部情報環境学科 (所在地 〒270 - 1382 千葉県印西市武西学園台 2-1200)

- ****(有)新技術マネイジメント
- (所在地 〒124 0023 東京都葛飾区新小岩 2-9-1-306)
- * Ashikaga Institute of Technology ** Toho Car Corporation

**** New Technology Management Co., Ltd.

い冷却システムの実用化ならびに用途拡大の観点から, ECF ポンプのさらなる小形化が求められている.

ここでは,異なった内径を有する管を組み合わせる ことにより小型化および部品点数の削減を図った異径 管接合 ECF ポンプを提案,試作し,その性能を実験的 に検討した結果を示す.

2. 異径管接合 ECF ポンプの概要

Fig.1 に ECF ポンプの小型化を狙ったスペーサー 体型 ECF ポンプ⁴⁾のポンプボディを示す.このポン プはスペーサをポンプボディと一体としている特長 を有している.しかしながら,ポンプボディと一体 化したスペーサの強度の関係上,スペーサの厚さを 0.2mm までにしかできず十分な性能が得られなかっ た.そこで,Fig.2 に示した異径管接合 ECF ポンプ を提案した.この図に示すように,本ポンプは,ポ ンプ本体,R1/8 高電位電極側管継手,高電位電極側 メッシュ,スペーサ,GND 電極側学継手で構成されてい る.このような構造とすることで ECF ポンプのさら なる小型化および部品点数の削減を図るとともに,



Fig.1 Pump body of spacer integrated ECF-pump

^{*}足利工業大学工学部創生工学科

^{(〒326-8558} 栃木県足利市大前町268-1)

^{***} Tokyo Denki University





(d)Photo of proposed ECF-pump Fig.2 ECF-pump with Different Diameter Tube



Fig.3 Experimental apparatus (Pump discharge vs. pump pressure characteristics)

スペーサ厚さを 0.1mm とすることが可能となった. 管継手に通電用の端子を取り付けメッシュ電極^{5,60} への通電を行う. ポンプ本体は 3D プリンタで製作 し,その材料はアクリル樹脂とした.

3. 流量-圧力特性

異径管接合 ECF ポンプの流量-圧力特性実験を Fig.3に示す実験装置で行った.本実験では絞り弁の 開度を変化させ,ECF ポンプへの入力電圧 V_{in} を 0.5kV および電極間でショートが発生する直前の入 力電圧 V_{in} =0.9kV に設定し,ポンプ吐出し量 Q_p と ポンプ吐出し圧力 P_p を計測した.なお,本実験では 電極であるメッシュに過去の研究においてポンプ吐 出し量が最大となったメッシュの組み合わせ(高電 位電極側:メッシュサイズ#150,GND 電極側:メッ シュサイズ#120)⁷⁰のニッケルメッシュに金めっきを



施したものを用いた.なお、メッシュサイズは1イ ンチ(25.4mm)の間にあるメッシュ数を意味する.

Fig.4にECFポンプへの入力電圧 V_{in} とポンプ吐出 し量 Q_p およびポンプ吐出し圧力 P_p の実験結果を示 す.この図より、入力電圧 V_{in} が一定のとき、ポン プ吐出し量 Q_p はポンプ圧力の増加とともに比例的 減少していることがわかる.ポンプ吐出し量の最大 値は V_{in} =0.9kVで,1.5cm³/s(90cc/min)であり、その時 のポンプ吐出し圧力 P_p は0.23kPaである.

過去の研究において試作した ECF を用いた液冷 システムでは、CPU を模擬した 50W の発熱量のヒ ータの温度を 50°C程度に保った際、システム内を循 環する ECF の流量が約 5.9cm³/s、冷却システムの圧 力損失が約 1.8kPa であったことが報告されている²⁾. 本研究で提案するポンプでは、例えば $V_{in}=0.9kV$ で ポンプ吐出し量 $Q_p=1.5cm^3/s$ 、ポンプ吐出し圧力 P_p =0.23kPa である.よって、この ECF ポンプを用い た液冷システムの実現には、ポンプの基本性能の向 上およびポンプユニットの多連装化が必要である.

4.結言

ここでは構造が単純で小型化を実現した異径管接 合ポンプを提案し、その基本性能を実験的に明らか にした.今後の課題は、本ポンプの基本性能を向上 させるとともに、本ポンプを用いた液冷システムを 試作し、その基本性能を明らかにすることである.

- 例えば、横田眞一、貞本敦史、近藤豊、大坪泰文、枝村 一弥:電解共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ(ス テータ電極(SE)形マイクロモータの提案)、機論 C, 66-642, 627/633(2000)
- 2) 桜井康雄, 門井寛人, 中田毅, 枝村一弥: プリント基板 多層形 ECF ポンプの開発と液冷システムへの応用, 機論 C, 72-715, 991/996(2006)
- 4) 岡本拓也,桜井康雄,中田毅,枝村一弥:新型メッシュ 電極 ECF ポンプの提案,平成 27 年春季フルードパワーシ ステム講演会講演論文集, 64/66(2015)
- 5) 中田毅, 桜井康雄, 枝村一弥: 電界共役流体を用いたピ ストン形リニアアクチュエータの開発, 機論 C, 71-706, 2014/2019(2005)
- 6) 特許 3225016「リニアモータ」,特許権者: 395016615,有限会社新技術マネイジメント
- 7) 桜井康雄,五十嵐友彰,中田毅,枝村一弥:メッシュ電 極を用いた ECF ポンプの提案,機論 B, 78-786, 291/299(2012)

ECF を利用した CPU 液浸冷却システムの開発

桜井康雄*, 髙實子正樹**, 中田 毅***, 枝村一弥****

Development of Immersion Cooling System for CPU by ECF

Yasuo SAKURAI^{*}, Masaki TAKAJIKKO^{**}, Takeshi NAKADA^{***}, Kazuya EDAMURA^{****}

This paper deals with development of immersion cooling system for CPU by electro-conjugate fluid(ECF). ECF is one of the functional fluids, which has a remarkable property that a strong jet flow is generated between the electrodes when a high voltage is applied to ECF through a pair of electrodes. Utilizing this strong jet flow, the authors had developed several kinds of ECF-pumps without noise and vibration. Furthermore, by the use of the ECF-pump, a liquid cooling system by ECF had been fabricated and the basic characteristics of the system had been made clear. The liquid cooling system is composed of an ECF-pump, a block to transfer heat into ECF flowing in it, a reserve tank and a radiator with a fan. Therefore, the system is complicated and the pump pressure has to be enough high, because the pressure had to be greater than the resistance of the block and the radiator. On the other hand, ECF is insulating liquid. By focusing on this point, it seems to be possible to develop an immersion cooling system which is used in supercomputers and a personal computer. In this study, an immersion cooling system by both ECF and an ECF-pump is proposed. In this system, it is not necessary that pump pressure is high. The system is produced experimentally and carried out some experiments. In the basis of the experimental results, it makes clear that it is possible to realize such the immersion cooling system by both ECF and an ECF-pump. In addition, it becomes clear that the ECF-pump improves the performance of the system and ECF is effective to adopt as the liquid for such an immersion cooling system.

Key Words : Immersion cooling system, Functional fluid, ECF, Personal computer, CPU

1. 緒言

電界共役流体(ECF: Electro Conjugate Fluid)は機 能性流体の一種であり¹⁾, 電極を用いて直流高電圧を 印加すると他の流動現象に比べ非常に強いジェット 流が生じるという特長がある.この ECF の強いジェ ット流を利用することにより,モータや羽根車を必 要とせず,そのため摺動部分が無い,単純な構造で 騒音の無い ECF を流動させるためのポンプ(以後, ECF ポンプ)の開発が可能となる.

筆者らは、上述した ECF の特長を利用し、単純な 構造で騒音の無い ECF ポンプ^{2)~4)}を開発し、これら のポンプを利用した ECF による CPU 液冷システム を試作しその性能について実験的に明らかにしてき た^{2)、3)}. その結果、50W の CPU であればその温度を 通常の動作温度である 50° ~60^oCの間に十分保つ ことが可能であることを示した. しかしながら、そ

```
*足利工業大学工学部創生工学科
(〒326 - 8558 栃木県足利市大前町 268-1)
(E-mail:ysakurai@ashitech.ac.jp)
**(株)ホンダテクノフォート
(〒321-3325 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台 89番4)
***東京電機大学情報環境学部情報環境学科
(所在地 〒270 - 1382 千葉県印西市武西学園台 2-1200)
****(有)新技術マネイジメント
(所在地 〒124 - 0023 東京都葛飾区新小岩 2-9-1-306)
* Ashikaga Institute of Technology
*** Tokyo Denki University
***** New Technology Management Co., Ltd.
```

のシステムには CPU の熱をその内部を流れる ECF に伝える液冷ジャケットおよび空冷式用のファンに 比べ径と回転数は小さいもののファン付きのラジエ ータが必要となる.そのため、システムの簡素化が 課題となっている.

一方, ECF は絶縁性の液体である. この点に注目 するとスーパーコンピュータおよび一部のパソコン で実用化されている CPU を直接液体に浸ける液浸 冷却システムが開発可能であると推察できる.

そこで、本研究では、ECF の絶縁性に着目したパ ソコン用の CPU を対象とした液浸冷却システムの 試作の第1段階として、ECF に伝わった熱を大気に 放熱する液浸システムを試作し、実験により液浸冷 却システムの実現の可能性について検討する.

2. 試作した液浸冷却システム

試作した液浸冷却システムを Fig.1 に示す.本シ ステムは ECF で CPU を直接冷却するため,CPU を 覆ように熱伝導率の低いアクリルケース (t=1mm, W70mm×D80mm×H40mm)をマザーボードに防水 性に優れたシリコンボンドで接着した.このケース に入れる ECF の量は 150cm³とし,ECF には現在最 も強いジェット流が発生することが確認されている FF-3EHA2 を使用した.CPU は最大使用温度 105℃ の Core i3-540 を用いた

Fig.1 に示すように, CPU から発生した熱は ECF



Fig.1 Immersion cooling system by ECF



Fig.2 Photo of immersion cooling system by ECF

に直接伝わる.本研究で試作したシステムは開発の 第1段階であるため、ECFの自由表面からその熱を 大気に捨てるものとした.本研究で試作した液侵冷 却システムの写真を Fig.2 に示す.

3. 液浸冷却システムの性能試験

実験は、CPU を覆ったアクリルケースに ECF を 入れ, CPU にかける負荷率を変化させ実験を行い, その時のクロック周波数, CPU 使用率, マザーボー ドに取り付けられている温度センサにより計測され た CPU の温度を記録した.実験開始時の温度は40℃ で一定になるように調整し, CPU の使用率を安定さ せるために省電力モードで実験を行った. アクリル ケース内にはメッシュ電極^{6,7)}形 ECF ポンプ⁴⁾を挿入 し、内部の ECF を流動させた状態における実験も実 施した. ECF ポンプをアクリルケース内に取り付け 簡単に流動を生じさせることができることは、液浸 冷却システムに使用する液体として ECF を利用す る最大の利点である. ECF ポンプは Fig.3 に示すよ うに, ECF の流動が CPU の面に対して水平方向お よび垂直方向に発生するよう取り付けた. ECF ポン プの電極間隔は2mmとし、印加電圧は2kVとした.

時刻約 20 秒で CPU 使用率を 50% に上げた場合の 実験結果を Fig.4 に示す. この図より CPU 使用率を 上げると CPU 温度は約 10 秒間急激に上昇し、その 後緩やかに上昇することがわかる.また、時刻 180 秒での CPU 温度は ECF ポンプを入れない場合では 89℃, ECF ポンプを入れて CPU の面に対し水平に ECF を流動させた場合では 83℃, CPU の面に対し 垂直に ECF 流動させた場合では 76℃となった. ECF ポンプを入れない場合と ECF ポンプを CPU に対し て真上に設置した場合では最大で 13℃の温度差が あることがわかる. これは ECF ポンプによりケース 内の ECF に流動を生じさせたことにより CPU から ECF に伝わった熱がケース内の ECF 全体に拡散し たこと、および、流れにより CPU 上部の伝熱面の温



ECF pump ECF (b)ECF-pump position : above CPU

Fig.3 Immersion cooling system by ECF with ECF-pump



度境界層が薄くなり熱伝達率が大きくなったことに よるものと考えられる.また, CPU 温度が実験を打 ち切る温度 95℃に達するまでの時間は ECF ポンプ 無しの場合で約5分, ECF ポンプを CPU に対して 横に設置した場合は約10分, ECF ポンプを CPU に 対して真上に設置した場合は約14分となった.これ らのことより, ECF ポンプを用いてケース内の ECF に流動を起こすことの有効性がわかる. なお, CPU 温度が95℃まで上昇してしまう理由は、放熱はECF の自由表面から大気中に行われているだけであるこ とによる. 今後の装置の改良により, 積極的に放熱 を行うことによりこの点については改善可能である ものと考えている.

4. 結言

本研究では、ECF を用いたパソコン用 CPU を対 象とした液浸冷却システムの開発を目的として、そ のシステムを試作し性能試験を行った.その結果, ECFによる液浸冷却システムの実現の可能性および ECF ポンプにより流動を発生させることは CPU の 冷却に有効であることを明らかとした.

- 例えば、横田眞一、貞本敦史、近藤豊、大坪泰文、枝村一弥 電解共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ(ステータ電材 1) -タ電極 (SE)形マイクロモータの提案),機論C, 66-642, 627/633(2000)
- 福井康雄,門井寛人,中田毅,枝村一弥,プリント基板多層 形 ECF ポンプの開発と液冷システムへの応用,機論 C, 2) 72-715, 991/996 (2006)
- 12-115, 991/990 (2000) 桜井康雄,中田毅,枝村一弥,管路形 ECF ポンプの開発と CPU 液冷システムへの応用,機論 B, 75-753, 966/971(2009) 桜井康雄,五十嵐友彰,中田毅,枝村一弥:メッシュ電極を 3)
- 4) 用いた ECF ポンプの提案,機論 B, 78-786, 291/299(2012)
- https://blogs.msdn.microsoft.com/vijaysk/2012/10/26/tools-to-simu 5)
- late-cpu-memory-disk-load/ 中田毅, 桜井康雄, 枝村一弥, 電界共役流体を用いたピスト 6) ン形リニアアクチュエータの開発, 機論 C, 71-706, 2014/2019 (2005)
- 特許 3225016「リニアモータ」,特許権者:395016615,有限 会社新技術マネイジメント 7)

油圧式パラレルメカニズムとその応用研究

田中 豊*, 丹羽 渉**, 関 智弥*, 五嶋 裕之***

Application Study of Hydraulically Parallel Kinematic Mechanism

Yutaka TANAKA^{*}, Sho NIWA^{**}, Toshiya SEKI^{*}, Hiroyuki GOTO^{***}

Spatial parallel mechanism has been widely used to realize rigidity, high accuracy, multi-degrees-of-freedom and complicated motion in application of industrial fields such as machine tools, coordinate measuring systems, robot manipulators and motion simulators. In our project team, an active vibration compensation system on traffic ships with Stewart platform type of hydraulically driven parallel kinematic mechanism is proposed and developed to provide safe ship-based access to a floating structure such as offshore wind power systems. The system consists of a motion stabilized platform with Stewart platform type of parallel kinematic mechanism and a catwalk on the platform. The motion platform is supported on the main hull and kept in a horizontal position by means of the six-degrees of freedom hydraulic parallel mechanism which control to absorb the motion of the main hull in accordance with the control signal from an on-board computer and motion sensors. In order to confirm the performance of the active vibration compensation by the parallel mechanism, a prototype 3/10 scale model of the actual system used for the offshore experiments. The experimental results show that the heave, roll and pitch motion of the top plate is greatly reduced with respect to the fluctuation of the main hull. The performance of the hydraulically parallel mechanism absorber has been experimentally confirmed. The dynamic behavior of the parallel kinematic mechanism has also been numerically confirmed by the motion simulation using the simulation software, MATLAB+Simulink.

Key Words: Active vibration compensator, Marine construction, Parallel kinematic mechanism, Inverse kinematic

1. はじめに

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

法政大学高機能メカトロデザイン研究室では,東 亜建設工業(株)殿や(株)工苑殿,法政大学大学院先端 モーションシミュレータ技術研究所などと共同で, PKM を応用した産業機械装置の研究開発を行って いる.本稿では油圧式 PKM を用いた動揺吸収装置 について紹介する.

2. 動揺吸収装置

資源開発や海洋エネルギー利用等の観点から、日本の持つ広い海域における海洋工事の重要性が指摘

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

されている.こうした海域における海洋工事では, 作業船による大規模施工が不可欠である.また施工 や施工後のメンテナンスのための洋上施設との移動 には一般的に交通船が用いられる.しかしこうした 海洋工事や施工後のメンテナンスは,波浪条件の厳 しい環境で行われることが多く,作業効率の低下や 作業員の転落・挟まれ事故による危険性も高まる.

これまで船舶の動揺を軽減したり,乗り心地を向 上させたりする試みは,種々提案され,一部実用化 されている¹⁾⁻⁴⁾.しかし今後は,作業船の定点保持中 の安全で高精度な制振が必要となる.

本研究で提案した動揺吸収装置は,作業船上の制 振が必要な構造体のみに限定し,その動きを水平に 保つことで波浪による動揺の影響を低減する.

Fig.1に動揺吸収システムの構成図を示す. 主船体 上に6本の油圧シリンダによるスチュアート式 PKM⁵⁾を設置し,波浪による主船体の動揺に対して, PKMのプラットフォームの姿勢を常に水平かつ上



Fig.1 Configuration of active vibration compensation system

^{*} 法政大学デザイン工学部

^{**} 法政大学大学院デザイン工学研究科

^{(〒102-8160} 東京都千代田区富士見 2-17-1)

^{*** (}株)工苑 (〒213 - 0032 川崎市高津区久地 4-26-41) *,** Hosei University

^{***} Koenn Co., Ltd.

下方向に運動しないような定位置に保つように動作 させる. 主船体に取り付けたセンサにより,船体の 上下と縦横揺れを検出し,制御演算装置により各駆 動シリンダの伸縮量を逆運動学により決定すること で,プラットフォームの搖動運動は理論上,打ち消 される.

3. スケールモデルによる評価実験

油圧式パラレルメカニズムにより動揺吸収装置 を構成し、スケールモデルによる性能評価を実施し た.実験は北九州門司港沖付近の海上で行われた.

Fig.2 に 496 トンの交通船の後部甲板上に設置し たスケールモデル実機の様子を示す. 高精度モーシ ョンセンサ(RTK-GPS)を甲板上と油圧式 PKM の プラットフォーム上に設置し,それぞれの上下運動 変位と横揺れ角度,縦揺れ角度を計測した.



Fig.2 Scale model of the active vibration compensation system on the ship

Fig.3に主船体と油圧式PKMのプラットフォーム の上下揺れ(Heave)と横揺れ(Roll)の測定結果の一例 を示す.また動揺吸収装置を動作させた時と動作さ せない時の測定結果より、それぞれの振幅の最大値 と最小値から各振幅ピークを求め、その最大値と標 準偏差を比較した.

主船体の動揺に対して、プラットフォームの上下 動変位は振幅ピークで82%程度、標準偏差で74%程 度低減されていることがわかる.また横揺れ角度は、 振幅ピークで84%程度、標準偏差で78%程度、吸収 低減されていることがわかる.また縦揺れについて も同様の低減効果が得られた.

よって本試作装置を用いることで、プラットフォ ーム上では、上下揺れ、横揺れ、縦揺れともに大幅 に減少しており、油圧式 PKM 動揺吸収装置の制御 効果が確認された.



(a) Heave



Fig.3 Measured heave and roll motions of the main hull and platform

4. おわりに

油圧式パラレルメカニズムによる動揺吸収装置は 原理的には船体運動により発生する,六自由度の揺 動成分全て低減する事が可能である.本報では,そ の制振効果について,試作システムを用いた洋上試 験の結果を示し,その有効性を実証した.

最後に本試作システムの実海域試験にあたり,多 大のご助言ご協力をいただいた,東亜建設工業殿と 洞海マリンシステムズ殿の関係者に感謝いたします.

- (1) 秀徳善治, ハイ・スティブル・キャビン艇 コン ピュータが支える揺れない客室,日本機械学会誌, 第91巻,第839号(1988)
- 2) 谷田宏次,船体動揺低減に対するアクティブコン トロールの研究開発動向,日本造船学会誌,第 800号,pp.119-124,(1996)
- 3) 谷田宏次, 各種分野における動揺制御装置の適 用例, 日本造船学会誌, No.815, pp.331-337, (1997)
- 小林日出男,小池裕二,今関正典,山下高広,ハ イブリッド式舶用減揺装置の運転と制御,石川 島播磨技報, Vol.40-6, pp.310-314 (2000)
- 5) Stewart, D., A platform with six degrees of freedom, Proceedings of the IMechE, Vol.180, Pt.1, No.15, pp.371-385 (1965-66)

機能性流体とその応用研究

彭 敬輝*, 外川 貴規**, 中村 栄竣**, 橘 拓真***, 田中 豊***, 李 松晶****

Application Study of Functional Fluids

Jinghui PENG^{*}, Takanori TOGAWA^{**}, Eishun NAKAMURA^{**}, Takuma TACHIBANA^{***}, Yutaka TANAKA^{***}, Songjing LI

As combination of both mechanical and electronic systems, micro mechatronics is attracting more and more research interests with significant development of micromachining techniques. Micro mechatronics systems are expected to be the most potential high-tech integrated product. In our project team, functional fluids such as magnetic fluids (MF), electro-rheological fluids (ERF), and electro-conjugate fluids (ECF) with high performance are applied to the micro mechatronics components and systems. The viscosity and yield stress of the MF and ERF can be controlled widely and rapidly by changing external magnetic and electric fields, respectively. The ECF generates a strong jet flow according to applied DC voltages. We have proposed and developed three types of the micro-mechatronics component using the functional fluids, the MF, ERF and ECF. Damping effects of the MF on vibration suppression of torque motor in hydraulic servo valves has been quantitatively analyzed and experimentally verified. Development of a small-scale soft braking device using the ERF and a soft actuator using the ECF has a great potential to perfectly solve the problems for micro-mobile robots. A small scale disk type ER brake for the micro-mobile robot and a novel micro suction pad actuator with a flexible rubber film and a sucker driven by the ECF jet flow has also been proposed and developed. Prototype components have been designed and fabricated. The simulation and experimental results are compared and analyzed thoroughly.

Key Words : Electro-conjugate fluid, Electro-rheological fluid, Magnetic fluid, Functional fluids, Micro-mechatronics components

1. はじめに

機能性流体は磁界や電界などの変化により流体の 物理的特性が変化・発現する流体の総称で、従来の 機械要素に比べ、簡易な構造で減衰、制動、駆動性 能等を実現できることから小形化に適しており、マ イクロメカトロニクスのシステムを構成する要素へ の応用が期待されている.法政大学デザイン工学部 の高機能メカトロニクス研究室では、中国・ハルビ ン工業大学の流体制御自動化研究室、(有)新技術マ ネジメント殿と共同で、磁性流体(Magnetic fluid: MF)や電気粘性流体(Electro-rheological fluid: ERF)、 電界共役流体(Electro-conjugate fluid: ECF)が持つ それぞれの特性を活かした小形機械要素の研究開発 を進めている.

本報では、MF の粘性減衰特性をトルクモータに 用いたノズルフラッパ形電気油圧サーボ弁、ERF の 粘性変化による減衰・制動特性を用いた小形ロボッ ト用制動装置、ECF 効果による発生する流動特性を

- * 法政大学 マイクロ・ナノテクノロジー研究センター (〒184 - 0003 東京都小金井市緑町 3-11-15)
- ** 法政大学大学院デザイン工学研究科
- *** 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科 (〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
- **** ハルビン工業大学
- *,**,*** Hosei University, JAPAN
 **** Harbin Institute of Technology
- **** Harbin Institute of Technology, CHINA

ソフトアクチュエータ駆動に用いた小形吸着アクチ ュエータについて紹介する.

2. MF の減衰特性を用いたノズルフラッパ形電 気油圧サーボ弁

Fig.1にMFを用いたノズルフラッパ形電気油圧サ ーボ弁の構成を示す¹⁾.初段のトルクモータの可動 電気子とコイルの間のギャップにMFが充填されて おり,MFの粘性変化により可動フラッパは大きな 減衰特性を得る.MFはコイル電流が零でも永久磁 石の磁界によりギャップ間に留まっている.

MF が有る場合と無い場合でトルクモータ駆動電



Fig.1 Structure of hydraulic nozzle-flapper servo-valve with the magnetic fluid



Fig. 2 Tested amplitude-frequency response of torque motor with and without the magnetic fluid

流の正弦波状周波数変化に対するフラッパの駆動振 幅特性を測定した.Fig.2に実験結果を示す.0~2.0 kHzの周波数領域に対して固有振動モードの周波数 で振幅のピークが大きく減少し、トルクモータの安 定性が向上することがわかる.この減衰効果は有限 要素法による振動解析でも確認されている²⁾.

3. ERF の粘性制動特性を用いた小形制動装置

ERF は電極間の電界の変化により見かけ上の粘 性が変化する機能性流体である.競技会用の小形走 行ロボットに ERF を用いた制動装置を搭載するこ とを提案し,その構造や動作特性を検討している³⁴⁴.

Fig.3 に小形制動装置に用いる ERF の特性を示す. また Fig.4 に ERF 制動装置の構造図を示す.装置は 正負の円板状電極と回転軸および導電性軸受と ERF を封入する筐体で構成されている.電極間に電圧を



Fig.3 Shear stress vs strength of the electric field for particle type ERF



Fig.4 Construction of the ER brake

印加し,2層分のER効果が得られる.Fig.3に示す 特性を持つERFを用いた小形制動装置数学モデル を構築し,その制動効果の妥当性をシミュレーショ ンで確認するとともに,小形制動装置を試作し特性 の検証を行った.

4. ECF を駆動源とする小形吸着アクチュエータ

ECF は電極間に直流高電圧を印加すると電極間 にジェット流が発生する機能性流体である.この ECFの流動特性を用いて蛸の吸盤を模した小形ソフ トアクチュエータを構成した⁵.Fig.5に小形吸着ア クチュエータの構造と試作結果を示す.



Cross-sectional drawing view

Fig.5 Structure of the micro suction pad

Prototype of micro suction pad

5. おわりに

機能性流体は小形で高出力・高機能なマイクロ機 械要素の構成に適している.本稿では、法政大学シ ステムデザイン学科の高機能メカトロデザイン研究 室で取り組んでいる機能性流体を用いた小形機械要 素の研究開発状況を紹介した.

- Jinghui Peng, Songjing Li, Yutaka Tanaka, Vibration suppression of the armature assembly in a hydraulic servo-valve torque motor using the magnetic fluid, Proc. 20th ICMT in Dalian (2016).
- Jinghui Peng, Songjing Li, Yutaka Tanaka, Numerical Study on the Vibration Suppression of the Armature Assembly in a Hydraulic Servo-Valve Using the Magnetic Fluid, Proc. 18th ISAEM, (2017).
- Xiangxiang Fan, Sayako Sakama, Takanori Togawa, Yutaka Tanaka, Design and Fabrication of ER Braking Device for Micromouse, Proc. 7th FPM2015, IEEE No.CFP1599K-USB, pp.729-733 (2015).
- 4) Jinghui Peng, Takanori Togawa, Yutaka Tanaka, Design of ER Braking Device for Micro-mobile Robot, Proc. 9th ICFP2017, Session C: Simulation, pp.167-171 (2017).
- 5) 中村栄俊,田中豊,枝村一弥,横田眞一,機能性 流体パワーを用いた小形吸着アクチュエータの 設計と試作,第15回「運動と振動の制御」シン ポジウム 講演論文集 (2017).

EHD (電気流体力学)ポンプを用いた流体駆動型アクチュエータ

○武井裕輔*, 佐藤直紀*, 中山遥介*,三井和幸*

The fluid power driven actuator using EHD pump

Yusuke TAKEI^{*}, Naoki SATO^{*}, Yosuke NAKAYAMA^{*}, Kazuyuki MITSUI^{*}

Recently, studies and developments about actuator which used a fluid power as a drive source are conducted. Especially, the fluid power actuator is paid attention as a power source of a medical robot or a rescue robot. However, this type of actuator has many problems such as occurrence of the vibration and noise. Therefore, we decided to develop the new type of fluid power actuator which used the electro-hydro-dynamics phenomenon which generates the flow in the insulating fluid by applying a high voltage electric field.

Key Words: EHD, robot hand, artificial muscle, articulated robot

1.緒言

近年,流体を駆動源としたアクチュエータの研 究・開発が行われている.その中でも,介護・福祉 ロボットのように人間の生活をアシストする機器や, 災害ロボットのように複雑に入組んだ場所を移動可 能な蛇型などの多関節ロボットにおいて,流体駆動 のソフトアクチュエータが注目されている.しかし, これらのアクチュエータにはポンプやコンプレッサ 等の外部機器が必要となり,振動や騒音の発生,発 熱が問題となるのみならず,バルブや調整弁などの 付加装置も必要となるため,システム全体が大型化 してしまう問題がある.そこでこれらの問題を解決 するために,流体が電圧印加により外力を受けずに 自ら流動するという EHD 現象に着目し,それを応用 したアクチュエータの開発を我々は行ってきた.

2. EHD 現象及び EHD ポンプ

EHD 現象とは, Electro Hydro Dynamics(電気流 体力学)現象の略称で、例えば Fig.1(a)に示すように、 絶縁性流体中に二枚の電極を挿入し、その電極間に 高電圧を印加すると流体中に流れが発生する現象で ある. 我々は, Fig.1(b)に示すような平板の+電極と その上に傾斜させた GND 電極の組合せを用いるこ とで、電極間に一方向の流れを発生させることので きる EHD ポンプの開発を行ってきた. さらに, Fig.1(b)の電極構造を Fig.2 のように直列に多段化 することで,吐出圧力を高めることが可能で,Fig.3 に示すように、対称に配置した GND 電極をスイッ チで切替えることで、流れの方向を切替えることが 可能である双方向 EHD ポンプの開発も行ってきた². そこで、この双方向 EHD ポンプを駆動源とすること で、駆動源単体で流体の圧送と吸引が可能となるこ とから、結果として外部に駆動源や複雑な配管、弁

などの付加装置も不要なため、システム全体が小型 なアクチュエータの開発が可能であると考えた.



3. EHD ポンプのアクチュエータへの応用 3.1 EHD 人工筋とロボットハンド²⁰

EHD ポンプのアクチュエータへの応用とし て、EHD 駆動の人工筋及びロボットハンドの開発を 行った.考案した人工筋を Fig.4 に示す.人工筋は軟 質ポリウレタン製の蛇腹型の膨張体とスリーブの代 わりにプラ板とテグスで構成した.この人工筋は、 膨張体が縦方向に膨張し、テグスの作用により横方 向に収縮する仕組みである.実際に製作した EHD 人 工筋の伸展時と収縮時の様子を Fig.5 に示す.さらに、 この製作した EHD 人工筋の応用としてそれを組込 んだロボットハンドを製作した (Fig.6(a)).ロボット ハンドは EHD 人工筋,双方向 EHD ポンプ,指,固 定台で構成しており、2 つの人工筋が交互に伸展と収 縮をすることで指が開閉する構造である.実際に製 作したロボットハンドを駆動させたところ、250[g] の物体の把持に成功した (Fig.6(b)).

^{*} 東京電機大学大学院工学研究科

^{(〒120-0026} 東京都足立区千住旭町5番)

⁽E-mail: 16kmf16@ms.dendai.ac.jp)



3.2 揺動型 EHD アクチュエータと 多関節ロボット³⁾

EHD ポンプのアクチュエータへの次なる応用と して,揺動型 EHD アクチュエータの開発を行った. EHD アクチュエータは, ロアデッキに内蔵した双方 向 EHD ポンプにより稼動部へ流体を圧送し,稼動部 がアッパーデッキを押すことで回転軸を中心とした 揺動運動を行う構造である.さらに,この応用とし て,揺動型 EHD アクチュエータを1つの関節とし, このアクチュエータを Fig.7(b)のように多段に接続 していくことで,関節それぞれに駆動源を有した多 関節ロボットの開発が可能であると考えた.



Fig.7 Swing motion type EHD actuator

設計した揺動型 EHD アクチュエータの構造を Fig.8 に示す.各アクチュエータはアッパーデッキ, ブリッジ,双方向 EHD ポンプを内蔵したロアデッキ, 稼動部 (ニトリルゴム製の蛇腹) により構成した.製 作した小型及び大型のアクチュエータを Fig.9 に示す. 小型の寸法は 60×50×45[mm]・質量 120[g],大型の 寸法は 80×50×45[mm]・質量 190[g]である.また, Fig.2 で示した電極構造を小型では 15 段,大型では 20 段直列に配置しており,小型では最大圧力約 60[kPa]・最大流量約 5.5[mL/s],大型ではそれぞれ約 50[kPa]・約 6.5[mL/s]を双方向で吐出することが可能 な性能となった.



(a) Small type actuator(b) Large type actuatorFig.9 The fabricated swing motion type EHD actuator

そこで、これらの揺動型 EHD アクチュエータを各 3 組製作し、6 段接続した多関節ロボットを製作した (Fig.11(a)). 寸法は 80×50×230[mm]である. 実際に 動作させたところ、象の鼻のように滑らかな揺動運 動を行い、左右対称の動作が確認でき、その時の揺 動角度は約 25[deg]であった. また、Fig.11(b)に示す ように、EHD ポンプを内蔵したことで、外部にポン プや配管を必要とせず、配線のみで動作が可能であ る. さらに、各アクチュエータに EHD ポンプが内蔵 されているため、それぞれのアクチュエータを別々 に制御し、動作させることも可能な多関節ロボット が製作できた.





(a) Front view

(b) The power supplied by the wiring

Fig.11 The actuator connected to multistage

4.結言

本研究では, EHD 現象を用いた流体駆動型アクチ ュエータの開発を行った.その結果,ロボット等を 駆動する流体駆動型アクチュエータとして実現の可 能性を示すことができ,システム全体が小型なアク チュエータとしての応用が期待できる.

- 寺阪澄孝,三井和幸:EHD 現象を応用した揺動運動型アクチュエー タの開発,日本フルードパワーシステム学会論文 集, Vol. 42, No. 5, pp. 95-100 (2011)
- 佐藤直紀,三井和幸他:EHD ポンプを駆動源とした人工筋の開発に 関する基礎的研究,平成29年春季フルードパワーシステム講演会 講演論文集,pp.34-36(2017)
- 3) 長瀬広明,三井和幸他: 揺動型 EHD アクチュエータの多関節ロボットへの応用に関する基礎的研究,平成27 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集,pp.11-13 (2015)

EHD(電気流体力学)ポンプ及び機能性材料の医療・福祉機器への応用 〇三井和幸^{*},武井裕輔^{*},長妻明美^{*},中條龍一^{*}

Development of the medical device and the welfare device which used the EHD pump or the functional material

Kazuyuki MITSUI^{*}, Yusuke TAKEI^{*}, Akemi NAGATSUMA^{*}, Ryuichi CHUJO^{*}

Recently, many types of functional fluid and functional material are applied to a medical and welfare field. Especially, importance of functional fluid and functional material is increasing in the device which needed the corresponding to a user's condition. In such a situation, we developed the EHD pump which applied the EHD phenomenon as application of functional fluid, and developed the Electro Attractive Material (EAM) as application of functional material. Then we are applying those developed devices to a medical and welfare device.

Key Words : EHD pump, Medical and welfare device, Actuator, Brake device

1. 緒言

近年医療や福祉機器分野に機能性流体や機能性材料の応用が進められている.特に人間の状態の変化に適合させることが医療や福祉機器には必要となってきているが、従来の材料や駆動源ではその対応が困難であり、その解決策として機能性流体や機能性材料の応用が期待されている.このような現状を鑑み我々は、機能性流体の応用として EHD 現象を応用した EHD ポンプを、そして、我々が Electro Attractive Material(EAM)と名付けた機能性材料を開発し、医療機器や福祉機器への応用を行っている.

2. EHD ポンプを応用した医療機器

2. 1 Electro Hydro Dynamics(EHD)現象

Electro Hydro Dynamics(EHD)現象とは, Fig.1(a)の ように絶縁性の液体中に挿入した電極間に高電圧を 印加することで流れが発生する現象である. 我々は この現象を応用することで Fig.1(b)に示すような一 方向の流れを発生可能な EHD ポンプの開発を行っ てきた.更に,電極構造を直列に多段化することで, 吐出圧力を高めることが可能である(Fig.2).



 ^{(〒120 - 0026} 東京都足立区千住旭町5番)
 (E-mail: mitsui@cck.dendai.ac.jp)



Fig.2 Multistage of the electrode structure

2. 2 EHD ポンプを応用した医療機器

EHD ポンプの医療機器への応用として,整形外科 手術の際に患者に装着して使用するターニケットと 呼ばれる止血装置の開発を行った¹⁾.現在手術で使 用されているターニケットは空気圧を駆動源にして おり,一定の圧力を掛け続けて止血を行っているが, 装着者の健康面に悪影響が出ている.これに対し, 圧力を調整しながらの圧迫が患者への負担を軽減す ることが示唆された.そこで我々は上述した圧力を 自由に調整可能な EHD ポンプをターニケットの駆 動源とすることで問題の解決を目指した.開発した EHD ターニケットを Fig.3 に示す.



Fig.3 EHD tourniquet for human

0~50[kPa]の範囲で圧迫圧を調整可能であり, 腕を模 した円柱に対し圧迫を行った際, およそ 1 分で 0[kPa]から 50[kPa]に到達することが分かっている.

3. EAM を応用した機器

3. 1 Electro Attractive Material(EAM) Electro Attractive Material(EAM: 電気的吸引材料) とは、我々が開発した機能性材料である.このEA Mは、過去我々が粒子分散型ER流体内の粒子とし て使用していたものを基本に改良した粒子をシリコ ーンゴムに練り込んだものである.そして、この EAMをFig.4に示すように導電性の材料を使用した 電極で挟み電圧を印加するとEAMが電極を吸引す る力を発生するという性質を有するものである.さ らに、この吸引力の発生により、挟んだ電極の一方 をスライドさせると、電極とEAMの間で摩擦力の ようなせん断抵抗力を発生させることができる.な お、この吸引力とせん断抵抗力は、印加する電圧(実 際には電界)の大きさ、およびEAMと電極の間の接 触面積に比例することがわかっている.





3.1で示した,EAMと電極の間で発生するせん 断抵抗力を利用することで,印加電圧により制動力 の調節が可能な新たなブレーキデバイスの開発が可 能ではないかと考えた.例えばFig.5に示すように, 円形のEAMを円形の電極で挟み軸を通すと,円形 の電極を回転させることで電極とEAMの間に発生 するせん断抵抗力を制動力として取り出すことが可 能な回転型ブレーキデバイスを開発することができ る.さらに,電極とEAMの間の接触面積を増加さ せるために,単に電極とEAMの直径を増加させる だけではなく,Fig.6に示すように,電極とEAMの 組み合わせを同一軸上に多層化させ,その結果とし てより大きな制動力を発揮させることが可能となる.





Fig.5 Schematic diagram of EAM brake

Fig.6 Image diagram of

multilayered brake

この考えに基づき共同研究者である藤倉化成と開発したものが Fig.7 に示した EAM ブレーキである.



Fig.7 The EAM brake developed with FUJIKURA KASEI CO.LTD.

この EAM ブレーキは,10 層の電極と EAM の組 み合わせを内蔵しており,さらには増速比 1:6 の遊 星歯車を搭載することで,外部から掛かるトルクを 低減し,実質的に EAM ブレーキの制動力を6倍に 増加させる方式を採用している.

3. 3 EAM を用いた上肢保持装具

現在高齢化が進んでおり、生産人口の減少が問題 となっている. そのため、従来では生産人口に含ま れなかった高齢者も生産に従事することが多くなっ ている. そこで、高齢者であっても生産活動に従事 するためには、作業時に身体に掛かる負担の軽減が 必要となってきた. この軽減策としてパワーアシス ト機器のように重量物を対象とする作業でのサポー ト機器の開発は近年では盛んになってきているが、 農業での摘果作業のように,一定の姿勢,特に上肢 を挙げたままの姿勢によって掛かる負担を軽減する 装置の開発は遅れている. そこで, 我々は上述した EAM ブレーキを用いた上肢保持器具の開発を行っ ている.これは、Fig.8(a)に示すように肩に装着した EAM ブレーキに取り付けたロッドおよび保持部で任 意の角度の位置で上肢を保持するものである.実際 に開発した装具を Fig.8(b)に示す.



	Power supply box
15	EAM brake
	Holding parts
	Belt

(a) Schematic diagram b) The actually developed orthosis Fig.8 Upper limbs holding orthosis

4. 結言

我々は,機能性流体の応用として EHD ポンプを, そして,機能性材料の応用として EAM の開発を行 い,それぞれの特徴を活かした機器の開発を行って きた.今回は,整形外科手術に使用されているター ニケットと呼ばれる止血装置の問題点解決のために EHD ポンプを応用した機器,そして作業中の姿勢, 特に上肢を挙げたまま維持する作業のサポート装置 として EAM ブレーキを応用した上肢固定装具の開 発を行った.今後は,さらに機能性流体や機能性材 料の医療や福祉機器への応用を目指し新たな機器の 開発を行って行きたいと考えている.

参考文献

 武井裕輔,三井和幸他:小型 EHD ポンプを駆動源としたターニ ケットの開発に関する基礎的研究,平成28 年度秋季フルードパ ワーシステム講演会講演論文集,103-105 (2016)

機能性流体 ERF を応用したマイクロアクチュエータシステム

吉田和弘*, 嚴祥仁*, 金俊完*

A Microactuator System Using Electro-Rheological Fluid

Kazuhiro YOSHIDA*, Sang In EOM*, Joon-wan KIM*

This paper presents microactuator systems using electro-rheological fluid (ERF). The ERF is a kind of functional fluids and changes its apparent viscosity when subjected to an electric field. An ER valve that controls an ERF flow by applying electric field through a pair of fixed electrodes is simple and miniaturizable. In this paper, two our researches are introduced. First, a soft ER microactuator system is described. For soft actuators, 3 mm long divided electrode type flexible ER microvalve (DE-FERV) is proposed and fabricated by MEMS process including electroforming. Second, for advanced microrobots, a multiple ER microactuator system using an alternating pressure source is described. To reduce the piping space, an ER microfinger system using an alternating pressure source is proposed and developed. An MEMS process for microfinger parts made of PDMS is developed. A 1.6 mm long microfinger is successfully fabricated and its motion is demonstrated.

Key Words : ERF (electro-rheological fluid), Functional fluids, Actuator, Microrobotics, Alternating pressure

1. まえがき

電界印加により粘度が上昇する機能性流体 ERF (Electro-Rheological Fluid)は、単純な固定電極対で その流れを電圧により制御することができる.本研 究室では、ER バルブを用いたマイクロアクチュエ ータシステムの研究開発を行っている¹⁾⁻³⁾.本稿で は、研究成果例を紹介する.なお、本研究室ではERF としてネマティック液晶を用いている.

2. ソフト ER マイクロアクチュエータシステム¹⁾ 狭隘な空間で壊れやすい微小部品などをハンドリ ングするため、ER バルブの電極を軸方向に分割し

得られる ER バルブユニットをゴムチューブ内に収 めた電極分割形フレキシブル ER バルブ (Divided Electrode type Flexible ER microValve : DE-FERV) と ソフト液圧アクチュエータを組み合わせた Fig. 1 の ようなマイクログリッパを提案,開発している.



Fig. 1 Microgripper using DE-FERVs

* Tokyo Institute of Technology

長さ3 mmの DE-FERV を MEMS プロセスにより 試作した.分割した電極部とそれらを結ぶ薄く柔軟 な電線部を一体化した電極部品の MEMS プロセス を Fig. 2 に示す.シリコン基板上のシード層のパタ ーニング (1~3),フォトレジスト製の型を用いた第 1 段階電鋳 (4,5),第2 段階電鋳 (6),フォトレジ スト除去と金メッキ (7,8),シリコン基板のエッチ ング (9) により行う.この電極部品 2 枚をフォトレ ジスト SU-8 の絶縁スペーサを介して接合し,その



Fig. 2 MEMS process for electrode part of DE-FERV



Fig. 3 Fabricated MEMS-based DE-FERV

^{*} 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 (〒226 - 8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-R2-42) (E-mail: yoshida@pi.titech.ac.jp)



Fig. 4 Proposed ER microfinger system



(f) Bonding and final release

Fig. 5 Proposed ER microfinger system

外側に PDMS (Polydimethylsiloxane) 流路を接着し, DE-FERV を製作した.

以上の MEMS プロセスにより, Fig. 3 に示すよう に,長さ 3 mm の DE-FERV の試作に成功した.静特 性実験の結果,電界印加により粘度が6.3 倍上昇し, 十分な弁制御特性を有することが確認された.

3. 交流圧力源を用いた複数 ER マイクロ アクチュエータシステム ²⁾³⁾

マイクロロボットには, 前進,後進,操舵,物体 のハンドリングなどのため,複数アクチュエータシ ステムが必要である.しかし液圧マイクロアクチュ エータを複数用いたシステムを実現しようとすると, 各アクチュエータに作動流体の供給および戻りの2 本の配管が必要であり,配管系が複雑かつ大形にな る.そこで,交流圧力源を用い,往復流を各アクチ



Fig. 6 Proposed ER microfinger system



Fig. 7 Motion of two-DOF bending actuators using air pressure

ュエータに付属した ER バルブを同期して動作させ 整流して屈曲動作を行う Fig. 4 のような ER マイク ロフィンガシステムを提案,開発している.

PDMS フィンガ部は、内部に径方向の膨張を抑え る補強壁を有する高アスペクト比構造の2個のチャ ンバと中板を接合したものである. PDMS フィンガ 部はフォトレジスト SU-8 の鋳型を用いた PDMS の 成型によって製作した.製作プロセスは、Fig. 5 に 示すように、2 枚のガラス基板上の SU-8 の型形成と 離型剤の塗布(a)、成形(b)、超音波処理による離 型(c)、O₂プラズマによる表面活性化(d)、接着(e)、 基板からの剥離(f) である. ER マイクロバルブは シリコンの MEMS プロセスで製作した.

試作した長さ 1.6 mm の ER マイクロフィンガは, Fig. 6 に示すように,先端変位 1.1 mm,立上り時間 1.1 s で屈曲できることが確認された.

現在,2自由度動作を目指し,2自由度フィンガ部 を試作し,Fig.7のような動作を確認している⁷.

4. あとがき

本研究室の ERF を応用したマイクロアクチュエ ータシステムの研究事例を紹介した.

- Yoshida, K., Tsukamoto, N., Kim, J.-W., Yokota, S., Mechatronics, 29, 103/109 (2014)
- Miyoshi, T., Yoshida, K., Kim, J.-W., Eom, S.I., Yokota, S., Sensors and Actuators A, 245, 68/75 (2016)
- 三好智也,吉田和弘,金俊完,嚴祥仁,機学 2016 年度 年次大会 DVD, J1110106 (2016)

機能性流体 ECF を用いたマイクロ液圧源とその応用

金 俊完*, 吉田和弘*

Micro Hydraulic Pressure Source by Electro-conjugate Fluid and Its Application

Joon-wan KIM^{*}, Kazuhiro YOSHIDA^{*}

This paper proposes an electro-conjugate fluid (ECF) micropump whose pumping sources are mounted on the inside of fluidic channels. ECF is a kind of functional and dielectric fluid. A strong and active jet flow of ECF is generated between electrodes surrounded by ECF, when high DC voltage is applied to the electrodes. To combine easy fabrication and high performance, we propose a novel ECF micropump that consists of triangular prism electrode and a slit electrode (TPSE). MEMS-based TPSE is successfully fabricated. The result shows that the ECF micropump can be a good candidate as a driving source for soft microactuators. The paper also proposes a novel fluid-powered finger to integrate ECF micropumps as a micro hydraulic pressure source with the hybrid 3D printing as the fabrication method to form the unibody-like finger. Two integrated ECF micropumps control two bellows-like joints respectively through fluidic channels built in the finger to realize the compliant motion with 2 DOFs (degree-of-freedom). Instead of the traditional CNC machining, molding and multiple manual assemblies, the 3D printing technology of hybrid-material (hard and soft material) is utilized to fabricate our hybrid finger. The hybrid finger with ECF micropumps was successfully realized and the driving experiments validated the feasibility of our concept.

Key Words : ERF (electro-rheological fluid), Functional fluids, Actuator, Microrobotics, Alternating pressure

1. まえがき

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

2. ECF マイクロポンプ¹⁾²⁾

不均一な電界を ECF に印加し, ECF ジェットを発 生させる電極対を用いて,小形化により出力パワー 密度の向上が期待できる ECF マイクロポンプユニ ットを提案,開発している.この ECF ジェットは ECF 電極対の形状によって大きく左右される.のこ 歯形電極対は MEMS 技術で製作が容易な平面形状 であるが,その吐出圧力は低い.一方,針ーリング 形電極対は,吐出圧力は高いが,MEMS 加工が難し い3次元構造である.MEMS 加工と高吐出圧力を両 立するために,針ーリング形に近い形状で,高アス ペクト比をもつ三角柱-スリット形電極対(図1) を提案した.三角柱-スリット形電極対(TPSE)は 平面形状をその平面に垂直な方向に伸ばした構造で あるため,MEMS加工が可能である.また,針-リ ング形電極対のように急峻な電界勾配を有するため, 高出力が期待できる.



Fig.1 Comparisons of electrode shapes for ECF jetting

三角柱-スリット形電極対の寸法は,スリット電 極のスリット幅0.2 mm,三角柱電極の先端角度30°, 電極間隔0.2 mm,電極高さ0.5 mmである.提案す

 ^{*} 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 (〒226 - 8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-J3-12) (E-mail: woodjoon@pi.titech.ac.jp)
 * Tokyo Institute of Technology

る TPSE は,1)高アスペクト比,2)三角柱先端の鋭さ, および3)絶対高さを必要とするため,汎用のシリコ ン MEMS 技術では実現が難しい.そこで本研究室で は,厚膜レジストによる鋳型製作と電解メッキ技術 による電鋳を融合させた MEMS プロセスを提案,開 発し,図2のようにデバイスの試作に成功している. 開発した MEMS プロセスにより TPSE を5対並列, 10 対直列に配置した平面形 ECF マイクロポンプを 試作した. ECF として FF-101EHA2 を用い特性実験 を行った結果,印加電圧4kV のとき,最大吐出圧力 78 kPa (1対あたり7.8 kPa)を実現している. TPSE は高密度な集積化が可能であるため,パワー密度の 点で高出力化が期待できる.



Fig.2 Fabricated ECF micropump

3. ハイブリッド 3D プリンタによる ミニサイズ ECF フィンガ ³⁾

ECFマイクロ液圧源を内蔵した新たなフィンガを 提案している.この ECF フィンガは、図3のように、 柔軟な材料の蛇腹構造体によるジョイント(2個) と ECF マイクロ液圧源(2個)を内蔵したフィンガ ボディで構成されている.ECF マイクロ液圧源で蛇 腹構造のジョイントを加圧することで蛇腹が伸び、 フィンガの関節が屈曲するメカニズムで動作する.

本研究では、Stratasys 社のハイブリッド 3D プリ ンタ技術を導入することで、製作と同時に組立てが できる新たな方法を提案している. MEMS 技術で 製作した ECF マイクロ液圧源チップをハイブリッ ド 3D プリンタで製作したフィンガボディと一体化 することで図3のようなミニサイズ ECF フィンガ が実現できた.

図4のように ECF マイクロ液圧源に 0.9 kV の電 圧を印加することで ECF フィンガのジョイントが 変形し, X 方向に 11.4 mm, Y 方向に 5.2 mm の変位 を得た. ハイブリッド 3D プリンタによる ECF フィ ンガ特性を明らかにすることで有効性を示している.



Fig.3 Finger with two integrated ECF micropumps



(c-1) Initial state (c-2) ECF micropump 1 and 2 applied voltage of 0.9kV Fig.4 Finger's movement by ECF micropump 1 and 2

4. あとがき

本研究室の ECF ジェットを用いたマイクロ液圧 源とその応用として ECF フィンガを紹介した.

- J.-w. Kim, T. Suzuki, S. Yokota, K. Edamura, Sensors and Actuators A, 174 155/161 (2012).
- J.-w. Kim, T. Nguyen, K. Edamura, S Yokota, Int'l. J. of Automation Technology, 10 470/478 (2016).
- D. Han, H. Gu, J.-w. Kim, S. Yokota, Sensors and Actuators A, 257 47/57 (2017).

水圧用ロータリー型サーボ弁の開発

鈴木健児*

Development of a Rotary-type Servo Valve for Water Hydraulics Kenji SUZUKI^{*}

This paper introduces a rotary type servo valve newly designed for water hydraulics. The prototype of the servo valve is a kind of four-way valve, and the port arrangement is according to the ISO 4401-02-01-0-05 and JIS B8355 (D-02-01-94). The servo valve was designed to control flow rate of 20 L/min under the rated pressure of 3.5 MPa. The disk type valve plate and the valve body has each the control conduit, and they compose a metering edge. The rotary valve plate which has the conduit hole to switch the ports is driven by small servo motor. The valve shaft and servo motor are connected by a disk-type joint. The control pressure is calculated by solving the simultaneous equation of the flow rate through the metering edge and the internal leakage through the narrow clearance between the valve plate and the valve body. Simulation and experimental results are compared for the static characteristics of the valve: (1) the control flow rate with no load, (2) the control flow rate with load, and (3) the internal leakage. Simulation and experimental results agreed well except for influence of the hysteresis that is not being considered in the mathematical model.

Key Words : Water hydraulics, Servo valve, Rotary valve, Static characteristics

1. はじめに

水圧駆動システムの構成要素は、油空圧機器と比較して一般に高価である.部品の高精度加工が必要であることや、水圧機器の部品はほとんどが難削材であるステンレス鋼であること、また市場規模が小さく量産効果が小さいことなどが、低コスト化を阻む要因となっている.したがって、水圧駆動技術の利点を活かすシステムの応用範囲の拡大のためには、その構成機器の低コスト化が重要である.そのため、従来の機器の延長線上にある構造ではなく、根本的な構造の簡略化を図る必要がある.

水圧アクチュエータを制御する制御弁として,水 圧サーボ弁^{1,2)}や水圧比例弁^{3,4)}が研究開発されて いるが,実用に供されているものは構造が複雑で部 品の高精度加工が必要であるため,高コストである. そこで筆者らは、円板形の弁板を小型のサーボモー タで直接駆動する形式の、ロータリー型水圧サーボ 弁を開発中である⁵⁾.この水圧サーボ弁では、小型 の回転型サーボモータの回転角度によって流体の方 向と流量を制御するような、直動形のロータリー型 サーボ弁とした.本報では、弁の構造と静特性につ いて紹介する.

2. 弁の構造

本研究で開発したロータリー型サーボ弁の外観を Fig.1に示す.寸法は,幅64×奥行40×高さ110mm である.この弁の形式は四方弁であり,弁の下面に

(E-mail: suzuki@kanagawa-u.ac.jp)

はピッチ円上に P, T, A, B の各ポートがある. ポート 配置を, JIS B8355 の D-02-01-0-05 (ISO コード: 4401-02-01-0-05) に準拠させるため, ポートアダプ タを介してマニホールドへ取付ける構造とした.

四方弁形式の制御弁の部品を Fig. 2 に示す.円形 の弁板は弁体によって挟みこまれており,弁板の上 下面は弁体としゅう動している.弁板とその外側の ハウジングの厚さは,平面研削盤によって高精度に 加工できるため,すき間寸法の管理が容易である.



Fig. 1 Rotary servo valve for water hydraulics



Fig. 2 Parts of the rotary-type four-way valve

^{*} 神奈川大学工学部機械工学科

^{(〒221-8686} 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)

^{*} Kanagawa University

円板形の弁板形状と, 弁本体にある4つのポート のピッチ円に沿った断面の概略図をFig.2に示す. 弁板と弁本体にはそれぞれ流路が形成されており, 弁板が回転するとそれらが接続される.内部漏れ低 減のため, 弁は1°だけオーバーラップとなってい る.なお, 弁板には上下面の圧力差を無くすための 貫通穴がいくつか開けてある



Fig. 3 Dimensions and cross section of the valve plate

3. 静特性

静特性の理論値計算のため、円板形の弁板と弁本 体とのしゅう動部すき間の流れを、矩形流路として 簡略的にモデル化した⁵.流量係数は、後述する無 負荷流量特性から算出した.

静特性実験において,供給圧力は筆者らが開発した水圧リリーフ弁^のによって 3.5 MPa に設定した. 流量はすべてタービン式の流量計で測定した.流量 の多寡によって,測定範囲の異なる2種類の流量計 を切り替えて使用した.サーボモータへの角度指令 はマイコン (Arduino Uno R3)によって行い,その 指令角度に相当する電圧を測定した.

3.1 無負荷流量特性

弁の角度に対する無負荷流量の計算結果及び実験 結果を, Fig. 4 に示す.流量係数の値は, ±10 deg の範囲の実験値から求めた.弁の角度が大きくなる と,線形性がやや失われる.これは,ロータリー弁 内の流動抵抗が増加する構造によるものである.



Fig. 4 Flow rate characteristics with no load

3.2 負荷流量特性

負荷圧力(A,Bポート間の圧力差)に対する流量 の計算結果及び実験結果を,Fig.5に示す.パラメ ータθはサーボモータへの指令角度である.



Fig. 5 Flow rate characteristics against load pressure

3.3 内部漏れ流量特性

A-B ポート間を閉じた状態での,弁の角度に対 する内部漏れ流量を Fig. 6 に示す.不感帯の両端付 近を除き,定性的・定量的によく一致した.



4. 結 言

本報では、新たに開発した水圧用ロータリー型サ ーボ弁の構造及び静特性を紹介した.静特性の計算 結果と実験結果を比較し、ヒステリシスの影響を除 いて、両者はほぼ一致することを示した.

- Urata, E., Miyakawa, S., Yamashina, C., Nakao, Y., Usami, Y. and Shinoda, M. : Development of a Water Hydraulic Servovalve, Jpn. Soc. Mech. Engrs, Intl. J., Ser. B, 41-2, 286/294 (1998).
- Watanabe, T., Inayama, T. and Oomichi, T. : Development of the Small Flow Rate Water Hydraulic Servo Valve, J. of Robotics and Mechatronics, 22-3, 333/340 (2010).
- Yoshida, F. and Miyakawa, S. : Characteristics of Proportional Control Valve Using Tap Water, Proc. Seventh Intl. Fluid Power Conf., Group H, Aachen, Germany, 445/456 (2010).
- Suzuki, K., Akazawa, S. and Nakao, Y. : Development of cam-drive type proportional valve for water hydraulics, Intl. J. of Automation Technology, 6-4, 450/456 (2012)
- 5) 鈴木健児:低コストを志向した水圧用ロータリー型サ ーボ弁の静特性解析,日本フルードパワーシステム学 会平成27年秋季フルードパワーシステム講演会講演論 文集,鹿児島,104/106 (2015).
- Suzuki, K., and Urata, E. : Development of a direct pressure-sensing water hydraulic relief valve, Intl. J. of Fluid Power, 9-2, 5/13 (2008).

ポンプ供給圧低減による水圧モータシステムの高効率化

八木澤遼^{*}, 伊藤和寿^{**}, Pham Ngoc Pha^{***}

Energy Efficiency Improvement of Water Hydraulic Motor System with Reducing Pump Supply Pressure

Ryo YAGISAWA^{*}, Kazuhisa ITO^{**}, Pham Ngoc Pha^{***}

Water hydraulic systems are an outstanding driving source because they have no risk of environmental pollution and fire hazard. However, conventional water hydraulic systems, as well as oil hydraulic systems, have larger energy loss for pressure loss through mainly control valves. In oil hydraulic systems, load sensing systems have been widely applied with a variable displacement pump for reducing pump supply energy. In contrast, water variable displacement pumps have not yet responded to a wide range of fields because they have only a few lineups on the market. In this study, the energy-saving is achieved by developing a novel water hydraulic circuit. This paper focuses on a water hydraulic motor system and aims for reducing pump supply energy with a fixed displacement pump. The pump of the proposed system supplies the required minimum energy for driving the water hydraulic motor. The experimental results showed that the proposed system could be operated in approximately 60[%] of required energy of the conventional system.

Key Words : Water hydraulic system, Motor velocity control, Energy-saving, Fixed displacement pump, Experiment

1. はじめに

水圧システムは、油圧システムで作動流体として 用いられる作動油のかわりに清水を用いる.そのた め、機器の潤滑や耐食性の問題が生じるものの、高 い洗浄度と低い環境負荷を特長とし、様々な分野に 適用されている¹⁾.しかし、水圧システムは油圧シ ステムと同様に、制御弁において絞り損失が発生す るため、ポンプの供給圧をこの分高く取らざるを得 ず、結果的にエネルギー効率の低下につながってい る.これに対し、油圧システムでは、可変容量ポン プを用いたロードセンシングシステムの導入が成さ れている.しかし、水圧システムにおいては、内部 漏れや材料選定の難しさから、可変容量ポンプがほ とんど市場に出回っておらず、広い分野に適用し、 かつ省エネルギーなシステムを構築することが難し くなっている²⁾.

本研究では、固定容量ポンプを用いた水圧モータ 駆動回路に対し、ポンプの供給圧を低減させるため の回路を提案する.そして、その回路と従来の水圧 モータ駆動回路の制御性能およびポンプの供給エネ ルギーを実験により比較する.

		記号	
е	: 誤差,	E	:エネルギー

* 芝浦工業大学大学院理工学研究科

(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)
 (E-mail: md16092@shibaura-it.ac.jp)
 ** 芝浦工業大学システム理工学部

*** ハノイ理工大学機械工学科

*, ** Shibaura Institute of Technology

*** Hanoi University of Science and Technology

p	:圧力,	q	:流重
ω	: 回転速度		
略称			
Conv.	: 従来回路,	CV	: チェック弁
FW	: フライホイール,	М	: 原動機
On/Off	: On/Off 弁,	Prop.	:提案回路
RV	: リリーフ弁,	SV	: サーボ弁
UV	: アンロード弁,	WHM	:水圧モータ
添え字			
Conv.	: 従来回路,	FW	:フライホイール
L	: 負荷,	n	: <i>n</i> = 1, 2
Prop.	:提案回路,	ref.	:目標
S	:ポンプからの供給		

2. 提案回路

本研究で提案する水圧モータ駆動回路を Fig.1 に 示す.



Fig.1 Proposed circuit for energy recovery

また、台形波目標回転速度 ω_{ref} に対する提案回路の 各弁の動作を Fig.2 に示す.アイドル時は、UV を開 口することにより、ポンプは無負荷で駆動される. 加速および定速時は、FW の回転速度 ω_{FW} は SV₁ によってブリードオフ制御される.この間、SV₂ は 全開口となっているため、ポンプの供給圧は理論的 には WHM の負荷圧力 $p_{L}(=|p_{1}-p_{2}|)$ と等しくなる. 一方減速時は、 ω_{FW} は SV₂によってメータアウト制 御され、その間、UV の開口によってポンプは無負 荷で駆動される.なお、WHM が逆回転で回転する 際も、回路は同様に動作する.





3.1 実験条件

提案回路(Prop.)と、ポンプと WHM の間に水圧サ ーボ弁を一つ設けた従来回路(Conv.)の実験を行う. 各設定パラメータを Table 1 に示す.また,それぞれ の回路に重積分型 PI 制御を適用する.

名称	値	単位
ポンプ押しのけ容積	18.0	cc/rev
WHM 押しのけ容積	18.6	cc/rev
WHM への負荷トルク	4	N∙m
原動機理論回転速度	900	rpm
定格圧力	7.0	MPa

Table 1 Parameters used in experiment

3.2 実験結果

目標回転速度 ω_{ref} および FW の回転速度 ω_{FW} を Fig.3 に示す. 同図より、 $0[s] \sim 60[s]$ における回転速 度誤差 $e(t)(=\omega_{ref}-\omega_{FW})$ の二乗積分を計算すると、従 来回路の場合は 48.62[rad²/s],提案回路の場合は 57.64[rad²/s]となり、提案回路の方が 20[%]程度増加 した. これは、従来回路は常にメータイン制御およ びメータアウト制御が適用されるのに対し、提案回 路は、加速および定速時はブリードオフ制御、減速 時はメータアウト制御のみが適用されるからである. それぞれの回路のポンプ供給圧 p_s と、提案回路の 負荷圧力 *p*_Lを Fig.4 に示す. 同図より,従来回路は 常に高い圧力を供給している.これに対し,提案回 路は,アイドル時および減速時はポンプは無負荷で 駆動され,加速および定速時は負荷圧力に応じてポ ンプ供給圧が変化するため,ポンプ供給圧が低減さ れていることが分かる.次に,ポンプ供給エネルギ ーを以下の式により算出する.

$$E = \int_{10}^{50} p_s \cdot q_s \, dt \tag{1}$$

ただし、 q_s はポンプ供給流量であり、原動機の回転 数により推定した値を用いる.式(1)より、従来回路 と提案回路のポンプ出力エネルギーの比、 $E_{Prop.} / E_{conv.}$ は、37.18[kJ] / 61.56[kJ] = 0.60 となった.







Fig.4 Pump supply pressure p_s and load pressure p_L 4. 結言

本研究では、固定容量ポンプを供給源とする水圧 モータ駆動回路に対し、ポンプ供給圧を低減させる ことで省エネルギー化を図るための回路を提案した. 従来回路および提案回路の実験を行った結果より、 提案回路は従来回路に対し、回転速度誤差の二乗積 分の値が 20[%]程度増加するが、ポンプ出力エネル ギーを約 40[%]程度大幅に低減出来ることが分かっ た.

- 1) 宮川新平,他2名:水圧サーボシステムの応用,計測 と制御,35-2,12/124(1996)
- Rokala, M. : Analysis of Slipper Structures in Water Hydraulic Axial Piston Pumps, Tampere University of Technology, 16/17(2012)

運転制約を考慮した水圧モータのモデル予測回転速度制御

稻田諒*,伊藤和寿*

Model Predictive Rotational Velocity Control for Water Hydraulic Motor with Operational Constraints

Ryo INADA*, Kazuhisa ITO*

This research describes rotational velocity control of water hydraulic motor used for elevator system in power plant with model predictive control (MPC). For actual applications of water hydraulic motor, practical operational constraints should be considered as well as control specifications. However, conventional control system is difficult to deal with these constraints in design steps. This research applies MPC to water hydraulic motor system to solve these problem. In this paper, we assume that water hydraulic motor uses passenger elevator and we evaluate control performance of both MPC and PI control. Experimental results show that MPC can improve its percent undershoot about 86.5 % compared with PI control.

Key Words : Water hydraulic system, Motor control, Model predictive control, Operational constraints

1. はじめに

石油化学産業等で広く実用化されているモデル予 測制御(MPC)は、有限時間内の状態変数を予測し、 制約条件を考慮した最適制御入力を算出する制御手 法である. MPCは一般的に演算量が非常に多いため、 従来比較的応答が遅いシステムにしか用いられてい なかった. しかし、近年では高速な計算機が安価に 入手可能になったことを背景に、比較的高速なシス テムに対してもMPCが容易に適用できるようにな った [1].

本研究では、高い静浄度と低い環境負荷を特長と する水圧モータシステムを制御対象とする.水圧モ ータシステムは圧力伝達媒体である水の低い圧縮性 により応答性が高く、オーバーシュートが起こりや すいといった問題点がある.また、実際に使用する 場合の制約も考慮する必要がある.例えば、水圧モ ータの許容上限回転数、サーボ弁への許容入力電圧 などがこれに相当するが、これまでの制御系では設 計の段階でこれらの制約を考慮するのが難しかった. 以上の点から水圧モータにMPCを適用することに より、水圧モータの適用範囲が大きく広がると考え られる.

本研究では、水圧モータを火力発電所のエレベー タ駆動に使用することを想定する.そして、エレベ ータ及び水圧モータシステムの制約条件を考慮した MPCとPI 制御との制御性能を水圧モータ単体の実 験にて評価・比較する. 2. モデル予測制御

本研究で用いる MPC の評価関数を式(1) に示す.

$$J(k) = \min_{\hat{u}(k+i|k)} \left[\sum_{i=1}^{H_p} |\hat{e}(k+i|k)|_{Q(i)}^2 + \sum_{j=0}^{H_u-1} |\Delta \hat{u}(k+j|k)|_{R(j)}^2 \right]$$
(1)

ただし, H_p , H_u , $\Delta \hat{u}$, \hat{e} はそれぞれ,予測区間,制 御区間,最適な入力の変化量,目標値と予測出力と の追従誤差,である.また,右辺第一項,第二項は それぞれ,各時刻での追従誤差に重みQを乗じて総 和を評価したもの,各時刻での制御入力の変化量に 重みRを乗じて総和を評価したもの,である.

3. 実験結果

本研究での実験回路を Fig.1 に示す.



Fig.1 Experimental circuit

本実験では、エレベータに196[kg]の荷重が加わったと仮定し、パウダブレーキで1[Nm]の負荷を与える.また、最大供給圧力を7[MPa]に設定する.

^{*} 芝浦工業大学システム理工学部

^{(〒337-8570} 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)

⁽E-mail: bq13012@shibaura-it.ac.jp)

^{*} Shibaura Institute of Technology

ここで、実験で用いる水圧モータの定格回転速度は 500[rpm]以上となっているため、サーボ弁への印加 電圧を、500[rpm] 以上となる5[V] から、最大印加 電圧である10[V] までとする.また、回転数の制約 及び実験結果は、入力電圧7[V] のときの回転数の定 常値を基準にオフセットしたものを示す.以上より、 本実験で考慮するエレベータ及び水圧モータシステ ムの制約条件はTable 1 に示すようにスケーリング される.また、目標値にはエレベータの理想運転曲 線を基に設計したFig.2 を使用する.

Item	Value	Unit
Elevating acceleration	±0.9	[m/s ²]
Input voltage	5-10	[V]
Allowable rotational velocity	0-30	[rpm]



Fig.2 の目標値に対して追従するために, PIコント ローラを式(3) のように設計する.

$$u(t) = K_p e(t) + K_{i1} \int e(t) dt + K_{i2} \iiint e(t) d\sigma \, d\gamma \, dt \qquad (2)$$

ただし, K_p , K_{i1} , K_{i2} , e(t) はそれぞれ, 比例ゲイン, 積分ゲイン, 三重積分ゲイン, 追従誤差, である. なお, PI 制御の各ゲインは, 水圧モータの加速時, 定速時, 減速時の各段階においてそれぞれチューニ ングを行った.

Table 2 に示す条件の下で行った実験結果を Fig.3-5に示す. 追従誤差の二乗平均平方根 (RMS) で追従性を,パーセントオーバーシュート (P.O.) 及 びパーセントアンダーシュート量 (P.U.) の最大値 で制約条件を超えた量をそれぞれ評価する.





Fig.5 Input voltage to servo valve

Table 2 Comparison analysis of experimental results

Item	MPC	PI
RMS (0 to 90 [step]) [rpm]	2.25	1.20
Maximum P.O.	0	0
Maximum P.U.	0.47	3.48

Table 2 より, PI 制御と比べてMPC はわずかに追 従性が悪化している一方, 86.5 [%] 最大P.U. が改善 されていることが分かる. このことより, PI制御と 同等の制御性能を得られた上に, P.O.及びP.U.が抑 えられていることが分かる. また, PI 制御は目標値 の各段階に分けてチューニングをしているため, チ ューニングパラメータが多く, 適切なゲインを設定 するために多大な工数がかかる. 従って, MPC は PI 制御と比べチューニングが大幅に簡素化される.

4.結言

本研究では、エレベータ及び水圧モータシステムの制約を考慮したMPC を設計し、水圧モータ単体の実験においてPI制御との性能評価を行った.その結果、MPC はPI 制御と同等の制御性能を発揮することが出来、最大P.U.を改善することができた.

- 伊藤和寿:油圧制御技術に応用される制御理論(モデ ル予測制御入門),ターボ機械,43-5,15/21 (2015)
- 船井潔:エレベータの安全快適技術, IATSS Review, 27-2, 35/36 (2002)

水道水圧用ベローズ型増圧器の開発と水道水駆動ゴム人工筋の変位制御

古田優悟*,伊藤和寿**,小林亘***

Development of Pressure Intensifier for Tap-Water Driven System with Bellows and Displacement Control of Tap-Water Driven McKibben Muscles

Yugo FURUTA*, Kazuhisa ITO**, Wataru KOBAYASHI***

This research discusses pressure intensifier with bellows for McKibben muscles driven by tap-water. In our previous study, the conventional pressure intensifier had larger friction force between piston and case for coiled up of bellows, hence, this led lower response of pressure rise and lager pressure loss. For this problem, even if a thickness of bellows is increased so as to avoid coiled up, restoring force of bellows becomes larger at the same time and this also leads to pressure loss. In this report, an improved pressure intensifier was proposed to reduce not only lager friction force but also larger restoring force of bellows. In addition, the static and dynamic characteristics of the improved pressure intensifier were evaluated for displacement control of McKibben muscle. As a result, experimental results showed that the proposed pressure intensifier was applicable in frequency band of no more than 0.24 Hz.

Key Words : Water hydraulics, Bellows, Pressure intensifier, McKibben muscle, Displacement control

1. はじめに

高い環境融和性,不燃等の特長を有する水圧駆動 システムでは,一般に広く普及した水道配管網圧力 を駆動源とするシステムの研究も進められている¹⁾. この一例である水道水駆動ゴム人工筋は,低い駆動 圧力によってゴム人工筋の収縮率が空気圧駆動の場 合と比較して低下する問題が指摘されているが,増 圧比2倍程度の比較的増圧率の低い簡便な構造を持 つ増圧器を用いることでこれを解決でき,下肢リハ ビリテーション等への応用が期待できる.

既報²においては強い摩擦の原因となるシールが 不要であり、かつ漏れない構造を持つベローズ型増 圧器を提案し、その設計手法および増圧原理などの 基本的なコンセプトを実験において確認した.しか しながら、ベローズがうねることでケースに引っか かり、応答性が低下する問題が生じていた.

2. ベローズ型増圧器の改良

Fig.1 に改良したベローズ型増圧器を示す. 定常状態での増圧力は力のつり合いより式(1)が成り立つ.

$$p_{2} = \left(\frac{d_{1}}{d_{2}}\right)^{2} p_{1} - \frac{4}{\pi d_{2}^{2}} \left\{ \left(k_{1} + k_{2}\right) \Delta L + mg + f \right\}$$
(1)

* 芝浦工業大学大学院理工学研究科

- (〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)
- (E-mail: md16076@shibaura-it.ac.jp)

*, ** Shibaura Institute of Technology

ただし、 p_i [Pa(G)]は圧力室の内圧、 d_i [m]は圧力室の 内径、 k_i [N/m]はベローズのばね定数、 ΔL [m]は力の つり合い時のピストン変位、m[kg]はピストンの質 量、f[N]はピストンとケース間に生じる摩擦、添え 字(i=1, 2)は圧力室の番号、を示す.

本研究では、ばね定数の実用的な計算式として広 く知られている M.W.Kellogg 社の式³⁾を用い、うね りが生じにくくばね定数が大きくなり過ぎないよう な肉厚を試行錯誤的に選定した.

$$k = \frac{4EDt^3}{3W^{0.5}H^{2.5}2n}$$
(2)

ただし, k[N/m]はばね定数, E[N/m]は縦弾性係数, D[m]は外径, t[m]は肉厚, W[m]は 1/2 ピッチ, H[m]は山高さ, $n[\cdot]$ は山数, を示す.



Fig.1 Sectional view of pressure intensifier with bellows

^{**} 芝浦工業大学システム理工学部機械制御システム学科

^{***} 岡山理科大学工学部知能機械工学科

^{(〒700-0005} 岡山県岡山市北区理大町 1-1)

^{***} Okayama University of Science

3.ベローズ型増圧器の性能検証

Fig.2 に実験回路図を示す.



rig.2 Experimental circ

3.1 静特性

ステップ応答実験結果より,改良後の最大圧力は 0.296[MPa(G)]と設計増圧比2に達してはいないもの の,増圧比1.9 と近い値を得られている.また,式 (1)右辺の各項の支配度をTable1に示した.支配度 は水道水圧による増圧力を基準としている

	水道水圧 による増圧力	ベローズの復元力	ピストンの 重量	摩擦力
	式(1)の $(d_1/d_2)^2 p_1$	式(1)の -4($k_1 + k_2$)ム $L / \pi d_2^2$	式(1)の -4mg/ πd_2^2	式(1)の -4 $f/\pi d_2^2$
圧力 [MPa(G)]	0.356	-0.033	-0.004	-0.023
支配度[%]	100	-9.1	-1.1	-6.6

Table 1 Influence of each element

3.2 動特性

PID 制御により, ゴム人工筋の変位制御を行った. ただし, ゴム人工筋は収縮時と伸張時で動特性が異 なるため, それぞれ異なる PID ゲインの値を用いて いる. ゴム人工筋の変位制御結果を Fig.3 に示す. 実験結果より, ゴム人工筋の伸張時に振動的な挙動 が見られるが, 目標信号に良好に追従しているため リハビリテーションにおいては望ましい制御性能が 得られると考えられる.

次にゴム人工筋変位の周波数特性実験の結果を Fig.4 に示す.ただし、リハビリテーションにおいて 位相遅れについては特に問題にならないと考えられ るため、省略している.実験結果より、バンド幅周 波数は 0.24[Hz]であることが明らかになった.実際 の下肢のリハビリテーションにおいて必要とされる 0.5[Hz]程度の周波数を達成するため、今後は増圧器 の有無を切り換えるシステムを構築する必要がある.



Fig.3 Experimental result of displacement control



Fig.4 Gain diagram of McKibben muscle

4. おわりに

本研究では先に製作した水道水駆動ゴム人工筋用 ベローズ増圧器の一次側のベローズの厚み及びケー スとの隙間を変更し、うねりが生じない範囲でしゅ う動部摩擦を低減した.また、ゴム人工筋の変位制 御にPID制御を適用し制御性能について良好な追従 特性が得られることを示した.さらに、0.24[Hz]ま での周波数帯域において、増圧器の有効性を実験に より明らかにした.

- 伊藤和寿,水圧システム技術の最前線,計測自 動制御学会誌,54-9,639/644(2015)
- 2) 古田優悟,伊藤和寿,小林亘,受圧面積比を利 用した水道水駆動ゴム人工筋用ベローズ型増圧 器の開発,2016年秋季フルードパワーシステム 講演会講演論文集,12/14(2016)
- 3) 三柴隆, 真空機器に使用するベローズ, 日本真 空学会論文集, 26-10, 757/769 (1983)

フルードパワーアクチュエータの特性比較調査

坂間 清子*

Characteristic comparison of Fluid Power Actuators

Sayako SAKAMA^{*}

Recently, to reduce environmental load and enhance the efficiency of machinery, hydraulic and pneumatic actuators have been replaced by electric actuators in many industrial fields. However, the characteristics of each actuators are different, and it is not necessarily appropriate to replace every hydraulic or pneumatic actuators by the electric actuators. We should select the appropriate actuator considering the actuator size, output power, speed, responsiveness, and so on. In this paper, the characteristics of various type of motors were compared and evaluated using some indexes. As the subject of this investigation, commercially available AC motors, brushed and brushless DC motors, hydraulic motors, pneumatic motors and water hydraulic motors were selected, and the data on their specification was collected from their catalogs. To compare and evaluate the characteristics of these motors, torque, power density, and power rate were selected as the performance indexes. The hydraulic motors, especially axial piston type motors have higher power density, torque, and power rate. It was also confirmed that water hydraulic motors have higher power density than the electric motors and pneumatic motors. Moreover, it was confirmed that there were no small-size fluid motors in this investigation, and small brushless DC motors have high power density. The present results suggest that we need to consider the characteristics of each actuator and appropriately select motors depending on the situation.

Key Words : Actuator, Comparison Survey, Electric Motor, Fluid Power

1. はじめに

環境負荷低減,高効率化等の観点からあらゆる産 業分野で油圧システムや空気圧システムの電動化が 進んでいる.しかしながら,油圧機器,空気圧機器, 電動機器は特徴が大きく異なり,各機器の特徴を十 分に把握した上で最適な構成を検討する必要がある. 本報では,フルードパワーアクチュエータと電動ア クチュエータのパワー密度,発生トルク,パワーレ ートを比較することで各アクチュエータの特徴を定 量的に評価する.

2. 評価対象および評価方法

本調査では、市販の回転式のモータを調査対象と し、各モータのカタログからデータを収集し、各モ ータの特性を比較した. Table 1 に本報で調査対象と したアクチュエータの分類と機種数を示す.

モータの特性評価には、定格トルク T_r [N·m], パワー密度 P_d [W/kg], パワーレート Q [kW/s]の3つの 指標を用いる.パワー密度 P_d は、モータの質量 m [kg] に対する定格出力 P_r [W]の比で表され、モータの小 形・軽量・高出力化の指標となる. パワーレート Qは、そのモータの応答性を表す指標であり、回転子 の慣性モーメント J_m [kgm²]に対するモータの定格 トルクの二乗 T_r^2 の比で表される.

* 青山学院大学理工学部

(〒252 - 5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1) (E-mail: sakama@me.aoyama.ac.jp)

T 1 1	4 3	NT 1	C .1		C	C	•
Inhla		Numbor	of the	motore	tor	nortormanco	comparison
raute	1 1	NUMBER	or the	motors	IUI	Derformance	Comparison

Motor type			Number of	Number
			companies	of motors
	Star	ndard	8	734
AC	Direc	t-drive	2	83
DC	Bru	shed	4	803
DC	Blus	shless	2	275
		Swash	7	02
	Axial	plate	/	83
	piston	Bent	4	179
Hydraulic		axis		
	Radial piston	Crank	3	393
		Cam	2	65
		plate		
	Va	ane	4	353
	Axial	Swash	1	14
Pneumatic	piston	plate	1	14
	Radial	Cronk	2	20
	piston	Crallk	3	20
Water	Axial	Swash	2	7
hydraulic	piston	plate	Z	/

3. 定格トルクの比較

Fig.1(a)にモータの発生トルク *T*,と質量 *m* の関係 を示す. 横軸にモータの質量,縦軸に定格トルクを とっている. 本報では,便宜的に 10⁻³ kg 以下のモー タを超小形モータ,10⁻³から 10⁻¹ kg のモータを小形 モータ,10⁻¹から 10 kg のモータを中形モータ,10 から 10³ kg のモータを大形モータ,10³ kg 以上のモ ータを超大形モータと呼ぶ. 各アクチュエータの定格トルクは, $T \propto m^{4/3}$ の直 線上にプロットされる傾向にあることがわかる.ま た,フルードパワーアクチュエータがプロットされ る直線は電動アクチュエータと比較して *T*,が大き い方にシフトしている.特に油圧モータと電磁モー タの違いは顕著であり,油圧モータの定格トルクは, 電磁モータよりも一桁近く大きな値を示す.

4.パワー密度の比較

Fig.1(b)に各モータのパワー密度 P_dと質量 m の関係を示す.中形~大形領域では,油圧モータのパワー密度が最も大きく,AC モータと比較すると一桁以上大きな値を示す.また,水圧モータも高いパワー密度を有しており,油圧アクチュエータの利用が難しく,小形かつ大きな出力を必要とする場合には水圧モータが最も適していると評価できる.

本報で調査対象としたモータでは、超小形〜小形 領域にプロットされるフルードパワーアクチュエー タはなく、この領域にプロットされるモータではブ ラシレス DC モータが高いパワー密度を有すること が明らかになった.

5. パワーレートの比較

Fig.1(c)に各モータの質量 m とパワーレート Q の 関係を示す.油圧,空気圧,電動モータのそれぞれ の質量とパワーレートはほぼ比例関係にあり,質量 が大きいものほど高い応答性を示す傾向にあること がわかる.ただし,油圧モータと電磁モータでパワ ーレートを比較すると,油圧モータのパワーレート の方が二桁近く大きく,油圧モータは優れた応答性 を有することがわかる.

6. おわりに

本報では、定格トルク、パワー密度、パワーレートの三つの評価指標で電動モータとフルードパワー モータを整理した.駆動原理の違いでアクチュエー タのプロットされる領域は大きく異なり、アクチュ エータの選定には、各アクチュエータの特徴をよく 把握する必要がある.なお、中形〜超大形領域にプ ロットされる油圧モータは、全ての指標において優 れた性能を有することが明らかになった.先行研究 において、フルードパワーモータよりも電動モータ の方が定格トルクやパワー密度の向上が顕著である ことも報告されていたが¹⁾、最近はフルードパワー アクチュエータのロボットへの利用も注目されてお り²⁾、小形で高出力なフルードパワーアクチュエー タの開発が進むことが期待される.

- 田中豊:フルードパワーアクチュエータの動向と将来 像,日本機械学会2012年度年次大会講演論文集DVD, K11500 (2012)
- 鈴森康一:タフロボット用油圧アクチュエータ,油空 圧技術,55-3,10/13 (2016)



Fig. 1 Comparison of actuator characteristics