

# メカノインフォマティクス・カデット教育

(「楽力」によって実践力を磨く創造的ものつくりエリート教育)

平成 26 年度報告書

=平成 27 年 5 月=

電気通信大学大学院情報理工学部

知能機械工学専攻

## ●目次

1. はじめに
2. MATLAB講義活用
  - 2.1 MATLABセミナー概要
  - 2.2 制御編
  - 2.3 ロボット編
3. 実践的課題プロジェクト
  - 3.1 淡江大学（台湾）との国際的実践課題の取り組みについて
  - 3.2 ロボットの制御に関するプロジェクト実験
  - 3.3 災害弱者への情報伝達プロジェクト
  - 3.4 ボストン大学研究交流プロジェクト
4. 大学院生による企画提案型プロジェクト研究  
採択の方法と発表成果の概要
  - 4.1. 菊島達也（田中研） 修士1年  
両眼視野闘争を用いた BMI(Brain-Machine Interface)への応用
  - 4.2. 小倉大介（田中研） 修士1年  
非線形制御系の Non-convex 設計条件解法アルゴリズムの提案と  
設計支援ツールの開発
  - 4.3. 中島 瑞（田中研） 修士1年  
へび型掃除ロボットの開発
  - 4.4. 伊藤 唯(田中研) 修士1年  
空からの情報収集を可能にする飛行ロボットの開発
  - 4.5. 林 直輝(小池研) 修士1年  
超磁歪素子を利用した埋め込み型骨導補聴器の開発  
～振動子の構造最適化および体外ユニットの開発～
  - 4.6. 植木公威(明研) 修士2年  
ダイナミックヒューマノイドロボットの開発
  - 4.7. 佐藤圭吾(明研) 修士2年  
生物模倣型脚移動ロボットの研究開発
  - 4.8. 趙 文静(明研) 博士3年  
圧電繊維複合材料を用いた生物模倣型ソフトロボットの研究開発
  - 4.9. 入江優花（青山研） 博士5年  
高粘度マイクロディスプレイシステムの開発
  - 4.10. 菊地 綾（青山研） 修士2年  
ペンシル型ハンドヘルド非接触マイクロニードルの位置制御機構の開発

5. ショートトレーニング

**Global Leadership Training**

- ・「民間ジェット的安全性について」
- ・講師 鈴木正也氏 宇宙航空研究開発機構

6 カデット講演会

6.1 「Advanced Control Design Tools for Automotive Applications」

講師： AnhTu NGUYEN 氏 Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

6.2 「Integrated Model-Based System Engineering and Model-Based Safety Assessment for Mission-Critical Mechatronic Systems」

講師： Prof. Jean-Yves CHOLEY, SUPMECA, Paris, France

7 地域貢献

7.1 オープンキャンパス

7.2 調布市科学センター 電気工作ボランティア

8 ロボカップサッカー

9 大学院生による研究成果発表

10 謝辞

## 1. はじめに

「メカノインフォマティクス・カデット教育」プロジェクトは国際的視野とリーダーシップに富んだ志高い学生「世界に通じる研究者の卵」を育成することを目的としている。今年度もその趣旨に沿った活動を展開できた。本報告書では、「メカノインフォマティクス・カデット教育」において2014年度に実施したプログラムの取組み内容と成果を報告する。

このプロジェクトは文部科学省「魅力ある大学院教育」イニシアティブに2006年度から2年間採択された大学院生を中心にした教育・研究プロジェクトであり、その後、学内プロジェクトとして継続が認められ、今日に至っている。ここで報告されている成果は本学からの経費援助のお陰であり、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

2015年3月31日

電気通信大学大学院情報理工学研究科 知能機械工学専攻  
統括責任者 田中一男

## 2.MATLAB エリート学問塾 夏の学校 in UEC 報告書

### 1 概要

本書は 9/1～9/2 にかけて行われた「MATLAB エリート学問塾 夏の学校 in UEC」に関する報告書である。本講義の講師として MATLAB プログラミングの第一人者であり、「MATLAB ハンドブック」を出版されている、法政大学の小林一行先生をお招きした。

講義内容は 1 日目が「MATLAB プログラムの基礎と制御工学」、2 日目が「MATLAB によるロボットアームのシミュレーション」となっている。

### 2 構成内容

#### 2.1 構成

講義の構成は以下のようになっている。

##### 一日目

1. ベクトル，行列定義の方法
2. バックスラッシュ演算 if 文，for 文などの使い方
3. Symbolic Math とラプラス変換
4. モータモデル作成とシミュレーション

##### 二日目

1. コロン演算子を用いたプログラミング
2. 配列演算子の使い方
3. plot の使い方と立方体の描画
4. 同次変換行列を用いたロボットアームのシミュレーション



Figure 1 MATLAB ハンドブック

## 2.2 講義一日目

一日目の講義は、前述の通りのような項目に沿って **matlab** の基本事項、またモータモデル作成に焦点をおいて進められた。

講義ではまず、**MATLAB** には特有の演算子があるということについて説明を受けた。具体的にはコロン演算によるベクトルの生成やバックスラッシュ演算子の使い方などである。中でも、バックスラッシュ演算子に焦点を当てており、バックスラッシュ演算子を使うことで、最小二乗法の計算が手軽に行えることを確認した。

また、**if** 文や **for** 文などを例に、**C** 言語や **Java** との文法の比較も行った。例えば、**for** 文を使う際に、**C** 言語では中括弧を用いていたが、**MATLAB** では **end** を用いるといった違いがある。

次に、**Symbolic Math toolbox** を使った演習に取り組んだ。演習では、連立方程式の解を求めるスクリプトを作成したり、ラプラス変換や逆ラプラス変換を **MATLAB** 上で行うための記述方法を学んだりした。

その次に、モータのステップ応答をシミュレーションした。シミュレーションには、モータの微分方程式をラプラス変換して行う方法と、状態方程式を用いて行う方法の、二つのやり方を用いて行い、それぞれのやり方で同じ結果が得られることを確かめた。

最後に、**Simulink** を用いた応答シミュレーションを行った。モータの微分方程式は、**Simulink** のブロック線図によって表すことができ、そのブロック線図を元にシミュレーションを行うことが可能である。実際に使用したブロック線図を図 2 に示す。また、応答を **Fig.2** に示す。

また、一日目の演習をすべて終えた後で、小林先生が実際のモータのパラメータを推定するというデモンストレーションを行ってくださった。パラメータ推定の方法は、最小二乗法を用いて、入出力から伝達関数のパラメータを抽出するというものである。デモンストレーションでは、推定したパラメータを用いてのシミュレーションと、実際のモータの挙動が、ほぼ同じものとなっていることを見て取ることができた。

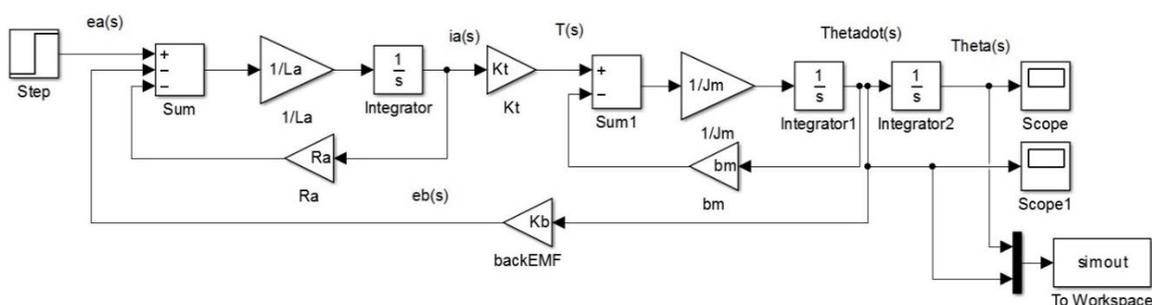


Figure 2 ブロック線図

## 2.3 講義二日目

二日目の講義は、前述の通り次のような項目に沿って一日目に引き続き、MATLAB の基本事項や特有な演算子と効果的なプログラミングについて、また MATLAB による 3 次元回転行列と同次変換行列に焦点をおいて進められた。

まず二日目の前半において講義をしていただいた MATLAB 特有な演算子と効果的なプログラミングについて述べる。MATLAB 特有な演算子や関数のうち、コロン演算子を使用した行列要素指定法、配列演算子の効果的な使用法、また plot 関数によるグラフ作成の補助として使用されるさまざまな補助関数についての詳細な説明がなされた。演習として plot 関数を用いた正方形の描画、Nan による表示テクニックを用いた立方体の plot3 関数による作成を行った Fig. を Fig. 3 に示す。

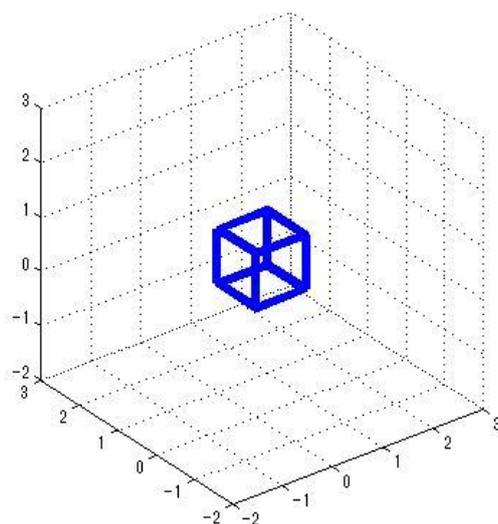


Figure3 Plot3 関数による立方体の作成

次に MATLAB による 3 次元回転行列と同次変換行列について述べる。

最初に handleGraphics による簡単な GUI を作成した。handleGraphics の属性を変更することによるグラフの細かい設定法の説明がなされた。また、アニメーションのテクニックとして handleGraphics に実装されている unicontrol 関数を利用したボタンやスライダの実装例について、サンプルプログラムを使用することによる確認を行った。

次に座標変換と同次変換行列を行った。移動ロボットの位置を表すための同時変換行列の MATLAB のプログラミング方法、3 次元座標空間の回転方法について学び、サンプルプログラムを使用してプログラミング方法を確認した。

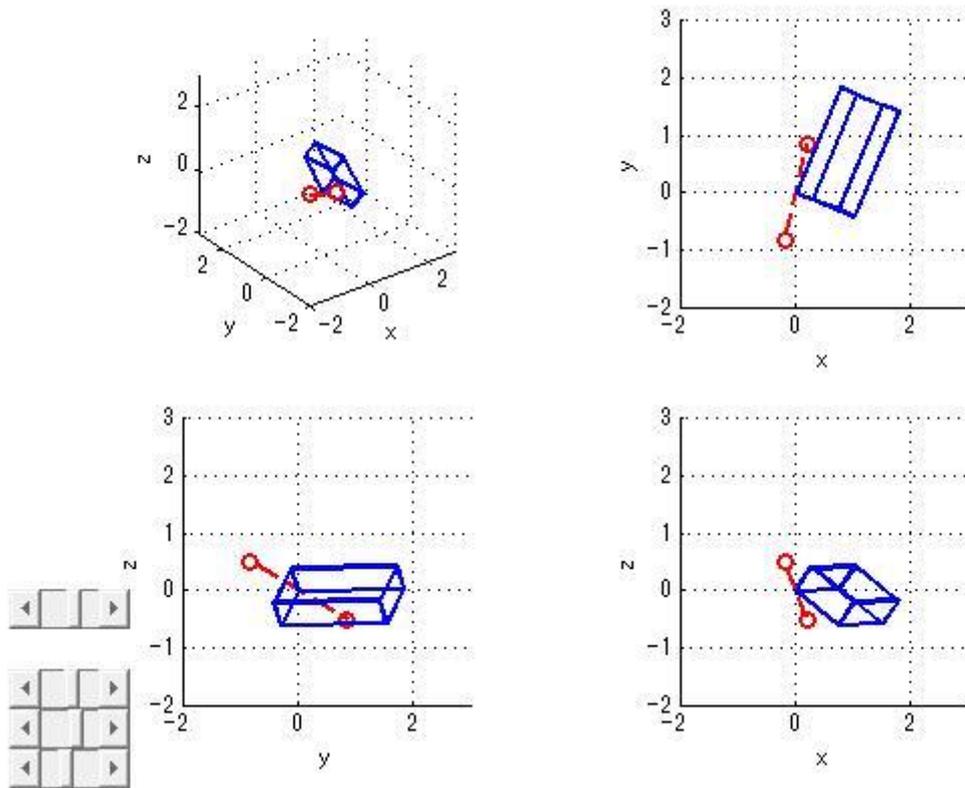


Figure4 3次元座標空間の回転

最後にロボットアームシミュレーションを行った。2次元2軸シリアルリンクのシミュレーションを例に、学んだ同時変換行列の使用法の説明がなされた。次に単振り子の運動方程式をラグランジュ方程式を用いて MATLAB 上で計算、導出を行い内容の理解に取り組んだ。また、本講義の最後にはロボットアームを応用した様々なサンプルプログラムを確認することで、MATLAB で行えるシミュレーション内容の理解を行った。

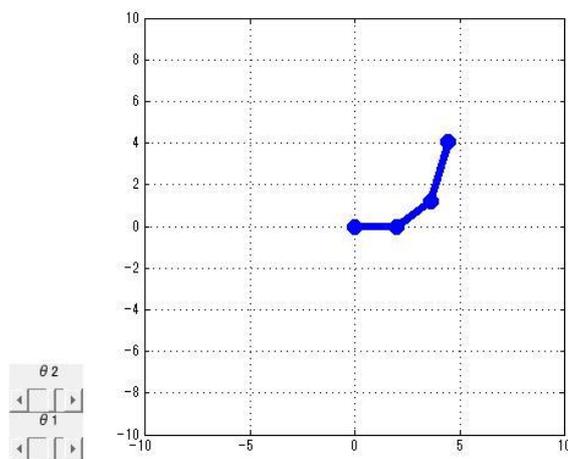


Figure5 2次元2軸シリアルリンク

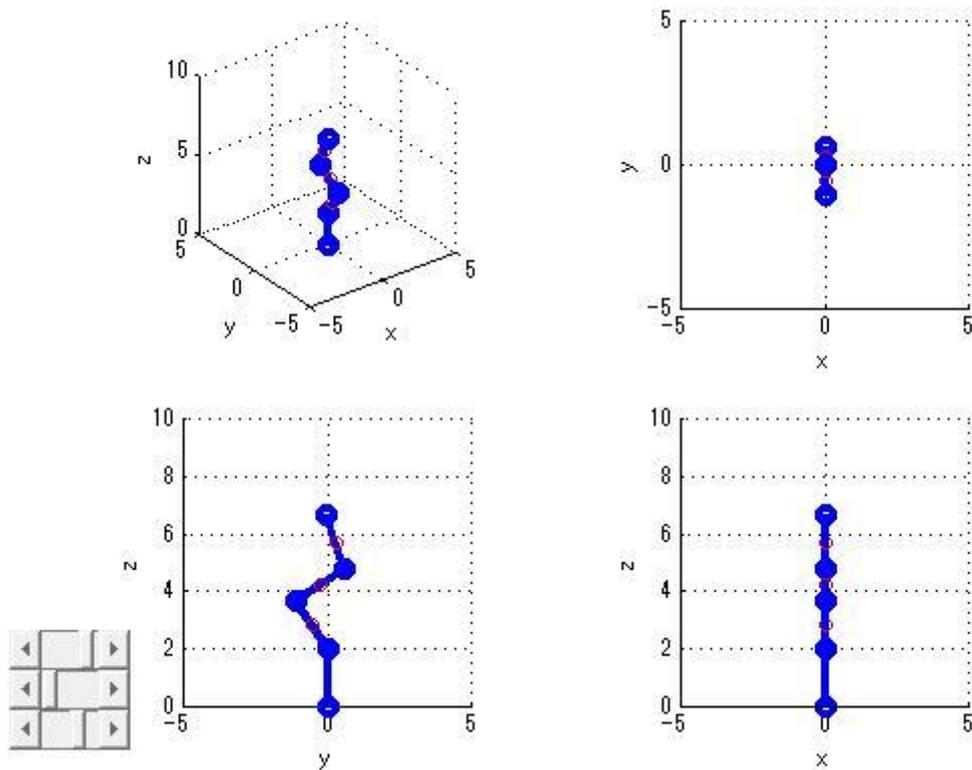


Figure6 多関節ロボットアーム



Figure 7 講義風景



Figure 8 熱心に説明される小林先生

### 3 総括

2日間にわたって基本的なことから丁寧に教えてくださったため、ほとんど MATLAB を使ったことがないような人にも理解できる内容であった。講義中の雰囲気も良く、わからないことがあればいつでも質問してかまわないような雰囲気作りをしてくださった。講義形式はプログラムの説明を受けてから演習をするという形を取っていたため、理解が深ま

り良く身についた。しかし、講義の時間が足りず、演習を行う時間がない場面もあったので、次にこのセミナーが開かれる場合はその点を改善してほしい。

### 3. 実践的課題プロジェクト

#### 1. 淡江大学（台湾）との国際的实践課題の取り組みについて

本プロジェクトはインターネットを利用し、海外の学生と相互遠隔操作ロボコンに取り組む、国際交流活動の一環である。インターネットを介して本学と台湾の淡江大学と相互遠隔操作ロボコンコンテストに取り組む活動を通して、将来メカトロニクス設計開発および生産拠点において国際的にチームワーク精神を発揮できるグローバル化人材の育成を目標とする。本プロジェクトには本学の大学院生を中心としたメンバーと淡江大学の学生が参加している。昨年度はキネクトに画像処理をコントローラとして使用した玉入れの競技を行った。本年度ではインターネットを介して水上移動ロボットを遠隔操作し、競技を行うことを目指した。

#### 2. 本年度の取り組み概要

本年度は Virtual Private Network(VPN)を利用して相手国側のルータにアクセスし、LAN I/O 及び無線モジュールを用いて遠隔制御システムを構築した。さらにその構築した遠隔制御システムを用いて水上移動ロボットによる競技を行った。図1に構築した遠隔制御システムを示す。本年度の競技は、水上移動ロボットからピンポン玉を発射し、相手のロボットに取り付けられている籠及び、フィールドの中央に設置された籠にピンポン玉を入れる玉入れ競技とした。図2に上面からの競技フィールドの概要図を示す。競技フィールドは直径 2.5[m]のプールに水を張り、籠および籠を保護するためにバリケードを設置した。図2のように計4台のロボットを使用するが、グローバル側1機とローカル側1機を1チームとし、フィールド中央の籠とロボットに設置された籠に入れた球の合計数の多い方が勝利とした。詳細なルールについては日本側で作成したが、本競技は双方向の参加を重視しているため、遠隔操作の方法、水上移動ロボットの製作については互いに検討しながら進めた。図3に各国で製作した水上移動ロボットの外観を示す。ロボットの移動速度制限のために推進機構としてパドルを採用するなど、双方向の協議により、図3のような水上移動ロボットを互いに製作することができた。

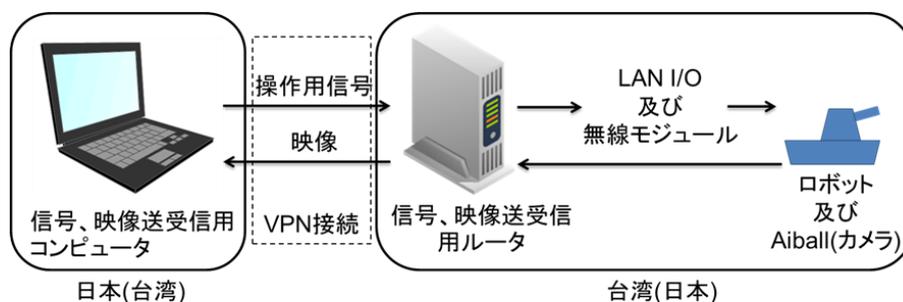


図1 構築した遠隔制御システム

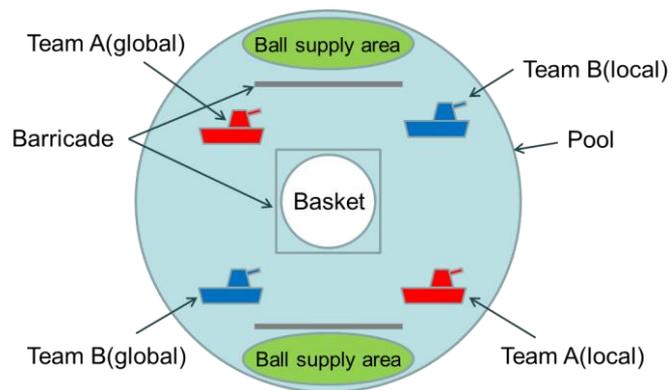


図2 競技フィールド概要図

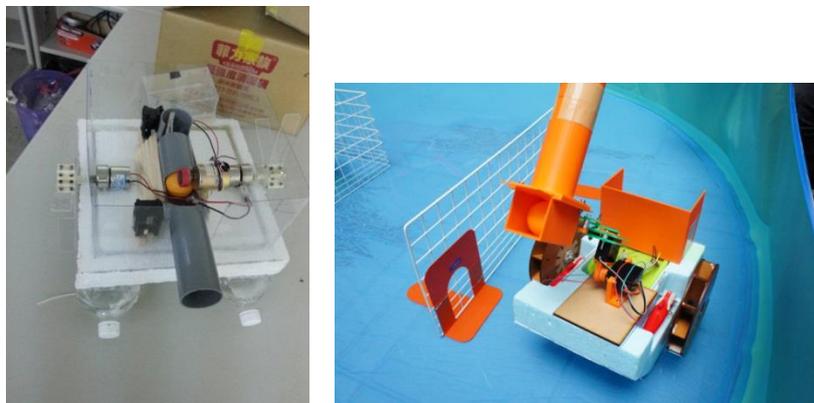


図3 製作した水上移動ロボット(左:台湾、右:日本)

### 3. 本年度の取り組み成果

本年度は、3名の学生を淡江大学に派遣し、現地での協議を行った。図4に協議中の様子を示す。日本側で決めたルールの説明を行って、そのルールに対する質問や疑問に答えた。また、VPNの方法、Aiball(Webカメラ)とLAN I/Oの使用方法などを現地で指導し、実際に日本との通信テストを行った。その様子を図4に示す。

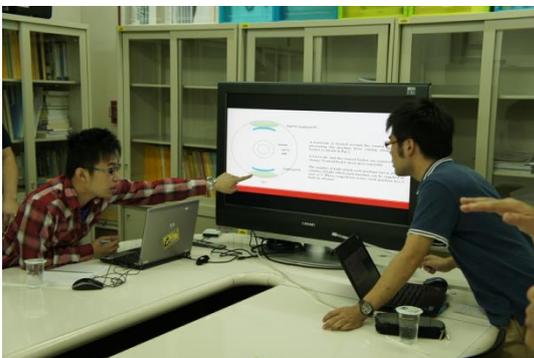




図4 淡江大学での活動の様子

本年度の競技の様子を図5に示す。本番の競技ではインターネット遠隔制御により、水上移動ロボットに予定していた動作をさせて競技を成功させることができた。しかし、インターネット環境上における遅延時間が発生し、マシン同士の衝突が懸念されたため、予定していた4台の操作をせず2台での競技とした。問題が起きてもしっかりコミュニケーションをとり、柔軟な対応をすることが大切であるということを互いに学ぶことができた。



図5 本年度の競技の様子

#### 4. まとめ

本年度は水上移動ロボットを双方向に制御するより、複雑で高度な国際的のロボメカ共同開発を実施することができ、国際的なチームワーク力を参加した学生に授けることができたと評価できる。今後は様々なテーマに取り組み、総合コミュニケーション科学をベースとして国際な人材の養成することを目指している。

本プロジェクトは平成26年度カデット教育事業経費の支援を受けた

### 3.2 ロボットの制御に関するプロジェクト実験

#### 3.2.1 目的

1) 生物模倣脚移動ロボットの機構と制御に関する授業を行い、実験により機構と制御方法の有効性を観察してもらう。

2) 生物模倣型ソフト水中ロボットを用いて授業を行い、様々な推進メカニズムを実現したソフト水中ロボットの動きを学生に体験してもらう。

#### 3.2.2 対応する大学院講義名

- ・ロボット工学特論(電気通信学研究科 下条・明)  
----- プロジェクトの実施
- ・ロボット工学基礎(情報理工学研究科 明)  
----- プロジェクト研究の提案、評価
- ・知能機械構成特論(下条・明) ----- プロジェクト研究の提案、評価

#### 3.2.3 プロジェクトの詳細

##### 1) 脚移動ロボットの機構と制御

生物のようなスマートな構造で高度な運動、すなわちハイパーダイナミックマニピュレーションを実現できるロボットの研究開発を進めている。

まず、人間の機構と運動制御技能をヒントに開発されたゴルフスイングロボットについて講義と動画によって説明する。その特徴として、従来のないアクチュエータの容量配分、非線形特性を持つストッパーの導入、および関節間の動的な干渉トルクの活用を前提としてロボットの機構設計と制御が挙げられる。これらの内容は従来の教科書にないもので、学生に新しい知見を与えることができた。

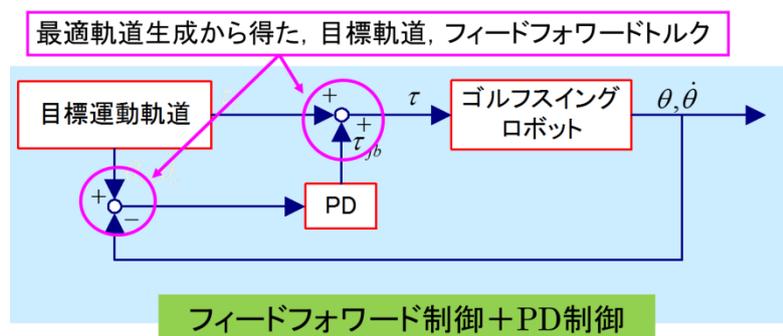
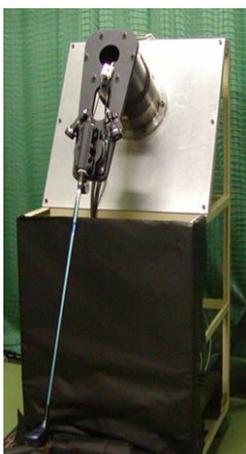


図1 ゴルフスイングロボットの機構と制御

次に、ゴルフスイングロボットの研究開発で得られた知見を脚移動ロボットに応用した研究について紹介する。脚機構の固有問題を解決するために、変減速機構を導入することによってバックドラバビリティを改善しようとしている。特に人間の靭帯構造を模倣した変減速交差リンクを持つ膝関節を開発し、動作実験を行っている。実際に、この膝関節を導入した脚型ロボットでサッカーボールを蹴る動作を実演し、提案した機構の有効性を観察してもらった。

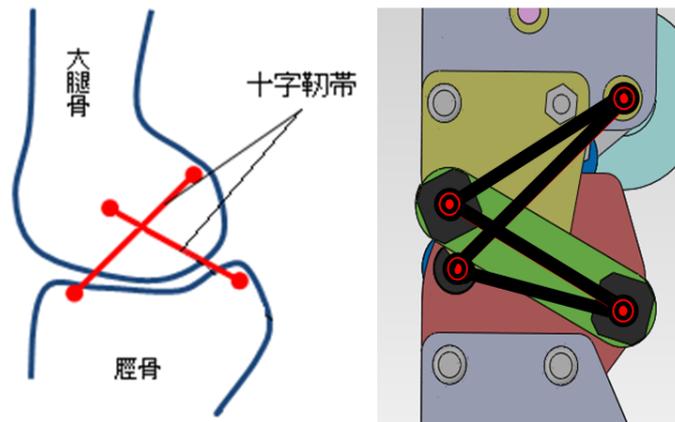
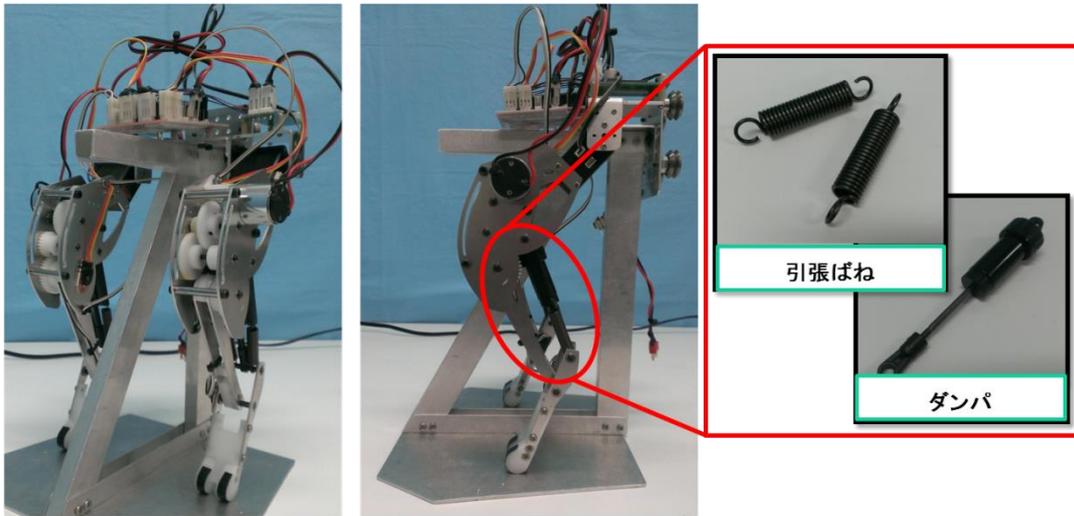


図2 変減速交差リンク機構

さらに、筋腱複合体を規範とした跳躍ロボットについて紹介している。動物、特にネコ科の動物は脚部の筋肉や腱を有効的に活用し、動画のような高い跳躍や柔軟な着地、高速な走行を実現している。本研究では、動物の筋腱複合体を規範とした脚機構を開発し、跳躍動作への有効性を検討している。実験では、跳躍動作および連続跳躍などを行い、機構と制御方法の有効性を観察してもらった。



### Sugoi—Neco Legs

図3 筋腱複合体を規範とした脚機構

#### 2) 生物模倣型ソフト水中ロボット

これまでの魚型水中ロボットに、生物特有の柔軟性を取り入れた「魚型ソフト水中ロボット」の研究がここ数年で活発化している。本研究室では早い時期から圧電繊維複合材料を用いた高性能生物模倣型ソフト水中ロボットの研究開発を行っている。本プロジェクト実験では、一般のソフト水中ロボットの設計法と、これをもとに開発したマス型ソフト水中ロボット (4.3BL/s)、マンタ型ソフト水中ロボット、ウミヘビ型水中ロボット、自律化を目指した立体型水中ロボットについて紹介し、実際の機構、制御と運動を観察・体験してもらった。

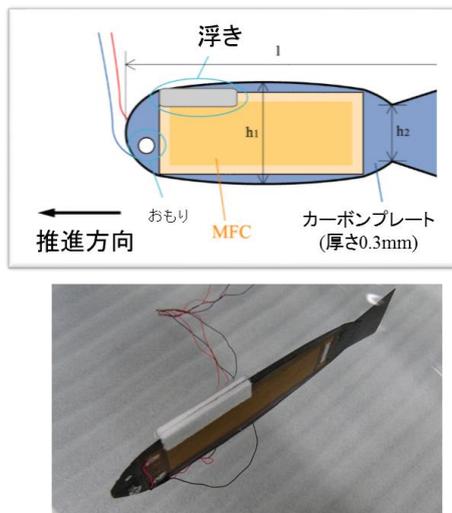


図4 実験用マス型水中ロボット

大学院講義「ロボット工学特論」「ロボット工学基礎」の2回の講義時間を用いて、各実験について45分ずつを行った。計130名の学生が4グループに分けられて、各実験に参加した。

#### 3.2.4 まとめ

大学院講義内容の発展として、最新の研究成果に関する実験を行った。実践プロジェクトを講義に導入することによって、学生の勉強に対するモチベーション、学習効果、知的な探求心を高めることができた。今後、より実験内容の充実や多人数でより効率的に実験ができるように改善を行っていく。

### 3.3 災害弱者への情報伝達プロジェクト (P5)

#### 3.3.1 目的、目標および本プロジェクトの位置づけ

生体情報計測手法を習得するとともに、生体における情報伝達の仕組みを学習し、感覚器の機能が一部欠損している場合でも、効率的に情報伝達を行える手段を検討することで、災害弱者への情報伝達手法を開発するとともに、マンーマシンシステム構築の基礎を確立することを目的とする。具体的には「感覚器機能低下の克服」、「聴覚障害、視覚障害などの災害弱者を対象とした情報伝達手法の確立」、「感覚や生体情報の定量的評価」についての実験・検討を行い、それらを通して、ヒトを対象とした実験の作法の理解、実験結果における個人差の影響の理解、ノイズに埋没した微弱信号の取得・解析方法の習得、およびコンピュータ制御による迅速な繰り返し計測の自動化の実践を目標とする。

これまでに、皮膚を伝わる音声計測用のセンサとして PVDF (Poly Vinylidene DiFluoride) フィルムを用い、騒音環境下における音声取得を実現するためのデバイス開発を行ってきたが、一昨年度より振動計測の医用応用の一環として、医療用骨削開デバイスが発生する振動の聴覚器に対する安全性評価、および内視鏡鼻腔内手術時の安全性確保のためのシステム構築を行ってきた。今年度は、「感覚や生体情報の定量的評価」として、胎児の聴力検査システム構築の可能性について検討を行った。

#### 3.3.2 背景

先天性難聴は約 800 人に一人の高頻度で発症し、聴覚と言語発育に著しい障害を引き起こす。従来の先天性難聴の診断では、新生児聴覚スクリーニングを行い、早期の難聴発見と聴覚障害教育が行われている。一方、胎生 22 週から 28 週にかけて内耳が発達・成熟・完成し、胎生期の環境因子ならびに遺伝子異常によって先天性難聴が規定されている。したがって、ヒトの先天性難聴では胎生期で既に難聴が始まっている可能性がある。そこで、胎生期に発症・進行する難聴を早期に検出し、因因子を同定することによって、聴の進行の予防や新規の治療を導入することができる。生後の先天性難聴は既に高度な難聴に陥っていることが多く、変性した内耳を再生することは困難である。しかし、内耳の病変の発生初期の段階を胎生期に検出することによって、不可逆性の障害に至る前に病変の進行の予防や根本的治療を導入することができる可能性があり、重度な障害の回避または回復が期待できる。

そこで本研究では、心拍数変化と聴性誘発反応を観察することにより、胎生期における聴力評価法を検討した。

#### 3.3.3 胎児心拍数変化を用いた胎児聴力評価法の検討

##### 3.3.3.1 計測方法

本研究では母体の腹壁から胎児の心拍数を検出する外測法としてドップラー心拍数計を用いる。腹壁にトランスデューサを貼り、超音波を送受信する。心臓の動きに由来するドップラー信

号は、心臓弁や心筋、血流などからの信号の他に、母体の心拍動や呼吸・胎動・子宮収縮といったノイズも混入している。このように複雑な信号から瞬時心拍数を検出するため、自己相関関数を利用して心拍動に由来する信号部分の類似性を統計的に比較して

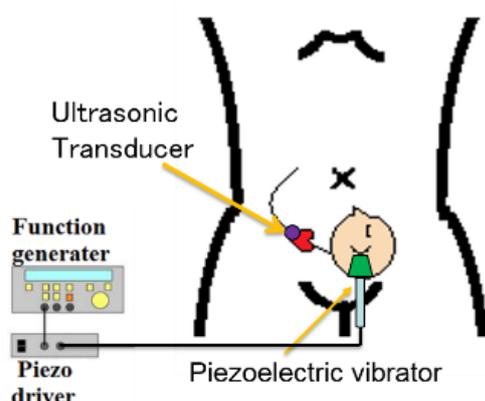


Fig. 1 Measurement system of fetus heart rate

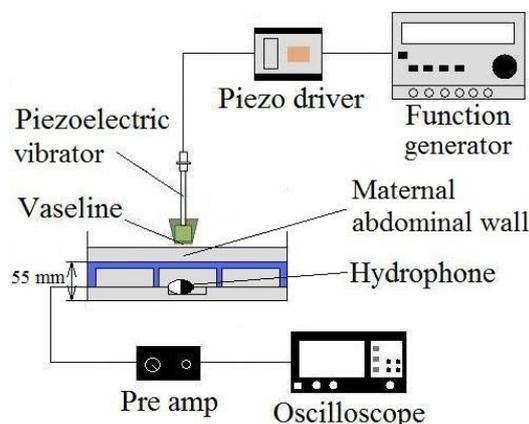


Fig. 2 Maternal abdomen model

周期性を算出する。このように検出された胎児心拍数図から与えた音刺激に対する変化を観察する。

被験者として3人の妊婦に協力してもらい、被験者1は妊娠31、33週、被験者2は妊娠36週のみ、被験者3は妊娠34、36、37週において計測を行った。全ての計測はシールドルームにて、母体がリラックスした状態で行った。

予め超音波画像診断装置を用いて胎児の心臓と頭部の位置を確認し、Fig. 1のように心臓真上の母体腹部表面に胎児監視装置の超音波トランスデューサを置いた。最初に胎児心拍数基線を求めるため、音刺激を加えず、胎児が安定している状態で10分程度心拍を計測した。

音刺激装置として圧電素子(AE1414D16F、NEC)を用い、骨伝導音を与えた。Fig. 1に示すようにファンクションジェネレータ(WF1944、nF回路設計ブロック)で発生させた電圧信号をピエゾドライバ(As-904、nF回路設計ブロック)により15倍に増幅し、圧電素子に入力した。圧電素子は後頭蓋、前頭蓋、側頭骨の真上の母体腹部表面に固定させた。

音圧は、Fig. 2に示したような腹部モデルを用いて求めた。母体内部は複雑で個人差が大きいため、個々に合ったモデルを作成するのは困難である。そこで、数値が分かっているものは考慮し、個人差は単純化して母体内部を単純な構造のモデルとした。子宮壁と胎児との空隙をタッパー(プラスチック製、容量4200 ml)で模した。その底面中央部を胎児の聴覚器官付近とし、水中マイク(H2a、AQUARIAN AUDIO PRODUCT)をマイク部分が中央部にくるように設置した。タッパー底面からの振動を直接計測しないように、スポンジ(天然ゴム製、寸法:53×48×10 mm)を水中マイクの下に敷いた。羊水として水道水を用い、タッパーに入れた。日本産科婦人科学会では、妊娠時期を問わず羊水量が800 mlを超える場合を羊水過多としている。そこで、水量を750 mlとした。また、子宮腔内で最も深い羊水スペースは正常で10~80 mmのため、母体の腹壁を模したスポンジ板材(天然ゴム製、寸法:270×190×20 mm、以下、腹壁スポンジ板材)の

底面と、タッパーの底面との距離は 55 mm とした。この距離を維持したままタッパー内の体積を 750 ml にするために、タッパー底面にスポンジ板材（天然ゴム製、寸法：255×180×20 mm、板材中央部に 53×48×20 mm の穴を開けたもの）をはめて固定した。さらに、スポンジブロック（天然ゴム製、寸法：75×50×25 mm）を 8 個設置した。腹壁スポンジ板材を、タッパーに蓋をするようにはめて固定した。その際、腹壁スポンジ板材と水道水との間に空気が入らないようにした。このモデルを用い、圧電素子入力電圧と母体腹部モデル内に発生する音圧を計測し、圧電素子入力電圧と母体内発生音圧の推定値を求めた。ここでは、胎児が感知しやすいと考えられる低周波数として 500 Hz、子宮内の環境音と異なると考えられる高周波数として 2 kHz と 3 kHz の音刺激を用いて聴力評価を行うものとし、それぞれの周波数に於ける母体腹部内発生音圧の推定値を Table 1 にまとめた。音刺激は 2 ms のバースト音を 50 ms 間隔で合計 4 秒間入力した。また、音刺激により変化した心拍が心拍基準線に再び戻るまで待つてから次の計測を行うため、音刺激の間に最低 3 分の間隔を置いた。

Table 1 Sound stimuli of the present study

Frequency [Hz]	Amplitude [Vp-p]	Sound pressure of abdomen model [dB]
3000	0.016	42
2000	0.016	50
	0.125	60
	1.0	70
500	0.016	52
	0.125	66
	0.5	77

### 3.3.3.2 分析方法

胎児の子宮内音環境より大きい音圧の音刺激を与えているため、交感神経線維を刺激し一過性頻脈が観察できると考えられる。一過性頻脈は、心拍数の上昇開始から 30 秒以内に 15 bpm 以上増加し、元に戻るまでの持続時間が 15 秒以上 2 分未満のものをいう。正常胎児の生理作用に起因する一過性頻脈は、特に刺激を加えない場合でも 10 分に 1 回以上見られる。それらに対して、音刺激に対する反応としての一過性頻脈を区別する必要がある。胎児心拍基線細変は 6~25 bpm までを中等度と定義されているため、本研究では、一過性頻脈の最大値が最初に求めた胎児心拍基線より 25 bpm 以上の増加があった場合を、音刺激に対して反応したものと定義する。また、音刺激を与えてから 1 分以内に一過性頻脈が見られたもののみを音刺激に対する反応があったものと判断する。

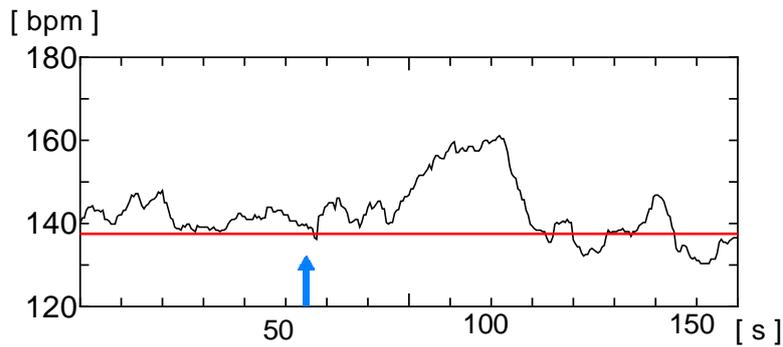


Fig. 3 Fetal heart rate tracing of 36 gestational age (GA)

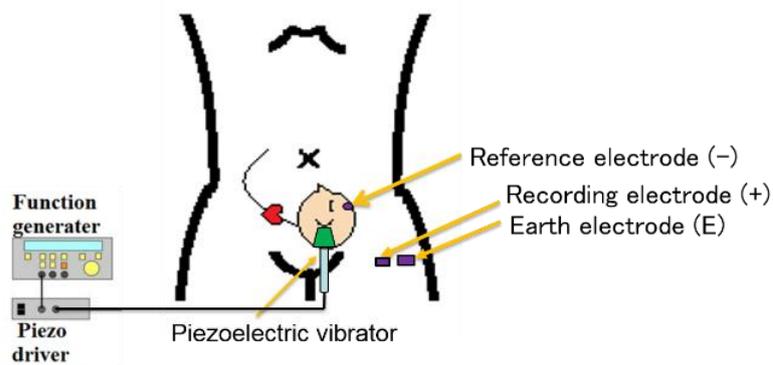


Fig. 4 Measurement system of fetus AER

### 3.3.3.3 結果および考察

結果の一例として、被験者3の妊娠36週に2 kHz 50 dBの音刺激を与えたときの心拍数図をFig. 3に示す。図の赤線は最初に求めた胎児心拍基線である。また、青の矢印は音刺激を与えた時間を表す。このように音刺激を与えてから1分以内に胎児心拍基線より25 bpm程度増加しているため、音刺激への反応として一過性頻脈が観察できたと考えられる。

同様にすべての計測に対して分析を行った結果、妊娠36週以降に音刺激に起因すると考えられる一過性頻脈が観察できた。しかし、音圧の変化と反応の関係は明確ではなく、500 Hzの音刺激への反応も明確ではなかった。

### 3.3.4 聴性誘発反応を用いた胎児聴力評価法の検討

#### 3.3.4.1 計測方法

聴性誘発反応(Auditory Evoked Response；以下AER)は、脳の表面や頭皮上に装着した電極から誘導される、音刺激に対応した脳波変動である。背景脳波などのノイズ除去のため、誘導された脳波を1000回以上同期加算平均すると、10 msの間に5~7個の波形が得られる。

被験者として2人の妊婦に協力してもらい、被験者1は妊娠36週のみ、被験者2は妊娠33、35、36週においてAER計測を行った。ノイズを低減するため、シールドルームにて、母体がリラックスした状態で行った。

本研究では、胎児に直接電極を貼れないためFig. 4のように予め超音波画像診断装置を用いて胎児の頭部の位置を確認し、関電極を頭部の真上の母体腹部表面に貼った。また、不関電極は胎児の脳波によってその部位の電位が影響を受けないものと考えられる母体の骨盤、または大腿に貼り、アース電極は不関電極の脇に貼り計測を行った。電極のインピーダンス値に差が生じないようにし、かつ値が小さくなるように留意した。

音刺激装置は2.1と同様のものを用い、70 dBのクリック音を2 ms与えた。音刺激を与えてから100 msの間の脳波を計測した。また、コントロール群として音刺激を与えていない場合の波形も同様に計測を行った。なお、AERは加算平均1000～1500回とし、再現性を見るため同じ場所で3回測定を行った。

#### 3.3.4.2 分析方法

AERによる胎児の聴力評価を行うに当たり、コントロール波形と音刺激を与えた場合の波形を比較し異なる特徴を見出す必要がある。また、複数計測の結果からその再現性を評価し、信頼度を確認する必要がある。そこで、3回測定したデータで2通りの相関分析を行う。ここでは、電圧波形そのものの相関を取る方法(方法1)と、電圧波形の傾きの変化に対して相関を取る方法(方法2)の2通りでその類似性を評価した。

#### 3.3.4.3 結果および考察

結果の一例としてFig. 5に妊娠36週において計測を行った被験者2人のAER波形を示す。

3.3.4.2の2方法により再現性があると判断された時間帯の平均相関係数をグラフの下に棒グラフとして表す。黒は方法1での結果、赤は方法2での結果を表す。また、図の上の黒線は刺激音を入力していないコントロールの波形、赤線は3回測定結果の平均値波形、青線3本は3回の計測結果を重ねて表したものである。ただし、0～3 msの大きい電位変化については、音刺激装置によるノイズの混入と考えられるため、相関は高いが無視した。これらの結果から、コントロール波形とは異なる特徴を持ち、かつ再現性がある領域は赤い四角で囲んだところである。被験者1と2の妊娠36週における領域が似ていることがわかる。

一方、同一被験者2において、各週齢における計測結果の比較を同様にFig. 6に示す。太線は各週齢の3回測定の平均値波形である。最初の2 msは音刺激によるノイズの影響として同様に無視できるが、35週においてはその影響が特に大きかったため、約5 msまでの相関は無視する。妊娠33週においては、全般的に相関は高いが、波形自体には平坦で特徴が見られなかった。35週、36週においては、四角で囲んだところに特徴的な波形があると考えられる。このように特徴的な波形は妊娠35週以降にみられ、その潜時にずれが生じた。これは、未熟児や新生児の双

極誘導 AER の潜時が成人より全般的に遅れており、成長に伴い成人の値に近づくことが原因として考えられる。

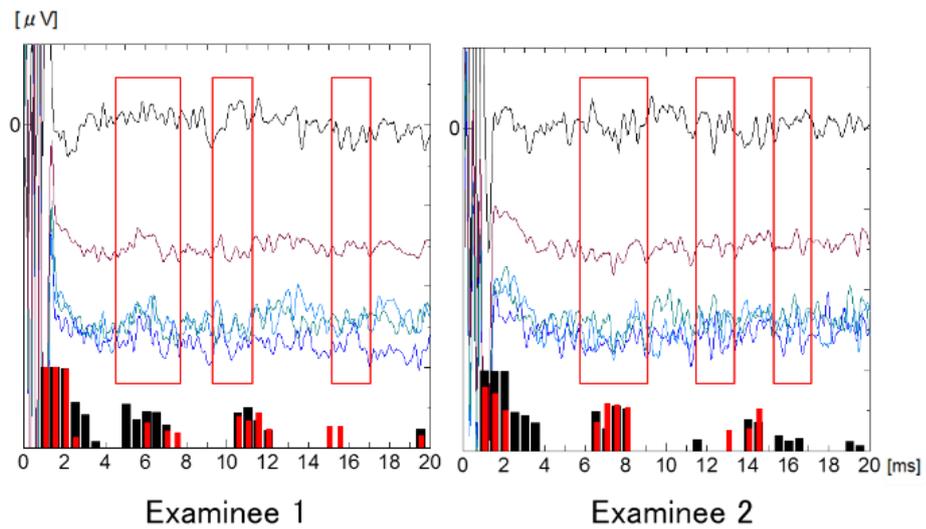


Fig. 5 AER wave form of 36 GA (examinee 1 and 2)

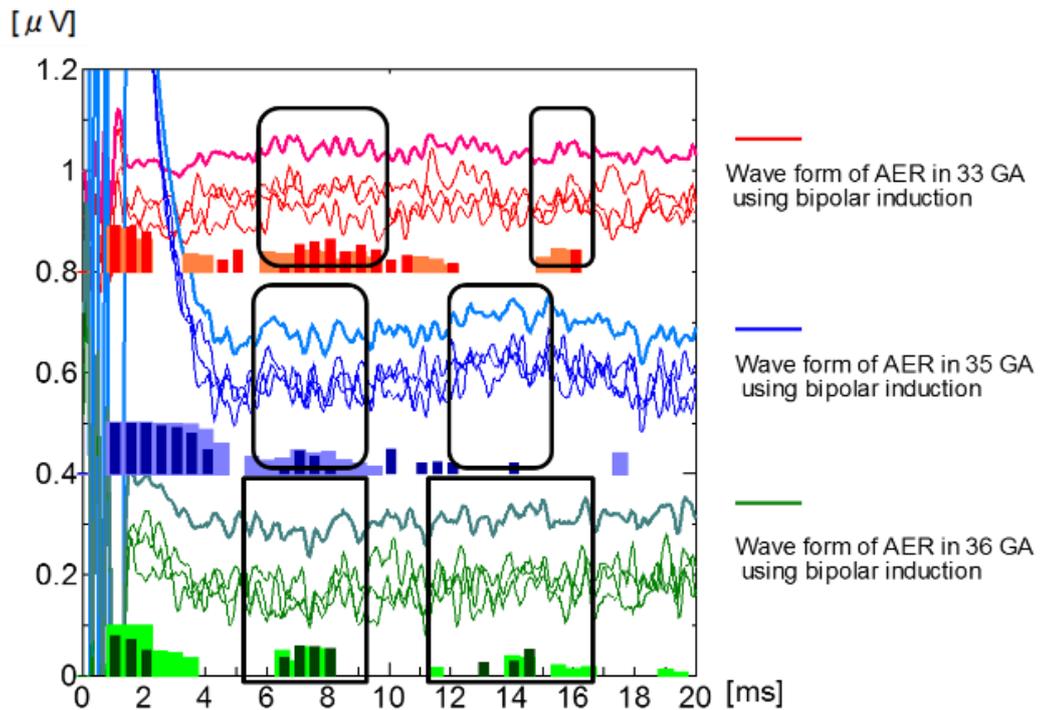


Fig. 6 AER Wave form of 33, 35, 36 GA (examinee 2)

### 3.3.5 結言

胎児の聴力評価法として、音刺激に対する心拍数の変化を観察した結果、妊娠 36 週以降において、高周波数の音刺激に対する一過性頻脈が観察できた。また、AER を用いた脳波変動の観察の

結果、妊娠 36 週以降に特徴的な波形が見られた。よって、心拍数変化と AER を用いた胎生期における聴力評価は可能であると考えられる。

### 3.3.6 本研究課題と講義との関連

本プロジェクトは、大学院の授業科目である生体計測工学特論と関連しており、生体計測工学特論受講学生が本プロジェクトで使用する実験設備の一部を用い、実際にヒトを対象とした体表振動計測、脳波計測、音波計測など、振動波形取得実験を体験することで、生体計測工学分野の実験の理解を促す試みをしている。今年度は 34 名の学生が受講した。その中には、普段生体を取り扱わない学生も多く受講しており、今回初めて生体計測を行ったという学生も散見された。本講義により、生体を対象とした実験特有の注意点などを理解させることが出来た。来年度も引き続き、座学に加え、実験実習を出来るだけ多く取り入れ、生体信号計測について学生が深い理解を得ることが出来るよう、努力・工夫していきたい。

### 3.4 ボストン大学研究交流プロジェクト

#### 1 はじめに

本書は、3月16日（月）から23日にかけて行われたボストン大学交流プロジェクトについての報告書である。

#### ボストン&ボストン大学について

ボストンはアメリカが独立した際の構成州、独立13州のうちの1つであるマサチューセッツ州の州都である。ボストンには2つの顔があり、1つはアメリカ独立、2つ目は学園都市の顔である。

独立にいたる中でボストンは大きな事件の起きた場所であり、ボストン茶会事件や、アメリカ独立戦争が始まる契機となったレキシントン・コンコードの戦いなどは非常に有名である。そして独立戦争にまつわる史跡を16箇所つないだ赤いラインがフリーダムトレイルであり、この赤い線に沿って歩いていくとボストンの有名な観光地を回れるようになっている。

ボストンにはハーバード大学やマサチューセッツ工科大学（MIT）をはじめとする大学が約60あり、多くの学生がいる学園都市としても知られている。そのためか、アメリカ国内では比較的安全な都市であるといわれている。これらの大学には世界から優秀な学生が集まり、また優秀な人材を世界に供給している。また、これらの二大学を挟んだチャールズ川の対岸に今回訪れたボストン大学がある。生徒数が約3万人、その半数が学部で半数が修士および博士課程である。100近い国からの学生が在籍しており、9つの学部等に分かれ、ハーバードよりも学生数は多い。今回はボストン大学のWang先生のご協力をいただき交流プロジェクトを行った。



Figure 2 ボストン大学と地下鉄 T



**Figure 3** ハーバード大学正門

また、ボストンは海と面しているため海鮮料理が美味である。特にロブスターやクラムチャウダーは有名であり、我々もロブスターロール、クラムチャウダー、オイスター（牡蠣）、ムール貝などを食べることができ、ボストンの食事を大いに堪能した。

さらに、ボストンレッドソックスのホームグラウンドであるフェンウェイパークを訪れただけでなく、世界中の貴重な美術品の数々がそろっているボストン美術館（Fine of Arts）も見学することができた。



Figure 4 ロブスターロール



Figure 5 ユニオンオイスターハウスの  
牡蠣



Figure 6 フェンウェイパーク



Figure 7 ボストン美術館

## 2 出発前後の準備

出発前の段階で、ボストン大学で研究発表をするためのパワーポイント資料の作成、ESTAの申請、パスポートの取得を行った。また、昨年度と同様に今年もモバイル Wi-Fi をレンタルし、羽田空港で受け取った。レンタルの際に Wi-Fi には 1 日あたりの利用制限が決められているとの記載があり、それを超えると回線速度が遅くなるため、大容量タイプを選択した。しかし、実際にはモバイル Wi-Fi を使用している時間は短く、大容量タイプにしなくても問題は無かったと感じているが、Wi-Fi 自体は必須でありレンタルすることが推奨される。

そのほかで有用な持ち物として、パスポートケースやホテル内で使用するための携帯用スリッパなどが挙げられる。またホテルによっては、歯ブラシが無いことがあるため持参すべきである。

スマートフォンの利用法について調べておき、いわゆるパケ死をしないように基本的に機内モードにしておくなどの海外ならではの使い方を理解しておくべきである。

## 3 ボストン大学での交流内容

### 3.1 発表

#### 3.1.1 「Visual Image Reconstruction from EEG and Introducing other BMI Works in our Laboratory」

##### 研究概要

##### Visual Image Reconstruction from EEG

我々は、視覚像再構成を BCI へ応用した、見ている形状をトリガーとする BCI を提案する。そのために、本研究では、頭皮に 12 チャンネルの電極を塗布し、それらで計測される脳波から、V1 内の電流密度を推定し、視覚像再構成を行った。再構成される画像は、3×3 のパッチから構成される 2 値画像(29=512 通り)であり、100 枚のランダム画像の提示により得た脳波を学習することで、再構成画像を得た。健常な 6 人の被験者に対して画像を再構成したところ、6 人の平均で 80.5[%]程度の精度であった。この値は、被験者を選ばずに、9 個のパッチの内、7 個以上が正しく再構成されていることを示している。この結果は、たった 12 チャンネルの脳波からでも、視覚像の再構成が可能であることを意味すると同時に、脳機能計測器やチャンネル数の観点から、リーズナブルなシステムが要求される BCI へも、応用が十分可能であることを示している。

##### Introducing other BMI Works in our Laboratory

ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) を用いた BMI を構築することで、携帯型 BMI の構築を目指す。さらに、開発した携帯型 BMI システムの適用事例として、マイクロヘリコプタの操縦タスクを通して本開発シ

システムの有効性を示す。本システムは、被験者の個人的 技能によらず、トレーニングをまったく行っていない初心者でも簡単に利用可能であることも実験において示す。

また両眼視野闘争とは、両眼に異なる視覚刺激を提示した 際に、時間と共に左右眼の見えが次々と交替して知覚される現象である。両眼視野闘争時において、左右の眼に別々の時間周波数の視覚刺激を与えた場合、定常状態視覚誘発電位 (SSVEP) は、知覚された視野闘争と同期して、交互に増減する。本研究ではより高精度な両眼視野闘争の知覚交替推定手法を検討する。

発表内容

- ・ SSVEP における脳波の特徴
- ・ レチノトピックマップの特性
- ・ Loreta の導入意義
- ・ 視覚像再構成の結果
- ・ SSVEP を適用した HMD システムマイクロヘリコプタの操縦
- ・ 両眼視野闘争について
- ・ 両眼視野闘争推定アルゴリズム
- ・ 両眼視野闘争推定結果



Figure 8 1回目発表



Figure 9 2回目発表

発表風景と質疑応答

発表は Wang 先生，田中一男先生，田中基康先生とボストン大学の学生の前で行った。活発な質疑が行われ研究への理解が深まった。

### 3.1.2 「Powered paraglider research project」

研究概要

近年では、自律型無人飛行機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) の研究が軍事、民間を問わず盛んに行われている。UAV は軍事利用をはじめとして、領域監視、

災害地における救助支援，物資輸送などに応用されている．UAV の研究対象の多くは回転翼機や固定翼機であり，制御不能に陥った際に危険である．そこで本研究では動力付きパラグライダー（Powered para-glider, PPG）に注目し，研究を行っている．

PPG は風の影響は受けやすいものの，パラグライダー特有のキャノピーと呼ばれる翼を持っており，動力を失った場合であっても低速で滞空しながら着陸することができるため比較的安全である．また，キャノピーは折りたたみ可能であり携行しやすい．飛行速度が小さく，小回りできるため狭い範囲での観測も得意である．

本研究では PPG の自律飛行による情報収集システムの構築を目的として，PPG のモデリング，制御系設計，マイコン・センサ周りなどのハードウェアの環境構築を行う．

#### 発表内容

本研究室で研究しているファジィ制御理論を飛行ロボットに適用した例として動力付きパラグライダーの研究発表を行った．

- ・ PPG の概要：PPG の他の UAV との比較を行い，メリット・デメリットを示した．また，PPG の操縦/制御の方法を示した

- ・ PPG に搭載されているマイコン・センサ類の説明と地上モニタリングシステム = Mission Planner の説明を行った．

- ・ モデリングおよびロバスト安定な制御系設計

本研究室では 3 次元 6 自由度のモデルを導出し，制御器に使用するモデルとして高度モデルと方向モデルの各 3 自由度モデルを使用している．高度方向と方向モデルを揚力係数と抗力係数に不確かさを含む T-S ファジィモデルで置き換えた後に，推力と方向舵のチルト角の 2 つの制御入力を出力するロバスト安定なコントローラ的设计を行った点について説明を行った．

- ・ 自律飛行/自動着陸

モデリング，コントローラ的设计の後に，実際に Waypoint を設定して PPG を自律飛行させた実験例を示した．自動着陸については Waypoint の高度を徐々に下げることによって実現していることを示した．

発表風景と質疑応答



Figure 10 発表の様子

Wang 先生との質疑応答は逐次行われた。質問内容は PPG の大きさや固定翼機との制御の違いは何かを理解しているかという質問であった。また、自分の研究と他者との研究を区別して説明したほうが、質問もしやすいので区別してほしいという要望があった。

### 3.1.3 「田中研究室の非線形制御の研究に関するプレゼンテーション」

#### 研究概要

ファジィモデルに基づく非線形制御は当田中研究室で行われている研究テーマのひとつである。ファジィ制御は、**semi-definite programming tools** を使って制御系設計が可能であるため、他の非線形制御手法と比べて取り扱いが容易であるという特徴を持っている。ファジィモデルに基づく非線形制御は、非線形システムを **T-S** ファジィモデルへと書き換えることから始まる。**T-S** ファジィモデルに基づき安定条件、安定化条件、ロバスト設計条件等が導出されており、このような条件は線形行列不等式(**Linear Matrix Inequality, LMI**)を用いて記述され解くことができる。また近年では、**T-S** ファジィモデルを拡張形式である多項式ファジィモデルに基づく制御に関する研究が行われている。多項式ファジィモデルによって得られた安定条件等は、二乗和(**Sum of Squares, SOS**)によって記述され、解かれる。現在、当研究室ではファジィ制御に関して三種類の研究が行われている。

#### 発表内容

- ・ Relaxation of stabilization conditions on basis of polynomial Lyapunov function

多項式リアプノフ関数を用いた凸な SOS 安定化条件の導出を示した。得られた安定化条件に対して、従来研究と同等の結果が得られたことを説明した。また、多項式リアプノフ関数を用いることで条件の緩和が期待されるが、実際には二次リアプノフ関数を用いた場合と比較して解が得られなくなっているという問題についても説明を行った。

#### ・ Stabilization Analysis of Polynomial Fuzzy Systems using Control Lyapunov Functions

Control Lyapunov function (CLF) を用いた SOS 安定化可能条件導出は従来研究において行われているが、非線形システムが多項式に限られるという問題があった。そこで多項式ファジィモデルを用いることで一般的な非線形システムに対しても control Lyapunov function の概念を適応し、安定化可能条件を導出できることを示した。また、導出された条件に対してベンチマーク問題を適用することで有効性を示した。

#### ・ On higher order derivatives of Lyapunov functions of fuzzy systems

高次微分要素を含むリアプノフ関数を用いた安定解析は従来研究においてはシステムが多項式に限られていた。そこで多項式ファジィモデルを組み合わせて、一般的な非線形システムに対する安定条件の導出を示した。また、例題を通して提案手法が従来手法よりも優れていることを示した。

#### 発表風景と質疑応答

発表は Wang 先生、田中一男先生、田中基康先生、UEC 学生二名の前で行った。質疑は、CLF とリアプノフ関数の違いや Positivstellensatz についてなどを聞かれた。自分の理解が及ばない点があり、うまく答えられないことが多々あった。しかし全体の発表を通して自分が理解できていない部分がどこであるのかが明白になったため、大変有意義な議論であった。



Figure 11 発表の様子

## 3.2 授業参加

### 3.2.1 Nonlinear systems

計二回の講義を受講した。いずれの講義も Khalil の「Nonlinear Systems」の四章に基づき行われていた。一回目の講義では、漸近安定や一様安定などの様々な安定性に関する内容やリアプノフ方程式と安定性の関係について述べられていた。二回目の講義では、引き続きリアプノフ方程式と安定性に関して講義を行い、フルヴィッツ行列と絡めた内容を説明された。また講義中、学生からは積極的に質問がなされていた。わからない点があれば講義中でも質問を行うという、日本ではあまり見られない光景は大変印象に残った。



Figure 12 Nonlinear Systems の授業の様子

### 3.2.2 Aerodynamics

講義名は Aerodynamics であるが、講義の内容は古典制御のラプラス変換と各種の信号応答に関する講義であった。ラプラス変換の定義から説明し、入力信号と出力信号から伝達関数が計算できることなどを説明していた。伝達関数を部分分数分解することは時間信号を求める上で必要なテクニックであるが、その係数を手早く求める方法が紹介されたので示す。

例 1 :  $G(s) = \frac{s}{(s+p_1)(s+p_2)}$  を考える。

$G(s) = \frac{s}{(s+p_1)(s+p_2)} = \frac{A}{s+p_1} + \frac{B}{s+p_2}$  と部分分数分解する。

A を求める → cover-up  $(s+p_1)$  をかけて  $s=-p_1$  を代入する。

$$\frac{-p_1}{(-p_1+p_2)} = A$$

B を求める → cover-up  $(s+p_2)$  をかけて  $s=-p_2$  を代入する。

$$\frac{-p_2}{(-p_2+p_1)} = B$$

例 2 :  $G(s) = \frac{as^2+bs+c}{(s+p_1)^2(s+p_2)}$  を考える。

$G(s) = \frac{as^2+bs+c}{(s+p_1)^2(s+p_2)} = \frac{A}{(s+p_1)^2} + \frac{B}{(s+p_1)} + \frac{C}{(s+p_2)}$  と部分分数分解

する.

A,C の求め方は先ほどと同様である. B の求め方は  $s$  をかけて  $s \rightarrow \infty$  とすることにより,  $a = B + C$  とすることができ, B が求められる.



Figure 13 Aerodynamics の授業の様子

### 3.3 研究室およびミーティング見学

研究室にはたくさんの UAV が置かれていた. ミーティングでは, ホワイトボードを使って教授と学生が活発に議論を交わしていた光景が大変印象に残った.



Figure 14 研究室の様子



Figure 15 研究室にあった多数の UAV



Figure 16 ミーティングの様子

### 3.4 セミナー参加

- ・ Microrobotic Platforms in Bioengineering and Translational Medicine (Mahmut Selman Skarar)

話のあらすじとして医療に用いるマイクロロボットの開発, および再生医療の

展望であった。ロボットの大きさはマイクロオーダーと非常に小さいサイズであり、作成で困難である。そのサイズのロボットである場合でどのような機構、形のロボットが最適であるかという話であった。またその後再生医療についてどのように損傷箇所の修復を実現するかという話であった。後半は理解がしづらくあまり理解をその場で行うことができなかった。また総じて意見の提案であり具体的な医療現場への応用結果が示されておらず、結果によるフィードバックに興味がある。

### **Junior Faculty Candidate Lecture Series: March 20, 2015, Mahmut Sakar, ETH Zurich**

Friday, March 20, 2015 at 11:00 AM to 12:00 PM  
110 Cummington St., Room 245



**Mahmut Sakar**  
Senior Research Scientist, ETH Zurich

#### **Microrobotic Platforms in Bioengineering and Translational Medicine**

Biological systems are exquisitely sensitive to the location, dose and timing of physiologic cues and drugs. This spatiotemporal sensitivity necessitates the development of bioengineering platforms that can apply well-characterized local signals to understand fundamental principles of cellular behavior and to create novel therapeutic approaches for minimally invasive medicine. Microrobotics is a relatively young field in which materials science and microelectromechanical systems (MEMS) technology meet robotics creating the next generation complex machines operating in three-dimensional microenvironments. In this talk, I will present the design and fabrication of untethered magnetic microrobots for targeted and triggered therapy. Several examples will be demonstrated to explain how microrobotic technologies can be utilized to introduce compact and versatile bioengineering platforms. These platforms will be able to perform automated micromanipulation on biological samples with high dexterity and precision and provide critical mechanistic insight on the generation, transmission and coordination of cellular forces during development, regeneration and performing physiological function.

**Mahmut Selman Sakar** received the B.S. in Electrical and Electronics Engineering with honors from Bogazici University in 2005 and the Ph.D. in Electrical and Systems Engineering from University of Pennsylvania in 2010. During his doctoral studies, he worked on microrobotics and single cell manipulation under the supervision of Prof. George J. Pappas and Prof. Vijay Kumar. Before joining Institute of Robotics and Intelligent Systems in 2012, he worked as a postdoctoral associate with Prof. Harry Asada in the Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology on the generation and optogenetic control of engineered skeletal muscle microtissues. Currently he is a senior research scientist in Prof. Bradley Nelson's laboratory at ETH Zurich and he is working on the development of microrobotic platforms for several bioengineering applications.

Faculty Host: **Sean Andersson**  
Student Host: **Yufan Lo**

**Figure 17** セミナーのポスター

#### ・ Tractable Bayesian Nonparametric Algorithms for Robotic Applications (Jonathan How)

機械学習についての講演である。計算精度と学習データに依存をすることが機械学習の課題であるがこの課題に対して **Bayesian Nonparametric Algorithms** による条件の緩和についてである。こちらの話もあまり内容を聞き取ることができず、数式等のスライドしか理解を行うことが出来なかった。機械学習の手法が非常に多くどの学習方法によりどの場面が適しているか様々であるのでそのような点からも理解を行いたいセミナーであった。

## March 20, Jonathan How, MIT

Friday, March 20, 2015 at 3:00 PM to 4:00 PM  
8 St. Mary's Street, PHO 210



Jonathan How  
MIT

### Tractable Bayesian Nonparametric Algorithms for Robotic Applications

Bayesian nonparametrics (BNPs) — a class of Bayesian models for which the structure of the model is flexible and influenced by observations — have become a topic of major interest in recent years, as they provide a means for probabilistic inference without requiring strong a priori structural assumptions about the model. However, as the majority of applications of BNPs have been purely machine learning endeavors, the inference methods that have been developed to-date have required extensive and reliable computational and network resources (as those resources are typically not of primary concern in machine learning applications). This talk, in contrast, will explore two inference algorithms that were originally motivated by robotic applications, where computational and network resources are potentially unreliable and limited. The first algorithm focuses on reducing computational load by employing a low-variance deterministic model approximation, while the second focuses on extending distributed inference to decentralized networks where communication is unreliable and often ad-hoc. Applications in real time surface normal clustering, dense 3D object segmentation from monocular video, and human segmentation in point clouds will be presented. The talk will conclude with a showcase of results using a new projector system, known as the Measurable Augmented Reality for Prototyping Cyber-Physical Systems (MAR-CPS), with which we visual augment the robotic demonstrations (e.g., multi-agent planning and learning algorithms) in our motion-capture facility.

Dr. Jonathan P. How is the Richard C. Maclaurin Professor of Aeronautics and Astronautics at the Massachusetts Institute of Technology. He received a B.A.Sc. from the University of Toronto in 1987, S.M. & Ph.D. from MIT Aeronautics and Astronautics in 1990 and 1993, respectively, and then was a postdoctoral associate for two years at MIT. Prior to returning to MIT in 2000, he was an Assistant Professor in the Department of Aeronautics and Astronautics at Stanford University. He is the Editor-in-Chief of the IEEE Control Systems Magazine and an Associate Editor for the AIAA Journal of Aerospace Information Systems. Professor How was the recipient of the 2002 Institute of Navigation Burka Award; a Boeing Special Invention award in 2008; the 2011 IFAC Automatica award for best applications paper; Recipient of the AIAA Best Paper Award from the 2011 Guidance Navigation and Control, 2012 Guidance Navigation and Control, and 2013 AIAA Infotech@Aerospace conferences; and he is an Associate Fellow of AIAA and a senior member of IEEE.

Faculty Host: Mac Schwager  
Student Host: Xi Yu

### Figure 18 セミナーのポスター

#### 4 終わりに

今回のボストン大学での交流を通じて、世界ではどんな研究をしているのかを直接自分の目で確かめることができた。ミーティングやセミナーにおいて意見交換が非常に活発に行われていたことは非常に印象に残っている事柄である。また、自らの研究の立ち位置も把握できたことにより、今後の研究に対するモチベーションも上昇し、大変意義のある交流であった。

最後にこのような経験を与えていただいた田中一男先生ならびに田中基康先生、ご協力くださったボストン大学の Wang 先生に感謝申し上げます。

## 4.大学院生による企画提案型プロジェクト研究

### 採択の方法と発表成果の概要

下記要領で大学院生による提案企画研究プロジェクトの公募を行ない、26年度は10件の応募があった。本メカノインフォマティクス・カデット教育プログラムの取り組み実施担当教員による提案内容審査の結果、下記のように予算配分を行い、各代表者のマネージメントの下、プロジェクト研究を開始した。研究結果は研究報告会で報告し、担当教員による質疑応答を行ない、今年度の進捗状況および次年度の課題を確認した。

### 平成 25 年度

提案・予算申請書提出期日： 平成 26 年 5 月 30 日（金）

研究提案ヒアリング： 平成 26 年 6 月 13 日（金） 13：15～15：45

電気通信大学 東 4 号館 8 階 AV 会議室

発表時間 1 件 15 分（8 分発表、7 分質疑応答）

提案プロジェクトタイトル・代表者・予算配分額：

1. 菊島達也 田中研 修士 1 年 170,000 円  
両眼視野闘争を用いた BMI(Brain-Machine Interface)への応用
2. 小倉大介 田中研 修士 1 年 210,000 円  
非線形制御系の Non-convex 設計条件解法アルゴリズムの  
提案と設計支援ツールの開発
3. 中島 瑞 田中研 修士 1 年 160,000 円  
へび型掃除ロボットの開発
4. 伊藤 唯 田中研 修士 1 年 210,000 円  
空からの情報収集を可能にする飛行ロボットの開発
5. 林 直輝 小池研 修士 1 年 190,000 円  
超磁歪素子を利用した埋め込み型骨導補聴器の開発  
～振動子の構造最適化および体外ユニットの開発～
6. 植木公威 明研 修士 2 年 170,000 円  
ダイナミックヒューマノイドロボットの開発

7. 佐藤圭吾      明研    修士2年            210,000 円  
                    生物模倣型脚移動ロボットの研究開発
  
8. 趙 文静      明研    博士                210,000 円  
                    圧電繊維複合材料を用いた生物模倣型ソフトロボットの  
                    研究開発
  
9. 入江優花      青山研 博士            230,000 円  
                    高粘度マイクロディスプレイシステムの開発
  
10. 菊地 綾      青山研 修士2年        160,000 円  
                    ペンシル型ハンドヘルド非接触マイクロニードルの  
                    位置制御機構の開発

プロジェクト研究報告会：

下記の通り研究報告会を行った。

平成 27 年 3 月 5 日（木）13:00～15:45

電気通信大学 東 4 号館 8 階 802AV 会議室

発表時間 1 件 15 分（10 分発表、5 分質疑応答）

# 成果報告書

## 4.1 両眼視野闘争を用いた BMI(Brain-Machine Interface)の応用

### プロジェクト概要

本プロジェクト名は「両眼視野闘争を用いた BMI(Brain-Machine Interface)の応用」である。

本プロジェクトに参加する学生は以下の 3 名である。なお指導教員を田中一男教授（知能機械工学科）と佐藤美佳准教授(筑波大学大学院リスク工学専攻)をお願いをした。

プロジェクトリーダー：菊島達也，知能機械工学専攻博士前期課程 1 年 田中研究室

プロジェクトメンバー：MORENO Saenz Jairo, Instituto Politecnico Nacional

プロジェクトメンバー：井上玲於，知能機械工学科 4 年田中研究室

指導教員：田中一男教授（知能機械工学科）

指導教員：佐藤美佳准教授(筑波大学大学院リスク工学専攻)

## 1. 研究目的

近年、脳と機械やコンピュータを直接つなぐインターフェース技術として、Brain-Machine Interface (BMI) や Brain-Computer Interface (BCI) に関する研究が注目を浴びている。手足の運動や言語機能に重篤な障害を持つ患者が、直接脳活動を測定することにより、他者と円滑に意思疎通を行えるようにするという観点から現在注目を浴びている技術である。また BMI の脳情報計測には、簡便であることから EEG(Electroencephalogram)が一般的である。EEG を用いた BMI は主に、定常状態視覚誘発電位 (SSVEP)、P300 事象関連電位、運動想起電位、に分類される。本プロジェクトでは、比較的識別の容易な SSVEP による BMI を構築することで、重度の身体麻痺者の生活の質,QOL (Quality of Life) を向上させることを目的とする。

## 2. 研究の有用性・独創性

本プロジェクトの有用性は、真に使用者目線に立ち、はっきりとした利用目的をもった

BMI システムの構築という点である。具体的には、使用者の自由度を高めるため識別クラスの改善を SSVEP ベースのインターフェースを考えている。このとき従来の SSVEP を用いた BMI では各々の刺激間を視野角で  $5^{\circ}$  程度離す必要がある。したがって、識別クラスが増えるほどそのインターフェースが占有する空間が大きくなるという問題点があった。そこで本プロジェクトでは視覚像再構成の技術を用いて、クラス識別の SSVEP による BMI を構築する。これによりインターフェースの空間的占有の問題を解決することができる。したがって、比較的識別の容易な SSVEP、多クラス識別、インターフェースの空間的占有の問題の解決の 3 点より、本システムは実際の使用に即した BMI であると言える。ここに本プロジェクトの有用性を見ることができる。

一方で本プロジェクトの独創性は、その BMI の構築手法に見ることができる。具体的には、SSVEP による両眼視野闘争の識別の例は類を見ない。ここに本プロジェクトの独創性を見ることができる。

### 3. 両眼視野闘争についての実験

#### 3.1 実験概要

本プロジェクトでは、両眼視野闘争を用いたインターフェースの開発をする。両眼視野闘争を行うための確認実験のシステムを図 1 に示す。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いた左右の目に異なる視覚刺激を提示する。被験者はたて縞が見えている場合はボタンを押し、よこ縞が見えている場合はボタンを外す。このタスクにより被験者からのフィードバックをもらう。またこの脳は計測をコンピュータを通して行った。

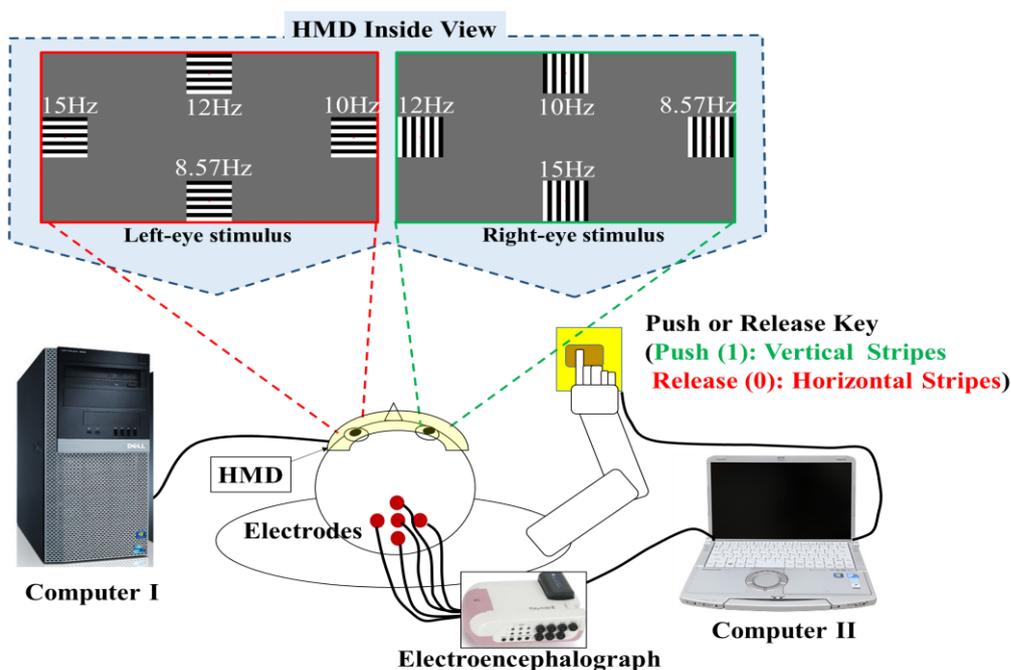


図 1 構築システムの概要

次に提示刺激について説明を行う。HMD を使用して、被験者の両眼に別々の周波数、グレーティングの刺激を提示し、被験者に両眼視野闘争を起こさせる。実験は2種類の刺激パターンについて20 トライアルの実験を行った。各トライアルで4種類の周波数の刺激を画面の十字に提示する。トライアルの内容は、被験者に各刺激を時計回りに順々に注視することで行う。4[s]のインターバルの間に注目する刺激へ視線を移し、音声による合図が出たら12[s]の注視をし、これを4種類の周波数の刺激に対して行うことを1 トライアルとした。図2にその様子を示す。

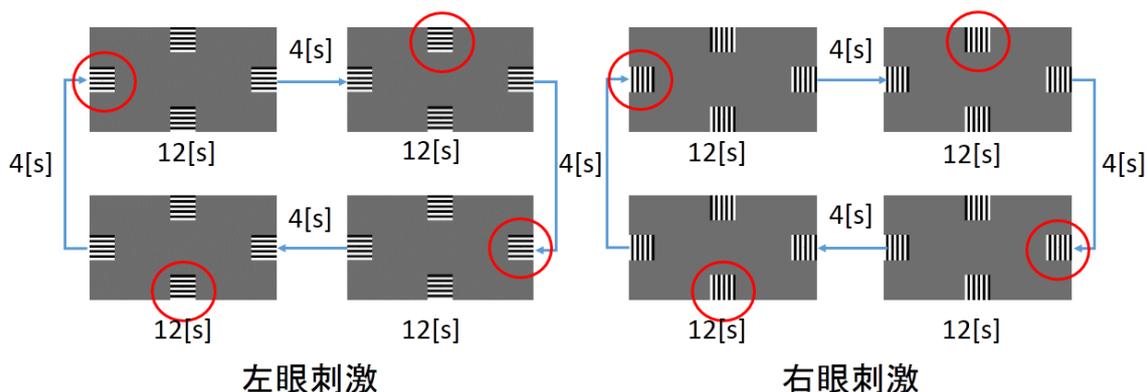


図2 視覚刺激の様子

また提示される視覚刺激は図3、図4とした。SSVEP で使用される視覚刺激は文献 [1]と同様にし、グレーティングを  $2.0[\text{cycle/deg}]$ 、大きさを  $10[\text{deg}]$  とする。また、パターン反転周波数は  $8.57[\text{Hz}]$ ,  $10.00[\text{Hz}]$ ,  $12.00[\text{Hz}]$ ,  $15.00[\text{Hz}]$  の4種類とした。

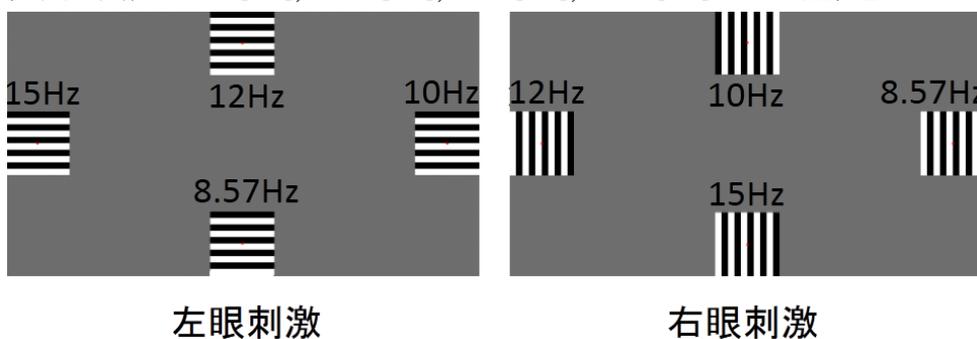


図3 応用手法 1 両眼に白黒によるパターン刺激

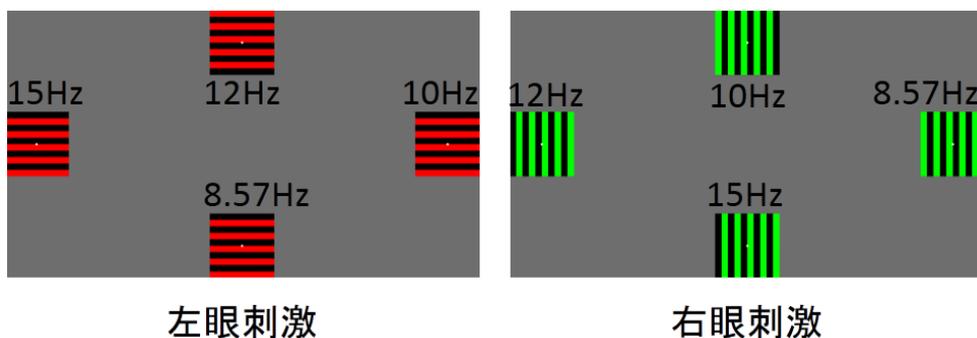


図 4 応用手法 2 両眼に赤緑によるパターン刺激

### 3.2 解析結果

計測をした脳波に対してラプラシアンフィルタを施したのち、短時間フーリエ変換 (STFT) により、時間周波数解析を行った。ここで、STFT は FFT データ長 3000[ms]、オーバーラップ 2992[ms] のハミングウィンドウを掛け、サンプリング周波数を 1000[Hz] とした。

文献[2]では、両眼視野闘争時において、視覚刺激が優位である眼に関する誘発電位が増加し、視覚刺激が優位でない眼に関する誘発電位が減少することを利用し、2 つの刺激周波数におけるパワースペクトルの差から、両眼視野闘争の知覚交替を推定できると主張した。しかし、本研究は 2 つの刺激周波数におけるパワースペクトルの差ではなく、2 つの刺激周波数におけるパワースペクトルの差の加速度に注目した。

まず STFT 後の 2 つの刺激周波数におけるパワースペクトルの抽出を行う(図 5(a))。次に 2 つの刺激周波数におけるパワースペクトルの差を取り、2 次カットオフ周波数 12[Hz] のバターワース型のローパスフィルタを掛け、波形を滑らかにする (図 5(b))。滑らかにした波形にした 2 つの刺激周波数におけるパワースペクトルの差を 2 階微分し、変曲点を求める (図 5(c))。変曲点を知覚交替のタイミングとして、両眼視野闘争の知覚交替を推定を行った。

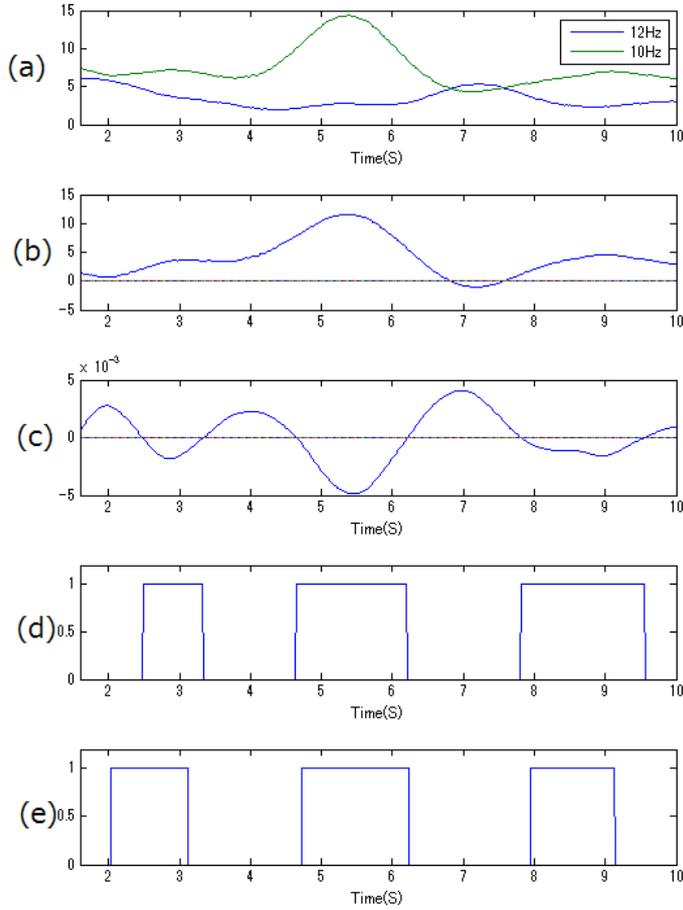


図5 知覚交代推定の画像

応用手法と文献 [2]による手法の比較の指標として，脳波から推定した両眼視野闘争の知覚 (Fig.5(d))と被験者からのフィードバック (Fig.5(e))における，信号の類似度合いを示す相互相関係数を使って評価する．被験者からのフィードバックを  $x(t)$ ，脳波から推定した視野闘争の知覚を  $y(t)$ とおくと，相互相関係数  $R_{xy}$ は以下のように定義される．

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-1/T}^{1/T} x(t)y(t + \tau)dt$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{C_x(0)C_y(0)}$$

ここで，文献 [1]を参考に被験者が視野闘争を知覚してから，ボタンを押すまでの反応時間を  $\tau_{act}$  を以下のように定義した．

$$R^{\max}(\tau) = \max_{-1000 < \tau < 1800} \frac{C_{xy}(\tau)}{C_x(0)C_y(0)}$$

$$\tau_{act} = \tau \quad s.t. \quad R^{\max}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{C_x(0)C_y(0)}$$

4人の被験者に対して実験を行った。被験者は全員健康な男性、20代前半、右利きである。図3及び図4の4つの刺激に対する応用手法と文献[2]による手法の相関係数の平均及び標準偏差を図6、図7に示す。

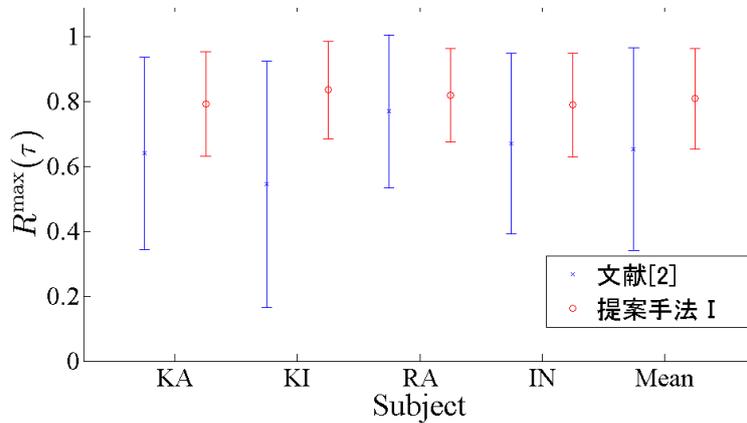


図6 応用手法1の相関係数及び標準偏差

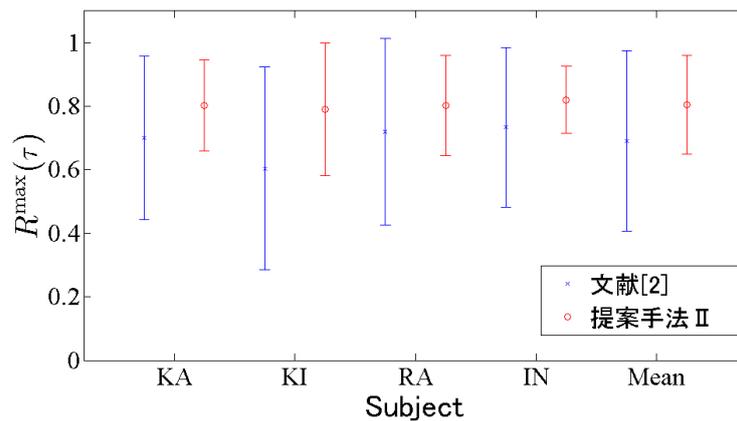


図7 応用手法2の相関係数及び標準偏差

図2の実験における、被験者4人の文献[2]による手法及び応用手法の相関係数について、有意水準5%のt検定を行った結果、p値が0.0182となり、有意差があると言える。また、図3の実験についてはpが0.0569となり、有意差があるとは言えなかった。図2の実験と図3の実験結果に差が出た理由としては、図2の実験における視覚刺激の方がコントラスト比が高いためだと言える。

#### 4. 視野闘争を用いたBMIの応用

応用手法1において両眼視野闘争の推定を行った。次にこの手法を用いたBMIシステムを応用する。本システムの流れは図8となる。本システムはHMDを使用し、視覚刺激および外の様子をユーザに提示し、脳波計で脳波を計測し、電動車椅子を操作する。



図 8 実験システム

HMD でのインターフェース HMD で提示される視覚刺激は図 9 のようになる。車椅子の 4 方向に動けるように、視覚刺激を 4 つ使用する。

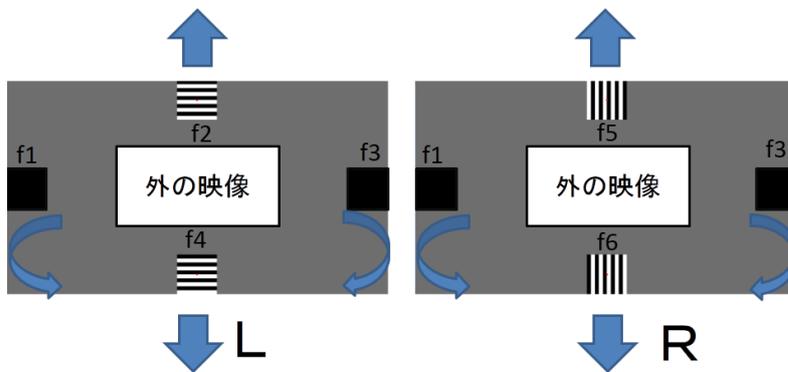


図 9 HMD での提示画像

右旋回左旋回に関しては、視野闘争を起こさず、左右の眼に対応するブロックには同じ周波数の視覚刺激を行なう。また、前進後退に関しては、視野闘争が起きるように、視覚刺激を行い、左右の眼に対応するブロックには異なる周波数とする。そして、視野闘争が起きた数に応じて車椅子の進む距離を決める(図 10)。視野闘争はユーザが知覚でき、脳波にも傾向が現れるため、ユーザが視野闘争を起きた数が分かる。この性質から、視覚刺激から眼を離す、眼をつぶる等を行なえば、一定時間内の視野闘争が起こる回数をユーザが制御できる。

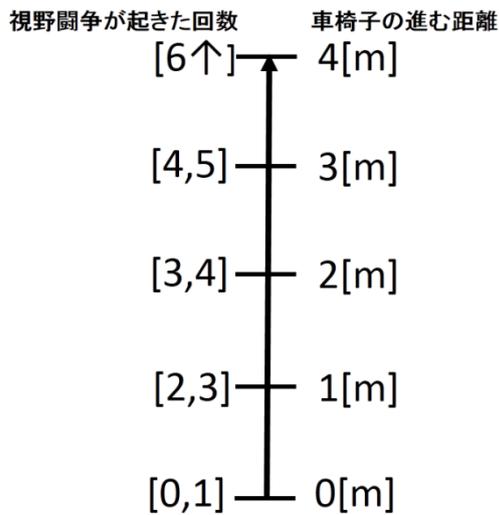


図 10 視野闘争の数応じた車椅子の進む距離の例

## 5. 予算および支出

予算：170000 円

### 支出

#### ・ 備品

多用途生体アンプ(脳波・筋電計測器) 110000 円

高フレッシュレートディスプレイ 20000 円

被験者費 30000 円

#### ・ 消耗品

アルコールパッド, Ten20 ペースト 10000 円

## 6. 参考文献

[1] R. J. Brown, and A. M. Norcia, "A Method for Investigating Binocular Rivalry in Real-time with the Steady-state VEP", Elsevier Science, Vision Res, Vol 37,pp. 2401-2408, 1997.

[2] R. Wang, X. Gao, and S. Gao, "A Study on Binocular Rivalry Based on the Steady State VEP", Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS San Francisco, 256-259, 2004.

## 4.2 非線形制御系の Non-convex 設計条件解法アルゴリズムの提案と設計支援ツールの開発

学籍番号 1432011 小倉大介 (知能機械工学専攻 博士前期課程 1 年 田中研究室)  
指導教員 田中一男 (電気通信大学大学院)  
大竹博 (九州工業大学大学院)

### 1. 目的および背景

非線形制御に対し、様々な研究が行われている。通常安定化条件については SOS 安定化条件, min-type および max-type piecewise Lyapunov Function を用いた安定化条件, ロバスト安定化条件については SOS ロバスト安定化条件等がある。これらの個別的条件について、解を求めるため MATLAB 上で動作する Linear Matrix Inequality 条件を解くための LMI Tool Box や Sum of Squares 条件を解くための SOSTOOLS, SOSOPT といったツールがある。

しかし、ここ数年研究されている Bilinear SOS ロバスト安定化条件や Control Lyapunov Function (CLF) といった非凸な条件を解くためにそれらの SOSTOOLS や SOSOPT を直接利用することは出来ない。このため、条件を利用するためには高度な数学的な知識が必要となる。

このような問題を解決するために用いられる方法として条件に対して微小な摂動を与えた別の条件を考えることにより凸化を行い条件を LMI や SOS の形式で解くことが出来るようにするものを提案する。MATLAB 上でこのような条件を用いるためには数学的な知識が必要になるが、これを用いることによって解やフィードバックゲインが求まりやすくなることがある。

本研究ではこれを解決し, Non-convex 条件を簡易に扱うことのできるツールの開発を目的とする。また、構築したツールによる制御器設計のための計算が行えるかどうかについて例題を用いて検証を行う。

つまり、

- ・非凸条件を用いた制御系設計の手法開発
- ・上記条件を利用しやすい形にツール化

の二点が本研究の概要である。

### 2. 研究の有用性および独創性

有用性および独創性は以下のとおりである。

- ・有用性

LMI および SOS 条件を解くためのツールは入手が容易であり、関数化が行われていることから制御の分野で広く利用されている。その反面、これらは直接的には凸な条件にしか利用することが出来ないため条件の導出に非凸な項が含まれてはならないという制約がある。このようなツールを開発することにより、非凸な条件を容易に解くことが出来るようになる。

• 独創性

非線形なシステムを対象とした制御系設計は今後益々需要が増すと考えられるが、非凸な条件を用いたほうが解を求めやすいことが多い。しかし、これを利用するには背景で記述した通り数学的高度な知識が必要になる。今回提案するツールの開発により、多くの研究者がスクリプトの記述の手間を費やさずに非凸な条件を扱えるようになる。

### 3. 制御系設計条件

#### 3.1 多項式ファジィモデル

非線形システムを多項式ファジィモデル[1]で表現する。多項式ファジィモデルとは(1)で表わされる T-S ファジィモデルの拡張であり、非線形システムより、多項式ではない項を分離することで SOSTOOLS で条件を扱えるようにするものである。ファジィモデルは(1)式に示すような If-then 形式で表現される。Then 以降の部分については多項式システムとなっている。

*Model Rule i :*

If  $z_1$  is  $M_{i1}$  and ... and If  $z_p$  is  $M_{ip}$ ,

$$\text{then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i(\mathbf{x}(t))\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}_i(\mathbf{x}(t))\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

ここで、 $i = 1, 2, \dots, r$  はルール番号である。 $z_p(t)$  は前件部変数と呼ばれ、これらは状態変数や観測可能な外部変数、時刻が用いられる。 $M_{ij}(i = 1, 2, \dots, p)$  はファジィ集合である。

ファジィシステム全体は非ファジィ化により以下の式で表わされる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\mathbf{z}(t))\{\mathbf{A}_i(\mathbf{x}(t))\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}_i(\mathbf{x}(t))\mathbf{u}(t)\} \quad (2)$$

ここで

$$h_i(\mathbf{z}(t)) = \frac{\prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t))}{\sum_{k=1}^r \prod_{j=1}^p M_{kj}(z_j(t))},$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(\mathbf{z}(t)) = 1, \quad h_i(\mathbf{z}(t)) \geq 0 \quad \forall i, \quad (3)$$

であり,  $h_i(\mathbf{z}(t))$ はメンバシップ関数と呼ばれる重み関数である.

なお,  $r = 1$  のとき, 多項式ファジィモデルは多項式モデルと一致し, 用いる行列が定数行列のとき T-S ファジィモデルと一致する.

### 3.2 制御器設計

ファジィ制御器を設計するために, 並列分散的補償 (PDC: parallel distributed compensation) と呼ばれる考え方をを用いる. これは, ファジィ規則に対応した制御器を作り, それらの制御器を結合することによって全体の制御器を構築するという考え方である. PDC ファジィ制御器を以下に示す.

Controller rule  $i$  :

If  $z_1(t)$  is  $M_{i1}$ ,  $\dots$ ,  $z_p(t)$  is  $M_{ip}$

then  $\mathbf{u}(t) = -\mathbf{F}_i(\mathbf{x}(t))\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}(t))$

$$i = 1, 2, \dots, r \quad (3)$$

ここで,  $i = 1, 2, \dots, r$ であり,  $r$ は制御規則の数である.  $i$ 番目の制御規則の前件部はそれぞれ対応した $i$ 番目のファジィ規則(1)と同じものを用いる.

ファジィ制御器全体の出力は次のように計算される.

$$\mathbf{u}(t) = -\sum_{i=1}^r h_i(\mathbf{z}(t))\mathbf{F}_i(\mathbf{x}(t))\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}(t)). \quad (4)$$

T-S ファジィモデル(2) に PDC ファジィ制御器(4) を代入すると, 閉ループ系は次のように記述できる.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(\mathbf{z}(t))h_j(\mathbf{z}(t))\{\mathbf{A}_i(\mathbf{x}(t)) - \mathbf{B}_i(\mathbf{x}(t))\mathbf{F}_j(\mathbf{x}(t))\}\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}(t)). \quad (5)$$

### 3.3 制御系設計条件

(5)式で表わされる閉ループ系は以下の二条件を満たすような多項式  $V(\mathbf{x})$  および多項式行列  $F_j(\mathbf{x})$  , スカラー  $\alpha < 0$  が存在するとき大域的漸近安定となる.

$$V(\mathbf{x}) - \epsilon(\mathbf{x}) \text{ is SOS} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \hat{h}_i^2 \hat{h}_j^2 \Lambda_{ij}(\mathbf{x}) \text{ is SOS} \quad (7)$$

ただし,  $\epsilon(\mathbf{x})$  は正定性を保障するためのスラッグ変数であり,

$$\Lambda_{ij}(\mathbf{x}) = -\frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{A}_i(\mathbf{x}) - \mathbf{B}_i(\mathbf{x})F_j(\mathbf{x})) + \alpha V(\mathbf{x}).$$

を満たす.

この条件は, 決定変数度同士の積が含まれるため非凸な条件ということが出来る. したがって, これを解くために以下の解法を提案するものとする.

### 3.4 Path Following Method

Path Following Method は微少摂動を考えることにより, 非凸条件を解く方法である. これは4つのステップから成る.

Step1:  $\eta = 0$  とし, ランダムに正定な多項式  $V_0(\mathbf{x})$  を以下の式

$$V_0(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P}_{rand} \mathbf{x} \quad (8)$$

によって定める. ここで  $\mathbf{P}_{rand} \in \mathbb{R}^{\rho \times \rho}$  は対角行列である. また, 全ての対角成分は正の定数とする.

Step2:  $V(\mathbf{x}) = V_\eta(\mathbf{x})$  とし, 以下の SOS 最適化問題を解く.

$$\min_{F_j(\mathbf{x})} \alpha \text{ subject to (6) and (7)}$$

Step3: Step2 で得られた  $F_j(\mathbf{x})$  について, 以下に示す SOS 最適化条件を解く. これらは(6)および(7)式を  $V(\mathbf{x})$  および  $F_j(\mathbf{x})$  の周りで線形化したものである.

$$\begin{aligned} & \min_{\delta V(\mathbf{x}), \delta F_j(\mathbf{x})} \alpha \text{ subject to} \\ & V(\mathbf{x}) + \delta V(\mathbf{x}) - \epsilon(\mathbf{x}) \text{ is SOS} \\ & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \hat{h}_i^2 \hat{h}_j^2 \left[ -\frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \{ \mathbf{A}_i(\mathbf{x}) - \mathbf{B}_i(\mathbf{x})(F_j(\mathbf{x}) + \delta F_j(\mathbf{x})) \} \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) \right. \\ & \left. - \frac{\partial \delta V(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \{ \mathbf{A}_i(\mathbf{x}) - \mathbf{B}_i(\mathbf{x})F_j(\mathbf{x}) \} \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) + \alpha (V(\mathbf{x}) + \delta V(\mathbf{x})) \right] \text{ is SOS} \end{aligned}$$

$$\mathbf{v}_1^T \begin{bmatrix} \epsilon_V \delta V^2(\mathbf{x}) & \delta V(\mathbf{x}) \\ \delta V(\mathbf{x}) & I \end{bmatrix} \mathbf{v}_1 \text{ is SOS}$$

$$\mathbf{v}_2^T \begin{bmatrix} \epsilon_F F_j(\mathbf{x}) F_j^T(\mathbf{x}) & \delta F_j(\mathbf{x}) \\ \delta F_j^T(\mathbf{x}) & I \end{bmatrix} \mathbf{v}_2 \text{ is SOS, } j = 1, \dots, r \quad (9)$$

ここで  $\mathbf{v}_1$  および  $\mathbf{v}_2$  は  $\mathbf{x}$ , とは独立なベクトルであり,  $\epsilon_V$  および  $\epsilon_F$  は範囲  $[0.05, 0.005]$  を指定するものである.

Step4: Step3 において得られた  $\delta V(\mathbf{x})$  に対し,  $V(\mathbf{x})_{\eta+1} = V(\mathbf{x})_{\eta} + \delta V(\mathbf{x})$ . としたうえで,  $\eta = \eta + 1$  とし, Step2 に戻る.

これを Step2 において  $\alpha < 0$  が得られるまで繰り返す.  $\alpha < 0$  が得られることは非凸な大域的漸近安定化条件の解が得られたことを意味する. また,  $\alpha$  が先の条件を満たさず, 改善もしないと判定した時, 繰り返しをストップする.

#### 4. ツールの構築

作成したツールの概要を記す.

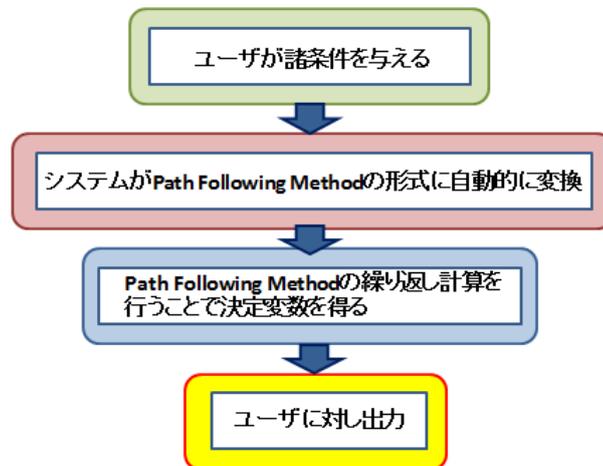


図1 ツールの概要

ユーザは GUI に対し, システム行列についての入力を行う. その後, 開始ボタンを押すことで条件を自動生成し, Path Following Method を利用した制御系設計を行った上で結果を出力する.

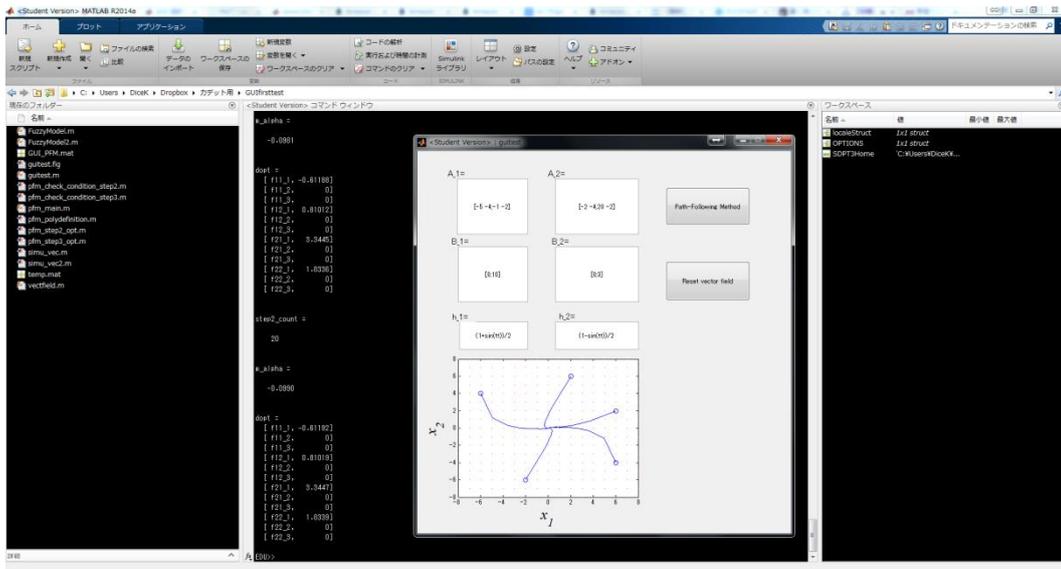


図2 デバッグ試験中のツール（ルール数が2の場合のGUI）

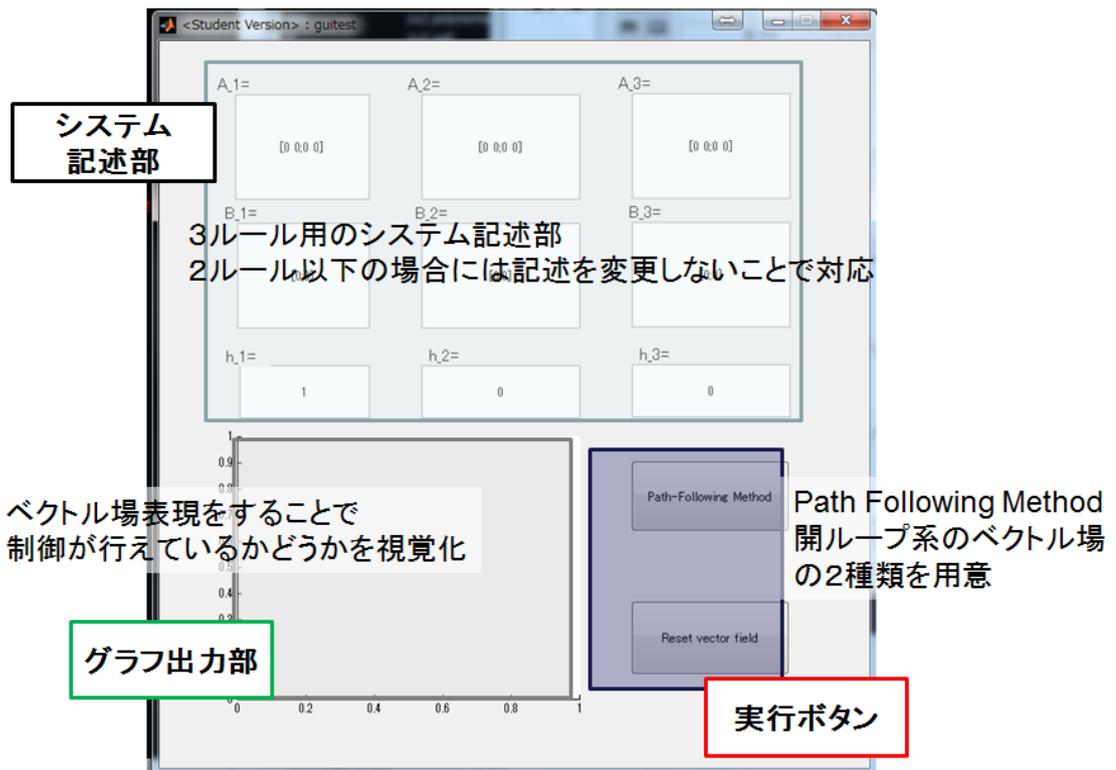


図3 完成したGUI

また、実行ボタンは2種用意することとし、Path-Following Methodによる制御系設計および設計された制御器を利用した際のベクトル場表現の出力についての実行ボタンと、システムの開ループ系（入力を零とした場合）についてのベクトル場の出力とした。これにより、制御対象が元々どのような挙動を示していた

のかについて視覚的に理解をすることが出来る。なお、今回はGUIの都合上多項式ファジィモデルではなく、TSファジィモデルで検証を行っている。

## 5. 検証

以下の例題を利用してツールの効果を検証した。

Model rule  $i$  :

If  $x_1$  is  $M_{i1}$

then  $\dot{x} = A_i x + B_i u, i = 1, 2, 3$  (10)

where

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1.59 & -7.29 \\ 0.01 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0.02 & -4.64 \\ 0.35 & 0.21 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} -a & -4.33 \\ 0 & 0.05 \end{bmatrix}$$
$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 8 \\ 0 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} -b+6 \\ -1 \end{bmatrix}$$

これを Path Following Method を用いて解いたところ以下のような解を得ることが出来た。

$$\begin{aligned} F_1 &= [41.3777 \quad 19.852] \\ F_2 &= [145.7551 \quad 88.5195] \\ F_3 &= [50.341 \quad -211.0757] \end{aligned} \quad (11)$$

尚、図 が開ループ系のベクトル場を出力させたもの、図 が設計した制御器を含む閉ループ系を出力したものである。

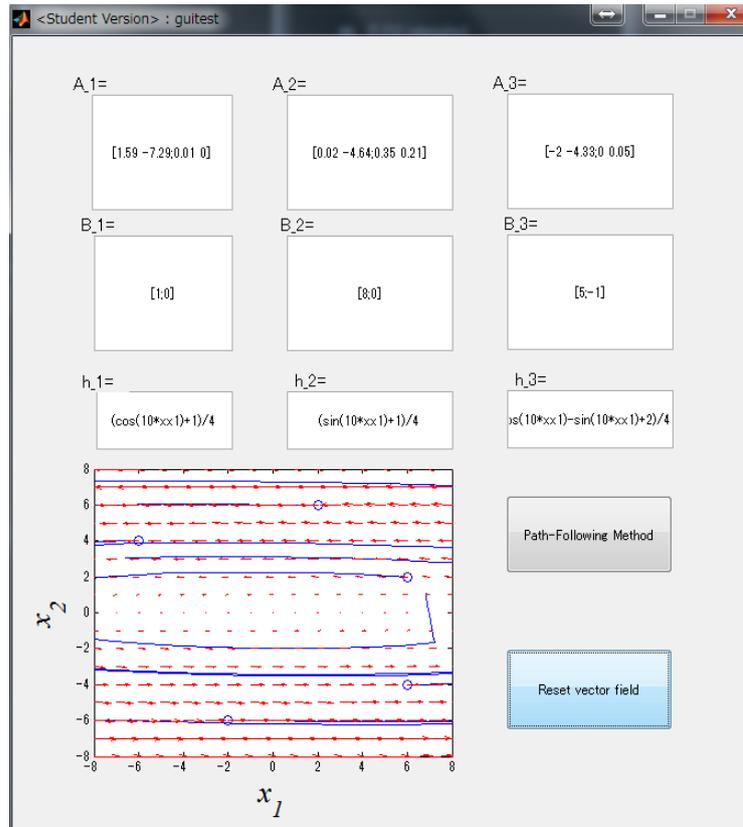


図4 開ループ系のベクトル場を出力させた GUI

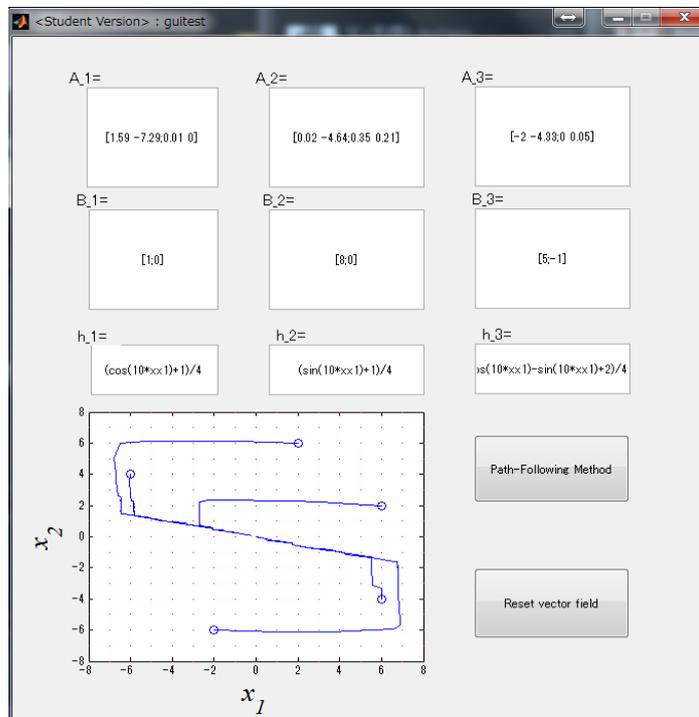


図5 閉ループ系のベクトル場を出力させた GUI

6. 予算執行状況

計算機（ワークステーション） 10 万円

検証用制御ロボット 6 万円

検証用制御周辺機器 5 万円

## 7. 結論

Non-convex 条件を解くためのアルゴリズムとして、微小項を考慮し繰り返し計算を行う Path Following Method を開発した。また、それに対応した設計支援ツールを開発し、GUI 上で制御系設計を行うことが出来ることを確認した。今後の展望については飛行ロボットに応用すること、実機実験中にゲインの調整を行うために利用することが考えられる。

## 参考文献

- [1] K. Tanaka, H. Yoshida, H. Ohtake, and H. O. Wang, “A sum of squares approach to modeling and control of nonlinear dynamical systems with polynomial fuzzy systems,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 17, no. 4, pp. 911-922, Aug. 2009.
- [2] T. Endo, Y-J, Chen, M. Tanaka and K. Tanaka, “SOS-Based Robust Control for Nonlinear Systems with Model Parameter Uncertainties,” The 29th Fuzzy System Symposium, pp. 996-1001, 2013.

### 4.3 ヘビ型掃除ロボットの開発

～ ヘビ型掃除ロボットの開発 ～

#### 1 プロジェクト概要

本プロジェクト名は「冗長多リンクロボットによるマッサージシステムの開発」である。本プロジェクトに参加する学生は以下の4名である。なお指導教員を田中 基康助教(知能機械工学科)と松野 文俊教授(京都大学), 根 和幸助教(京都大学)にお願いした。

プロジェクトリーダー：

中島 瑞 知能機械工学専攻 博士前期課程 1年 田中研究室

プロジェクトメンバー：

有泉 亮 京都大学 工学研究科 機械理工学専攻 博士後期課程 3年

佐藤 順亮 知能機械工学専攻 博士前期課程 2年 田中研究室

鈴木 兼悟 知能機械工学科 学部 4年 田中研究室

指導教員：

田中 基康 助教(知能機械工学専攻)

松野 文俊 教授(京都大学)

根 和幸 助教(京都大学)

#### 2 研究目的

人が活動する空間であれば、清掃作業は必ずといってよいほど必要になる作業である。近年、少子高齢化の進行や共働き世帯、単独世帯の増加するにつれ、家事の省力化を望む人が増加したことにより、家庭用清掃ロボットを購入する人が増加してきている。家庭用清掃ロボットとは床面の清掃を行うロボットであり、自律的に動作する点が従来の電気掃除機と異なる。現在市販されている清掃ロボットの一部をTable1に示す。

家庭用の床清掃ロボットの形状は多くが直径250-350mm前後の薄い円形である。また、部屋の隅まで清掃可能であることから四角形の清掃ロボットやルーローの三角形を基に設計された三角形の清掃ロボットがある。清掃方法はブラシで粉塵をかき集めて吸引するものや専用の布を取り付けて行う拭き清掃、もしくは吸引と拭き清掃の両方を行うものがある。機能は価格によって様々であるが、安価なものであれば側面に設置されたセンサに障害物が接触することで方向転換し、室内を無作為な経路で清掃を行う。高価なものであれば赤外線センサにより接触回避や衝突緩和を行い、室内を満遍なく清掃するためにロボ

ルンバ[1]	
ブラーバ[2]	
ココロボ[3]	
トルネオロボ[4]	
ミニネオ[5]	ツ
ホームボット[6]	
ラクリート(S01)[7]	
ラクリート(907)[8]	
モーファ[9]	
クレモン[10]	：
ロボクリーナー[11]	
ルーロ[12]	ノ

Table1 従来の清掃ロボット[1 - 12]

ット自ら経路生成を行う等の機能が備わっている。しかし、高機能な清掃ロボットほど大型化する傾向にあり、その形状から狭所に進入できない、段差を踏破することができないといった欠点がある。

以上の欠点を解決するために多連結ロボットに着目する。多連結ロボットは複数のモジュールを関節で連結した構造であり、ロボット全体として細長い構造になることから障害物を利用した狭所進入[13-15]や障害物を回避した狭所進入[16]、段差の踏破[17-19]を行うことができる。そこで本研究では多連結ロボットを用いて狭所および段差環境においても清掃可能なロボットの開発を行う。また、清掃動作の考案を行い、開発したロボットに適用させることでその有効性を検証する。

### 3 研究報告

#### 3.1 多連結清掃ロボットの構成

多連結清掃ロボットの構成について検討を行う。多連結清掃ロボットは平面だけではなく、狭所環境、段差環境の清掃を行う。狭所環境を清掃するためにはロボットの形状が細長いこと、ロボットと障害物の接触検知が可能であること、十分な身動きが取れないと考えられるため推進力を直接的に生成可能であることが要求される。段差環境を清掃するためには関節の 3 次元的な屈曲が要求される。以上の要求から構成を決定する。構成を決定する際に、推進力生成方法、関節構成、車輪配置、清掃方法、センサの 5 つの項目について検討を行った。

#### 推進力生成方法

狭所環境では推進力を直接的に生成可能であることが要求されるため、異方性摩擦によって推進力を生成する受動車輪は適さない。また、狭所に進入することやリンクを持ち上げて段差環境の清掃を行うことを考慮すると小型で軽量あることが望ましい。そのため、クローラやねじ推進機構はロボットが大型化するため適さない。したがって、推進力生成

方法として能動車輪を採用する。さらに、ロボットを小型化するため、片側のみ能動車輪、逆側は受動車輪とし、能動車輪は左右交互に配置する。

### 関節構成

多連結清掃ロボットは段差環境の清掃を行うため、関節の3次元的な屈曲が要求される。また、小型であることや制御をしやすくするため機構が簡略であることが望ましい。そのため、3自由度関節や2自由度関節は適さない。そこで、1自由度関節を組み合わせた構成とする。多連結清掃ロボットは段差昇降の制御[20]を行うため、ピッチ関節、ヨー関節を交互に配置した構成とする。

### 車輪配置

障害物の検知後、全ての車輪が接地していると車輪の摩擦により障害物を回避することができない。そこで、一部の車輪を非接地にすることで回避動作を行う。車輪をピッチ関節軸と同軸上に配置することで微小な屈曲角度で容易に車輪の接地/非接地の切り替えが可能となるため、この車輪配置を採用する。能動車輪を駆動させるサーボモータはロボットの横幅を小さくするため、ピッチ関節の上に配置し、プーリとタイミングベルトによって能動車輪を駆動させる(Fig.1)。

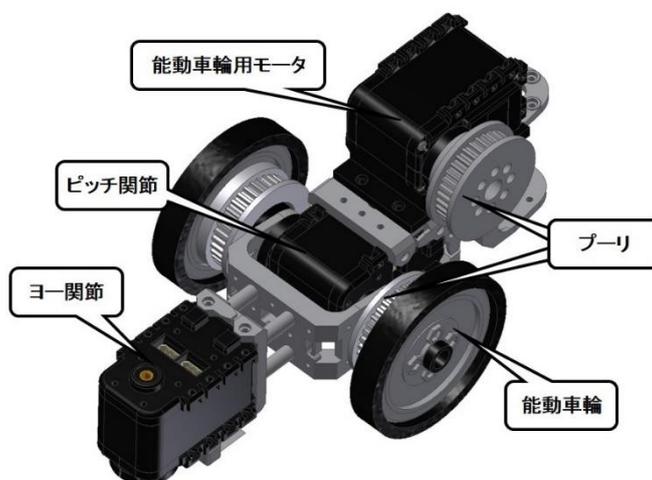


Fig.1: 車輪配置

### 清掃方法

従来の清掃ロボットの清掃方法は、ゴミをかき集めて吸引、清掃用のモップや布をつけて拭き清掃、吸引・拭き清掃の両方を行うものがある。吸引の清掃はロボットが大型化し重量が増えるため、狭所進入に支障が出ることやリンク持ち上げ時にトルク不足になる恐れがある。そのため、多連結清掃ロボットの清掃方法は拭き清掃とし、拭き掃除を行うための清掃ユニットの設計を行った。

## センサ

障害物との接触を検知するために各リンクに接触検知ユニットを設置した構成とする。段昇降時は車輪の接地情報を取得できる必要があるため、各リンクに下向き方向の距離センサを設置した構成とする。

## 構成のまとめ

以上より、多連結ロボットの構成をまとめたものを以下に示す。

- 片側能動車輪，逆側受動車輪とし，能動車輪は左右交互に配置
- ピッチ関節軸と同軸上に車輪を配置
- 能動車輪はプーリとタイミングベルトによって駆動
- ピッチ関節，ヨー関節を交互に配置
- 清掃方法は拭き清掃を採用
- 障害物との接触，車輪の接地情報が取得可能なセンサを配置

以上の構成から設計した多連結清掃ロボットをFig.2に示す。以降では設計した接触検知ユニットと清掃ユニットについて説明する。また，設計したパーツは3Dプリンタによって成形を行った。



Fig.2: 多連結清掃ロボット

## 3.2 パーツの設計

### 接触検知ユニット

障害物との接触を検知するために接触検知ユニットの設計を行った。接触検知ユニットの要求仕様を以下に示す。

- 他のパーツよりも先に障害物に接触
- 前後対称構造
- ピッチ関節の屈曲(90[deg])可能
- ヨー関節屈曲範囲が広い

- スタックしにくい

設計した接触検知ユニットをFig.3, 接触を検知する構造をFig.4に示す. 接触検知ユニットに外力が加わるとマイクロスイッチが押し込まれる仕組みとし, マイクロスイッチの切り替わりによって接触検知を行う. また, 押し込まれた後はバネの力によって元の位置に戻る構造とした. また, 障害物に接触しスタックしやすい部分が車輪であるため車輪を覆うような構造とすることで, 接触検知ユニットが先に障害物に接触するようにした. さらに, 狭所進入後は進行方向を逆にすることで狭所からの脱出を行うため可能な限り前後対称構造とすることで, 狭所脱出時においても接触検知が可能な構造とした.

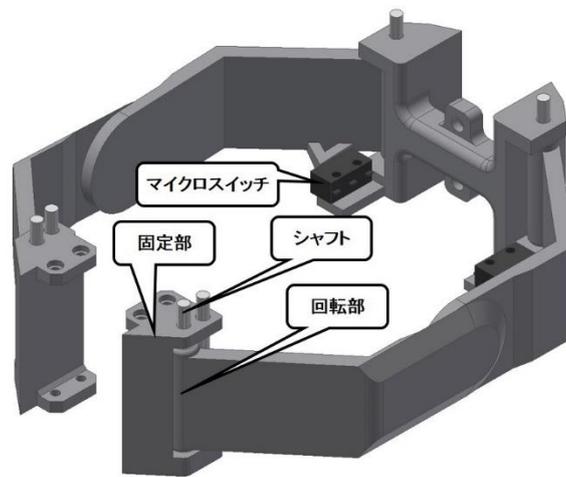


Fig.3: 接触検知ユニット

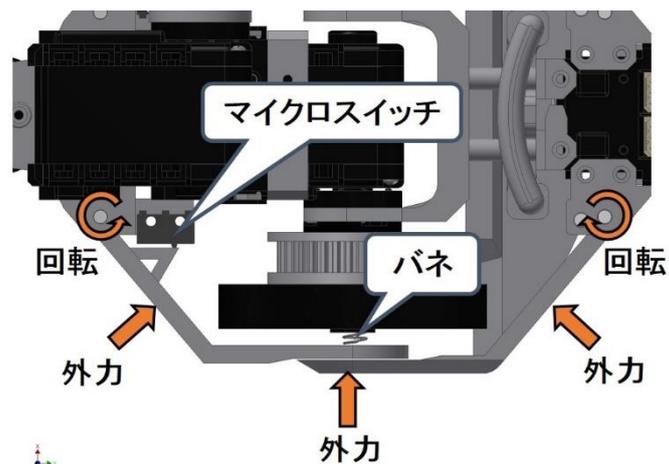


Fig.4: 接触検知ユニットの構造

清掃ユニット

清掃ユニットの要求仕様を以下に示す.

- 拭き清掃が可能
- 1ユニットで広範囲を清掃可能
- 段差昇降時にスタックしない

設計した清掃ユニットをFig.5に示す. 上下にスライドが可能な構造とし, バネの力によって圧力をかけた拭き清掃を可能とした. 清掃用の布はFig.5に示す清掃部にマジックテープを用いて固定した. 清掃部は接触検知ユニットの外側に出ない範囲で可能な限り広くした(Fig.6). また, 段差昇降時のスタック防止のため傾斜をつけたパーツを配置し, そこから全体を覆うように清掃用の布を取り付けた(Fig.7).

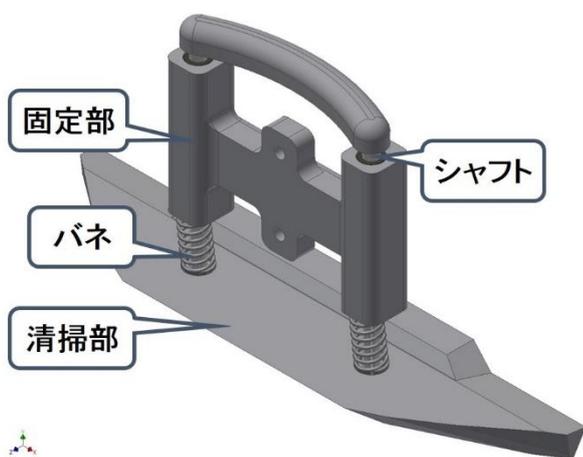


Fig.5: 清掃ユニット

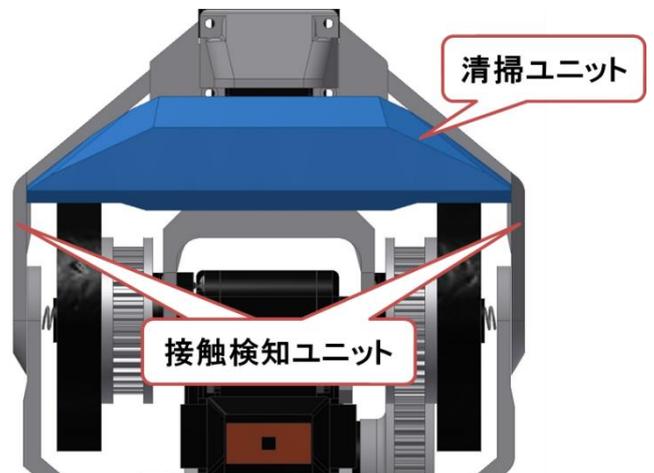


Fig.6: 清掃ユニット(下図)

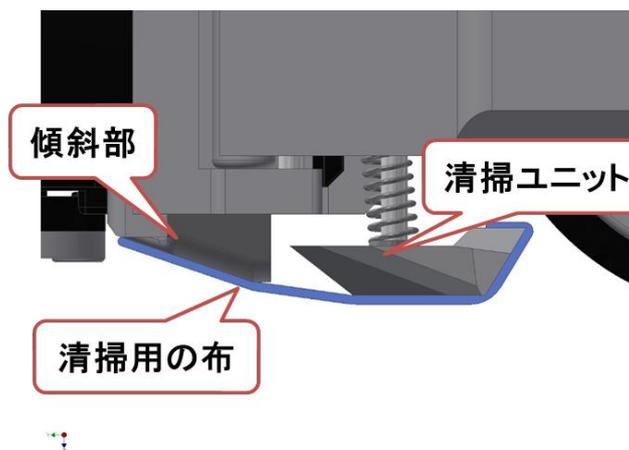


Fig.7: 段差によるスタック回避構造

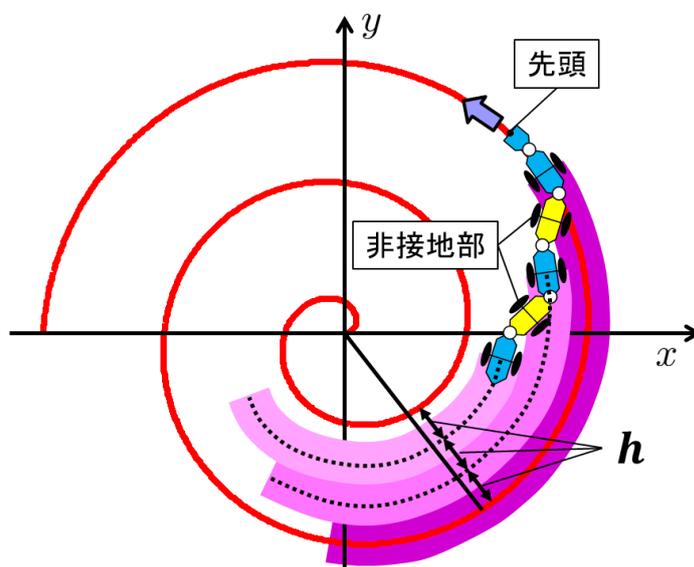
### 3.3 平面における螺旋清掃

## 平面清掃動作の検討

障害物のない広い平面の清掃経路について検討を行う。まず、リンク配置について説明する。各リンクが同一の経路を辿ることは非効率であるため、通過経路をずらして清掃を行う。また、第1リンクは清掃ユニットを配置しないため清掃を行うことができない。1リンクで清掃できる幅を $h$ [m]とし、第2,4,6リンクの通過する経路の幅が $h$ となるように第3,5リンクを屈曲させ、第3,5リンクは非接地リンクとすることで一度に $3h$ の幅で清掃が可能となる。このとき、清掃ユニットの幅を $h'$ [m]とすると、 $h' > h$ とし、未清掃領域が減少するように余裕を持たせた。

次に清掃経路について説明する。多連結清掃ロボットはその形状とヨー関節の角度制限から、旋回時に大回りになり、経路の重複や未清掃領域が生じるため、方向転換の多い清掃経路は適さない。そこで、曲率が徐々に変化していく螺旋経路で清掃を行う。使用する螺旋はアルキメデスの螺旋である。これは $a$ を定数として極方程式 $r = a\theta$ で表される曲線であり、 $r$ は $\theta$ に比例することから曲線間の幅が一定となる特徴がある。

リンク配置と清掃経路をFig.8に示す。 $\theta$ が $2\pi$ ごとの螺旋の間隔は $2\pi b$ と表されることから $a = 3h/2\pi$ とし、第2リンクが通過する経路より $h$ だけ内側を第4リンク $2h$ だけ内側を第6リンクが通過するように関節角目標値の導出を行った。また、 $\theta$ が小さいときは螺旋の曲率が大きくFig.8のような姿勢をとることができないため、第2リンクのみを用いて清掃を行う。



## シミュレーション

続いて物理シミュレータV-repを用いて、現在位置を取得しながら目標経路に追従するフィードバック制御を適用した場合と運動学モデルによって推定した先頭位置、関節角度を用いたフィードフォワード制御を適用した場合のシミュレーションを行った。結果をFig.9に示す。図中の紫色の領域は清掃ユニットが通過した経路である。フィードバック制御は螺旋の幅がほぼ一定に保たれている。フィードフォワード制御は経路誤差やモデル誤差の蓄積により、時間の経過によって螺旋間の幅が異なる結果となった。しかしながら、未清掃領域は生じておらず、誤差も小さいため清掃領域は十分に広いと考えられる。そこで、アルキメデスの螺旋を用いた清掃動作が実環境で有効であるかを検証するため、実機実験を行う。

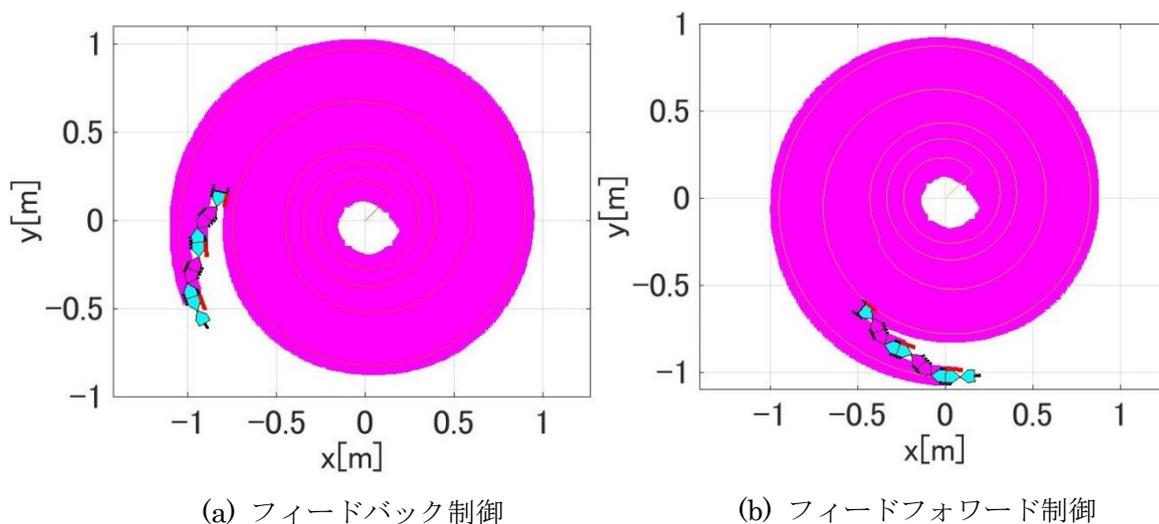


Fig.9: シミュレーション結果

## 実機実験

実機実験を行う目的はアルキメデスの螺旋を用いた清掃範囲の検証と設計したハードウェアの検証の2点である。実験環境をFig.10に示す。障害物がなく、十分に広い平面を清掃領域とする。また、ロボットは制御用PCによって制御される。モーションキャプチャによって先頭の位置・姿勢の計測を行い、PCにデータを送信するが、それらの情報を用いたフィードバック制御は行わない。

実験結果をFig.11に示す。結果から目標通りの螺旋を描くことができず、未清掃領域が多いことがわかる。このような清掃経路となってしまった原因として、車輪の空転が発生していたことが挙げられる。車輪の空転は清掃用の布を押し付ける力が強いことやタイミン

グベルトの力による車軸のたわみが原因であると考えられる。



Fig.10: 実験環境

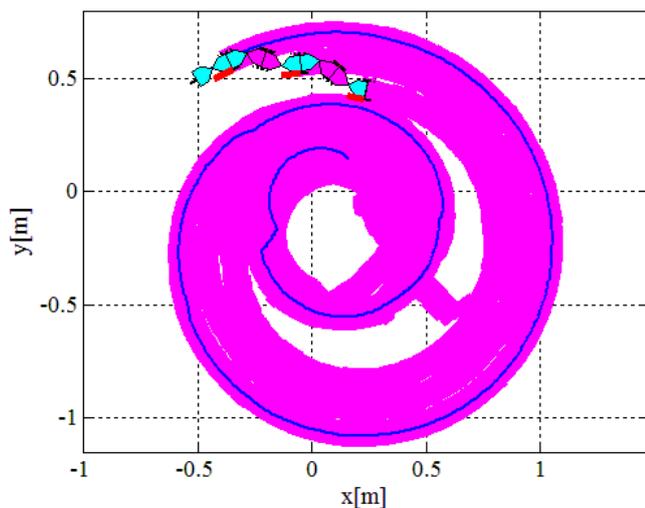


Fig.11: 実験結果(清掃ユニットあり)

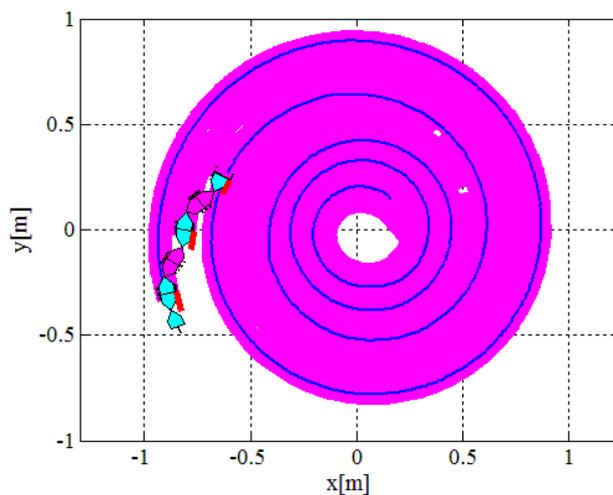


Fig.12: 実験結果(清掃ユニットなし)

そこで、アルキメデス螺旋による清掃範囲の検証を行うため、清掃ユニットをはずして実験を行った。実験結果をFig.12に示す。結果から螺旋を描くことができていたことがわかる。経路誤差が発生し、清掃領域の重複が見られたが、中心部を除き未清掃領域はないことが確認できた。以上から実験によって得られた結果を以下にまとめる。

- 実機実験を通してハードウェア面の課題が見つかった。
- アルキメデスの螺旋を用いた清掃範囲は一度に広領域の清掃が可能であることを確認できた。

## 4 まとめ

本研究では狭所及び段差環境の清掃が可能な多連結清掃ロボットの開発を目指し、ロボットの設計、清掃動作の考案と検証を行った。実機実験を通してアルキメデスの螺旋を用いた清掃範囲が十分に広いことが確認できたが、ハードウェア面における課題が見つかった。

今後はハードウェアの修正、壁面や障害物を想定した平面の清掃動作、狭所・段差環境における清掃動作の検討を行う。

## 5 予算

購入物品	費用
ロボット用アクチュエータ	¥150,000
ロボット用消耗品・パーツ類	¥10,000
合計	¥160,000

## 参考文献

- [1] iRobot ロボット掃除機ルンバ公式サイト,  
<http://www.irobot-jp.com/> (2015年2月7日アクセス)
- [2] iRobot 床拭きロボット ブラバ 公式サイト,  
<http://www.irobot-jp.com/braava/?gclid=CNbkwPKyz8MCFUyVvQodYEUAZA> (2015年2月7日アクセス)
- [3] シャープ ロボット家電COCOROBO,  
<http://www.sharp.co.jp/cocorobo/> (2015年2月7日アクセス)
- [4] 東芝 トルネオ ROBO (TORNEO ROBO) ロボットクリーナー (掃除機),  
<http://www.toshiba.co.jp/torneo/robo/> (2015年2月7日アクセス)
- [5] ツカモトエイム株式会社 ロボットクリーナー ミニ ネオ,  
[http://www.tsukamoto-aim.co.jp/products/detail\\_78.html](http://www.tsukamoto-aim.co.jp/products/detail_78.html) (2015年2月7日アクセス)
- [6] LG電子 ホームボットスクエア,  
<http://www.lg.com/jp/robot> (2015年2月7日アクセス)
- [7] 株式会社シー・シー・ピー LAQULITO(ラクリート CZ-S01),  
[http://www.ccp-jp.com/life/laqulito/cz\\_s01.html#01](http://www.ccp-jp.com/life/laqulito/cz_s01.html#01) (2015年2月7日アクセス)
- [8] 株式会社シー・シー・ピー LAQULITO(ラクリート CZ-907),  
<http://www.ccp-jp.com/life/laqulito/907.html> (2015年2月7日アクセス)
- [9] 株式会社シー・シー・ピー 自動モップロボット掃除機 モーファ  
<http://www.ccp-jp.com/zakka/mofa/> (2015年2月7日アクセス)

- [10] クレモン MONEUAL ロボットクリーナー MR6850M,  
<http://clemon.smile-mon.jp/mr6850m/> (2015年2月7日アクセス)
- [11] ANABAS ロボクリーナー[sz-400],  
<http://www.anabas.co.jp/taichiholdings/j/product/sz400/> (2015年2月8日アクセス)
- [12] Panasonic ロボット掃除機 ルーロ,  
<http://panasonic.jp/soji/rulo/index.html?gclid=CLLtwYuyz8MCFUwHvAodqGgAaw>  
(2015年2月7日アクセス)
- [13] A. A. Transeth, R. I. Leine, C. Glocker, K. Y. Pettersen, and P. Liljeback, "Snake robot obstacle-aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 24, no. 1, pp. 88-104, 2008.
- [14] T. Kamegawa, R. Kuroki, M. Travers, and H. Choset, "Proposal of EARLI for the snake robot's obstacle aided locomotion," *IEEE Int. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics*, pp.1-6, 2012.
- [15] T. Kano, T. Sato, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, "Local reflexive mechanisms essential for snakes' scaffold-based locomotion," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 7, 046008, pp.1-11, 2012.
- [16] M. Tanaka, K. Kon, and K. Tanaka, "Range-sensor-based Semi-autonomous Whole-body Collision Avoidance of a Snake Robot," *IEEE Trans. on Control Systems Technology* (Accepted).
- [17] K. Lipkin, I. Brown, A. Peck, H. Choset, J. Rembisz, P. Gianfortoni, and A. Naaktgeboren, "Differentiable and piecewise differentiable gaits for snake robots," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1864-1869, 2007.
- [18] M. Tanaka and K. Tanaka, "Climbing and Descending Control of a Snake Robot on Step Environments based on Kinematics," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.3285-3290, 2013.
- [19] H. Yamada, S. Takaoka and S. Hirose, "A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism)," *Advanced Robotics*, vol.27, issue 1, pp.47-60, 2013.
- [20] M.Tanaka and K.Tanaka, "Control of a Snake Robot for Ascending and Descending Steps," *IEEE Trans. on Robotics* (Accepted).

#### 4.4 空からの情報収集を可能にする飛行ロボットの開発

報告者

学籍番号：1432006

氏名：伊藤 唯

指導教員

田中一男 教授

明愛国 准教授

## 6 プロジェクト概要

本プロジェクト名は「空からの情報収集を可能にする飛行ロボットの開発」である。本プロジェクトに参加するのは以下の学生 3 名と特別プロジェクト員 1 名である。なお指導教員を田中一男教授(知能機械工学科専攻)と明愛国准教授(知能機械工学専攻)にお願いをした。

プロジェクトリーダー：

伊藤 唯 知能機械工学専攻 博士前期課程 1 年 田中研究室

プロジェクトメンバー：

Dr. Ying-Jen Chen 知能機械工学専攻 特別研究員 田中研究室

高野 祐 知能機械工学専攻 博士前期課程 2 年 明研究室

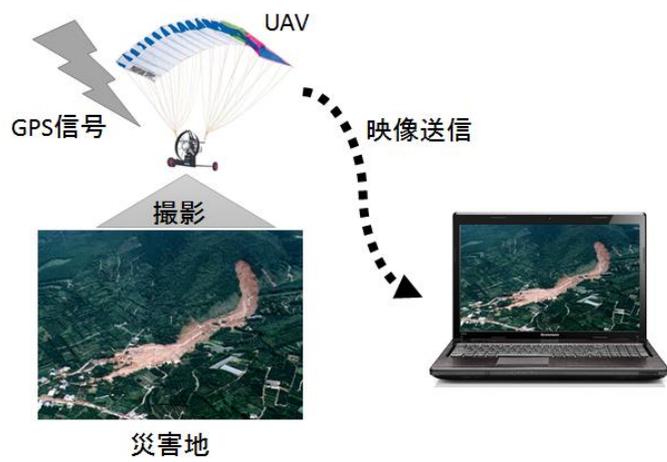
遠藤 祐甫 知能機械工学科 学部 4 年 田中研究室

高橋 佑徳 知能機械工学科 学部 4 年 田中研究室

指導教員：田中一男教授（知能機械工学専攻），明愛国教授（知能機械工学専攻）

## 7 研究目的

本プロジェクトでは無人飛行ロボット(UAV)の中では取り扱いが容易である小型の動力付きパラグライダーを用いて、低コストで情報収集用飛行ロボットプラットフォームの開発を行う。既存の UAV と比較して、使い捨てが可能なレベルの安価な UAV を開発し、災害救助に役立てることを目的とする。



## 8 研究の独創性・有用性

### 動力付パラグライダー — Powered Para-Glider (PPG)



- 重心が常に翼の下
- 操作はスロットルと方向舵のみ
- 小型・軽量
- 安価
- 非高速だが小さい
- 旋回半径が小さい
- 無動力でも滑空可能
- 制御不能や墜落の際に安全

現在 UAV の機体形態として実用化がなされている物の多くは固定翼機・回転翼機である。情報収集を目的として考えた場合、回転翼機は空中静止が可能であるため狭い範囲での情報収集に適しているが熟練した操縦技量を要求する面がある。また、固定翼機は飛行速度に優れ定常飛行時の安定性も高いが旋回半径の広さゆえ狭い領域での観測に適していない。さらに一部の垂直離陸機(Vertical Take-Off and Landing,VTOL)を除き、離陸と着陸のための長距離の滑走路が必要となってくる。また、上記の両者とも万が動力を失った場合に制御不能、もしくは制御困難な状態に陥ってしまう。

また、ペイロードを確保しようとする機体が大型化し、取り扱いや携行が難しくなる。大型の機体は電動機ではなくエンジンを搭載するのも取り扱いにくい理由の一つである。以上から、このタイプの UAV は高価になりやすく、機体を損失したときの予算的リスクも大きい。これらに対し、パラグライダーに動力を付加した動力付パラグライダー (Powered Para-Glider, PPG) というものがある。この PPG は、風の影響を受けやすいという難点はあるものの、小型・軽量で携行性に優れ取り扱いが容易である。また、機体の重心である胴体が揚力を生み出すキャノピーから離れているため、胴体が振り子状の運動をして常にキャノピーの真下に来ようとする。このことは、姿勢の制御をする必要が無く機体の制御が容易であることを意味する。さらに PPG は飛行中に何らかのトラブルで動力が停止した場合でも、滑空することによって誘導しながら着陸することができるため安全性も高い。また、飛行速度が小さく旋回半径も小さいため狭い範囲での観測が可能である。これらの特徴を持った PPG は、小型で安価な UAV の構築が可能である。

本プロジェクトではこの PPG という、回転・固定翼機と異なる特徴を持った飛行体を制御対象とする。そして機体の状態、外環境等を考慮できる制御器を設計し、自律飛行を可能とし、PPG ならではの安全・低コストな地上観測システムを構築することを目指す。この点を本プロジェクトの独創性と有用性をみることができる。

## 9 プロジェクト報告

### ArdupilotMega, MissionPlanner の導入

先行研究においては、リアルタイムでの飛行状態の把握ができていなかったこと、またログデータの解析環境や飛行管制について統合的に扱える環境が無く不便であったという問題点があった。そこで今回 ArdupilotMega(以下 APM), 及び MissionPlanner(以下 MP) の導入をおこなった。これはオープンソースでの飛行ロボットの制御、管制システムの構築を目指し DIYDRONES と呼ばれるコミュニティで開発が進められている物である。APM はマルチロータ、固定翼機などに搭載される制御ボードと飛行ミッション管理、及び姿勢制御を行うためのソフトウェアを指し、また MP は地上管制用 PC 用のソフトウェアでありミッションを作成し APM に書き込むこと、無線データ通信を介して機体と飛行情報やミッションの遂行状況などを逐一操縦者に GUI を用いて伝えることができる。以下 (Figure1,2) に APM を搭載した状態の PPG と MP の管制画面を示す。



Figure 19 APM を搭載した PPG

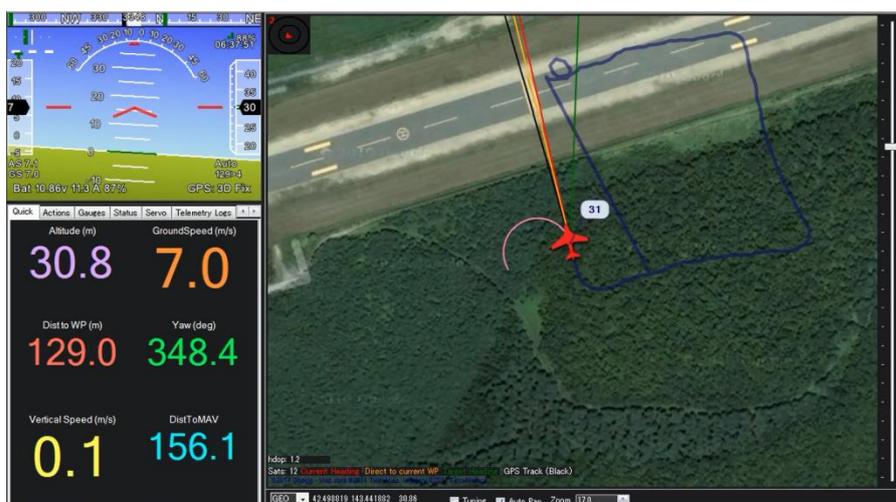


Figure 20 MissionPlanner 起動画面

しかし、上述したように本システムはオープンソースでマルチロータ、固定翼機用などのソフトウェアが公開されているが本研究で用いている PPG を制御するためのソフトウェアを持ち合わせていない。そこで我々はソースコードを解析し独自の制御系を導入、これに対応している。

### 洋上までの長距離情報収集実験

PPG に対して小型カメラと先行研究[1][2][3]で導出した高度、方向モデルに対する安定化制御器を導入した APM を搭載し実際に洋上までの情報収集ミッションを行った。本実験では微風（風速 0.5m～1 m 程度）の状況下で Waypoint4 から手動にて離陸し、すぐに自動飛行に切り替えて着陸までを行っている。その結果得られた飛行実験の飛行軌跡及び情報収集の結果を Figure3 に示す。これより青の飛行軌跡が 1～4 の設定された Waypoint を通るよう描かれていること、そして飛行軌跡に対応した空撮画像を得られていることが分かる。

しかし風外乱に対して安定性を保証していないことと軌道(trajectory)ではなく経路(path)として誘導アルゴリズムを構築しているゆえ、全体的に南側に飛行軌跡がずれてしまっている。また、一般的に海上よりも陸上においてのほうが突風率が高く、本実験の制御結果 (Figure4) よりも陸上での風の影響を強く受けている様子が見られる。よって風外乱を考慮することと誘導アルゴリズムを発展させることが今後の課題として挙げられる。

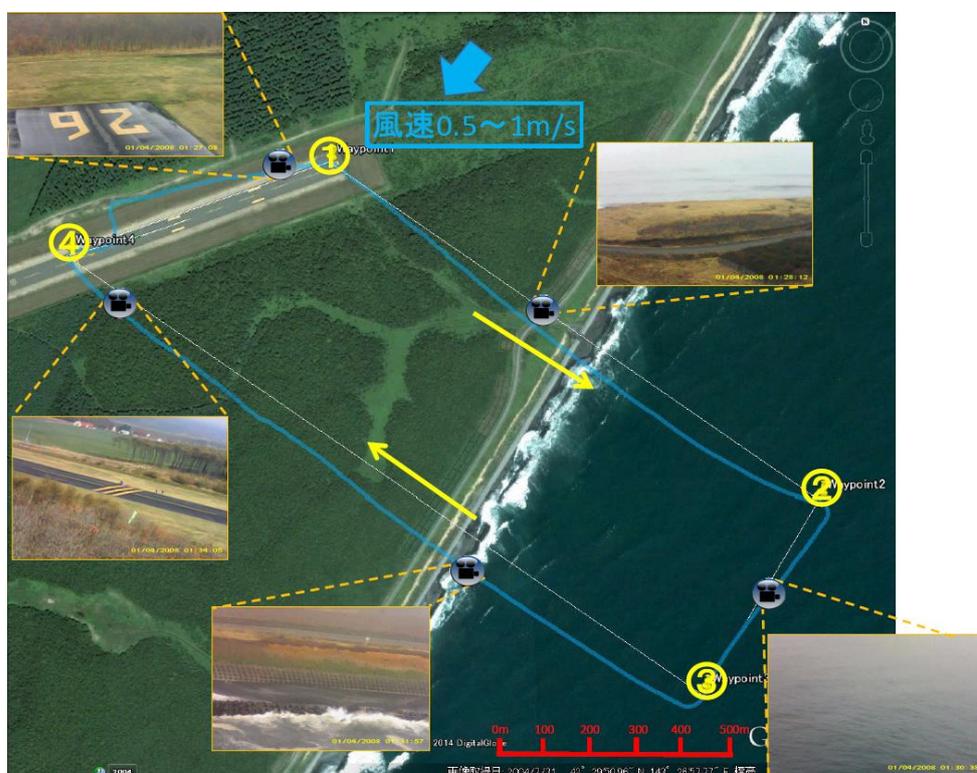


Figure 21 実験によって得られた飛行軌跡

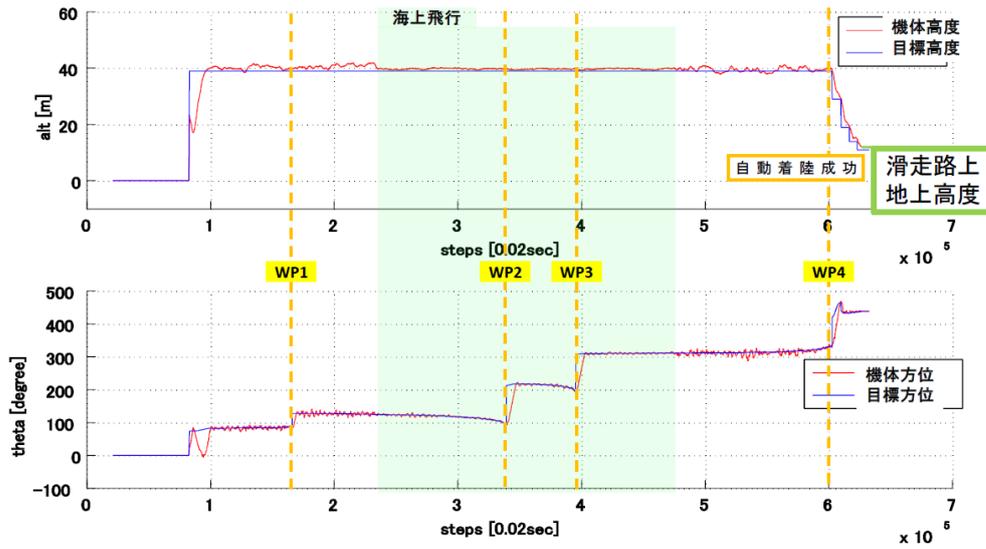


Figure 22 実験の制御結果

### 推力測定実験

現在までPPGの推力はスロットル開度と線形の関係であるとの仮定で制御系設計を行ってきたが、一般的に流体系に生じる力は流速の2乗に比例する。よって今回スロットル開度と推力の非線形な関係を明らかにするため推力測定実験を行った。しかし得られた結果は全くプロペラに対する流速の無い静止推力を表し、飛行時の推力とは異なることが予想されるため、先行研究において導出したXZモデルを用いて平衡点における力の釣り合い及びスロットル開度から、開度65%時に推力3.634[N]を発生していることが分かった。これを元に静止推力曲線を1.33倍し飛行時推力曲線として得た。得られた関係を制御系に適用することで今後モデル精度向上が期待される。

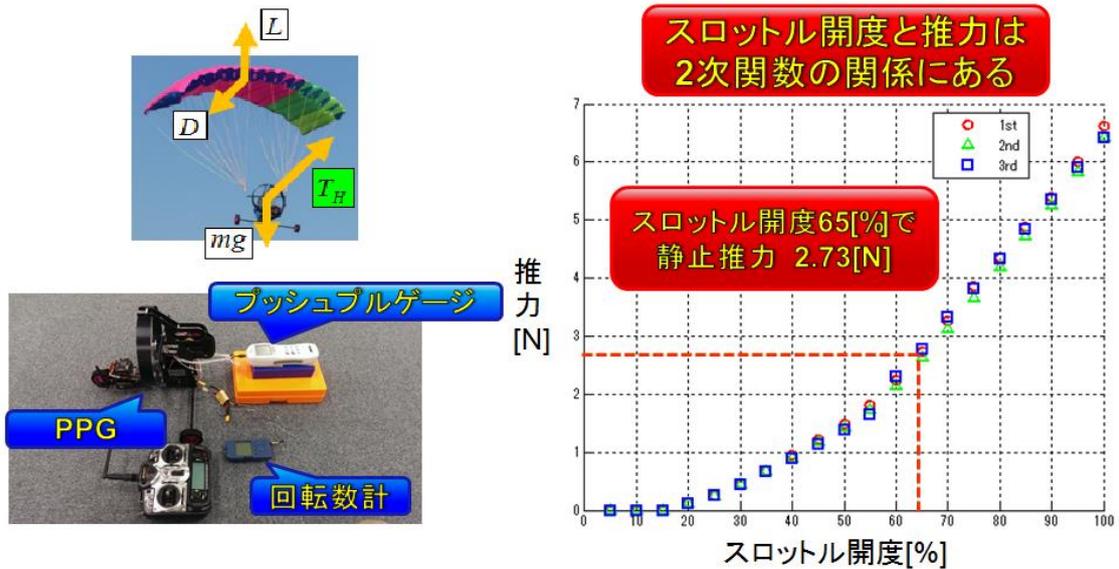


Figure 23 推力測定実験概要と結果

## 擬似追尾実験

複数台での PPG の同時ミッションを想定する前段階として先頭機に対して一定の距離を保ちながら追尾することによって編隊飛行を行うことが考えられる。そこで今回内界センサのみの情報から他 UAV を追尾することを目的とした実験を行った。しかし現時点では実際に複数機飛行させ相互に飛行情報を共有するに至っていないため実験は単機で行い、一度手動で飛行した経路データ上での一定時間ごとの位置情報を **Waypoint** として作成し「一定時間ごとに前方を飛行する UAV から送られてくる位置情報」に等しいと仮定し再度自動飛行に用いることで仮想的に追尾しているものとした。結果、3 秒ごとに区切られた位置情報を **Waypoint** とする場合は最も追従性が高かった。

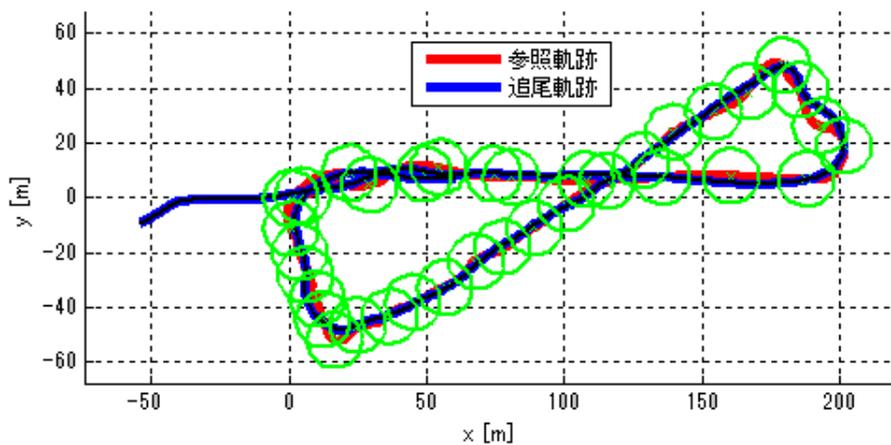


Figure 24 擬似追尾実験結果

## エリア内完全情報収集実験

PPG が実際に災害地域を観測する場合は真下に向けてカメラを取り付け、探査領域内を上空から空撮、抜けが無いよう情報収集を行う必要がある。指定された領域内に手動で **Waypoint** を設定した場合の未探査領域が無いよう自動飛行が可能であるか実験にて検証を行った。

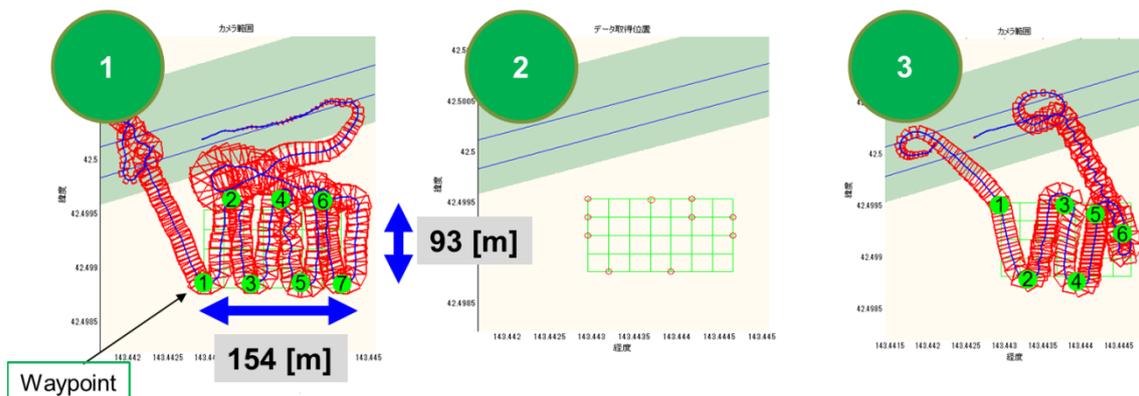


Figure 25 探査領域完全情報収集実験結果

探査領域内を仮想的に格子状に区切ることで領域の離散化を行いカメラの画角と高度及び

機体姿勢角によって決定される撮影範囲内に格子点が含まれた領域は撮影済みと判定するとする。その結果を Figure6 に示す。

上図では一度目の探査飛行においては領域内を探査しきることができず、二度目の飛行において全ての領域の探査が完了した結果を示している。として一回では探査しきることができず、二度の探査が必要という結果となった。原因として手動により設定した Waypoint が全ての領域を探査することを保証していないこと、また外乱によって飛行軌跡が想定よりもずれてしまうこと、そして機体の特性及び外乱と誘導アルゴリズムによって Waypoint 切り替え時の旋回動作において左周り、右回りがランダムに決まってしまう場合があることなどが挙げられる。領域内完全探査を保証する自動 Waypoint 作成ツール及び誘導アルゴリズムを開発することが課題となる。

## 5 まとめ

本研究ではセンサ精度及び飛行管制、データ解析の環境改善のため APM 及び MP の導入を行い、システムを有効性を示すため洋上までの長距離情報収集実験を行った。また、モデルを精度を向上させるために推力測定実験を行った。そして PPG の協調制御を見据え擬似追尾実験、さらに探査可能領域の確認のためエリア内完全情報収集実験を行った。

今後は探査領域を完全に網羅することを保証した Waypoint 生成及び軌道追従アルゴリズムを提案すると共に、ロバスト安定性を保証する制御系設計[4,5,6]を実機に導入し実験を行う予定である。

## 5 予算執行

予算 ￥210,000

### 購入物品リスト

#### ● 備品

飛行体本体及びパーツ類 ￥100,000  
カメラ・無線送受信機・GPS など ￥20,000  
マイコン・画像処理ボード・センサなど ￥60,000

#### ● 消耗品

バッテリー・充電器 等 ￥50,000

## 参考文献

- [1] M. Tanaka, H. Kawai, K. Tanaka and H. O. Wang, Development of an Autonomous Flying Robot and Its Verification via Flight Control Experiment, 2013 IEEE International Conference on Robotica and Automation, Karlsruhe, Germany, May, 2013.
- [2] 倉持,河合,大竹,田中,動力付きパラグライダーのモデリングと軌道追従制御,計測自動学会システムインテグレーション部門講演会,1A2-5,Kyoto,December,2011.
- [3] 倉持,河合,田中,大竹,田中,電動パラグライダーのモデルパラメータ同定と安定化制御器の設計,自動制御連合講演会,F0989D,Kyoto,November,2012.
- [4] H. O.Wang, K. Tanaka andM. F. Griffin, An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.4, No.1, pp.14-23 (1996).
- [5] K. Tanaka, H. Ohtake and H. O. Wang, A Sum of Squares Approach to Modeling and Control of Nonlinear Dynamical Systems with Polynomial Fuzzy Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.17, No.4, pp.911-922, August, 2009.
- [6] K. Tanaka, H. Ohtake and H. O.Wang, Guaranteed Cost Control of Polynomial Fuzzy Systems via a Sum of Squares Approach, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part B, Vol.39, No.2, pp.561-567 April, 2009.

#### 4.5 超磁歪素子を利用した埋め込み型骨導補聴器の開発 ～振動子の構造最適化および体外ユニットの開発～

##### [プロジェクトリーダー]

林直輝 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 1年 小池・橋本研究室

##### [プロジェクトメンバー]

田中絵里 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 2年 小池・橋本研究室

金子渥 情報理工学部 知能機械工学科 4年 小池・橋本研究室

Geoffrey Ball MED-EL

高梨馨太 慶應大・医 大学院 2年

渡部孝太郎 慶應大・医 大学院 2年

##### [指導教員]

小池 卓二 教授, 神崎 晶 講師 (慶應大・医), 羽藤 直人 教授 (愛媛大・医)

### 1. 研究目的

外界の音は、鼓膜、耳小骨、蝸牛へと伝達され、蝸牛内のリンパ液を振動させる。リンパ液の振動により、蝸牛内の感覚細胞が刺激され、電気信号が脳に伝えられることで音を知覚する。この音の伝達経路に何らかの異常が生じると難聴となる。

難聴になった場合、聴力改善の一つの手段として補聴器の利用が挙げられる。外耳道にイヤホンを挿入し、気導刺激によって補聴する気導補聴器は、外耳道内における音の反射やハウリングなどの影響により高音域までひずみの少ない正確な音圧増幅特性の実現が困難である。外耳や鼓膜を介さない聴覚経路である骨導を用いた骨導補聴器は、気導補聴器に比べて音圧音質ともに優れ、ハウリングや耳の閉塞感等を克服できることから注目されている。日本でも認可され使用されている Cochlear 社の Bone Anchored Hearing Aid (BAHA) は、骨導端子が皮膚表面に露出しているため感染症を引き起こすこと、特に高音域における出力不足が問題点として挙げられる。近年、BAHA の問題点を解決するために、皮膚下に振動子を完全に埋め込む骨導補聴器である BoneBridge が MED-EL 社によって開発された。しかし、Bonebridge は振動子のサイズが大きいため、脳硬膜を傷つけないよう埋め込み場所を慎重に決定する必要があるといった問題点がある。そこで本研究では、超磁歪素子を用いることで小型化と高出力を実現する骨導補聴器を提案する。本報告では、本補聴器の課題である低周波数域での出力不足を改善するために、送受信コイルの伝送効率の改善に取り組んだ。

### 2. 超磁歪素子を利用した埋め込み型骨導補聴器

本補聴器の構成を Fig. 1 に示す。本補聴器は、マイク、サウンドプロセッサ、送信コイルからなる体外ユニットと、小型振動子、受信コイルからなる体内ユニットにより構成されている。体内外ユニットの信号伝送は、それぞれのユニットに設置されたコイルの相互誘導を用いることで経皮的に行うことが可能である。これにより、体内外ユニットを分離することができ、体内ユニットの完全埋め込みと小型化を実現し、侵襲の低減と衛生管理に優れるという利点がある。

体内ユニットの振動子を Fig. 2 に示す。振動子には外部磁界の変化に応じて寸法を変化させる性質 (Fig. 3) を持った素子である超磁歪素子 (Giant Magnetostrictive Material, GMM) を

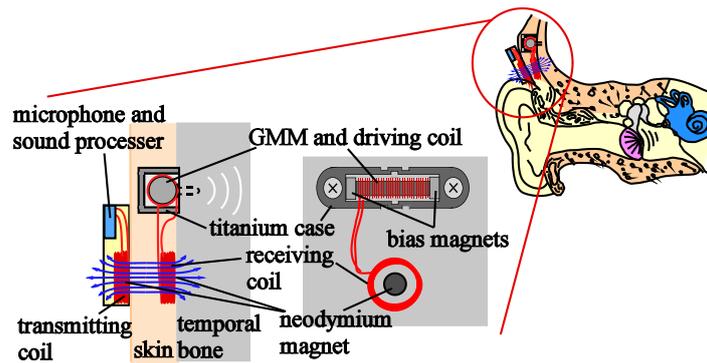


Fig. 1 Implantable hearing aid



Fig. 2 Vibrator

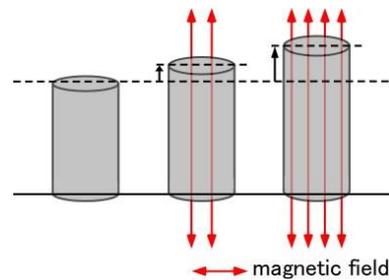


Fig. 3 Magnetostriction

用いる。GMMは、テルビウム、ジスプロシウム、鉄からなる合金で、従来の磁歪材料や圧電材料よりも変形率、応答速度、発生応力に優れている。本補聴器はこのような特性を持つ材料を振動子として利用する。

### 3. AM波と共振回路を組み合わせた新伝送方式

相互誘導によって体内ユニットの受信コイルに発生する誘導起電力は次式で表せる。

$$V = -M \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

ただし、 $M$ は相互インダクタンス、 $I$ は送信コイルに流れる電流である。相互インダクタンス  $M$  は、コイル形状やコイル間距離などによって決定される値であるため、形状や距離が一定である場合、式 (1) より受信コイルに発生する電圧は送信コイルに流れる電流の時間変化に依存する。これまで本補聴器は、ヒトの可聴域である比較的低い周波数の音声信号を送信コイルに直接入力し相互誘導させていた。そのため、受信コイルに発生する誘導起電力は小さく、伝送効率が悪かった。

相互誘導の伝送効率を上げる手段の一つに、高周波の利用がある。そこで本補聴器には、高周波である搬送波の振幅を信号波の振幅に比例して変化させる振幅変調 (Amplitude Modulation, AM) 波の利用を検討する。使用する搬送波周波数は、非接触給電の規格の 1 つである  $Q_i$  の範囲内である 110~205 kHz に収めた。また、伝送効率をさらに上昇させる手段として、コイルとコンデンサによる共振回路を利用する方法を提案する。両素子を直列に接続した場合、回路のインピーダンスおよび共振周波数は次式で表される。

$$Z = j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) + R \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

ただし、 $Z$ は回路のインピーダンス、 $\omega$ は回路の共振周波数、 $R$ は回路の抵抗、 $L$ はコイルのインダクタンス、 $C$ はコンデンサの静電容量である。この共振周波数に相当する信号を回路に入力することで、インダクタンスとキャパシタンスが打ち消し合い、回路内のインピーダンスは抵抗成分のみとなるため、電力を高効率で伝送することが可能であると考えられる。しかし、AM波を信号伝送に使用する場合、AM波から元の音声信号を取り出す必要があるため、受信コイルに送られた信号を復調回路に通す必要がある。

そこで本研究では、複数の復調回路を用いた場合のGMMの振幅を評価し、高効率かつ高出力な復調回路の検討を行った。また、復調回路で用いられるダイオードの電圧降下によって振動子へ流れる電流が低下してしまう可能性がある。そこで、信号波を直接入力した従来の伝送方法と、AMと直列共振回路を用いた新伝送方法の伝送効率の比較も行った。

### 3.1 3種類の復調回路によるGMMの振幅評価実験

#### 3.1.1 実験方法

実験に使用した復調回路と送受信コイル及び駆動コイルの詳細をそれぞれ Fig. 4, Table 1 に示す。GMMの一端を木片に取り付け、その木片を万力で固定した。ヒトの皮膚を考慮するため送受信コイルの間に厚さ5mmの塩化ビニル板を挟み、送信コイルに対しファンクションジェネレータ(DF1906,NF)、アンプ(HSA4011,NF)を介し、AM波を入力した。Fig. 4(a)包絡線復調回路(回路A)には50kHz、(b)クランプ回路と包絡線検波を組み合わせた復調回路(回路B)および(c)倍電圧復調回路(回路C)には190kHzの搬送波を入力した。また、AM波の変調度は95%、信号波周波数は0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8kHzとした。復調回路に使用したコンデンサはすべてフィルムコンデンサの0.01 $\mu$ Fであり、ダイオードはショットキーバリア型ダイオード(1S4)である。送信コイルへの入力電力を1.0AVで一定とした際のGMMの振動をレーザドップラ振動計(LV-1720A, ONO SOKKI)を用いて計測し、オシロスコープ(DS-5524, IWATSU)によって波形を記録した。また、送信コイルへの入力電流および電圧は電流プローブ(P6022, Tektronix)、ワニ口クリップによって計測した。同時に、相互誘導により駆動コイルに発生した電流を電流プローブ(P6022, Tektronix)によって計測した。次に、変調度を95%、信号波周波数を8kHzとし、送信コイルへの入力電流を50, 70, 90, 110, 130, 150 mArmsと変化させた場合のGMMの振幅を同様にして計測した。

#### 3.1.2 結果・考察

各復調回路を用いたときの駆動コイルに流れる電流波形を Fig. 5 に示す。回路Aは今回使用した復調回路の中で最も簡単な回路である。しかし、共振回路を使用していないため、一定電流を流すのに大きな電圧が必要となり、伝送効率が悪い。回路Bおよび回路Cは共振回路を採用しているため、伝送効率が良く、回路Aに比べて大きな電流が流れることが分かる。次に、送信コイルへの入力電力を一定にしたときのLDVの測定結果を Fig. 6(a) に示す。Fig. 6(a)より、回路Bがすべての周波数において最大振幅となった。GMMの伸びは駆動コイルに流れる電流によって決まるため、受信側に大きな電流が流れた回路Bが最も大きな振幅を得られたと考えられる。次に、Fig. 6(b)の送信コイルへの入力電流の値を変化させた場合のGMMの振幅を見ると、どの電流帯でも回路Bの振幅が一番大きくなった。また、それぞれの復調回路の電流値の傾きを見ると、回路Bの傾きが最大で、回路Aが最小となった。これより、大電流を流した場合、回路Bは大きな加振力を得られるが、回路Aは大きな電流を流しても大きな加振力が得られないことがわかる。ただし、回路Bによって復調された電流波形を見ると、搬送波成分が多く残っている。しかし、人間の可聴域が20~20kHzであることを考えると、190kHzの搬送波成分が残っていても補聴音には影響がないと考えられる。

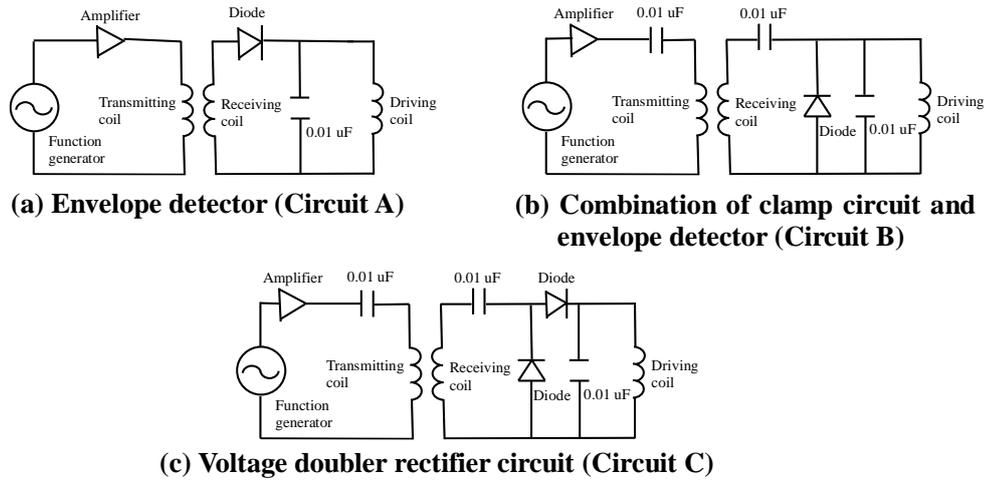


Fig. 4 Demodulating circuits

Table 1 Details of coils

	Transmitting coil	Receiving coil	Driving coil
Lead diameter [mm]	0.2	0.2	0.2
Coil turns [turns]	40	40	130
Inner diameter [mm]	25	25	2
Length [mm]	2	2	10
Resistance [ $\Omega$ ]	2.0	2.0	0.9

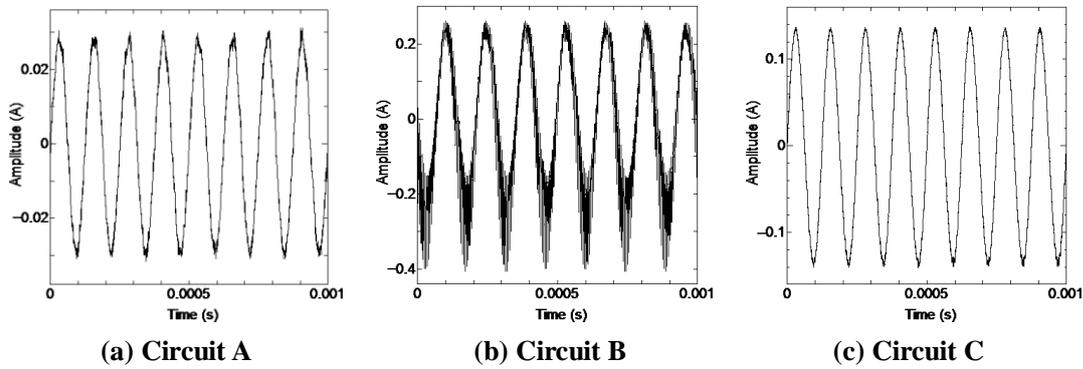


Fig. 5 Output current of demodulating circuits

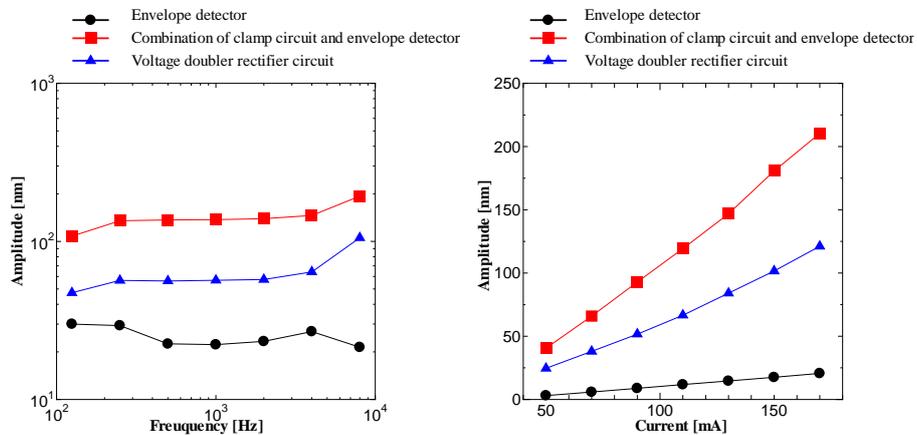


Fig. 6 Experimental results

### 3.2 従来方式と新方式による伝送効率の比較実験

#### 3.2.1 実験方法

実験に使用した回路を Fig. 7 に示す. また, 使用した送受信コイル及び駆動コイルは Table 1 と同じである. Fig. 7 (a) の回路 A はコイルの相互誘導に音声信号を用いる従来の伝送方式であり, (b) の回路 B は送受信コイルにコンデンサを直列に接続し, 共振回路とした新伝送方式である. 回路 B は送受信コイルの信号伝送に AM 波を使用し, 復調回路には前項の実験結果で出力および効率が最大となった Fig. 4 (b) の回路を用いた.

送受信コイルの間には, ヒトの皮膚を考慮し, 厚さ 5 mm の塩化ビニル板を挟んだ. ファンクションジェネレータ (SG-4115, IWATSU), アンプ (HSA4011, NF) を介し, 送信回路に信号を入力した. 送信回路の入力電圧, 電流は電圧プローブ (SS-0130R, IWATSU) および電流プローブ (P6022, Tektronix) を用いて計測した. また, このとき相互誘導により駆動コイルに流れた電流を電流プローブ (SS-240A, IWATSU) を用いて計測し, 波形をオシロスコープで記録した. 入力信号として, 回路 A には 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 kHz の正弦波, 回路 B には搬送波周波数 180 kHz, 信号波周波数 0.125 ~ 8 kHz, 変調度 95 % の AM 波を入力した. また, 回路 A, 回路 B ともに送信コイルへの入力電流は 100 mArms で一定とした.

#### 3.2.2 実験結果・考察

駆動コイルに発生した電流の周波数特性を Fig. 8 に示す. 相互誘導に音声信号を用いる従来方式は, 周波数が低くなるに従い伝送効率が落ち, 送信側に入力した電流に対して受信側に流れる電流が小さくなった. 一方, AM 波と共振回路を用いた新伝送方式は, フラットな周波数特性を持ち, 大きな電流が得られた. また, 従来方式と新方式を比較すると, 0.125 kHz で最大約 45 dB の伝送効率の改善が見られた. 以上の結果より, AM 波と共振回路を用いた新伝送方式を採用することで, 本補聴器の課題である低周波数域における出力不足が改善できるのではないかと考えられる.

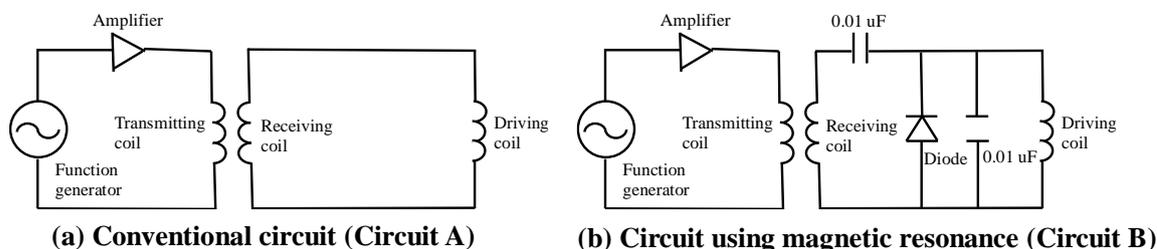


Fig. 7 Circuits of external and internal units

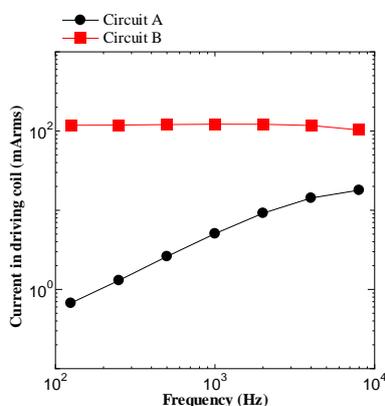


Fig. 8 Current in driving coil

## 5. 結言

3種類の復調回路を用いて GMM の振幅を比較した結果、クランプ回路と包絡線検波を組み合わせた復調回路が出力、エネルギー効率ともに最大となることが分かった。また、AM 波と共振回路を組み合わせた新伝送方式を用いると、伝送効率を最大で約 45 dB 向上することができた。

以上より、AM 波と共振回路を組み合わせた新信号伝送方式を用いることで、本補聴器の課題である低周波数域の出力不足を改善できると考えられる。

## 6. 今後の展望

### 6.1 骨導補聴器装用者による試作補聴器の性能評価

BAHA の骨導端子に本補聴器の振動子を取り付けるために、補聴器アダプター (Fig. 9) を製作した。BAHA 患者の協力のもと、補聴器アダプターを用いて骨導端子に本補聴器を装着し、試作補聴器の補聴性能の評価を行う。

### 6.2 動物実験による経年変化・耐久性の評価

本補聴器の振動子は埋め込み後、半永久的に体内に残る。そこで、Fig. 10 の動物実験用体内ユニットをモルモットの体内に長期間埋め込むことで、振動子の耐久性を評価する。また、チタン製の振動子が骨と高度に結合する osseointegration によって加振力に経年的な変化が現れるかどうかを、聴性脳幹反応 (auditory brainstem response, ABR) によって評価を行う。

## 7. 物品購入リストおよび価格

品名	単価	個数	項目価格
ABR 用ヘッドホン	¥70,000	1	¥70,000
ABR 用針電極 (動物実験用)	¥23,328	1	¥10,500
補聴器アダプター (BAHA 患者装着用)	¥90,720	1	¥65,000
合計			¥184,048

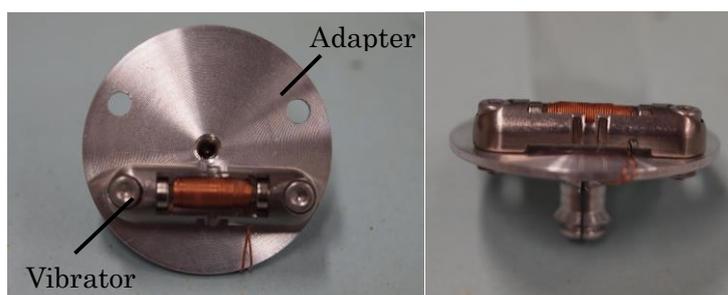


Fig. 9 Adapter for hearing aid

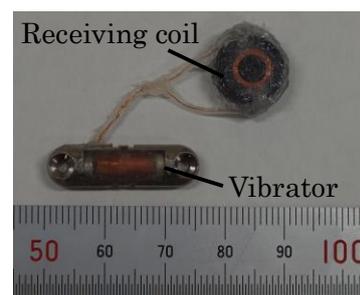


Fig. 10 Internal unit for guinea pigs

## 4.6 ダイナミックヒューマノイドロボットの開発

### [プロジェクトリーダー]

1350006 植木 公威 情報メディアシステム学専攻 大学院博士前期課程 2年 明研究室

### [プロジェクトメンバー]

1490011 孟 非 北京理工大学 機械工程 博士後期課程 4年 明研究室  
1332022 小山 佳祐 知能機械工学専攻 大学院博士前期課程 2年 下条研究室  
1450037 米田 将允 情報メディアシステム学専攻 大学院博士前期課程 1年 明研究室  
1112022 内田 卓馬 知能機械工学科 4年 明研究室

### [指導教員]

明 愛国 教授  
下条 誠 教授  
鈴木 陽介 助教

### [提出日]

2015年3月5日

### 1. 研究背景

これまでロボットは産業分野において活躍が目覚ましく、工場といった特定空間での単純作業の効率化が重要視されてきた。しかし最近では、未知の領域への探査やホームサービスといった多岐にわたる分野での活躍も期待されている。そのため、特定の目的に対して効率よく作業を行えるだけでなく、複数のタスクが実行可能なロボットが求められている。このような背景から、数多くの研究機関が人間と同じ移動形態で生活環境への適応性が高いといった利点を持つ二足歩行ロボットに関する研究を行っている。しかし、現在開発されている二足歩行ロボットは、関節駆動に用いられるアクチュエータのエネルギー効率が低く、大型高重量で、動作がぎこちなく、人間と同等な運動性能には程遠い。このため、高速な動作が可能で高バックドライバビリティを有するアクチュエータを搭載した二足歩行ロボットの実現は大きな課題となっている。二足歩行ロボットが未だ人間並みの高速な動作を実現できていない理由の1つとして、アクチュエータの力に高い減速比をかけて関節を駆動している点が挙げられる。一般に減速比は関節にかかる最大のトルク負荷に対応できるように決められるため、最大負荷がかかっている場合を除いては、過剰な高減速比の設定になってしまう。減速比が過剰に高いと、関節の回転速度の低下に加えて、バックドライバビリティの低下が発生するため、高い運動性能を発揮しにくくなる。

本研究室では上記の課題を解決するために、四節リンク機構を用いた変減速リンク機構を開発し、二足歩行ロボットの膝関節静トルクを補う研究を行った。この研究で変減速リンク機構を用いて二足歩行ロボットの関節減速比を変化させることが可能であり、また有効であることが分かった。

そして、この四節リンクを応用した2つの研究を行った。1つは、四節リンクの向かい合った2辺を交差させた形状で膝関節に搭載された変速交差リンク機構である。これは、膝関節の角度に伴い減速比が変化することに加え、人間の膝関節のような回転中心が移動する関節駆動を実現し、脚の可動域の広範囲化に繋がった。もう1つは、4つのリンクのうち1つのリンクの長さを変化させることで、歩行の効率化を図った負荷感応無段変速機構である。足裏が地面についている際に、リンク機構の入力軸に加わる負荷に対して、減速比を

変化させる。本機構を、ヒューノイドロボットの関節の中でも特に駆動に必要なトルクの大きな膝関節に導入し、入力軸に加わる負荷の変化の大きい歩行動作へ利用することで、効率の良い歩行を行うことを可能とした。

しかし、これらを実用的なものにするためには、更なる改善が必要である。そこで、本プロジェクトでは、これまで本研究室で開発されてきた上記2つそれぞれの発展研究として、①変減速交差リンクとストッパを用いた脚機構の開発および②負荷感応無段変速リンク機構を用いた膝関節を有する脚機構の開発を行った。

## 2. ①変減速交差リンクとストッパを用いた脚機構の開発

### 2.1. 研究目的

研究背景で述べた変速交差リンク機構は、変速機としての特性しか活かしきれていなかったため、機構の再設計およびストッパとの統合により更なる性能の向上を図る。

本研究では、変速交差リンクを採用することで膝関節の変速比変化による必要静トルクの低減に加え、膝関節の瞬間中心の移動による膝関節駆動に必要なトルクの低減ができる設計を行う。また、ストッパを採用することにより、膝伸展時における膝関節アクチュエータの低トルク化が期待できる。

そして、両脚膝屈曲といった基礎的な動作を可能とする必要最低限のトルクが出力される膝関節アクチュエータを設計し、二足歩行ロボットの運動性能の向上を図る。

### 2.2 変速交差リンク

#### 2.2.1 瞬間中心移動による特性

本研究で用いる変速交差リンクとは、人間の十字靭帯の形状を参考にした交差リンク機構のことである。人間は図2.1のように十字靭帯が大腿骨と脛骨を繋いでおり、膝に四軸の回転を有している。これらは連携して動く。伸展時には前十字靭帯と後十字靭帯が交差した状態で繋がれており、屈曲するにつれて交差点がずれ、最終的に凹四角形となる。このヒトの十字靭帯を参考とした変速交差リンク機構を図2.2に示す。

このことにより、関節角度の回転に伴い軸点が移動し、ヒトと同様な転がり・滑り運動を実現し、単純な一軸回転方式の膝関節に比べてピッチ軸回りに広い可動域を有する。また、膝屈曲において生じる移動する回転軸点：瞬間中心(ICR, Instant Center of Rotation)から質量中心までのモーメントアームの増加が抑制され、膝関節に必要なトルクの低減される。さらに、膝関節の変速変化によってアクチュエータに必要なトルクの低減もされる。

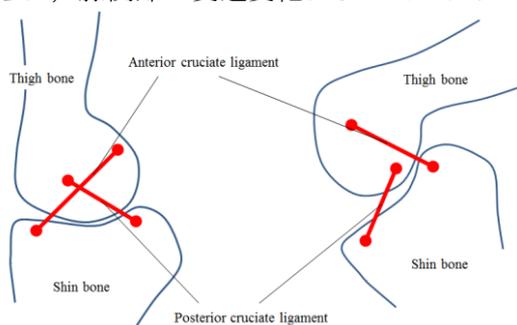


図 2.1 ヒトの膝関節構造概略

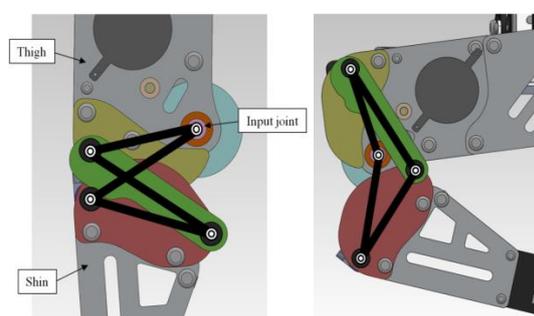


図 2.2 変速交差リンク機構

#### 2.2.2. 変速機としての特性

変速交差リンクモデルを図 2.3 上の太線で示す. 点 A の角度を入力角  $\phi$  とすると, 交差していないリンク  $b$  とリンク  $d$  の二辺をロボットの大腿部と下腿部として構成するとき, 膝関節角度  $\theta$  はリンク  $b$  とリンク  $d$  を延長した線の交点に存在する. よって, 変速交差リンク機構の変速比は入力角速度  $\dot{\phi}$  と膝関節角速度  $\dot{\theta}$  の関係にある.

$$v_B = L_B \dot{\theta} = l_b \dot{\phi} \quad (1)$$

したがって, 入力トルク  $\tau_i$  と出力トルク  $\tau_o$  の関係は式 2 のように求められる.

$$\tau_o = \frac{L_B}{l_b} \tau_i \quad (2)$$

ただし,  $L_B$  は以下の通りとなる.

$$L_B = \frac{l_c \sin \alpha_C (l_a^2 + l_b^2 - 2l_a l_b \cos \phi)}{l_a l_c \sin(\phi + \alpha_C) - l_a l_d \sin \phi - l_b l_c \sin \alpha_C} \quad (3)$$

以上の式から, 膝関節角度  $\theta$  が変化すると, CFLVT の入力角  $\phi$  や点 C の角度  $\alpha_C$  が変化するため, 減速比も変化し, 膝関節アクチュエータに必要なトルクに相当している CFLVT の入力角  $\phi$  変化することが分かる. これにより, 膝屈曲動作において一般的に増加する膝関節に必要な静トルクに変速比を対応させることが可能となる. したがって, 膝関節に大きなトルクを必要とする膝屈曲時には減速比を大きく, 膝関節トルクをあまり必要としない膝伸展時には減速比が小さく設計することにより, アクチュエータに必要な最大静トルクを低減することを可能とし, 膝伸展時における動作の高速化およびバックドライバビリティの向上が期待できる.

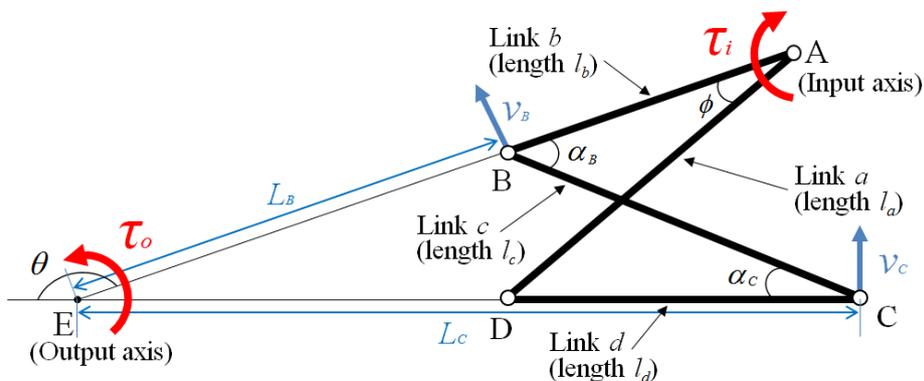


図 2.3 変速交差リンクモデル

### 2.2.3. シミュレーション

動力学シミュレーションにて変速交差リンク機構を搭載した簡易モデルによる膝屈曲での膝関節駆動に必要な静トルクを求め, 1 軸回転モデル, 変速リンク機構を搭載したモデルと比較し有用性を検証する.

シミュレーションでの膝屈曲動作は, 膝関節角度 5[deg] から 160[deg] まで一定の速度で動かす. 膝屈曲における片脚の膝関節に必要な静トルクは図 2.4 のようになる.  $\tau_a$  は 1 軸回転のモデルの膝関節トルク,  $\tau_b$  は変速リンク機構のモデルの膝関節トルク,  $\tau_c$  は変速交差リンクの膝関節トルクを表している. この結果より, 膝関節において必要となる最大静トルクが変速比の変化により低減し, また変速交差リンクの特徴である回転中心の移動により, さらに低減されているが確認できる. したがって, 変速交差リンク機構を用いることによ

って比較的低出力のアクチュエータでも膝屈曲は十分に可能であると言える。

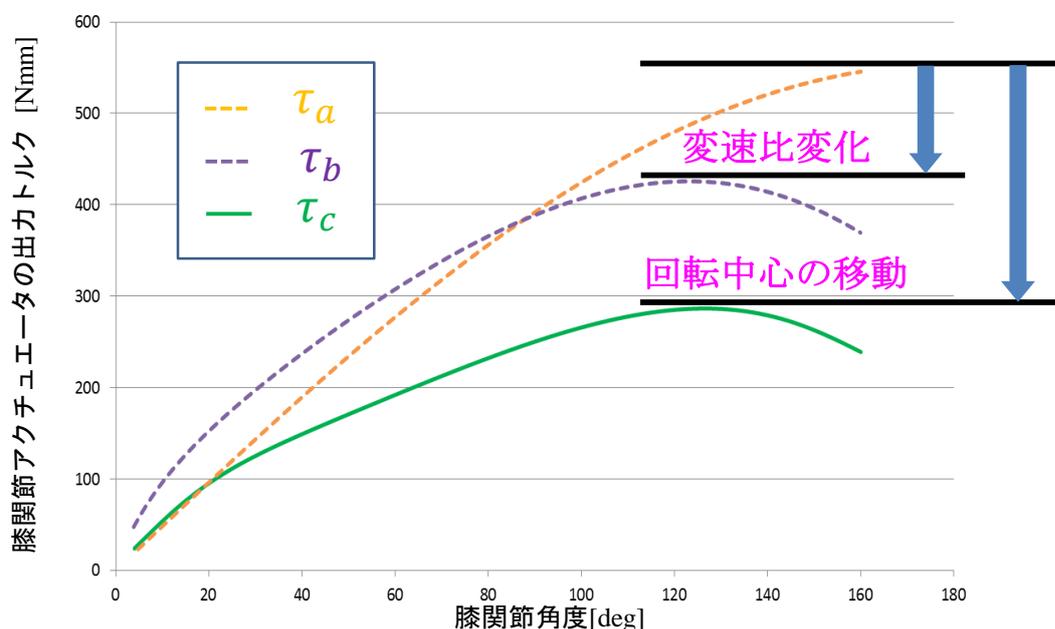


図 2.4 膝屈曲時の片脚膝関節に必要な静トルク

### 2.3. ストップ機構

ヒトの全ての関節には、関節受動抵抗という関節可動域を制限するストップ機能が存在する。関節受動抵抗は、関節可動域の限界に近づくと、関節まわりにある靭帯や腱、関節包といった軟部組織により運動方向と反対に非線形なトルクが発生し、運動に必要なトルクの補助や身体への損傷を防止するといった役割を果たす。また、ヒトは直立時、膝関節と足関節が重心よりも後方に存在しており、関節が固定され受動的に体が支えられている。本研究では、膝にストップ機構を採用し足裏が床面に接地している支持脚は、膝伸展時において質量中心より後方に膝関節を有し、膝から上にある大腿部と胴体の質量によって伸展方向へのトルクが加わる。しかしストップにより、これ以上伸展しないように受動的に拘束されるため、膝関節アクチュエータの必要トルクの補助が期待される。ストップは図 2.5 のように機械的に拘束される。このストップ機構は膝関節角度を制限するためのものであるため、モータや電磁磁石を用いたストップ機構に比べて小型軽量の機構であると言える。

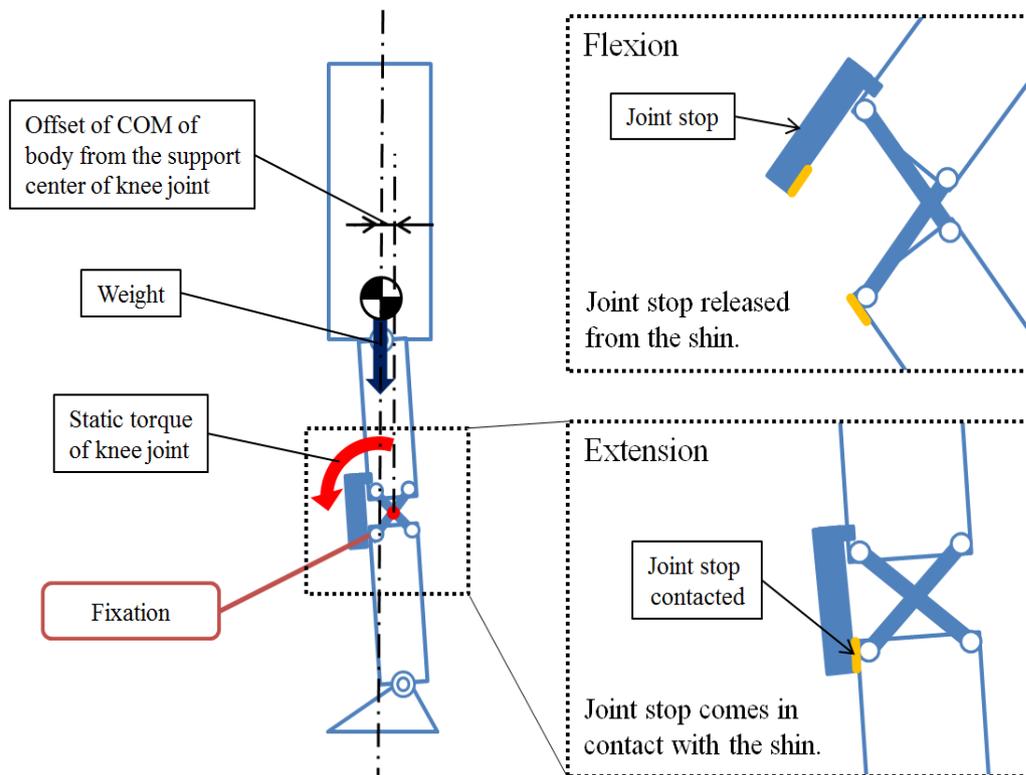


図 2.5 ストップ機構の機能

## 2.4. 実験

### 2.4.1. ロボット製作

機構設計とシミュレーション結果より、全長 473mm、重量 1.6kg となる図 2.6 のようなロボットを製作した。両脚の股関節にはピッチ軸とロール軸の 2 自由度をそれぞれ有し、膝関節にはピッチ軸が 1 自由度ずつ、股関節にはピッチ軸とロール軸の 2 自由度がそれぞれ存在する。加えて、二足歩行ロボットの重心移動を容易に行うために本ロボットの胴体部に腰関節駆動をピッチ軸に 1 自由度設けている。変速交差リンク機構が膝関節の可動域は  $5 < \theta < 170\text{deg}$ 、最終減速比は最小 9.7、最大 36.3 まで変化が可能である。

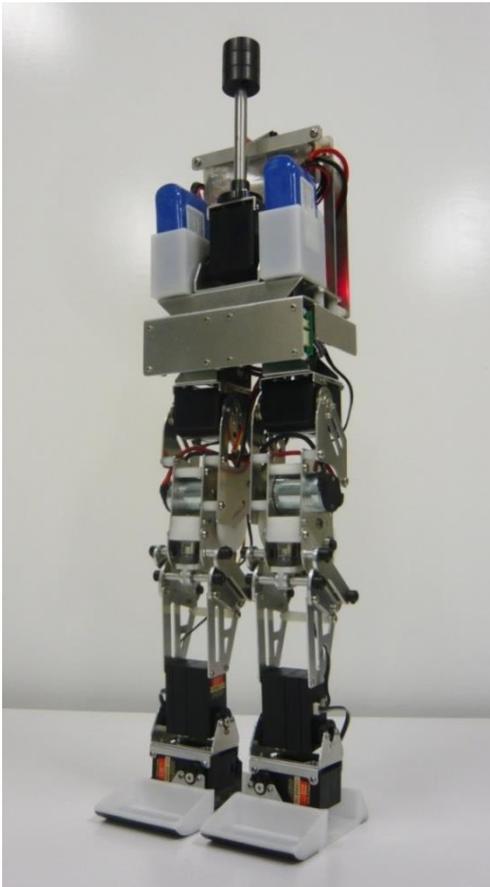


図 2.6 ロボット本体と膝関節側面図

#### 2.4.2. 歩行実験

膝伸展歩行を実行し、二足歩行ロボットの膝関節にストップ機構を用いることで、膝関節アクチュエータの出力トルクが低減されるか検証を行う。ストップ機構の有用性を明確にするため、質量中心の地面への投影点が常に脚の支持基底面内にあるように駆動させ、静歩行にて実験を行った。

支持脚側の膝関節アクチュエータの出力トルクは、常に 50Nmm 以下となっており低出力トルクであることが確認できる。これはストップ機構が支持脚時に有効的に働き、出力トルクの補助が行われたと考えられる。また、ストップ機構を外した場合には、うまく歩行させることはできなかった。膝伸展歩行は、重心が高いところに位置しているため制御が困難であることに加え、変速交差リンク機構により減速比が小さく、バックドライバビリティが高いことがロボットが倒れた原因であると考えられる。このことから、高いバックドライバビリティを持ったロボットにおいてストップ機構が特に有用であると考えられる。また、動歩行にて実験を行ったところ、歩行速度 0.12m/s を実現することができた。

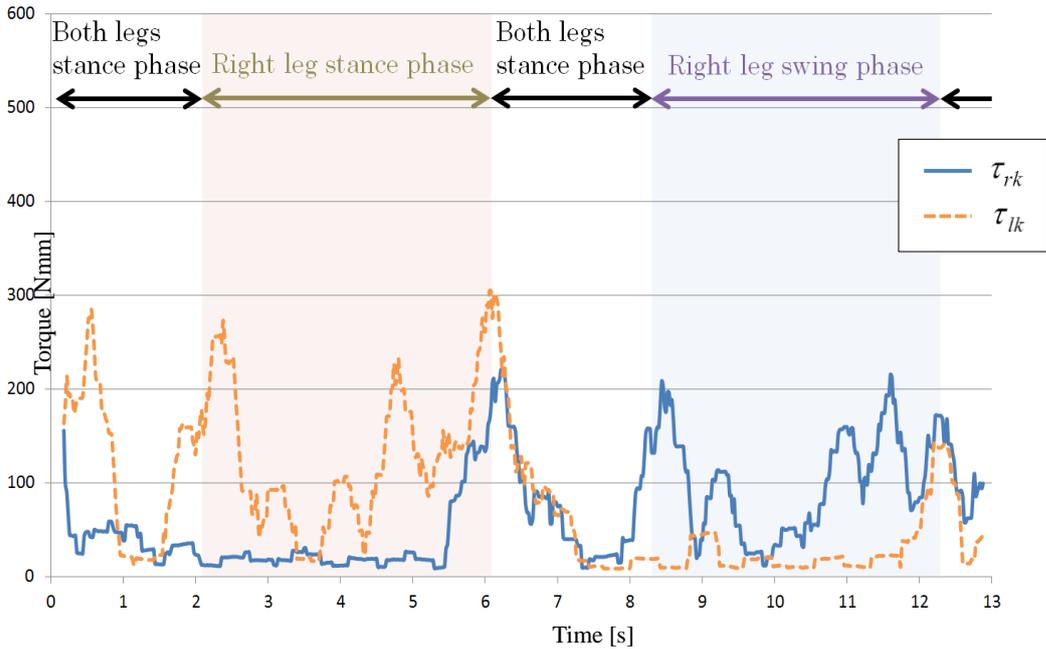


図 2.7 静歩行実験における膝関節アクチュエータの出力トルク

### 2.4.3. キック実験

本実験では、ダイナミックな動作としてインステップキックを採用し、膝関節アクチュエータにおけるバックドライバビリティ性について検証を行う。このキック動作において、遊脚では、変速交差リンク機構による高いバックドライバビリティを活かしたキックの高速化が期待できる。支持脚では、ストッパ機構により伸展支持を可能とし、遊脚が可動できる空間の確保と膝関節アクチュエータの出力トルク低減が期待できる。

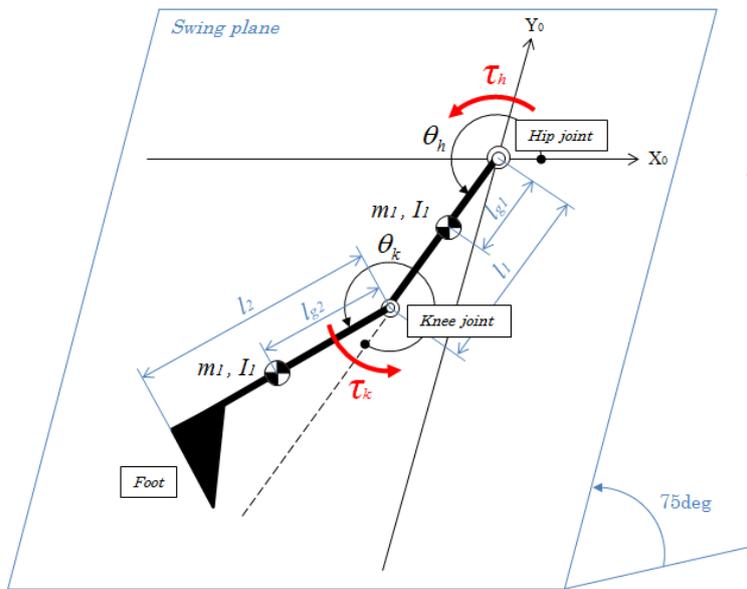
遊脚の簡易モデルを図 2.8 に示す。本実験では、脚機構の効果とその原因を明らかにするため、股関節と膝関節の 2 自由度の回転を有した簡単な 2 リンクモデルとしてキックモーションを考える。ラグランジュ法より、股関節角度  $\theta_h$  と膝関節角度  $\theta_k$  からなる遊脚の運動方程式は式 4 のようになる。

$$I_2 \ddot{\theta}_k = \tau_k - \{ (I_2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_k) \ddot{\theta}_h + m_2 l_1 l_{g2} \sin \theta_k \dot{\theta}_h^2 + m_2 l_{g2} g_y \cos(\theta_h + \theta_k) \} \quad (4)$$

この式から、股関節の角加速度  $\ddot{\theta}_h$  が減速することで、下腿部の加速に必要な慣性力が大きくなることが分かる。この慣性力は、バックドライバビリティが高いほど有効的に働くと考えられる。そのため、二足歩行ロボットの膝関節が高バックドライバビリティであれば、遊脚側の股関節をキック動作の途中で減速させることで足先速度の向上が期待できる。

実験方法は、脚機構の効果と比較しやすくするため支持脚を定盤に固定し、遊脚の股関節と膝関節を最大角速度でフォワードスイングを開始させた。そして、大腿部が床面と垂直になったとき、膝関節を脱力、および股関節を(a)減速した場合と(b)等速で駆動し続けた場合の 2 通りのキックを行わせた。このときの膝関節角速度を図 2.9 に示す。また、インパクト時の股関節および膝関節角速度、足先速度を表 2.1 に示す。インパクトポジションは、支持脚の足先から足裏基底面の長さ 1 個分(77mm)とする。

$\dot{\theta}_{ka}$  : (a)減速したときの右膝関節角速度、 $\dot{\theta}_{kb}$  : (b)等速で駆動したときの右膝関節角速度とする。



$m_i$  : Center of mass of the link  
 $l_i$  : Link length  
 $l_{gi}$  : Length to mass point of link from joint  
 $I_i$  : Moment of inertia  
 $\theta_i$  : Joint angle  
 $\tau_i$  : Joint torque

図 2.8 遊脚の 2 リンクモデル

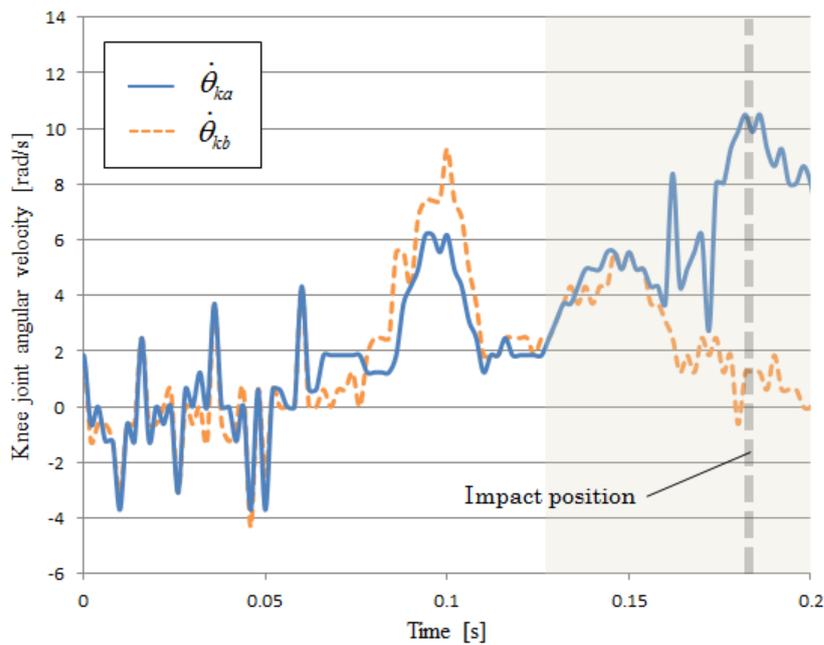


図 2.8 遊脚の 2 リンクモデル

表 2.1 キックの測定結果

	Hip joint angular velocity (rad/s)	Knee joint angular velocity (rad/s)	Foot velocity (m/s)
(a) Negative acceleration	7.5	10.5	3.1
(b) Constant acceleration	14.0	1.9	2.8

股関節を途中で減速すると、脱力しているにもかかわらず膝関節は加速するのに対し、股関節を等速に動かし続けると減速することが分かった。これは、本ロボットの膝関節が高バックドライバビリティであることにより、股関節を途中で減速することで慣性力を効率的に利用していると考えられる。

また、途中で脱力した遊脚の膝関節を最大角速度で常に駆動させた場合、アクチュエータの駆動トルクと慣性力の利用により、足先速度 3.9m/s のキックが実現できた。

## 2.5. まとめ

本研究では、変速交差リンクとストッパを用いて二足歩行ロボットの運動性能の向上を試みた。変減速交差リンク機構とストッパ機構を搭載したロボットの製作し、膝屈曲、静歩行、動歩行、キックの 4 つについて動作実験を行った。静歩行実験は、静的動作についての検証として行い、ストッパによる膝関節のトルク補助を可能とし、低出力トルクでの膝伸展歩行を可能とした。動歩行実験は、静歩行と同様に膝伸展歩行を実現した。キック実験では、変速交差リンク機構の高バックドライバビリティ性により慣性力の利用を可能とし、高速なキックが実現できた。さらに、ストッパにより膝伸展での片脚支持を可能とし、遊脚が可動できる空間の確保と膝関節のトルク補助が確認できた。以上のように、膝関節において変速交差リンクとストッパの有用性を示した。

今後の課題としては、変速交差リンクとストッパの特性を有効利用するためのモーションの改善が求められる。また、これらの機構を股関節や足関節等にも利用し、各関節アクチュエータの最適設計を行うことで自律したキックや走行等の動作も可能であると考えられる。

### 3. ②負荷感応無段変速リンク機構を用いた膝関節を有する脚機構の開発

#### 3.1. 研究目的

研究背景で述べた負荷感応無段変速機構は、制御性と安定性を優先して変速を2段階のみに制限した上で、二足歩行ロボットの膝関節に適用した。この2段変速により、歩行動作における立脚と遊脚のトルク負荷変化への対応が可能になった。しかし、変速比が2パターンだけでは効率がよくない場合も多い。同じ立脚期中においても、上半身の姿勢などにより負荷トルクは変化するため、減速比が過剰となり得るからである。さらに、変速リンク機構において入力軸は、関節を駆動する分の回転量に加えて、変速を行う分の回転量も必要となる。2段変速しかないと、この変速のための回転量も過剰となる。素早く関節を駆動するには、減速比と入力軸回転量は必要最小限であることが望ましい。

そこで、本研究では減速比を無段階で得られるようにした負荷感応無段変速リンク機構を膝関節へ搭載することを提案し、実機開発を通じてその有効性を検証する。

#### 3.2. 負荷感応無段変速リンク機構の設計・製作

##### 3.2.1. 概要

本機構を含むロボットのモデルを図3.1に示す。本機構は、ねじりバネを搭載した5節リンク機構であり、五角形OABCDが5節リンクを構成する。

モータとギアボックスからのトルクが軸Aへと入力され、リンク機構を介して膝関節軸Oで出力される。ねじりバネは軸Bに実装されており、リンクABとリンクBCのなす角に応じて弾性力による反時計回りのトルクを発生させる。

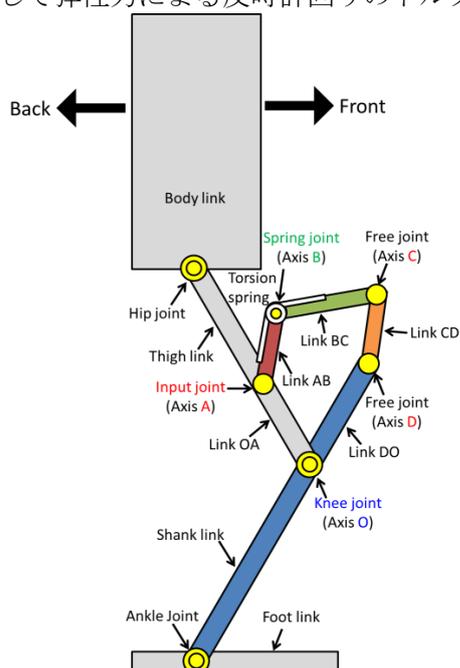


図 3.1 脚機構モデル図

本機構の動作は以下の2ステップから成る。

1：モータからの入力トルクがねじりバネをたわませる

2：ねじりバネが発生させるトルクが膝関節に出力される、

ねじりバネを含む5節リンクの姿勢によって、モータから入力されるトルクと膝関節から出力されるトルクの比率は連続的な変化を示す。この性質を利用して、入出力トルクの比率を連続的に変化させ得る無段変速機構を設計する。なお、本機構が感応する「負荷」とは、膝関節を屈曲させる方向に働く外力によるトルクのことである。

### 3.2.2. 入出力トルク計算

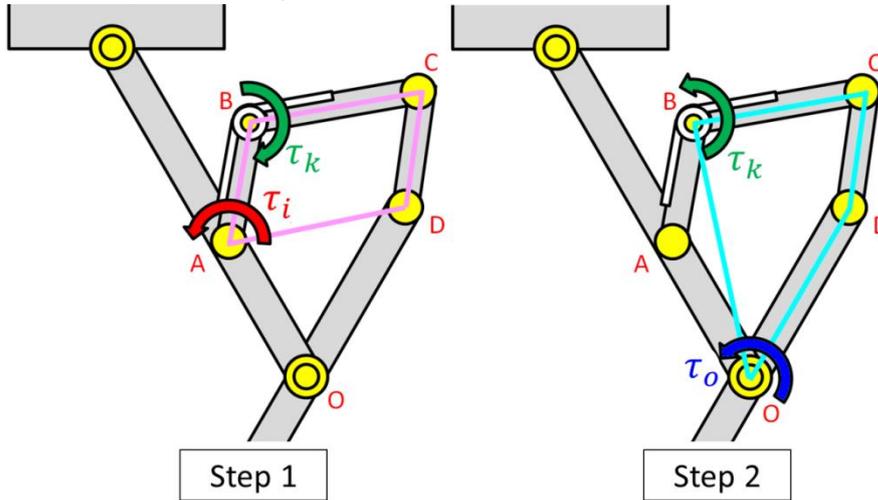


図 3.2 脚機構モデル図

5節リンクを4節リンク2つに分け、入出力トルクを計算する。図 3.2 左図において、軸 A への入力トルクを $\tau_i$ 、軸 B でねじりバネをたわませるトルクを $\tau_k$ とし、軸 A からリンク CD への距離を $L_A$ 、軸 B からリンク CD への距離を $L_B$ とする。四角形 ABCD を4節リンクと考えると、式(1)が成り立つ。同様にして、図 3.2 右図において、軸 B でねじりバネが発揮するトルクを $\tau_k$ 、軸 O で膝関節を駆動する出力トルクを $\tau_o$ とし、軸 B からリンク CD への距離を $L_B$ 、軸 O からリンク CD への距離を $L_O$ とする。四角形 BCDO を4節リンクと考えると、式(2)が成り立つ。

$$\tau_i = \frac{L_A}{L_B} \tau_k \quad (1)$$

$$\tau_o = \frac{L_O}{L_B} \tau_k \quad (2)$$

式(1)、(2)より、ねじりバネトルク $\tau_k$ および各軸からリンク CD への距離がわかれば、入出力トルク $\tau_i$ 、 $\tau_o$ を算出できる。そして $\tau_k$ および各軸からリンク CD への距離は、5節リンクの姿勢、バネ定数、自然角がわかれば確定できる。

そこで、表計算ソフトを用いて、5節リンクの姿勢を計算できるようにした。これにより、各軸の角度やリンク長、バネ定数、自然角などの設定条件下における静的な入出力トルクを算出できるようになった。

### 3.2.3. 選定したパラメータによるモデル

以上の計算法を用い、無負荷状態で減速比が常に1の平行リンクとなることや、自重支持に十分な出力トルクが得られることなどを条件に、試行錯誤的に5節リンクのリンク長、バネ定数 $k$ 、自然角 $\beta_0$ を選定した結果が表 3.1 である。なお軸 A と軸 B をつなぐリンク長を $L_{AB}$ と表現し、他リンクも同様に定めた。

表 3.1 選定したリンクパラメータ

$L_{AB}$	12.5[mm]
$k$	3[mNm/deg]
$\beta_0$	180[deg]

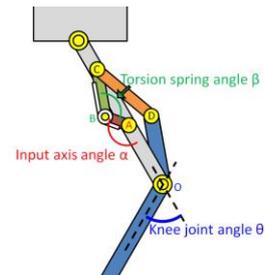


図 3.3 選定したパラメータによるモデル

選定したパラメータのモデルを図 3.3 に示す。入力軸角度 $\alpha$ 、ねじりバネ角度 $\beta$ 、膝関節角度 $\theta$ を図 3.3 にあるよう定義した。図 3.4 に $\theta = 60[\text{deg}]$ で一定の場合におけるリンク姿勢の例を示す。左図から $\alpha = 200, 140, 80[\text{deg}]$ の時のリンクの姿勢を表している。

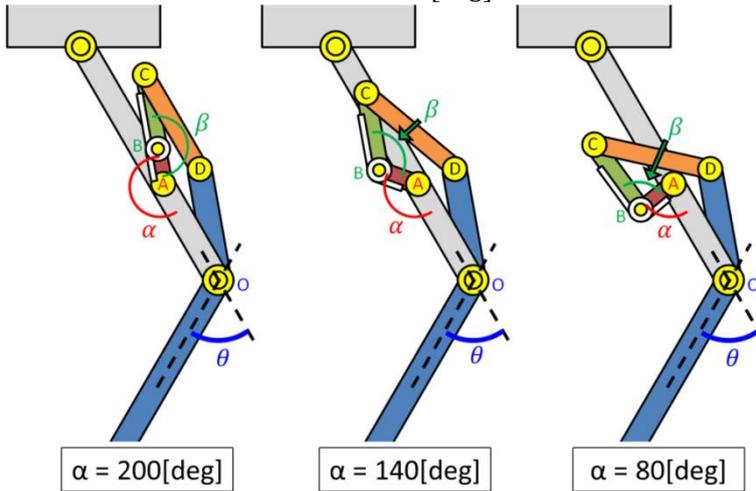


図 3.4 機構のリンク姿勢の例( $\theta = 60[\text{deg}]$ )

また、入出力トルク変化の一例を図 3.5~3.7 に示す。さらに、選定したパラメータに基づき製作した実機を図 3.8 に示す。

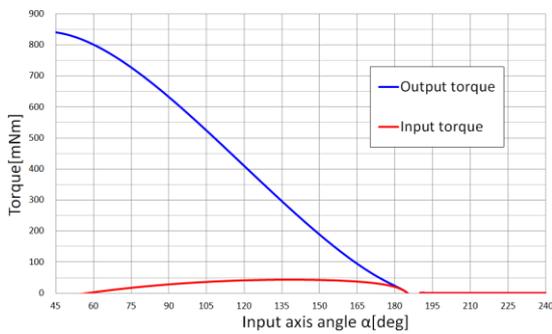


図 3.5 機構入出力トルク変化( $\theta = 45[\text{deg}]$ )

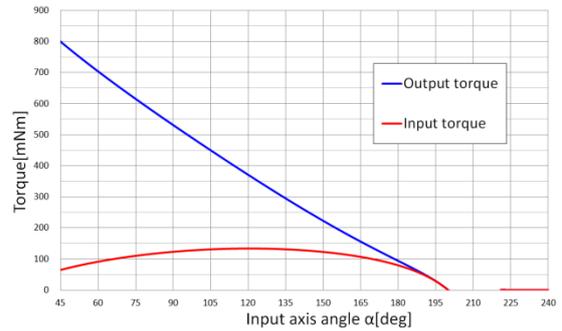


図 3.6 機構入出力トルク変化( $\theta = 60[\text{deg}]$ )

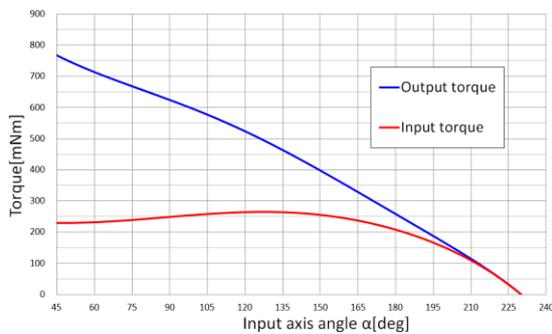


図 3.7 機構入出力トルク変化( $\theta = 90[\text{deg}]$ )

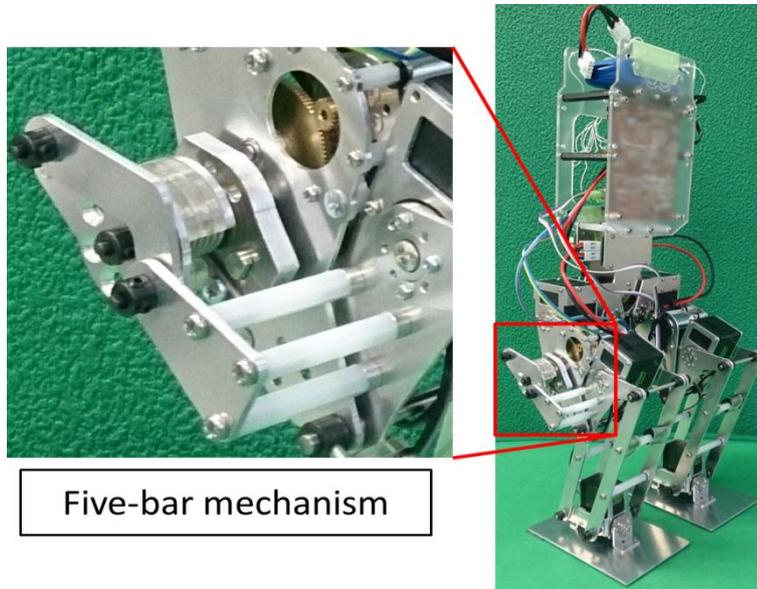


図 3.8 製作した実機外観と機構拡大図

### 3.2.4. 負荷感応フィードバック制御

負荷感応無段変速を実現するため，入力軸角度制御のためのフィードバックに加えて，膝関節角度のフィードバックにより入力軸角度目標値を制御するという，二重のフィードバックループを構成した．これにより負荷によって膝関節が目標角よりも屈曲したときに，より高トルクを出力できるリンク姿勢となるよう入力軸目標値を変更するといった動作が可能になった．ブロック線図を図 3.9 に示す．

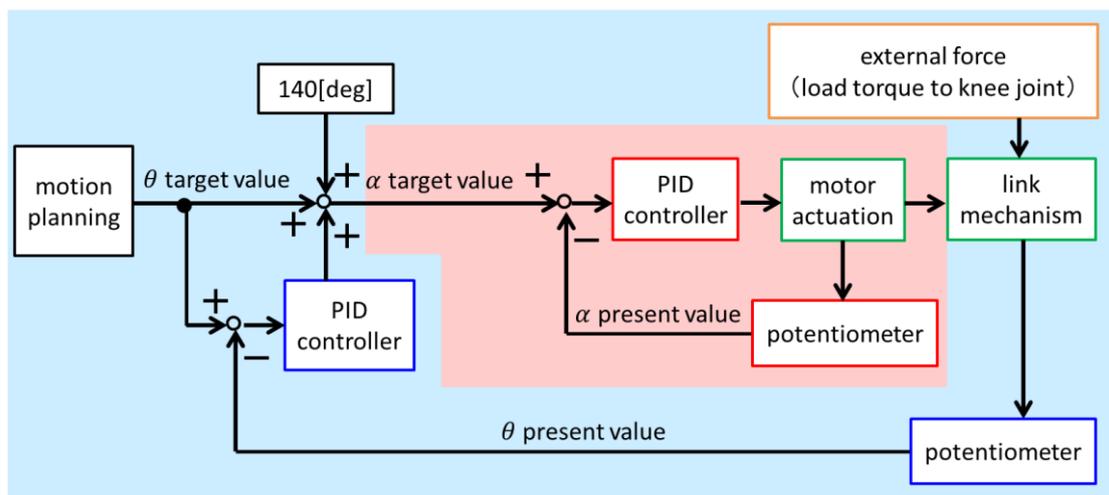


図 3.8 負荷感応フィードバック制御のブロック線図

### 3.3. 実験

#### 3.3.1. 屈伸実験

両脚で立脚した状態で、膝関節角度 45[deg]から 3 秒間で 90[deg]まで屈曲させ、1 秒間その姿勢を保ったのち、再び 3 秒間で 45[deg]まで伸展させるという屈伸運動をさせた。その際プログラムを変えずに 3 段階の重量を加えて実験を行った。

多少ふらつきや偏差はあったが、どの場合も膝関節角度はほぼ同じように推移した。

一方、図 3.9 に示した入力軸角度の推移をみると、追加重量が増えると入力軸角度が全体的に小さくなる方向にシフトしていた。これは重量の追加による負荷の増大に感応して入力軸の動作が変化したことを示している。上記のように、入力軸角度が減少すると、機構の出力トルクは増大する。したがって、本機構と制御により自動的にこのような入力軸角度のシフトを得られたことから、負荷感応による無段変速を実現できたと考えられる。

また、機構によって減速比が大きくなるために、機構がなかった場合に想定される必要トルクと比較して、モータの発揮トルクを低減することができた。

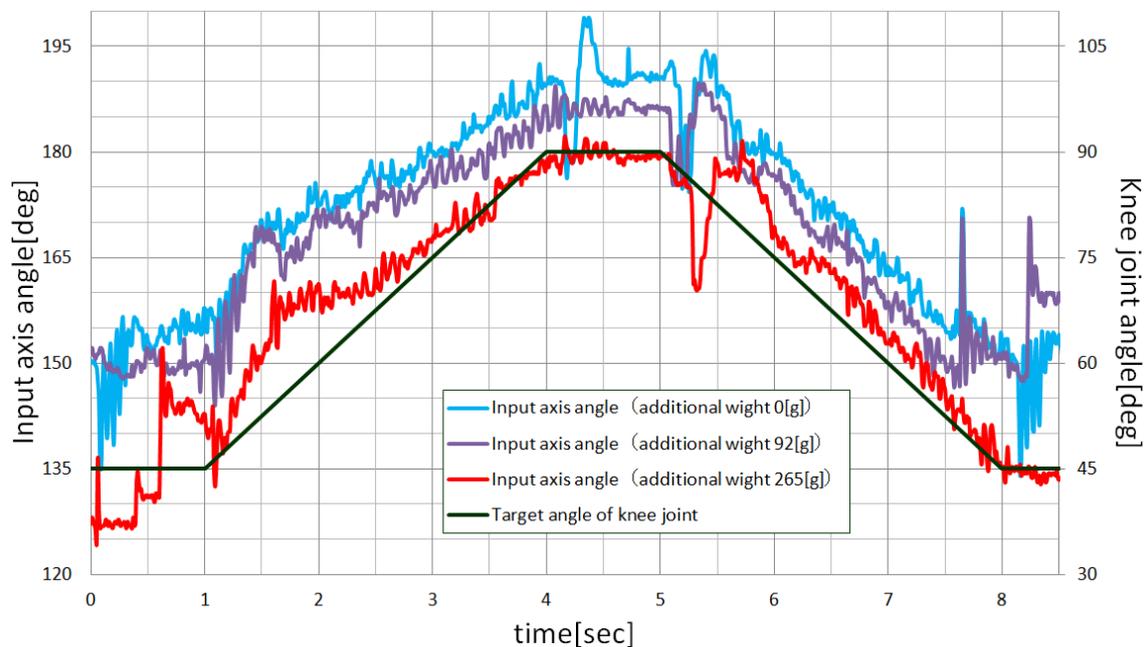


図 3.9 屈伸実験における入力軸角度変化

#### 3.3.2. 歩行実験

歩行周期 5[sec]で歩行動作を行わせた。3 歩分の左足の入力軸角度および膝関節角度の推移を図 3.10 に示す。

注目すべきは、立脚中における入力軸角の変化である。立脚中に、膝関節角度はほぼ一定のまま、入力軸角度が徐々に増加している。これは、立脚中に膝関節への負荷が軽くなっていくのに感応した結果だと考えられる。この変化により、減速比は 0.6 倍になり、立脚中において自動的に過剰な減速比が抑制された。

また、立脚中に入力軸角度が自動的に上方へ戻ってくるので、すばやく次の遊脚に移行す

ることができる。これが入力軸回転量を抑制できたことによる効果だと言える。  
 したがって、立脚中において、機構と制御が機能し、負荷感応により過剰な減速比と入力軸回転量を抑制できた。

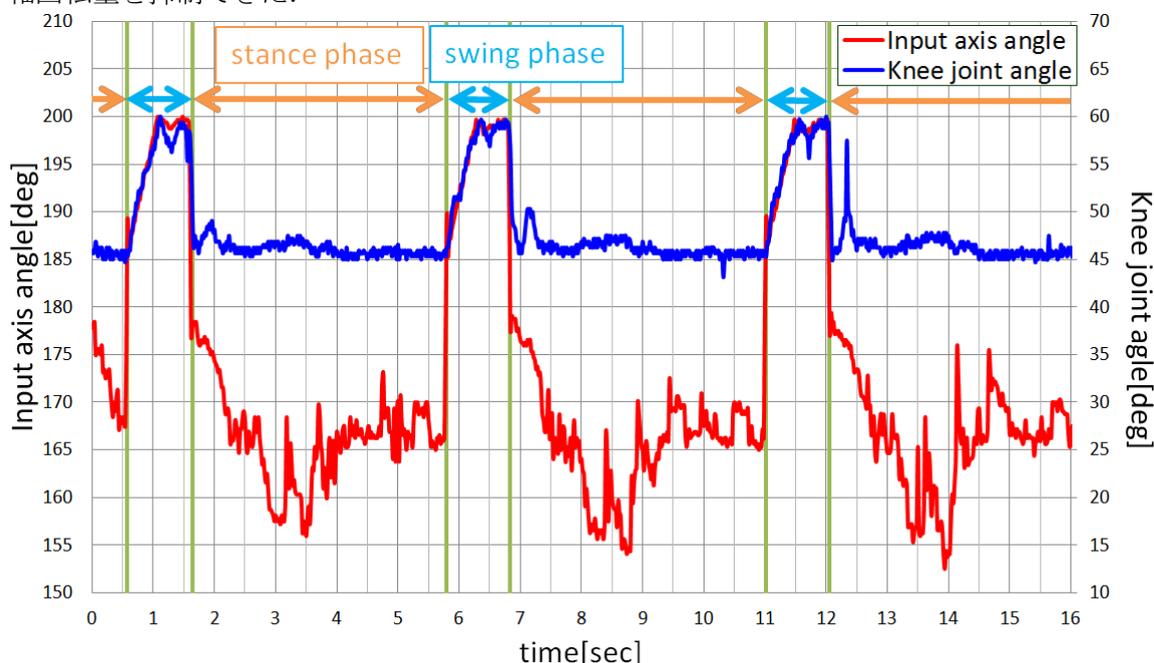


図 3.10 歩行実験における入力軸・膝関節角度変化

### 3.4. 結言

本研究では、適切な減速比で関節を駆動することがロボットの運動性能向上へつながるという考え方のもと、変化する負荷に感応して変速できる負荷感応無段変速リンク機構の開発を行った。

本機構を膝関節に搭載した二足歩行ロボットで動作実験を行い、動作中に負荷感応変速機能が実現されていることを確認した。またその実現により、過剰な減速比の抑制および、変速のための入力軸回転量の抑制を実現した。

今後の課題として、機構の最適化やコンパクト化、膝関節以外への適用、ダイナミックな動作を実現するための全身制御の実現が挙げられる。

### 4. プロジェクトの成果

本プロジェクトでは、二足歩行ロボットの膝関節に変速機を導入することで運動性能の向上を図った①変減速交差リンクとストッパを用いた脚機構の開発および②負荷感応無段変速リンク機構を用いた膝関節を有する脚機構の開発を行った。①では、変減速交差リンクとストッパを採用することで低減速比のアクチュエータを用いたロボットを製作し、歩行やキック等の運動性能の向上が確認できた。②では、変化する負荷に感応して変速できる負荷感応無段変速リンク機構の開発し、その有用性が確認できた。

本プロジェクトにおける今後の課題として、ダイナミックな動作を実現するための運動計画や全身制御の実現、および股関節や足関節への応用等が挙げられる。

#### 4.7 生物模倣型脚移動ロボットの研究開発

[プロジェクトリーダー]

1232035 佐藤 圭吾 知能機械工学専攻 大学院博士前期課程 2年 明研究室

[プロジェクトメンバー]

1432028 佐藤 隆紀 知能機械工学専攻 大学院博士前期課程 1年 明研究室

1112039 風間 英気 知能機械工学科 学部 4年 明研究室

1142006 水野 正博 知能機械工学科 学部 4年 田中研究室

13A0002 William Ricaud 知能機械工学専攻 交換留学生

[指導教員]

明 愛国 教授

下条 誠 教授

鈴木 陽介 助教

田中 一男 教授

田中 基康 助教

[提出日]

2015年3月5日

## 1. 研究背景

近年のロボット開発では、動物の持つ機能や構造などを工学的に再現し、応用するバイオミメティクスという概念が重要になってきている。動物は骨格構造や筋肉に柔軟性を有し、それらを有効に活用して、跳躍や走行などのダイナミックな動作を効率よく実現していることがわかっており、それらを規範にした機構やアクチュエータを導入することによってロボットの運動性能を向上させることができると期待されている。本研究室では過去に動物の脚機構に着目し、二関節筋と腱組織からなる筋腱複合体を規範とした脚機構を持つロボット図1の「Sugoi-Neco Legs」を開発した

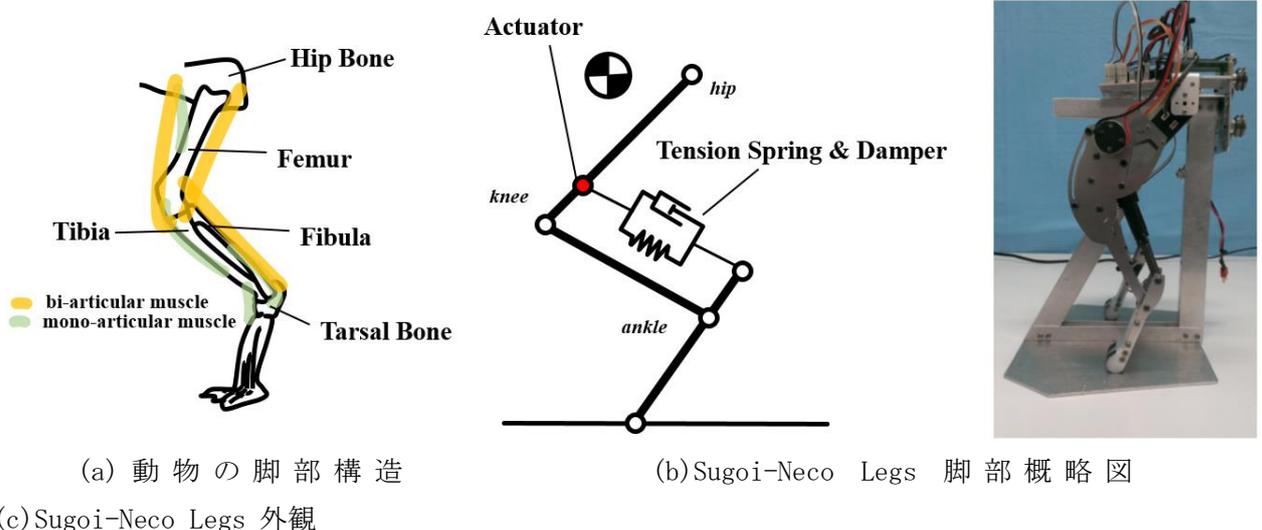


図1. Sugoi-Neco Legs

## 2. 新しい脚機構の開発

### 2.1. 研究目的

研究背景で述べた Sugoi-neco Legs は着地時に床反力の衝撃を弾性要素によって低減することができたが、跳躍時に弾性要素を有効に活用することはできず、その結果剛体のリンクを用いた場合との跳躍田高さと変わりがなかった。弾性用を有効に活用できるとも考えられるが、その為には複雑な運動制御が必要になりその実現には至っていない。本研究では、動物の様な高運動性能を持つ小型四脚ロボットの研究開発に主眼を置き、二関節筋と腱組織を規範とした弾性要素を含む、新たなパラレルリンク脚機構の開発を目指す。

### 2.2. 脚機構の説明

本研究では従来研究で開発された脚機構に対し、図2のように構成する。膝関節から足首関節に掛けて剛体パラレルリンクによって構成され、その内部には対角線上に引っ張りバ

ネが導入されている。

このようにバネを設置することにより，従来研究と異なり，ロボットの姿勢ではなく膝関節の角度変化のみによって，弾性要素が変位するため，より容易に有効活用ができると考えられる。

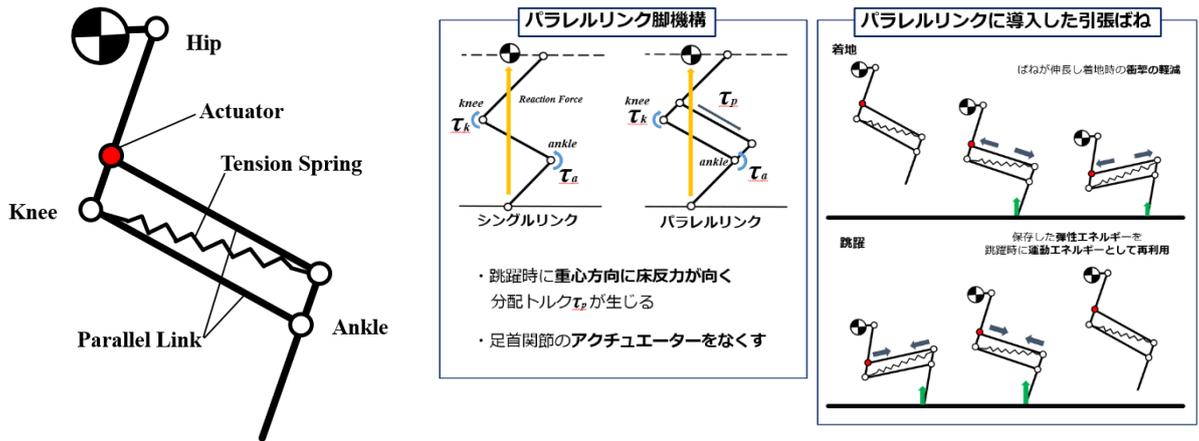


図 2. 提案する脚機構と期待される効果

また，パラレルリンク脚機構は大島らの研究により，跳躍時に床反力ベクトルが重心方向へ向き，より最適な跳躍ができるとされる．パラレルリンクの対角線上に接地された引張バネ，膝関節が最大伸展している時に，自然長になるように設計することによって，着地時の床反力の低減と，跳躍時の弾性エネルギーの再利用が期待できる。

### 2.3. シミュレーション

提案した脚機構の有用性を検証するために，シミュレーションによる検証を行った．モデルは図 3 のように，パラレルリンクのみの脚機構と，パラレルリンクの対角線上に引っ張りバネを導入した本機構と，過去に開発された Sugoi-Neco Legs の脚機構の簡易モデルを作成した．それぞれ床面から 50[mm]離れた点から落下させて，膝関節が 110[°]になったら，最大のトルクを入力する動作を行った．

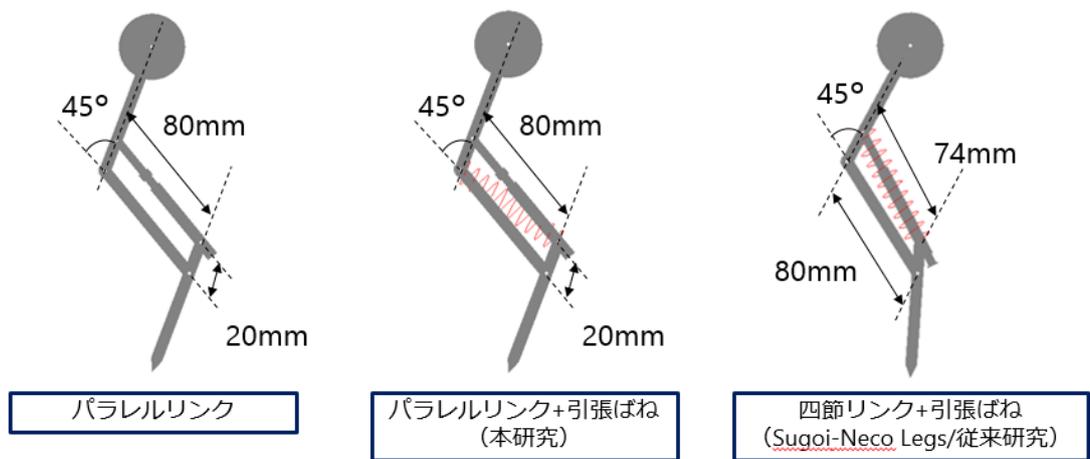


図 3. シミュレーション上の脚機構の簡易モデル

入力トルクはモータの特性を考慮した式を導入した。また、パラレルリンクの対角線上に引っ張りバネを導入した本機構と、過去に開発された Sugoi-Neco Legs の脚機構については、その構造上、着地した時に同等の弾性エネルギーが溜められるように、バネ定数をそれぞれ、 $k=0.12$  [N/mm],  $k=1$  [N/mm]とした。股関節の高さに着目したシミュレーション結果は図 4 のようになった。パラレルリンクの対角線上に引っ張りバネを導入した提案機構が最も高い跳躍を実現した。これは着地時に、ばねが膝の屈曲によって引き伸ばされ、弾性エネルギーを溜めた後、跳躍時の運動エネルギーとして再利用されたためだと考えられる。

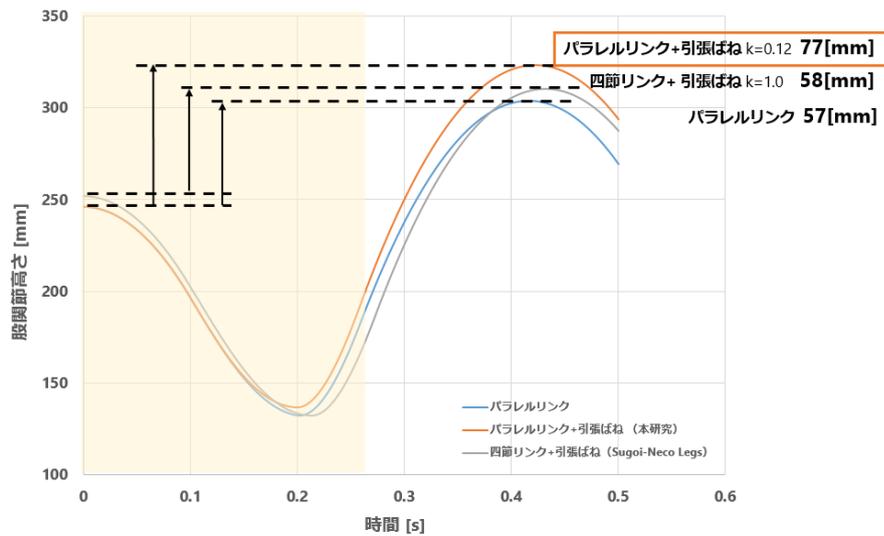
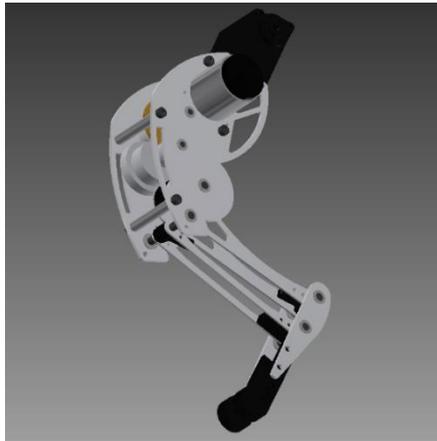


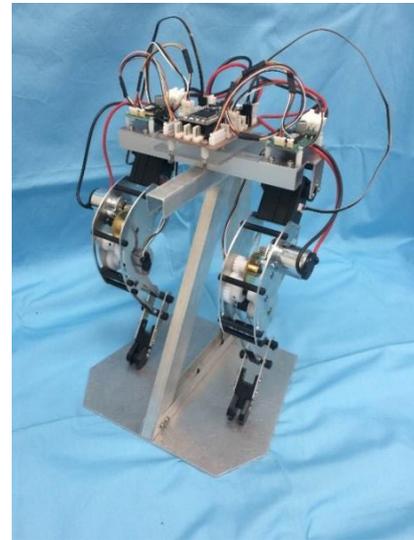
図 4. 股関節高さ

## 2.4. 実機製作

以上の結果を踏まえ、実験で用いる図 5 のようなロボット実機を作成した。ばね定数はシミュレーションをもう一度行い、もっとも跳躍高さが向上した  $k=1.27[\text{k/mm}]$  のものを使用した。



(a) CAD 図



(b) 実機外観図

図 5. 作製した実験機

## 2.5. 実験

### 2.5.1. 連続跳躍

実機を用いて連続跳躍実験を行った。実験装置はロボットのロール軸，ヨー軸方向の回転運動を拘束することができる，ガイドレールに取り付けて行った。初期姿勢からモータに最大電圧をかけ，跳躍を行い，着地後床反力によって膝関節が一定の角度になったら同様の動作を繰り返す跳躍動作を実装した。

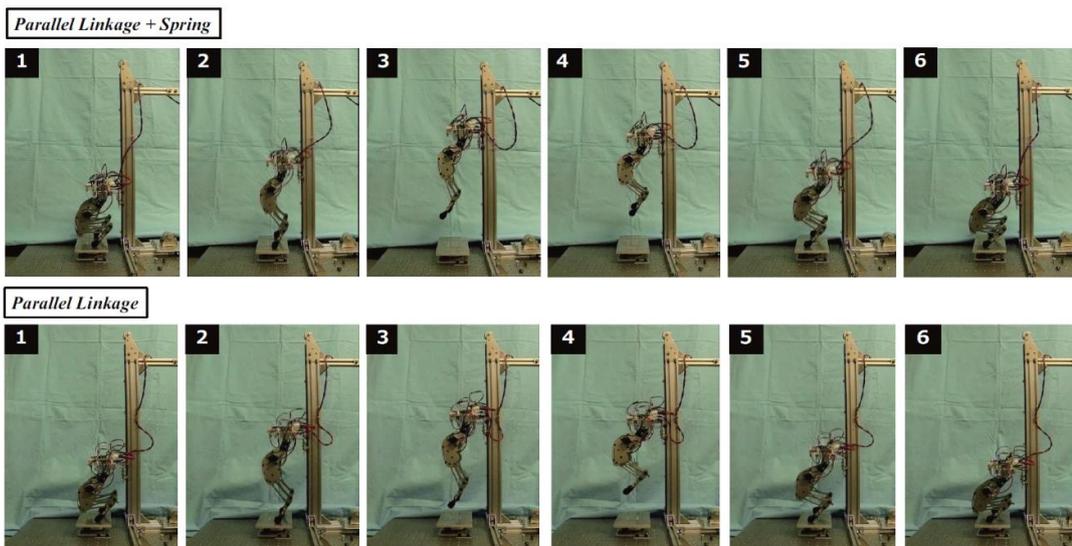


図 6. 連続跳躍動作

図 6 は跳躍中のロボットの動作中の様子を示した連続写真である。実験はパラレルリンクの対角線上に引っ張りバネを導入した提案機構とパラレルリンクのみで構成された機構を比較した。

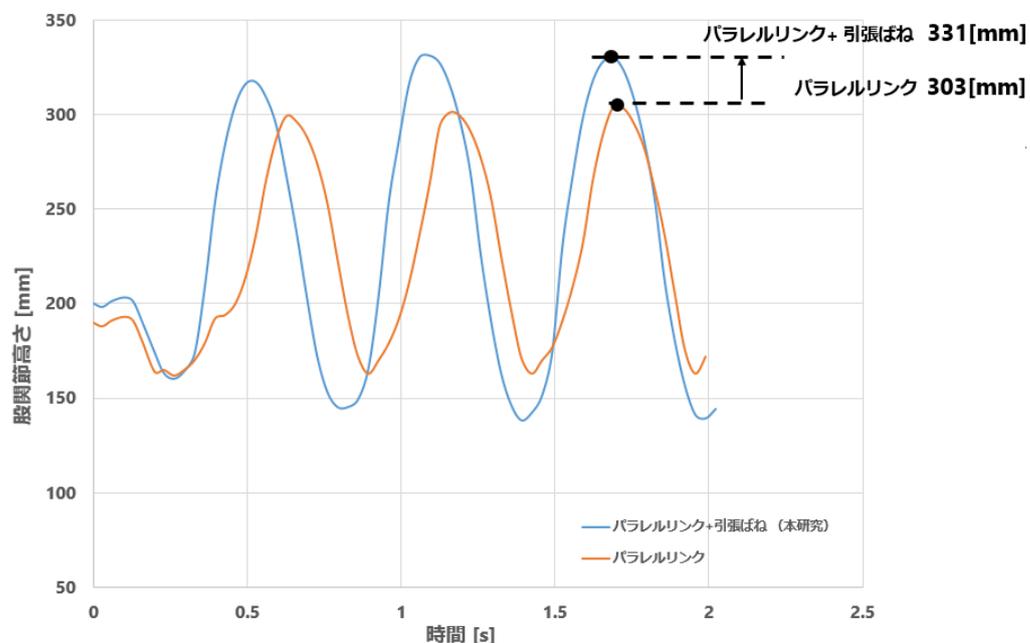
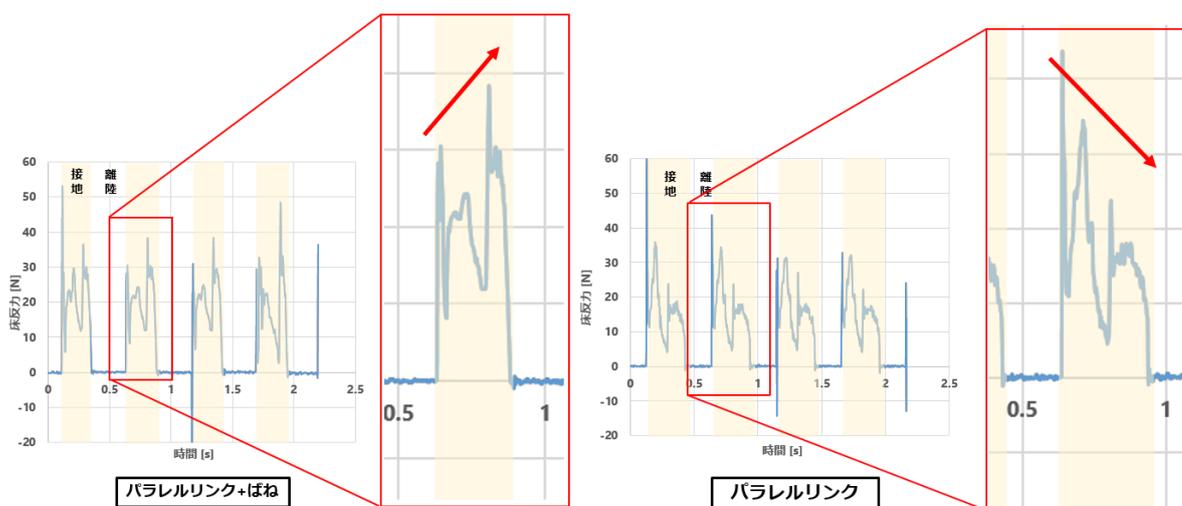


図 7. 股関節高さ

図 7 はロボットの股関節の位置に着目し、スローカメラでトラッキングして高さを示したものである。パラレルリンクのみの脚機構では、最大跳躍高さは 303[mm] 対し、引っ張りばねを搭載したパラレルリンク脚機構は 331[mm] となり、跳躍高さがおよそ 10[%] の向上した。



(a) パラレルリンク+引っ張りバネ

(b) パラレルリンク

図 8. 連続跳躍動作時の床反力

図 8 には連続跳躍中に 6 軸力覚センサにより、床反力を測定した結果を示す。グラフの全体から、パラレルリンクのみで構成された脚機構のものは着地した直後の床反力が大きく、離陸の直前の床反力は減少していることが確認できた。一方で、本研究で提案している引っ張りばねを搭載している機構はその逆の傾向があることが分かった。これは着地した直後の床反力をばねの効果によって、軽減し、なおかつ、貯められた弾性エネルギーの効果によって、跳躍時に地面をより強い力で蹴りだしているためだと考えられる。この効果により跳躍高さの向上が実現したと考えられる。

### 2.5.2. 床反力を利用した跳躍実験

提案した脚機構の構造から、モータの力で膝を曲げるのではなく床反力によって膝を曲げてバネを引き伸ばして弾性エネルギーを溜め、跳躍時のみ、モータを駆動させる跳躍動作が連続で可能ではないかと考えた。この跳躍動作の実現により、消費電力量の低減や、動物のように高効率な動作が期待できる。そこで新たに提案する跳躍動作を図 9 に示す。

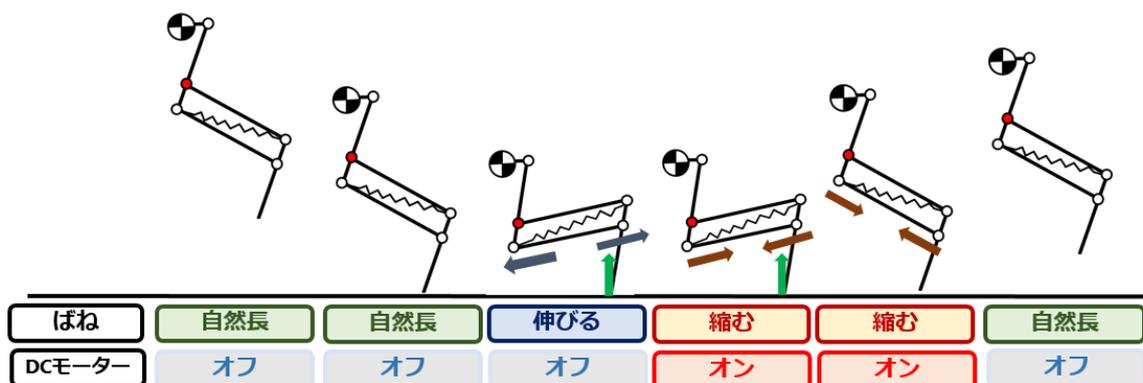


図 9. 提案した新たな跳躍動作

まず、離陸時、モータには電源が入っていない状態で着地し、床反力のみによって膝を屈曲させる。この時にはモータにはまだ電源が入っていない。外力によってばねは引き伸ばされ続け、膝関節は屈曲し続けるが、いずれは収束しバネが最も伸びる地点で膝関節の屈曲が止まる。その後ばねの復元力によって自然長に戻り始めるが、この時に初めてモータに最大電圧をかけ膝関節を進展させる。その後、膝関節が伸展しきったら、ふたたびモータの電源を切り、最初の動作に戻る。この一連の動作のプログラムを作成し、ロボットに入力して動作実験を行った。

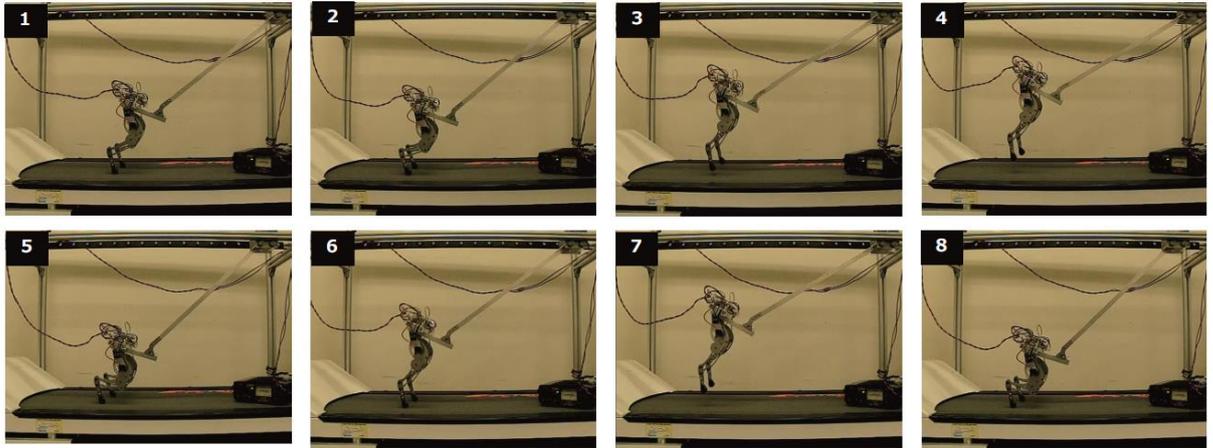


図 10. 提案した跳躍動作を実装した連続跳躍動作

ロール軸，ヨー軸方向の回転運動を拘束され，地面と推定方向に駆動する上部に取り付けられた治具によってロボットを固定し，跳躍実験を行ったところ，連続跳躍動作が可能であることが図 10 から確認できた．また，その時のモータの出力トルクと，膝関節の角度を図 11 に示す．

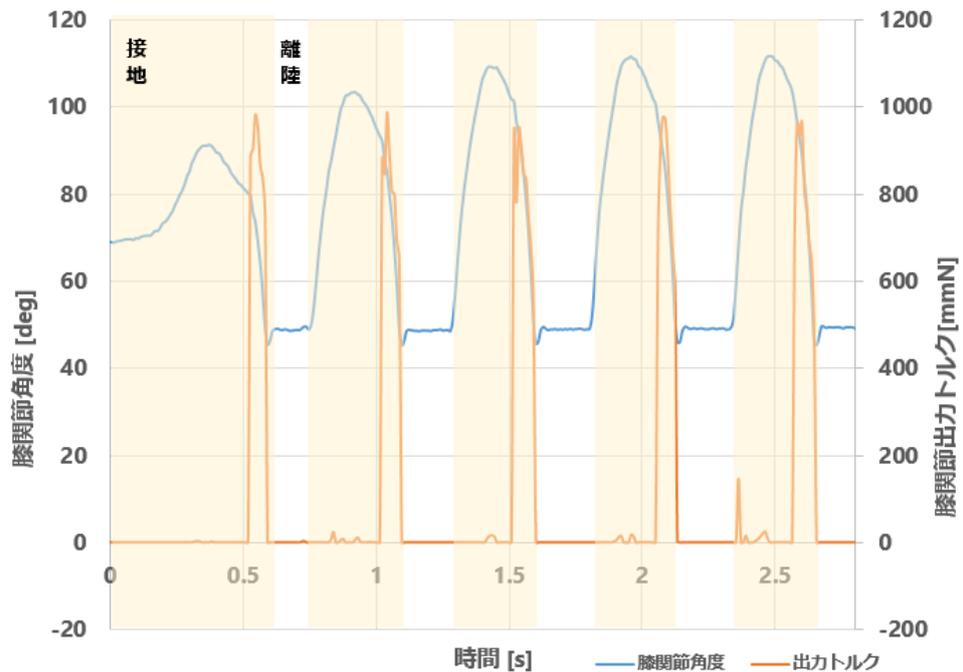


図 11. 膝関節角度およびモータの出力トルク

グラフからロボットが着地し，膝関節が曲がり，その後，バネの復元力によって膝が伸展し始めるころのみにモータに電圧がかけられていることが分かる．これにより消費電力量が低く，より効率の良い連続跳躍が実現できたことがわかった．

## 2.6. まとめ

本研究では、動物の様に俊敏でエネルギー効率の高い運動性能を持つ小型四脚ロボットの研究開発に主眼を置き、二関節筋と腱組織を規範とした弾性要素を含む新たなパラレルリンク脚機構を開発した。提案した脚機構を検証する際、モータ特性などを取り入れた跳躍・着地シミュレーションによって跳躍高さの向上が確認できた。その結果を元に、実機を作成し、連続跳躍実験を行ったところ、パラレルリンクのみで構成された脚機構と比べ跳躍高さが向上した。その原因として、弾性要素の効果により着地時の床反力の衝撃を軽減と、離陸直前には溜めた弾性エネルギーが運動エネルギーに変換されることにより、床反力を増大させていることが、6軸センサによる測定で確認できた。最後に、膝関節のDCモータの電源を切り、着地時の床反力のみによって引っ張りバネを引き伸ばして弾性エネルギーを溜め、バネが復元し始めた時のみに、モータに最大電圧を付加する跳躍動作の実現に至った。

## 3. 前脚機構の開発および後脚との統合

### 3.1. 研究目的

研究背景で述べた Sugoï-neco Legs は後脚であり、前脚が開発されていない。本研究では、高運動性能小型四脚ロボットの開発を主眼に置き、その第一歩として、小型四脚ロボットの前脚機構を開発し、先行研究の後脚と統合することで、四脚を用いた走行動作や跳躍動作が可能な小型四脚ロボットの開発を目指す。

### 3.2. 脚機構の説明

本研究で開発する前脚機構は、先行研究で開発した後脚機構と同様に、パラレルリンクの一部のリンクをバネ・ダンパ機構に置き換えた脚機構を採用する。また、手首の柔軟な動きを再現するために、手首関節には図12のように、ねじるバネを搭載する。

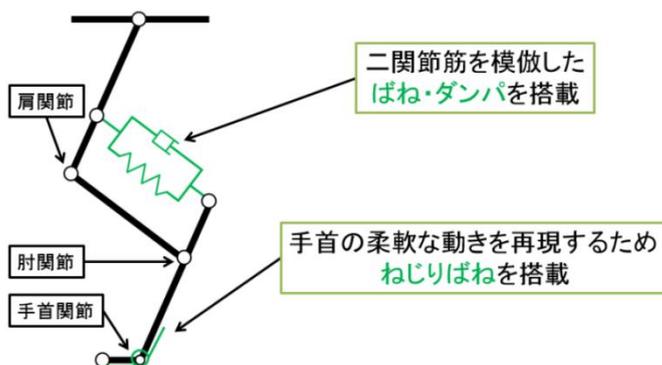


図 12. 前脚機構の概略図



図 13. 猫

また、図 13 のように猫の前脚は後脚よりも短く、走行時は伸展されている前脚が着地の役割を果たし、屈曲されている後脚が地面を蹴り出して推進力を生み出していることが考察できる。よって前脚は後脚よりも短めに設計する。

### 3.3. シミュレーション

前章で述べた脚機構を設計する前段階として、シミュレーションによって跳躍に適したバネの定数と肩関節アクチュエータの減速比を選定した。まず、バネ定数の選定を行うために、シミュレーション上に図 14 のような簡易モデルを作製し、図 15 のような肩関節角度変化を示す目標角度を式(3.1)に代入してトルク制御による跳躍シミュレーションを行った。

$$\tau = K_P(\theta_{ref} - \theta) + K_D(\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}) \quad (3.1)$$

式にある記号は以下， $\tau$ :トルク [Nmm]， $K_P$ :比例ゲイン [Nmm/deg]， $K_D$ :微分ゲイン[Nmms/deg]，

$\theta_{ref}$ : 肩関節目標角度[deg]， $\theta$ : 肩関節現在角度[deg]とする。

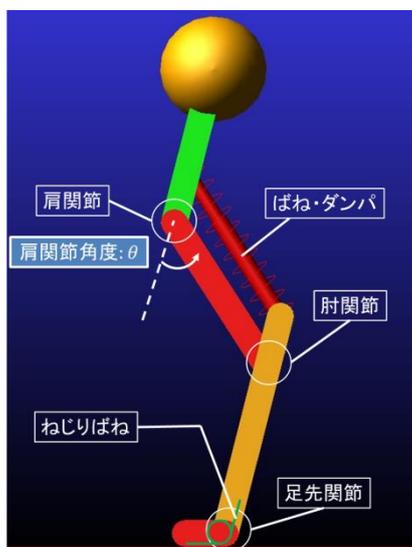


図 14. シミュレーション上の簡易モデル

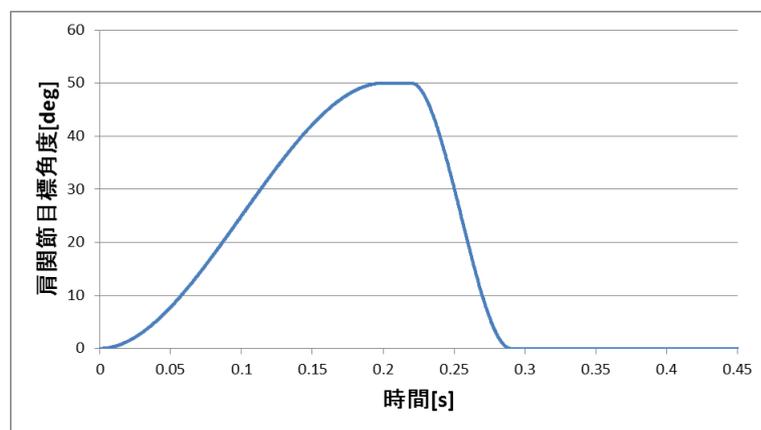


図 15. 入力した肩関節目標角度変化

ばね定数を 1~20 [N/mm] まで変化させて跳躍シミュレーションを行った。ばね定数が大きくなるほど、跳躍高さは一度増加しその後減少、肩関節必要トルクは増加する傾向が見られた。連続跳躍や走行のように、モータを駆動しつづける動作においては、肩関節必要トルクを抑え、かつシミュレーション上では高い跳躍高さが発揮できることが望ましいと考えた。よって、これら 2つの値から図 16 のように、跳躍高さ 1[mm]あたりに必要なトルクを

求め、それが最小となるばね定数 5 [N/mm] を選定した。

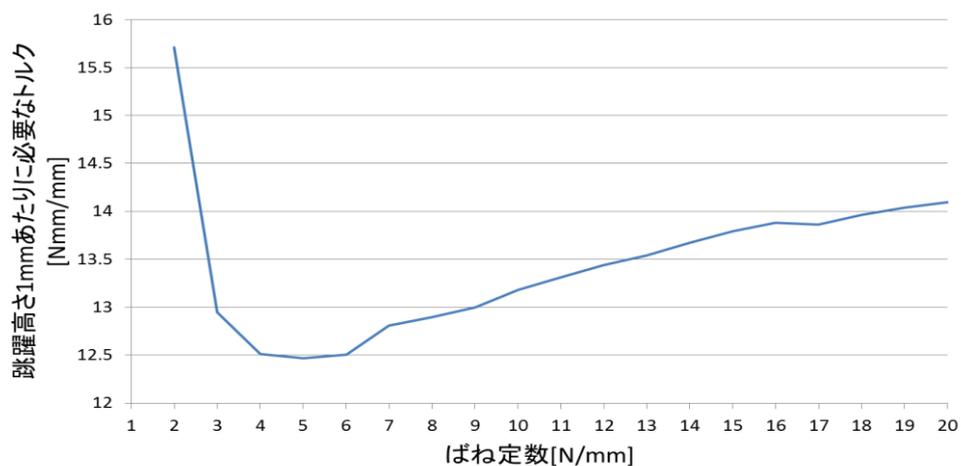


図 16. バネ定数と跳躍高さ 1mm あたりに必要なトルクの関係

次に、肩関節アクチュエータの減速比の選定を行った。選定したばね定数 5 [N/mm] での跳躍シミュレーションを再度行い、肩関節の必要トルクを算出した。さらに算出した必要トルクから、DC モータの特性と減速比を考慮して出力可能な角速度を算出した。DC モータの出力トルクと出力角速度にはトレードオフの関係があるために減速比を変化させて、跳躍動作中に必要なトルクを出力しても、その角速度が同時に出力可能か検証した。

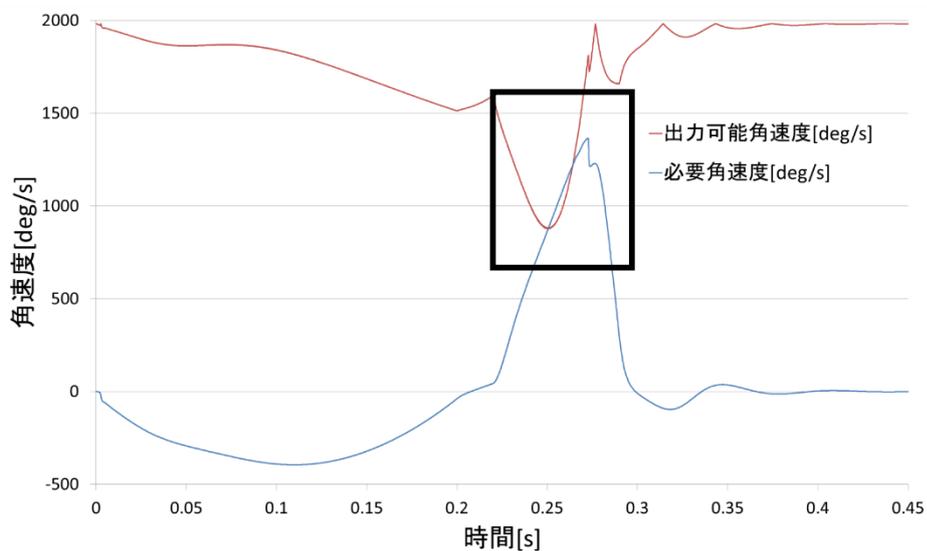


図 17. 必要角速度と出力可能角速度の関係

跳躍動作に必要な角速度とその時の出力可能な角速度の関係を図 17 のようなグラフで示す。その時に必要角速度が出力可能角速度を上回らないように、減速比を変化させてグラフの

変化を考察した。その結果、離陸する直前に、必要角速度が出力可能角速度を上回ってしまうことがわかったが、その区間が最も少ない減速比を最適なものとし、減速比を 22.6 と定めた。

### 3.4. 実機製作

#### 3.4.1. 引っ張りバネおよび一方方向ダンパ機構

先行研究の脚機構は、着地の衝撃をダンパによって吸収することができる反面、跳躍時にダンパが引っ張りバネの溜めた弾性エネルギーを減衰してしまうことが考えられた。よって本研究で製作する脚機構は着地時のみダンパの効果を発揮し、跳躍時はバネの効果のみを有する図 18 のような一方方向ダンパ機構を考案した。

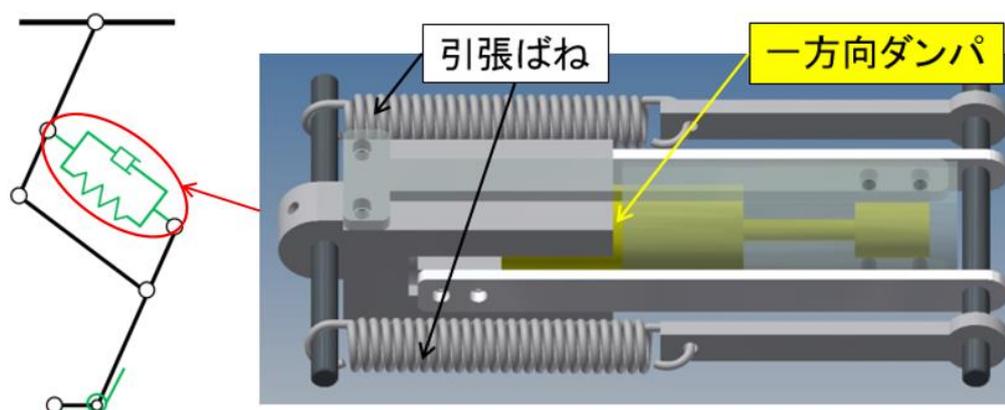


図 18. 引っ張りバネおよび一方方向ダンパ機構

#### 3.4.2. 前脚と後脚の統合

前節の引っ張りバネ・一方方向ダンパ機構を含む、前脚を製作し、後脚との統合を行った。図 19 に外観を示す。

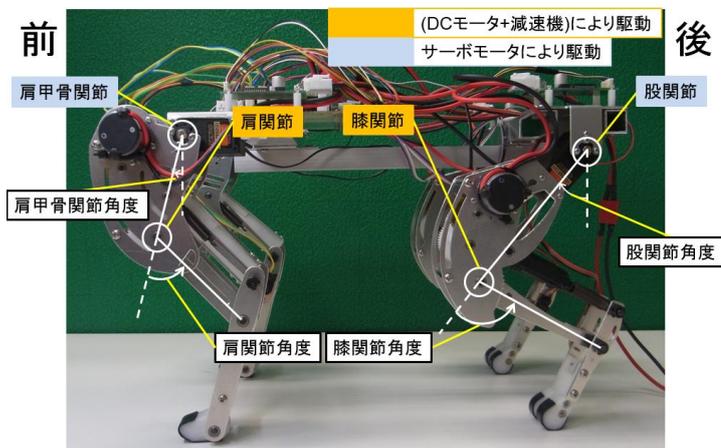


図 19. 前脚および後脚を統合した実験機の外観図

### 3.5. 実験

#### 3.5.1. 走行実験

製作した実機を用いて、走行実験を行った。左右への移動およびロール軸・ヨー軸の回転を拘束することのできる治具にロボットを取り付け、3.5[km/h]で走行面が動作するトレッドミル上での安定した走行が可能であることが、図20より確認できた。

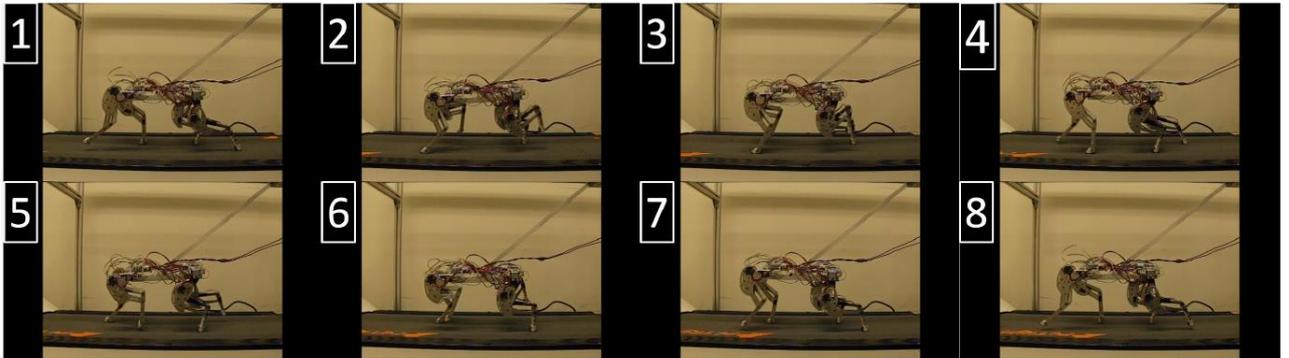


図20. 走行動作

また、走行中の前脚の肩関節と後脚の膝関節の出力トルクを図21, 22に示す。前脚は、着地後に図21のように肩関節が大きなトルクを出力して姿勢を保持し、後脚は着地後、地面を蹴り出すときに膝関節が図22のように大きなトルクを出力して推進力を生成していることが確認できた。

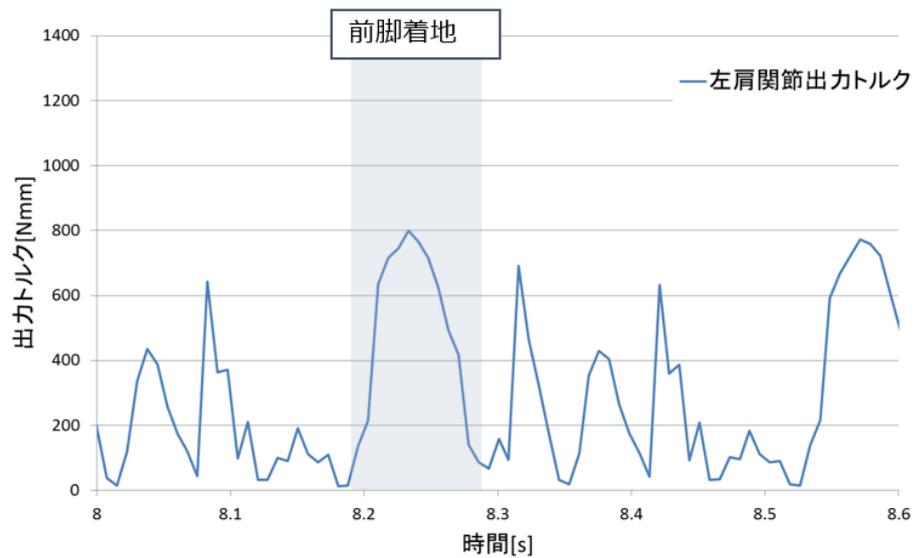


図21. 前脚出力トルク

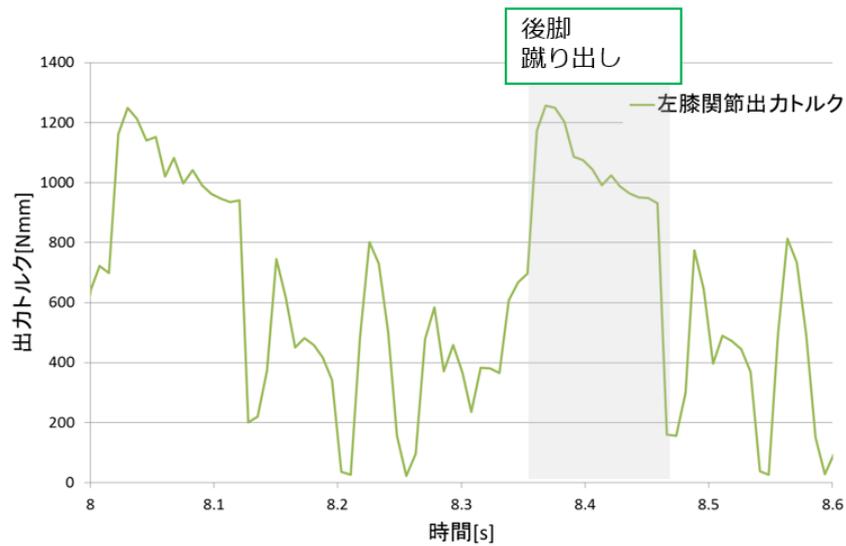


図 22. 後脚出力トルク

### 3.5.2. 前方跳躍実験

次に前方への跳躍実験を行った。ロボットを平坦な面に置き、脚を屈曲させてから前脚、後脚の順に伸展させ前方への跳躍を行った。図 23 のように約 1 体長分の跳躍が可能であることが確認できた。

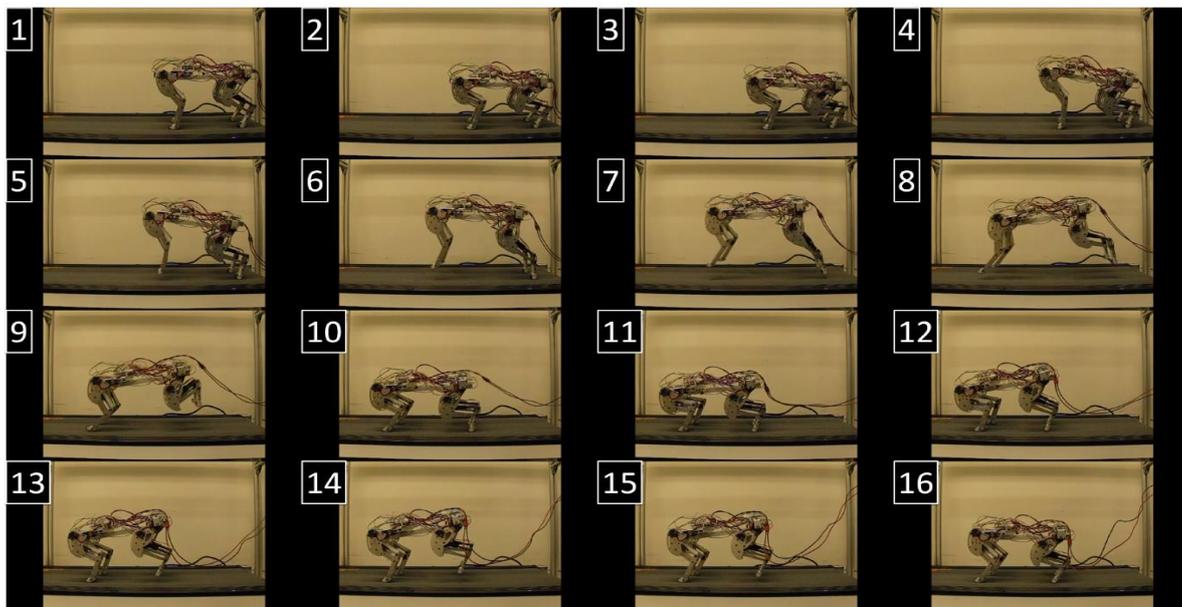


図 23. 前方跳躍動作

また、このときの前脚肩関節の出力トルクと前脚内の引張バネの伸展量は図 24 のようになった。前脚伸展後、引張バネが収縮して跳躍時の肩関節必要トルクを補助していることが確認できた。さらに着地後、引張バネが伸展して、着地時の床反力の衝撃を吸収していることが同様に確認できた。

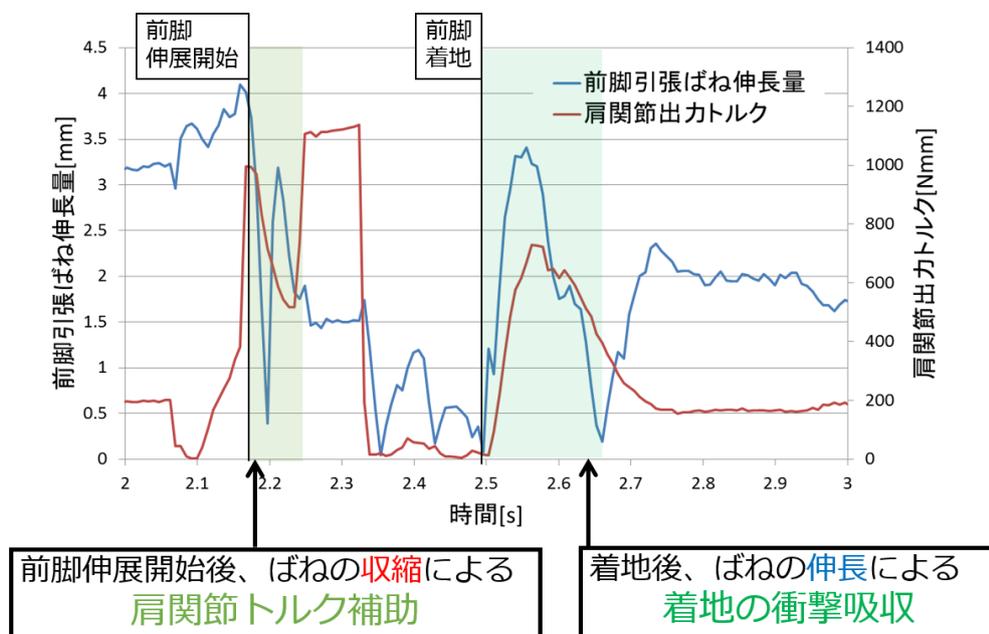


図 24. 前脚肩関節出力トルクおよびバネの伸展量

### 3.6. まとめ

本研究では、小型四脚ロボットの前脚機構を開発し、先行研究の後脚と統合して多様な動作が可能な四脚ロボットの開発を行った。まず、ネコの脚部を参考に前脚機構を設計・製作し、先行研究の後脚と統合して小型四脚ロボットを開発した。実験により、歩行・走行・跳躍などの多様な動作が可能であることが確認できた。走行においては固定装置を使用して 0.97[m/s]でのトロット走行、跳躍では約 1 体長分の方への跳躍が可能であることが確認できた。また、前方への跳躍時前脚の姿勢によって着地時の必要トルクを低減可能であることを確認できた。今後の展望として、より高速なトロット走行を実現や前方への跳躍を連続して行うバウンス走行の実現などが挙げられる。

## 4. プロジェクトの成果

本プロジェクトでは高運動性能小型四脚ロボットの研究開発に主眼を置き、本研究室で過去に開発された、Sugoi-Neco Legs の研究成果を元に、新たな脚機構の提案と、Sugoi-Neco Legs の後脚に統合するための前脚の開発を行った。新しい脚機構の開発では Sugoi-Neco

Legs の運動動作時や制御性の問題点を挙げたうえで、新たなアプローチでの脚機構を提案し、検証することで、弾性要素を有効に活用した運動動作のさらなる可能性を示すことができた。また、前脚の開発および後脚との統合では、先行研究ではなし得なかった走行を含む四脚での動作の確認と検証を行うことができた。双方の研究ともに今後、本研究室での四脚ロボットの開発を行っていくうえで、欠かせない重要な研究成果を得ることができた。

#### 4.8 圧電繊維複合材料を用いた生物模倣型ソフトロボットの研究開発

[プロジェクトリーダー]

1142003 趙 文静 知能機械工学専攻 博士後期課程 4 年 明研究室

[プロジェクトメンバー]

1332055 西村 冬威 知能機械工学専攻 博士前期課程 2 年 明研究室

1332077 RADIAN FURQON 知能機械工学専攻 博士前期課程 2 年 田中研究室

1450002 市川 貴大 知能機械工学専攻 博士前期課程 1 年 明研究室

1432026 佐々木 貴史 知能機械工学専攻 博士前期課程 1 年 明研究室

1432034 谷口 貴耶 知能機械工学専攻 博士前期課程 1 年 明研究室

1112070 鈴木 啓友 知能機械工学科 学部 4 年 明研究室

[指導教員]

明 愛国, 田中 一男, 前川 博, 黒田 成昭

[提出日]

2015 年 3 月 5 日

##### 1. 研究目的

メカトロ機器を構成する要素としてアクチュエータ, センサ, 動力源などが考えられる。アクチュエータではモータなどの回転動力が多く利用され, 多様な特徴を持つように研究されてきた。このようなアクチュエータは大出力を得るために最適化されているが, 使用目的によっては効率が悪くなる場合もあると考えられる。

センサはメカトロ機器においては必要不可欠なもので, 何らかのタスクを行う際に基本的に必要となる要素である。このようなセンサには様々な種類があり, メカトロ機器が行うタスクの種類によって適切なものが選ばれる。

しかし, メカトロ機器において重要なのは製作及び作業における効率を向上させることである。従来のアクチュエータ, センサを組み合わせる事ではこのような効率向上が既に実現されており, その限界に至っている。

近年, センサ機能・アクチュエータ機能などを材料自体が併せ持つようないわゆるインテリジェント材料が様々な場面で注目されている。このようなインテリジェント材料としては形状記憶合金, IPMC(Ionic polymer-metal composite: イオン導電性高分子・貴金属接合体), 圧電繊維複合材料(Piezoelectric Fiber Composite) などが挙げられる。

本研究では, 圧電セラミック繊維を利用したソフトな人工筋肉である圧電繊維複合材料: Macro Fiber Composite(以下 MFC, 図 1) のアクチュエーション, センシング機能といった優れた特徴に注目し, MFC を利用したスマートメカトロ機器の研究開発を行う。

MFC は NASA のラングレー研究センターで開発された新しい圧電複合材料で, 従来の圧電材料に比べて図 2 のような構造をしており, 柔軟性・耐衝撃性に優れた特性を持っている。柔らかいフィルム状の MFC に電圧を印加すると圧電繊維が伸縮し, MFC 全体にかけて歪みが発生し, アクチュエータとして利用できる。また, 外部から歪みを加えると圧電効果により電圧が発生するので, センサとしても利用することもできる。さらに, チャージ回路などを用いることより発電機能も期待されている。

その応用研究として, MFC の持つ構造的な材料特性より, MFC のセンサ及びアクチュエータとして利用することで, MFC を用いた生物模倣運動機構(羽ばたきロボットや水中ロボット), インテリジェントクッション, アクティブダンピングへの利用などについて検討を行っている。

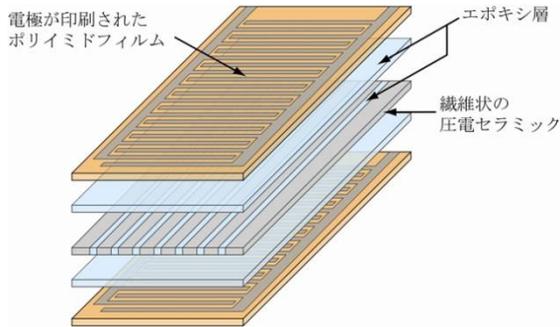
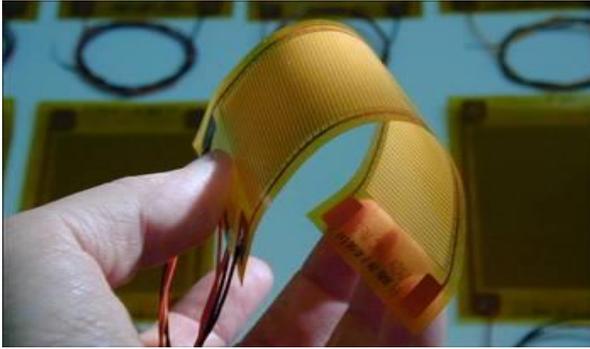


図1 MFCの外観

図2 MFCの構造

## 2. 研究の独創性と有用性

メカトロ機器である圧電繊維複合材料(MFC)を利用してソフトロボットを製作することにより、多くに用いられているモータなどで構成されるロボットに比べ、柔らかいフィルム状のアクチュエータであるので、アクチュエータ自身が柔らかく、アクチュエーション部は曲面構造など様々な構造物に接着する事が出来る。このため全体の構造を単純化する事が出来、比較的に自由な駆動が出来る。また、人工筋肉であるアクチュエータの中ではパワーやエネルギー変換効率が良いので、より運動性能の高いソフトロボットや、より高効率のソフトロボットに生かせる。

さらに材料と一体化させ骨格・アクチュエータ・センサ・エネルギー回収の多機能を付加する事が出来るので、メカトロアプローチに好都合であり、構造体の運動制御が直接的に出来る。このため、制御がしやすいため生物の模倣が可能である。また高感度歪センサとして用いる事も可能なのでMFC複合体における構造センシングが可能である。

MFCを用いた生物模倣の運動機構を製作する場合、MFCは直接リニア駆動が出来るアクチュエータであり、回転運動系のアクチュエータを利用するロボットより、簡単で効率的な構造に作り上げる事が出来る。さらに、将来的には実際の鳥・昆虫または魚のように翼全体をソフトな人工筋肉であるMFCで構成する事でアクチュエーションとセンシングを一緒に行う事も出来ると考えられるので、簡単な運動制御ループを構成することが出来る。

## 3. 研究成果

### 3.1 羽ばたきロボット

近年、鳥や昆虫の羽ばたき原理を解明し、それらが行う急旋回やホバリングなどの飛行機では行えない高い飛行性能を取り入れようと羽ばたきロボットの研究が盛んに行われている。開発されている羽ばたきロボットは、一般的に回転型アクチュエータであるモータを使用している。しかし、回転動作を羽ばたき動作に変換するためにクランク機構などの複雑な機構が必要であり、ロボットの重量増加や大型化などの問題がある。これらの問題を解決するアクチュエータとして、小型かつ軽量の圧電繊維複合材料がある。また、圧電繊維複合材料は柔軟性が高いという特徴もあることから生物のソフトな動作の模倣に適していると考えられる。本研究室では圧電繊維複合材料を用いることで、単純な変換機構で昆虫を模倣した羽ばたき動作を行うロボットの研究開発を行っている。

### 3.1.1 クリック機構を模倣した羽ばたきロボット

間接飛翔筋型昆虫にはクリック機構と呼ばれる独特な機構が翅関節部分に備わっている。このクリック機構は羽ばたき速度の上昇、フラッピング角度の増加を起し、発生させる揚力を増加する効果がある。本研究では、ソフトアクチュエータである圧電繊維複合材料を用い、クリック機構を模倣することで羽ばたき動作の高性能化を目指す。

#### クリック機構

クリック機構の動作原理について打ち上げ状態から打ち下ろし状態への流れを図 1 を用いて説明する。クリック機構の特徴は翅の打ち上げ、打ち下ろしの二つ状態において安定であり、それ以外の遷移状態では不安定となり瞬時に打ち上げ、打ち下ろし状態へと移行する。

まず打ち上げ状態においてクリック機構は安定状態となっている。羽ばたき運動を開始しようと飛翔筋である背腹筋、縦走筋が伸縮運動を行うと同時に、sl:小盾板レバーが ax1:関節骨片 1 に垂直方向の力を加える。それにより ax1 は押し上げられ、遷移状態へと移行する。このとき、pa:側板と n:背板に弾性エネルギーが蓄えられる。次に角度  $\phi$  が  $180^\circ$  より小さくなった瞬間、先ほど pa と n に蓄えられた弾性エネルギーにより、ax1 が勢いよく押し上げられ、打ち下ろし状態へと移行する。これが翅の打ち上げ状態から打ち下ろし状態へのクリック機構による動作である。翅の打ち下ろし状態から打ち上状態へはこの逆の動作が起こる。

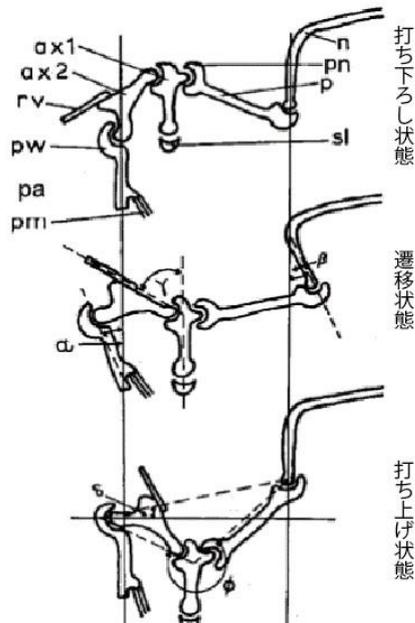


図 1 間接飛翔筋型昆虫翅根元関節

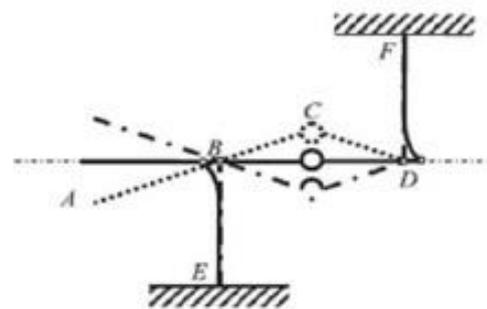


図 2 間接飛翔筋型昆虫翅根元関節簡易モデル

#### 試作機的设计・製作

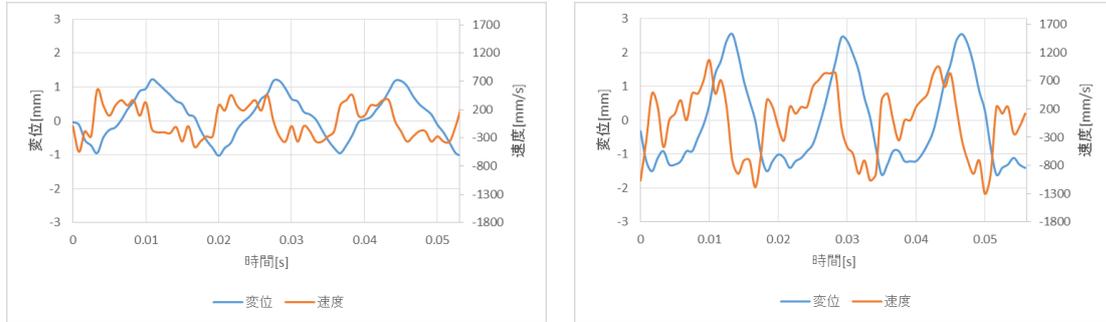
図 2 は、図 1 の間接飛翔筋型昆虫の翅根元関節部分をより理論的に製作されたモデルである。これより、従来研究で開発された駆動モジュールの側面から中央部に背板と胸版の動きによって側板に弾性エネルギーが蓄えられ、発散することができるような機構を考案した。製作した試作機を図 3 に示す。



図 3 試作機

## 試作機の評価

試作機と従来型についてそれぞれ翅根元部分の変位及び速度を測定したところ、図 4 のようになった。この結果より、従来型と比較して試作機の変位と速度が上昇していることがわかり、クリック機構の効果を確認することができた。



(a) 従来型

(b) 試作機

図 4 翅根元部測定結果(60Hz)

## シミュレーションによる最適化

試作機において打ち上げ動作と打ち下ろし動作に必要な力の非対称性を解消するためにシミュレーションを行った。クリック機構の影響が大きい弾性エネルギーを蓄える部品である側板の長さを最適化した。図 5 に製作した最適化機の翅根元部分の変位及び速度の測定結果を示す。最適化機は試作機と比べ打ち下ろしに必要な力が小さくなった。よってシミュレーションによる最適化は成功したと考えられる。

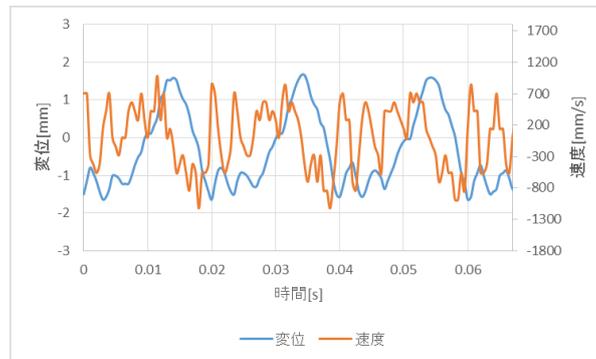


図 5 最適化機の翅根元部測定結果(50Hz)

## 垂直力の測定

図 6 に示す羽を付けた最適化機について垂直力の測定を行った。結果を表 1 に示す。50Hz のときのみ平均垂直力が正の値となった。この原因として、打ち上げ速度が大きくなったことにより受動的にフェザリング運動を行い、負の垂直力を減らすことができたことが考えられる。

また、50Hz のとき垂直力重量比は 1 を超え、飛行可能な値が得られたが、飛行できていない。この原因として、姿勢が安定せず常に一定方向の垂直力を出力することができなかつたことなどが考えられる。

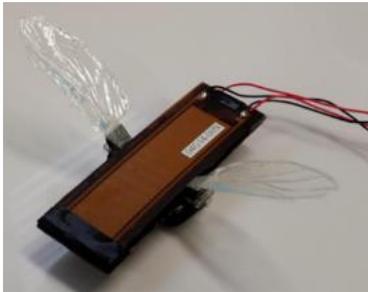


図 6 羽を取り付けた最適化機外観

表 1 垂直力測定結果

	平均垂直力 [mN]	垂直力重量比
10Hz	-2.854	-0.104
20Hz	-0.414	-0.015
40Hz	-3.350	-0.122
50Hz	81.965	2.987
60Hz	-1.417	-0.052

### まとめ

本研究では、圧電繊維複合材料を用いた羽ばたきロボットの性能向上を目指し、間接飛翔筋型昆虫特有のクリック機構を備えた羽ばたきロボットを開発した。翅根元部分の変位と速度は従来型と比較して大きくなり、クリック機構の有用性を確認することができた。

### 3.1.2 リード・ラグ運動を導入した羽ばたきロボットの開発

昆虫は羽ばたき飛行中、フラッピング運動、フェザリング運動、リード・ラグ運動の 3 つの運動を行っている。この 3 つの運動を組み合わせることで側面から見ると翅は 8 の字や 0 の字のような羽ばたき軌跡を描いている。このような軌跡を描くことで昆虫は効率よく正の垂直力を得ている。本研究では、本研究室の従来研究でフラッピング運動のみであった羽ばたき動作にリード・ラグ運動も行わせることで昆虫のような羽ばたき軌跡を描き、垂直力の向上を目指す。

#### 羽ばたきロボットの試作

駆動モジュールは、従来研究で開発されたアーモンド型駆動モジュールを使用する。この駆動モジュールの動作からフラッピング運動とリード・ラグ運動を生成する。フラッピング運動は従来研究と同様に回転ヒンジにより生成する。リード・ラグ運動を行わせる機構を図 7 に示す。リード・ラグ板が回転することでリード・ラグ運動を行う。リード・ラグ板にはゴムと糸が接着されており、ゴムは駆動モジュールの前方に留め、糸はピンに通して駆動モジュールの上部に接着されてある。糸の長さは一定であるため、駆動モジュールが収縮状態から膨張することでリード・ラグ板は引かれ、同時にゴムは伸ばされる。膨張状態から収縮することでゴムの復元力によりリード・ラグ板は元に戻される。

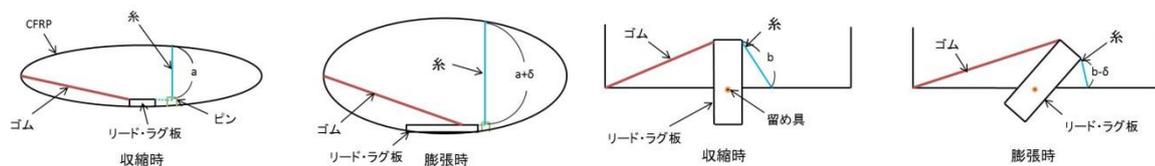


図 7 リード・ラグ機構

#### 試作機の羽ばたき軌跡の評価

試作機の側面からハイスピードカメラを用いて動画を撮影した。撮影した動画から羽先端をトラッキングし、羽ばたき軌跡を生成した。生成した羽ばたき軌跡 3 周期分を平均したものを図 8 に示す。羽ばたき軌跡は、打ち下ろしで前方、打上げで後方に描いており、リード・ラグ方向に 5.8mm 変位している。これはフラッピング方向の変位量に対して 12% の変位である。

### 試作機の垂直力の評価

ロードセルを用いて試作機の垂直力の測定を行った。測定結果を図 9 に示す。平均垂直力は 2.4mN であり、垂直力重量比は 0.083 となった。垂直力が小さい原因としては、駆動周波数である共振周波数が低いこと、羽ばたき動作中、羽においてマイクロフィルムのみ部分が空気抵抗により変形し、有効面積が縮小したこと、フェザリング運動が微小であることが考えられる。

### 羽変更機の羽ばたき軌跡の評価

試作機同様に羽変更機の側面からハイスピードカメラを用いて撮影を行った。撮影した動画の羽先端をトラッキングし、羽ばたき軌跡を生成した。生成した羽ばたき軌跡 3 周期分を平均したものを図 10 に示す。羽ばたき軌跡は、試作機同様に打ち下ろしで前方、打上げで後方に描いており、リード・ラグ方向に 4.3mm 変位している。これはフラッピング方向の変位量に対して 12%の変位である。

### 羽変更機の垂直力の評価

試作機同様に垂直力の測定を行った。測定結果を図 11 に示す。平均垂直力は 0.16mN であり、垂直力重量比は  $5.7 \times 10^{-3}$  となった。試作機より垂直力が小さくなった原因としては、翼面積が縮小したこと、揚力係数が小さくなったことが考えられる。

### まとめ

新たに機構を搭載することでフラッピング運動とリード・ラグ運動を能動的に行うロボットを開発した。リード・ラグ運動はフラッピング運動に対し 10%程度の振幅を実現した。

## 3.2 水中ロボット

近年、水産資源や海底鉱物資源、海底油田など、海洋開発の必要性が大きくなっている。そのため、海洋開発や水産資源の持続的有効利用を図る観点から、魚類の行動や海底付近の様子などの把握を目的に、水中ロボットが水産調査分野においても頻繁に利用されている。

魚類は、水中での高い運動性能を有するものも多く、生息する環境に応じて様々な形態を持つため、魚類の運動機構を基に設計を進めることは、水中での高度な運動性能を実現するために有効な方法であるといえ、柔軟性を有する新しいアクチュエータを利用した水中ロボットの開発が進められている。

本研究では、ソフトアクチュエータとして近年開発された MFC を用いて、水棲生物の遊泳方法を模倣したソフト水中ロボットの研究開発を行っている。

### 3.2.1. 魚類の急旋回動作を規範とする旋回動作設計

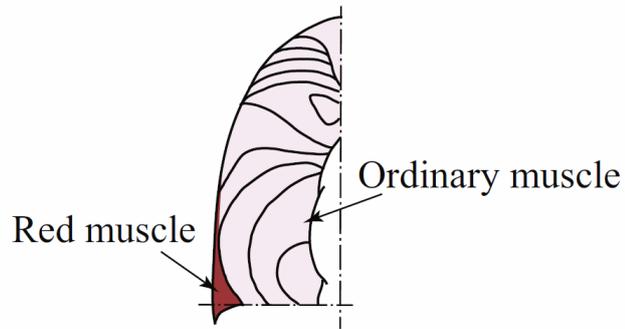
これまでに本研究室が開発した圧電繊維複合材料を用いた魚型ソフト水中ロボットは高速推進が可能であるが、平板型であるために、流体特性的に実際の魚類と異なる点と、駆動システムを内蔵できないという課題を残していた。

そこで、本論文では、駆動システムを内蔵可能な立体構造を有し、かつ高効率な推進が可能な魚型ソフト水中ロボットの実現を目指し、魚類の三次元的流線形と筋骨格構造の剛性分布を模倣した、立体魚型ソフト水中ロボットの基本構造を提案する。また、この基本構造に基づきニジマスの三次元流線形状を模倣した立体マス型ロボットを設計・製作し、実験によりロボットの性能を評価する。

## 魚類の筋骨格構造

魚が蛇行推進をする際に主に用いる筋肉は、体構造の大部分を占める左右対称な体側筋である。体側筋は、その大部分を占める普通筋と、皮膚付近を縦走する表層血合筋に分類される。図8の暗赤色で示す部分が表層血合筋である。瞬発的な遊泳には普通筋が用いられ、効率の良い持続的な遊泳には、表層血合筋が主に用いられる。すなわち、持続的遊泳における普通筋は筋としてはあまり用いられず、左右の表層血合筋を柔軟に接続する程度の機能しか果たさない。

また、魚類の体を構成する要素として、骨格も考慮する。蛇行運動を行う胴体部にある主な骨格である脊椎は体長方向に並ぶ椎骨で構成される。椎骨同士はコラーゲン質の構造で柔軟に接続される。椎骨はその前後に神経・血管関節突起を有しており、これらは前後の椎骨と噛み合う。これらの突起は、上下方向の変形を抑制しつつ、右方向の変形を阻害しない形状をしており、動を妨げずに神経と血管を保護している。また、椎骨の神経・血管弓門に沿って2本の帯が縦走しており、脊柱にわずかな弾性をえている。



お  
ら  
左  
運  
ま  
韌  
与

図8 魚類の筋肉断面図

### 立体魚型ソフト水中ロボットの基本構造

以上の解剖学的特性を考慮して、立体魚型ソフト水中ロボットの基本構造を以下の様にする。

1. 左右一対の機体を縦走する人工筋肉を使用
2. 持続的遊泳に用いる人工筋肉は体表付近に配置
3. 左右の人工筋肉は互いに柔軟な構造で接続
4. 上下方向に強く、左右方向に弱い構造剛性を持つ

図9に魚型ソフト水中ロボットの基本構造を示す。まず、機体表面の左右一対のユニモルフ機構により、魚類の血合筋の機能を模倣する。また、体幅方向に薄い弾性板を用いることで、脊椎靭帯の、上下方向に強く左右方向に弱い剛性を模倣する。さらに、左右のユニモルフ機構間に柔軟なゲルを充填し、血合筋間の普通筋による柔軟な接続を模倣する。また、流線形に関しては、ユニモルフ機構のアーチ形状により体長-体幅平面の流線形を、ゲルと尾鰭弾性板の形状により体

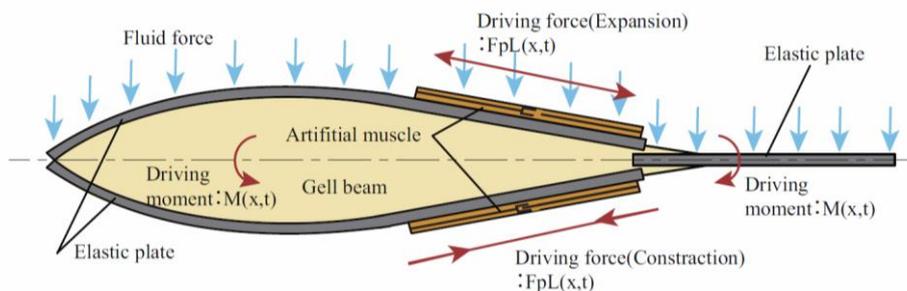


図9 立体魚型ソフト水中ロボットの基本構造

## 立体マス型ロボットの試作

ロボットの基本構造の各寸法をニジマスの外形を参考に決定し、立体マス型水中ロボットを設計・試作した。左右ユニモルフ機構を接続するゲル要素の材料にはアスカーC硬度  $0^{\circ}$  のウレタンゲルを用い、弾性板要素として厚さ  $0.2[\text{mm}]$  のCFRP プレートを用いた。各要素の接続には、変形を阻害しないよう強力な両面テープを用いた。尾鰭のアスペクト比は  $2.5$  とした。製作後、鉛をゲル梁要素に挿入し浮力調整を行った。試作機の外観を図 10 に、仕様を表 2 に示す。

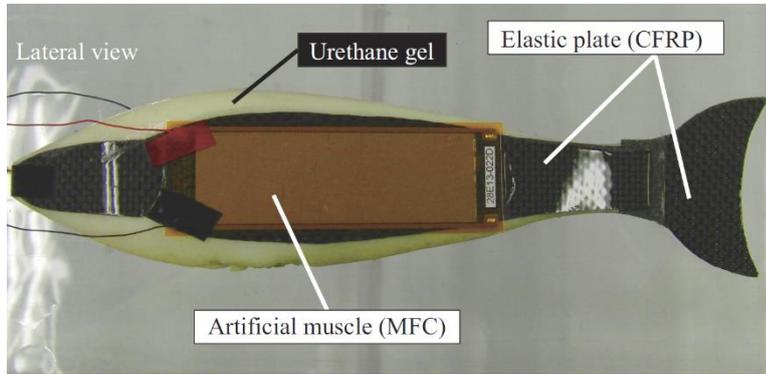


図 10 試作機の外観

表 2 立体マス型ロボット試作機の仕様

試作機	仕様
体長	250[mm]
体高	56[mm]
体幅	23[mm]
機体重量	210[g]
アクチュエータ	MFC(M8528P1)

## 流体の付加質量を考慮したモーダル解析を用いた最適化設計

試作機は、形状については実際のニジマスを参考に設計を行ったが、剛性には参考とすべきデータが得られていない。そこで、立体マス型ロボットについて、推進力と推進運動形状に強く関係すると考えられる尾柄部の剛性をシフトパラメータとする最適化設計を行った。シフトパラメータは、尾柄部弾性板を切断する長さ  $Cl$  とし、図 11 の様に弾性板を左右対称に切断し、尾柄部の剛性を変化させた。最適化指標として、魚類の遊泳原理で推進力を得るために必要な、「体後方に向かって振幅が増大する推進運動」をより効果的に行うため、頭部と尾鰭先端の振幅比である頭部-尾鰭振幅増大率を用いた。尾柄部の弾性板切断長さが  $12[\text{mm}]$  の場合が最適であることがわかった。最適化モデルに基づき製作した最適機の外観と仕様を図 12、表 3 に示す。

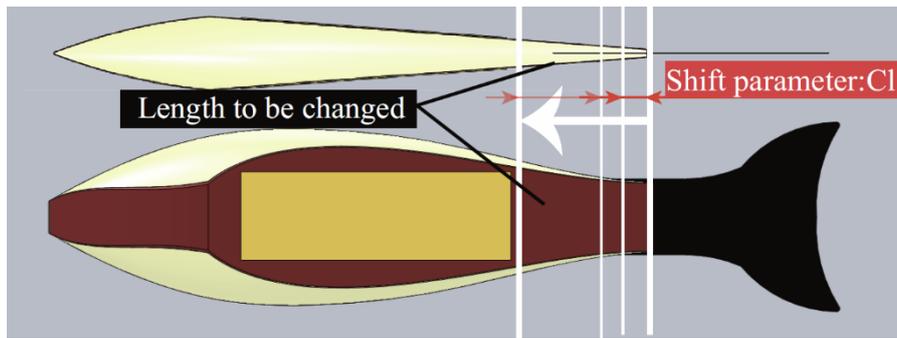


図 11 モーダル最適化設計のシフトパラメータ

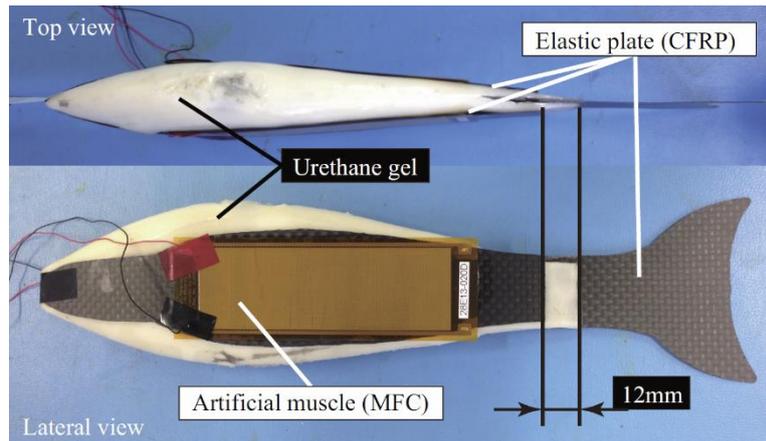


図 12 立体マス型ロボットの外観(モーダル最適機)

表 3 立体マス型ロボット試作機の仕様

モーダル最適機	仕様
体長	250[mm]
体高	56[mm]
体幅	23[mm]
機体重量	210[g]
アクチュエータ	MFC(M8528P1)

## 性能評価実験

製作したロボットの性能を評価するために実験を行った。各項目についてまとめる..

### ・推進速度

駆動電圧は+1500[V]~-500[V] 矩形波とし、周波数を 1~25Hz まで 1Hz 刻みに変化させて、ロボットの推進速度  $U$  を測定した。その結果を図 13 に示す。図 13 より、両ロボットの推進速度は、1~

25[Hz] の区間において、2つのピークを持つことがわかる。また、尾柄の剛性について最適化を行った結果、全駆動周波数について速度向上に成功し、最高速度は12.6%向上した。

・移動仕事率

推進運動のエネルギー効率を評価するため、移動仕事率(Cost of transport:COT)を求めた。移動仕事率は単位質量を単位距離移動させるために必要なエネルギーを示す無次元数であり、消費電力  $P$ [J/s]、対水速度  $U$ [m/s]、質量  $M$ [kg]、を用いて式(2)で示される。

推進速度および測定した消費電力から計算した移動仕事率を Fig.13 に示す。Fig.13 より、モーター最適機が試作機よりも全駆動周波数に渡って高効率であることがわかり、最小 COT について18%、最高速度推進時 COT について16%の効率化に成功した。以上より、提案最適化指標が立体魚型ソフト水中ロボットの高効率化に有効であることを確認した。

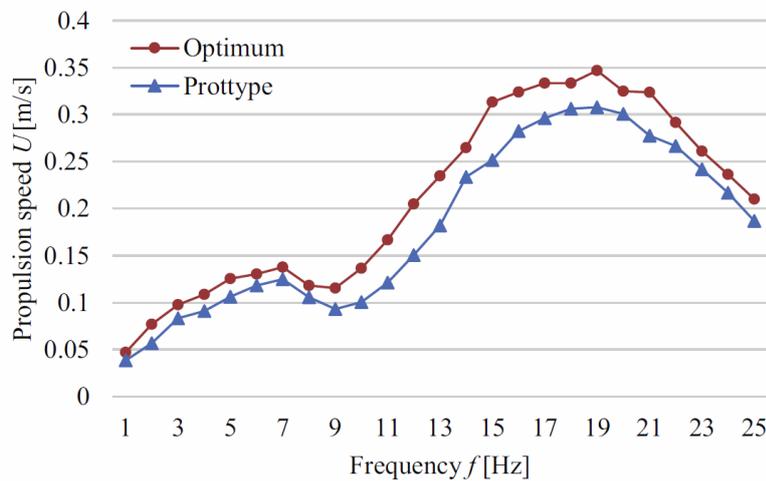


図 13 立体マス型ロボットの推進速度

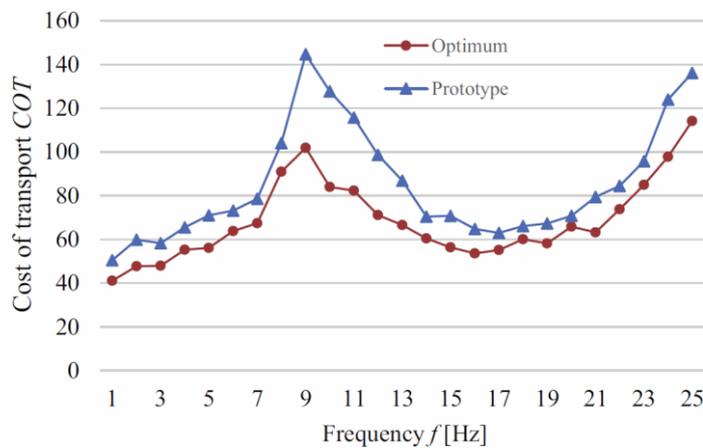


図 14 立体マス型ロボットの移動仕事率

## まとめ

本論文では、魚類の筋骨格構造の剛性分布・三次元流線形状を模倣することで、駆動システムを内蔵するための体積を有し、かつ高効率な推進を可能とする立体魚型ソフト水中ロボットの基本構造を考案し、基本構造に基づいた立体マス型ロボットの設計・試作を行なった。

また、立体マス型ソフト水中ロボットについて、周辺流体を付加質量として考慮したモーダル解析および時刻歴解析を用いた最適化設計を行い、モーダル最適モデルを算出した。さらに、モーダル最適機を製作し、推進性能および最適化設計の効果を実験的に確認した。今後の課題としては、尾鰭振幅の向上と駆動システムの内蔵、および温度による機械特性変化を解決するため、柔軟材料および基本構造の再検討が挙げられる。また、最適化指標についても、FSI 解析などのより高度な解析を用いてさらなる性能向上を目指す。

### 3.2.2 FSI解析を用いたソフト水中ロボット設計システムの開発

本研究では、生物模倣魚ロボットを取り上げる。今まで生物模倣魚ロボットに関する研究開発が多く行われているが、運動性能、効率の向上などがまだ重要な課題となっている。特に、生物のように柔軟性を有効に活用する生物模倣ソフト魚ロボットについて、試行錯誤による研究開発がほとんどで、設計と制御に関する明確な手法がまだ確立されていないのが現状である。そこで、本論文ではロボットの柔らかい構造体と周囲の流体の相互作用を考慮した数値シミュレーションに基づいた設計と制御を行い、高性能な生物模倣ソフト魚ロボットの実現を研究目的とする。

#### ソフト魚ロボットの設計システムの要件

高性能生物模倣ソフト魚ロボットを開発するための設計方法、手順とシミュレーションシステムについて述べる。ソフト魚ロボットの研究開発では、従来の研究開発と異なって、柔らかい構造と流体の相互作用を活用することを前提としている。そのため、魚のような柔らかい構造、柔らかいアクチュエータによる分布駆動および流体などをモデリングする必要がある。また、柔らかい構造と流体の相互作用を考慮した解析により、魚の推進運動を実現させ、そして性能向上のための構造と制御入力の最適化を行う必要がある。

これらの要求を満たすために、本研究では有限要素法によるモデリング、流体と構造の連成解析により流体力の更なる活用ができるシミュレーションシステムを構築した。シミュレーションに基づいたロボットの設計と制御の最適化を行うことによって、高性能な生物模倣ソフト魚ロボットの開発が効率良く行うことができる。

#### 有限要素法による流体-構造連成(FSI)解析

魚類の推進のような、蛇行する柔軟物体と流体の相互作用については様々な研究がなされ、特に細長体理論や振動翼理論、渦格子法などが知られている。しかし、これらは物体表面における境界条件を線形近似して解いているため、ソフト魚型ロボット開発において必要となる実際の非線形な相互作用の解を得ることはできない。そこで、本研究では有限要素解析ソフトANSYSを用いた設計システムを考える。図15にFSI解析を用いた設計システムのスキームを示す。

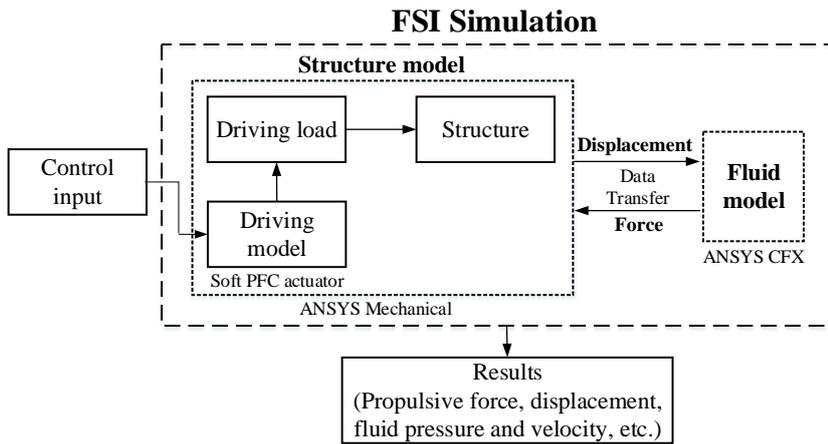


図 14 F S I 解析を用いた設計システムのスキーム

FSI 解析では、流体と構造体の 2 つのドメインの支配方程式は以下の様に記述できる。

$$\text{Structure: } \begin{cases} M\ddot{U} + KU = F_s \\ + \text{Boundary conditions and initial conditions} \end{cases}$$

$$\text{Fluid: } \begin{cases} \rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + F_f \\ + \text{Boundary conditions and initial conditions} \end{cases}$$

#### 有限要素法による流体-構造連成(FSI)解析を用いた最適化設計

開発したソフト魚ロボットの設計システムの有効性を確認するため、過去に本研究室で、試行錯誤的な方法によって開発された平板マス型ロボット(図 15)をモデルケースとして最適化設計を行う。表 4 に平板マス型ロボットの仕様を示す。

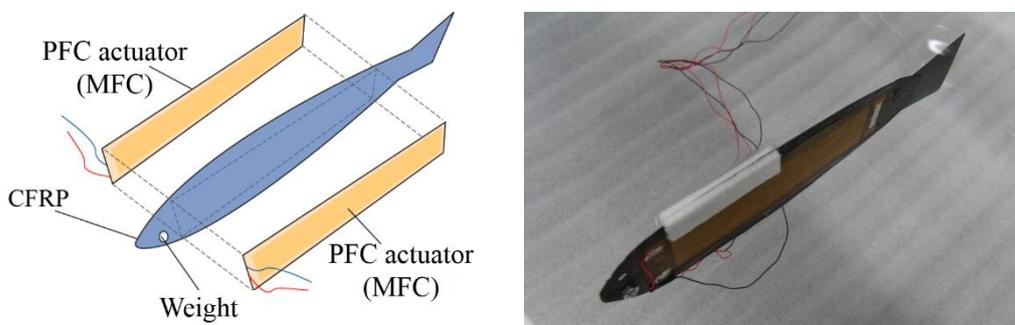


図 15 平板マス

表 4 平板マス型ロボットの仕様

Item	Specification
------	---------------

Body Length (mm)	167
Maximum Height (mm)	55
Minimum Height (mm)	30
Body Thickness (mm)	CFRP-0.2
PFC Actuator	MFC 8528P1×2
Robot Weight (g)	15.98
Adhesive	Epoxy 3M-DP460

魚の推進法において推力発生に関係する身体パラメータとして、尾鰭のアスペクト比、尾柄の高さ、胴体から尾鰭にかけての各位置における振幅が挙げられる。平板マス型ロボットの設計パラメータとしてこれらの要素に関するものとして、図 16 に示す様に、頭部に設けた錘の重量、尾柄高さ、尾鰭高さ、体構造を構成する CFRP プレートの厚さをを用いた最適化を行う。錘の重量を変化させる際、錘の半径を変化させ、材料は鉄とした。

また、シフトパラメータは、尾柄高さ、尾鰭高さ、CFRP 厚さ、錘の半径の順番に最適化を行った。最適化指標には尾鰭振幅を用い、これが最大となるパラメータを求めた。

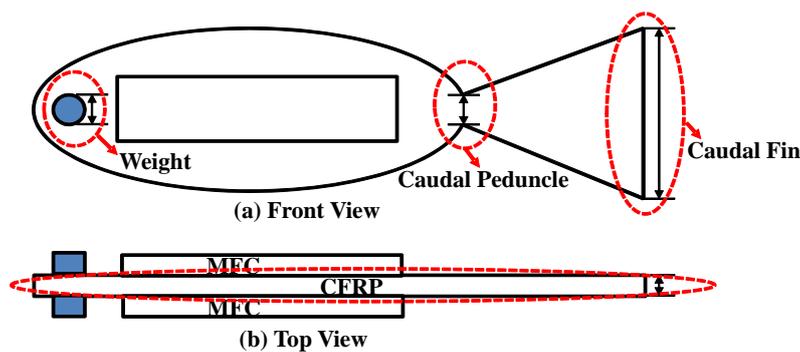


図 16 最適化のシフトパラメータ

最適化の結果、尾柄高さ 3[mm]、尾鰭高さ 60[mm]、CFRP 厚さ 0.2[mm]、錘半径 7[mm]の組み合わせが最適であることが分かった。この最適値に基づいて、平板マス型ロボットの最適機を製作した。その概形を図 17、仕様を表 5 に示す。

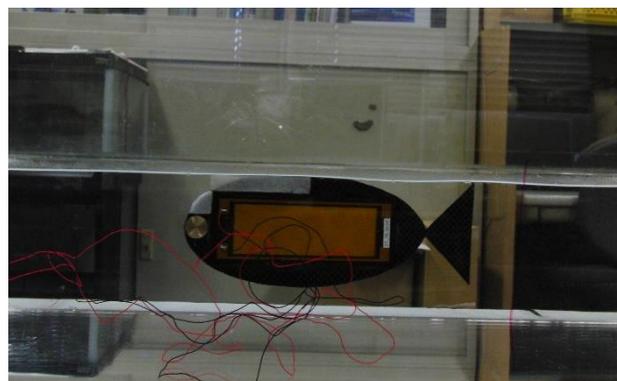


図 17 平板マス型ロボットの最適機

表 5 平板マス型ロボット最適機の仕様

Item	Specification
Caudal peduncle height (mm)	3
Caudal fin height (mm)	60
Radius of head weight (mm)	7
Maximum body height (mm)	64
Type of actuator	MFC 8528P1×2
Actuator dimensions (mm)	112×40
Actuator active area (mm)	85×28
Actuator for adhering	CFRP-0.2mm thickness
Adhesion bond	Epoxy 3M-DP460

## 性能評価実験

製作したロボットの性能を評価するために実験を行った。各項目についてまとめる。

### ・推進速度

ロボットの推進速度を測定した。その結果を図 18 に示す。最適機の最高速度は 0.79[m/s]であった。従来の平板マス型ロボットの最高推進速度は 0.72[m/s]であるので、最適機は従来機に対し最高速度について 10%の性能向上に成功した。このことから、本研究が開発したソフト魚ロボット設計システムがソフト魚型ロボットの推進速度向上に有効であることを確認した。

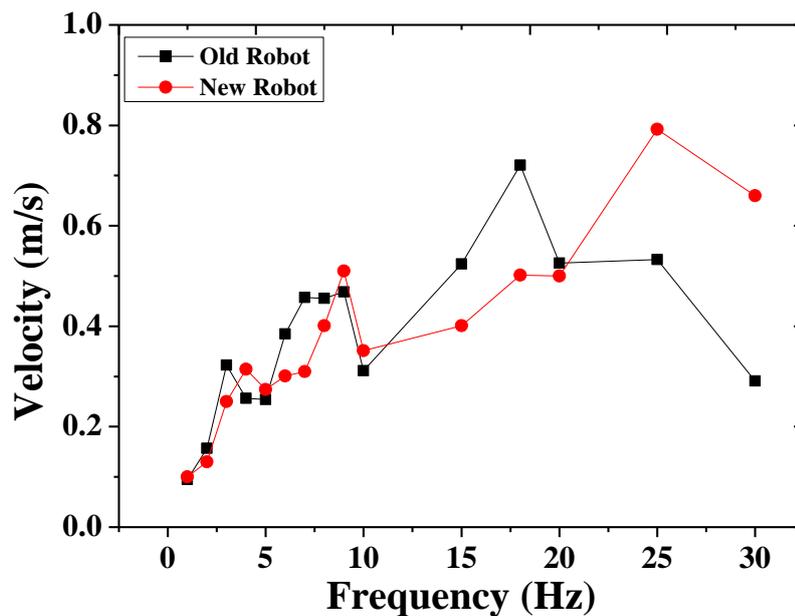


図 18 平板マス型ロボットの推進速度

・単位距離あたりの消費エネルギー

消費電力を測定し，速度で除することでロボットが単位距離前進するために要するエネルギーを求めた．その結果を図 19 に示す．図 19 より，前周波数において，最適化機が従来機よりも高効率な推進を行なえていることを確認した．以上より，本研究が開発したソフト魚ロボット設計システムがソフト魚ロボットの推進効率向上に有効であることを確認した．

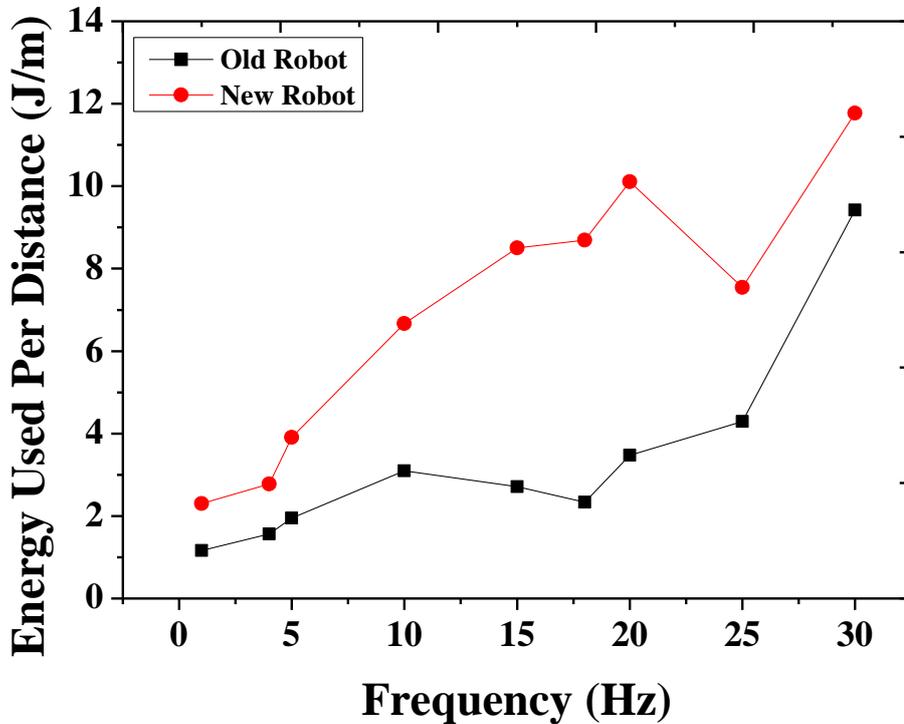


図 19 平板マス型ロボットの単位距離あたりの消費エネルギー

まとめ

本研究では，有限要素解析法にもとづいた FSI 解析を用いて，ソフト魚ロボットについて流体と柔軟な構造体との相互作用を考慮した設計が可能な設計システムを開発した．また，開発した設計システムを用いて従来機に対し最適化設計を行い，同システムがソフト魚ロボットの推進速度および推進効率向上について有効であることを実験的に確認した．

## 4.9 高粘度マイクロディスペンスシステムの開発

学籍番号：0644010

氏名：入江 優花

指導教員：青山尚之教授、金森哉吏准教授

**プロジェクトリーダー：**入江優花 知能機械工学専攻 博士後期課程 青山研究室

**メンバー：**1. 田中和城 知能機械工学科 学部4年  
2. 湊裕 紀 知能機械工学専攻 博士前期課程1年  
3. 平田慎之介 東京工業大学 大学院理工学研究科  
機械制御システム専攻 助教  
4. 臼田 孝 産業技術総合研究所計測標準センター  
センター長

### 1. 諸言

近年、モバイルデバイスの製造にプリンテッドエレクトロニクス (PE) 技術が利用されている[1,2]。PE 技術はフォトリソグラフィを使わず、直接描画・印刷する技術であり、主にインクジェット印刷技術やスクリーン印刷技術を応用した方法である。マスクレスであるために製造工程の簡略化によるコスト削減、使用化学物質の低減が可能である。モバイルデバイスでは製品の低電力化が望まれており、これを実現するにはアスペクト比の高い微細パターンによる低抵抗値化が必要である。低抵抗値化するひとつの手段として、高粘度材料を用いた微細パターン形成がある。しかし既存の PE 技術では高粘度液体を精密に微量塗布することが難しい。そこで本研究では、高粘度液体塗布が可能な小型なニードル方式のディスペンスシステムの開発を目的とする。本ディスペンスシステムは、ディスペンス部と XY ステージ部から構成される。ディスペンス部のニードルの上下駆動及び XY ステージの駆動には圧電素子を用いることで、高精度、小型化を目指す。小型化することで、既存の配線検査装置や顕微鏡等に組み込むことが可能となる。本ディスペンスシステムを用いた、描線、断線リペア、接着剤塗布、バイオ液体、その他高粘度ペースト類の精密塗布が実現する。

### 2. ディスペンス部の設計

図 1 にディスペンスシステム構成を示す。ディスペンスシステムは、ディスペンス部と XY ステージ部から構成される。XY ステージは圧電インパクト駆動[3]により精密に動作し、X ステージ上に塗布基板を配置する。ディスペンス部には、圧電素子に接続されたシャフトがあり、スライダはシャフトに締結されている。ニードルはスライダに取り付けられており、塗布する液体を充填したピペット内に挿入されている。塗布する液体は表面張力によりピペット内に保持されている。圧電インパクト駆動によりスライダがシャフト上を上下に移動する時、スライダに取り付けられているニードルも上下に移動する。ニードルがピペット内部を通過し、ニードル先端に付着した極微量の液体を、XY ステージ上の塗布基板上に接触させることで塗布される。塗布原理を図 2 に示す。図 2(a) は初期状態である。図 2(b) の時、ニードルは液体の充填されたピペット内を下降する。図 2(c) の時、ニードル先端の液体が塗布基板表面に接触し、液体が転写されることで塗布が行われる。図 3 に圧電インパクト駆動によるディスペンス部の動作原理を示す。図 3(a) は初期状態である。圧電素子は上部を固定してあり、下部にはシャフトが接続している。シャフト上にはスライダが締結されている。スライダが自重で滑り落ちない条件を(1)式に、各記号の意味を以下に示す。

$$\mu_{\max} F > Mg \quad (1)$$

$\mu_{\max}$  : 最大静止摩擦係数

F : スライダからシャフトへの締付力

M : スライダの質量

g : 重力加速度

$a_s$  : シャフトの加速度

図 3(b) の時、圧電素子に急速に電圧を印加すると、圧電素子は急速に伸び大きな加速度を発生し、その

変位によって、圧電素子に接続されたシャフトは下方向へ急速に移動し、大きな加速度を得る。この時、スライダのシャフトに対する締め付け力による摩擦力よりも、シャフトの移動によって発生する加速度が大きい場合、スライダはシャフト上で滑り（スリップ）、慣性の法則に従ってその場にとどまり、始めの位置から動かない。この時の関係は(2)式で表すことができる。

$$a_s > \frac{\mu_{\max} F}{M} \quad (2)$$

次に図 3(c)の時、圧電素子にゆっくりと電圧を印加する。圧電素子はゆっくりと縮み、その変位によってシャフトは上方へ移動し初期位置に戻る。この時、スライダのシャフトに対する締め付け力による摩擦力よりも、シャフトの移動によって発生する加速度が小さい場合、スライダはシャフトに締結されたまま（スティック）でシャフトと一緒に移動する。この時の関係は(3)式に示す。

$$a_s < \frac{\mu_{\max} F}{M} \quad (3)$$

この(a)~(c)のプロセスを繰り返すことで、スライダはシャフト上を精密に移動することができる。

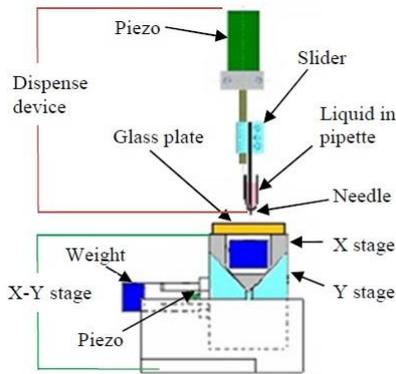


図1. マイクロディスペンスシステムの構成

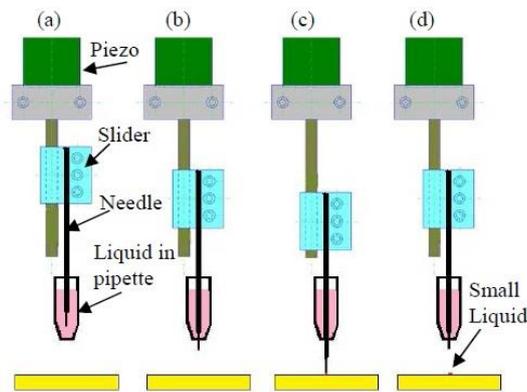


Fig.2 塗布原理

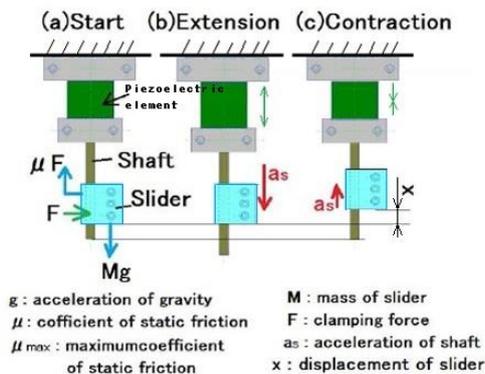


Fig.3 圧電インパクト駆動の原理

### 3. 性能評価実験

試作した圧電インパクト駆動式ディスペンス部の構成を図 4 に示す。ディスペンス部は、圧電素子に接続されたシャフトと、シャフトに締め付けられたスライダ、スライダに取り付けられたニードルから構成されている。スライダには締め付け力調整ねじ (M1) 2 本とロック用ねじ (M1) 1 本がついている。スライダに取り付けているニードルは、材質タングステン、直径  $300\mu\text{m}$ 、長さ  $20\text{mm}$ 、重さ  $0.01\text{g}$  である。圧電素子は NEC トーキン製 AE0505D08F を用いた。シャフトは直径  $1\text{mm}$ 、長さ  $10\text{mm}$ 、重さ  $0.06\text{g}$  である。スライダは、長さ  $5\text{mm}$ 、幅  $4.5\text{mm}$ 、高さ  $1.3\text{mm}$ 、スリット幅  $0.3\text{mm}$ 、重さ  $0.21\text{g}$  である。シャフトとスライダの材質には SUS303 を用いた。シャフトとスライダ間の最大静止摩擦係数は、実験により求めており、 $\mu_{\text{max}} = 0.42$  であった。

ディスペンサー部の圧電素子に、駆動電圧波形として、先端突起付き矩形波、 $40\text{V}$  を印加した際のスライダの動作について、レーザ変位計 (LK-G35、キーエンス社製) を用いて計測した。実験装置の構成を図 5 に示す。スライダにレーザ照射用の微細なターゲットを設置して、スライダがシャフト上を上下に移動する状態を計測した。計測結果を図 6(a)、(b) に示す。図中の黄色線は圧電素子に入力している波形で、青線はスライダの変位を表している。スライダの上下の移動量については、圧電素子に  $40\text{V}$  の先端突起付き矩形波を 5 ステップ分入力して、約  $3\mu\text{m}$  の移動が計測された。圧電素子に入力している波形は先端突起付き矩形波の部分が  $2\text{ms}$ 、インターバルも  $2\text{ms}$  であり、極めて高速であり、レーザ変位計の応答速度を超えているためにスライダの動作状態が階段状に見えない。そこでインターバル時間を  $1\text{s}$  にしてスライダの動作を測定した。結果を図 7 に示す。図中の上の赤色は、入力波形のイメージである。青線はスライダの変位を表している。スライダは約  $1\mu\text{m}/1\text{step}$  で移動していることがわかった。またスライダの変位の最初のステップでの移動量が、ほかのステップでの移動量に比べて大きい結果となった。この原因を調べるために、圧電素子に  $40\text{V}$  の先端突起付き矩形波を連続した 5 ステップで入力し、その時の圧電素子の変位を静電容量型変位計で測定した。結果を図 8 に示す。図中の黄色線は入力波形であり、青色線が圧電素子の変位を示している。この入力波形が示すように、5 ステップの入力している波形形状に変化は観られないが、圧電素子の変位は最初の変位の先端突起部分がほかの変位の先端突起部分と比べて大きくなっている。この理由として、圧電素子のヒステリシスループによるループのスタートポイントでの変位増加であると考えられる。またこの先端突起部は、デジタルオシロスコープのサンプリングレートの影響で信号の全てを捉えきれず、実際の値よりも計測値のほうが小さく表示されていると考えられる。

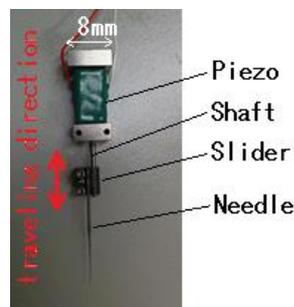


Fig.4 試作したディスペンス部

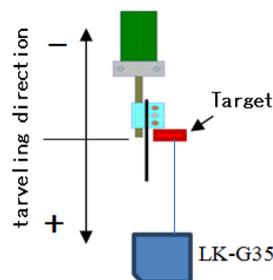


Fig.5 スライダの変位測定方法

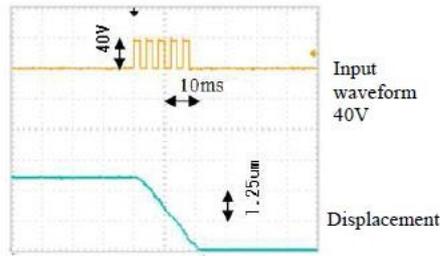


Fig.6(a) スライダーの上方向移動

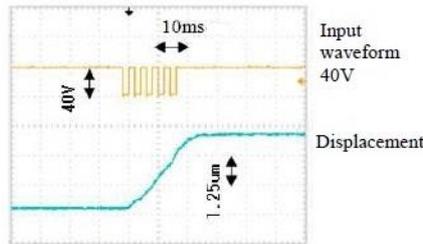


Fig. 6(b) スライダーの下方向移動

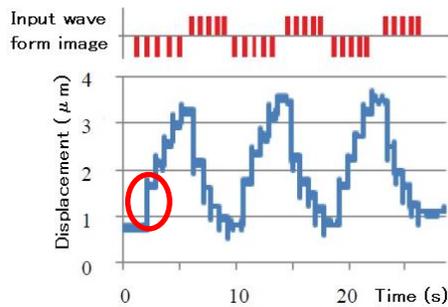


Fig.7 スライダーの上下方向移動

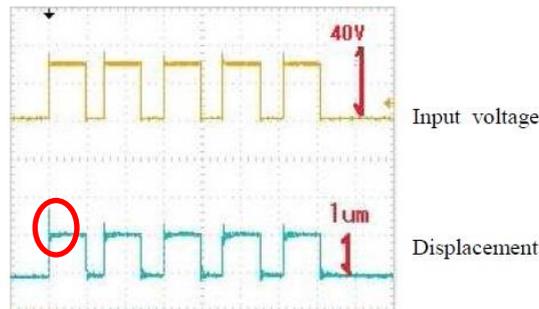


Fig.8 指令入力に対する圧電素子の変位

#### 4. 塗布実験

図9に試作した圧電インパクト駆動を用いたマイクロディスペンスシステムを示す。XYステージ上に、ディスペンス部が配置されている。XYステージ上に塗布基板が配置され、ピペット内には塗布する液体を充填する。始めに、先端直径 $300\mu\text{m}$ のタングステンニードル(図10)とシリコンオイル粘度 $5,000\text{mPas}$ (信越化学)、塗布基板ガラス(マイクロカバーガラス $18\times 18\text{mm}$ 、松浪)を用いて塗布実験を行った。ニードル先端部に付着した液体と塗布基板表面の接触の状態は、マイクロスコップ(VW-6000, VH-Z500R、キーエンス)を用いて観察している。塗布観察の様子を図11に示す。ニードル先端直径が小さくなるとニードル先端と塗布基板のギャップ量も狭くなることわかっている[4]。塗布結果をレーザ顕微鏡で観察した(図12, 13)。塗布はX、Y方向にピッチ $650\mu\text{m}$ の間隔で行い、オープンループ制御であるが、塗布位置と塗布直径の標準偏差はそれぞれ $1\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ となり精密に塗布された。塗布直径は $350\mu\text{m}$ 、液滴厚さは $10\mu\text{m}$ であり、これを元にVK-8550(キーエンス)を用いて計算された体積は $960\text{pL}$ となった。次に先端直径 $10\mu\text{m}$ のタングステ

ンニードル(図 14)と導電ペースト粘度 50,000mPas (ナミックス) を用いて塗布実験を行った。結果図 15, 16 に示す。塗布は X、Y 方向にピッチ 50  $\mu$ m の間隔で行い塗布直径は 12  $\mu$ m、液滴厚さ 4  $\mu$ m、塗布体積 0.2 pL が得られた。

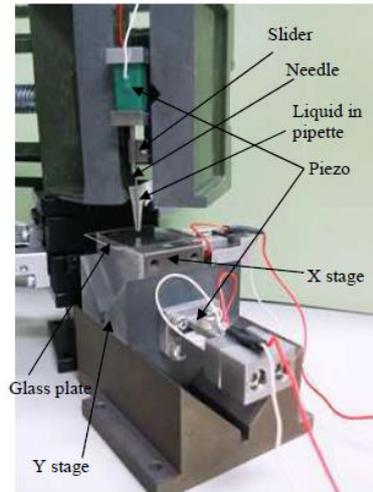


Fig.9 試作したマイクロディスペンスシステム

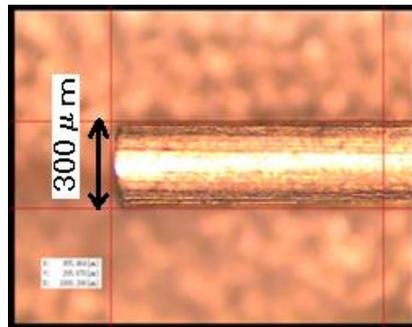


Fig.10 先端直径  $\phi$  300  $\mu$ m ニードル

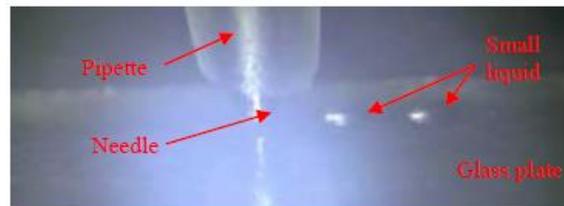


Fig.11 塗布観察の様子

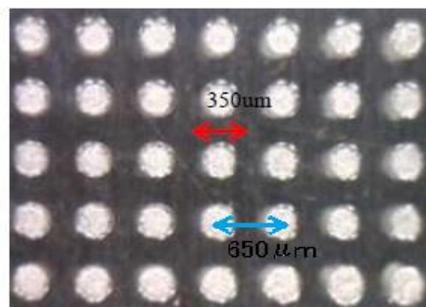


Fig.12 塗布直径  $\phi$  350  $\mu$ m

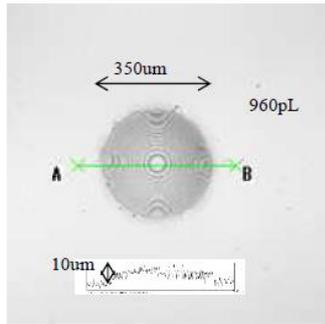


Fig.13 塗布体積 960 pL

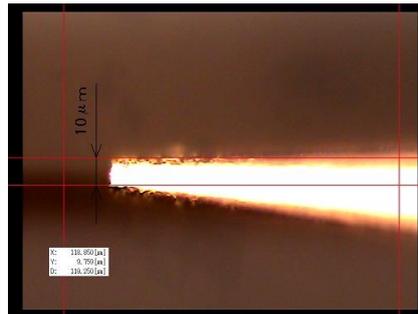


Fig.14 先端直径  $\phi$  10  $\mu$  m ニードル

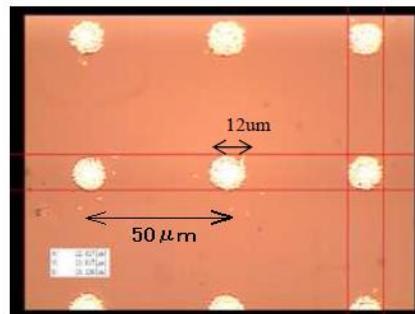


Fig.15 塗布直径  $\phi$  12  $\mu$  m

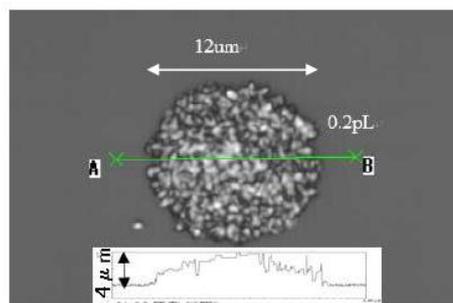


Fig.16 塗布体積 0.2 pL

## 5. 結言

圧電インパクト駆動を用いたマイクロディスペンスシステムを開発した。本装置は、圧電インパクト駆動を用いたディスペンス部とXYステージから構成される。ディスペンス部は、圧電素子に接続されたシャフト、シャフトに締結されたスライダ、スライダに固定されたニードルから構成される。液滴塗布は、ニードルが液滴の充填されたピペットを貫通し、ニードル先端に付着した微量の液滴が塗布対象に接触して行われる。マイクロディスペンスシステムで先端直径 10  $\mu$  m ニードル、粘度 50000 mPas の導電ペーストを用いて、塗布直径 12  $\mu$  m、液滴厚さ 4  $\mu$  m、体積は 0.2 pL の塗布に成功した。

## 謝辞

本プロジェクトを進める上で、多大なご指導を頂きました青山尚之教授、金森哉吏准教授には深く感謝申し上げます。

また、オシロスコープ購入費に関して、カデット教育学生プロジェクトの支援を受けましたことに、感謝申し上げます。

最後に、本プロジェクトを進める上で、ご協力を頂いた白田孝氏、平田慎之介氏、湊裕紀氏、田中和城氏に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 今井隆之：プリンテッド・エレクトロニクス、フジクラ技報、(2012)、Vol.2、pp. 63 - 66.
- [2] 菅沼克昭、神澤毅、後藤大輔、成井譲司、大槻高幹：プリンダブル回路形成技術の開発、富士通テン技報、Vol.30、No.1、pp. 37 - 39.
- [3] T. Higuchi, Y. Yamagata, "Micro robot arm utilizing rapid deformations of piezoelectric elements", JRM, Vol.1, No.4, 1989
- [4] S.Hirata, K.Hirose, Y.Irie, H.Aoyama, "Evaluation of micro-gap control of the needle-type dispenser for precise micro-droplet dispensation", Journal of robotics and mechatronics, Vol.25, No.5, pp. 848-854, 2013

## 4.10 ペンシル型ハンドヘルド非接触マイクロマニピュレータの開発 ～マイクロヒートニードルの試作～

### プロジェクトリーダー

菊地綾

知能機械工学専攻 博士前期課程 2年 青山研究室

メンバー：1. Bokusuwan SUNGWAN

知能機械工学専攻 博士後期課程 3年

2. Daisuke ISHIKO

知能機械工学科 学部 4年

3. Montree Pakkatoke

タイ国立計量研究所・主任研究員

4. Taworn Benjanarasuth

キングモンクット工科大計測工学科准教授

指導教員：青山尚之教授、金森哉吏准教授

## 4. 緒言

近年、医療の現場では神経細胞や毛細管など非常に微細な部位を扱うことが増えている。その操作や手術はマイクロメートル単位で行われ、日々複雑になっている。現在は経験豊かな医師が手でメスを用いた手術を行うことが多い。しかし、人間の手では物理的に届かない部分、再現不可能な操作などがある。具体例を示すと、内臓の腫瘍の除去手術などが挙げられる。この手術には、他の部位を傷つけないことや、必要な箇所を必要な分だけ除去することが必要とされる。人間の手で行うよりもマイクロマニピュレータは正確に、素早く手術を行うことができ、手術のために切開する部分も必要最小限で済む。図1にマイクロマニピュレータのイメージ図を示す。この図のように手で持つことが可能なマイクロマニピュレータが必要となっている。

そこで、我々のグループでは非常に微小な神経細胞や毛細管などに微小マニピュレートすることを想定し、アクチュエータにリン青銅の板ばねを用い、電磁石によって非接触に微小位置決めが可能なペンシル型マイクロマニピュレータの開発を行ってきた。図2にマイクロマニピュレータの既存の機構を示す。この現状の装置では位置決めの際に過渡応答が発生してしまい、短時間で位置決めが出来ないことや、円や楕円等の軌跡が描けないという問題点がある。更に医療現場において用いることを想定すると、ニードルの先端を加熱し、微小領域を加熱するようなツールの有用性が高いと考えられる。

現状の装置のみでは、このような要求を満たすこ

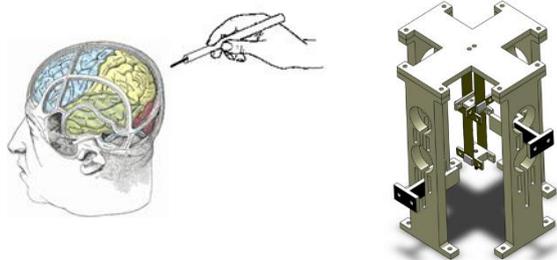


図1 マイクロマニピュレータのイメージ図

図2 マイクロマニピュレータの既存の機構

とは難しい。そのため、現状の装置の機構の見直しや新しい制御方法の検討と微小領域を加熱するツールの設計開発が望まれる。

## 5. 電磁石駆動式マニピュレートシステム

本研究ではペンシル型のハンドヘルドツールの内部に電磁石で非接触精密駆動される機構を組み込み、マイクロニードルなどを微細に操作する機構の開発を目的とする。

本報では基本的な機構を提案し、その動作確認を行い、実用化への可能性を示す。また、人間の細胞が約 100[μm] のため、本研究での目標駆動範囲を 100[μm] とする。

### 2.1. 機構と動作原理

図3に動作原理、図4に駆動部分の拡大図を示す。下側の駆動機構を X 軸、上側の駆動機構を Y 軸とする。アルミニウム製のフレーム、磁石固定具、リン青銅の板ばね、電磁石、ネオジム磁石、マイクロニードルで構成されている。板ばねの両端に設置された電磁石に電圧を加えると磁力が発生する。その磁力によって、磁石が反応し、駆動する原理となっている。以下の式より駆動範囲と力の関係が分かる。

$$\delta = \frac{Pl^3}{4bh^3E} \quad (1)$$

$$P = \mu SH^2 \quad (2)$$

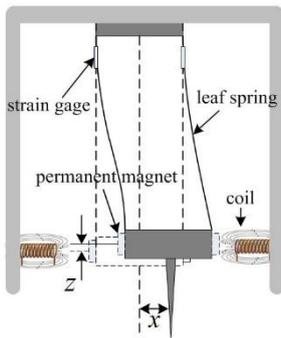


図3 動作原理

図4 駆動部分の拡大図

## 2.2. 位置制御の原理

位置制御にはPID制御とEMPC制御を用いている。この二つの制御方法により、指示した位置に過渡応答することなく、制御することが可能となっている。PID制御は入力した値と出力された値の差を計算し、入力した値に出力された値を近づける。一方、EMPC制御は将来にわたる予測を行いながら、入力された値へと位置制御することができる。PIDに比べて非常に高い精度の制御が実現可能である。しかし、未知の外乱などが発生した場合、予測が外れ、制御精度が低下してしまう恐れがある。そのため、外乱を考慮できるPID制御と、より精度の高いEMPC制御を同時に組み込むことで、お互いの欠点を補いつている。図5にマニピュレータ制御のためのブロック線図を示す。最初に駆動させたい目標値を決め、駆動するために電流が流れる。電流が磁力を発生させ、それによってマニピュレータが駆動する。そのとき駆動した値を板ばねの側面に設置されている歪ゲージで測定し、フィードバック制御を行っている。

## 6. 電磁石による駆動実験

図6に装置の全体図を示す。この装置を用いて、駆動実験を行った。図7にX軸駆動の変位、図8にY軸駆動の変位を示す。PID制御とEMPC制御の両方で実験を行い、評価した。図7, 8において、PID制御の場合、目標値に到達するまでに約0.5[s]経過しているが、EMPC制御の場合は0.05[s]で目標値に到達している。EMPC制御はPID制御の約10倍の周波数応答性となっており、優れていることが分かった。また、安定してからの変幅を比較すると、図7の変幅は約1[um]だが図8の変幅は約3[um]となっている。これはX軸方向駆動に比べ、Y軸方向

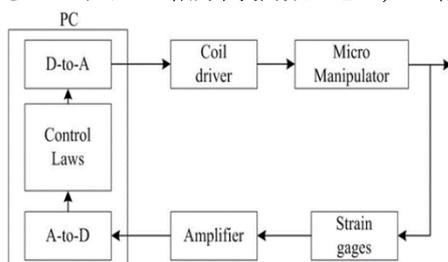


図5 ブロック線図

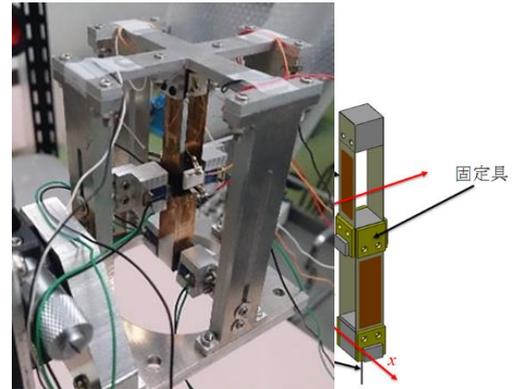


図6 装置の全体図

駆動はX軸の板ばね等を共に駆動させ、重いためであると考えられる。更に、PID制御時の立ち上がり曲線が図7に比べて図8は連続ではない。これも駆動させる際の重さが原因であると考えられる。

X,Y軸の動作確認により、精密位置決めが可能であることを示した。次に応用実験として、円や楕円等の複雑な軌跡を描くことが可能であるか検証した。図9に円と楕円の軌跡を示す。円に関してはPIDとEMPC制御の両方による軌跡を示した。円の軌跡から、PID制御時は直径30[um]の円を描き、EMPC制御時は約1[um]の誤差はあるが直径50[um]の円を描いている。目標値である直径50[um]にPID制御では再現出来ていない。これはPID制御の立ち上がり時間が遅く、入力した信号に追従していないためであると考えられる。立ち上がりが終わる前に描き終わっているということである。また、PID制御時の円は綺麗な円ではなく、歪んだ円となっている。それに比べ、EMPC制御時は立ち上がり時間が早いいため、入力した信号に素早く追従し、目標とする直径50[um]の円を描けていることが分かった。

これらの結果から、先端の過渡応答も最大で約3[um]と小さく、周波数応答性も最大で0.05[s]と早いことが分かった。精密位置決めが出来ており、既存の機構から改善がされているといえる。

## 7. マイクロヒートニードルの開発

医療現場における切開や切除手術において、高電圧でペースメーカー等を使用している人には使用することが困難な電気メスや、術中に細かな操作、制御が困難なレーザーメスが従来は用いられている。しかし、体内に電流を流すことや術中に細かな作業が出来ないことは手術を受けることが出来る患者の数を制限し、医療ミスや医者の手術時間の増大へと

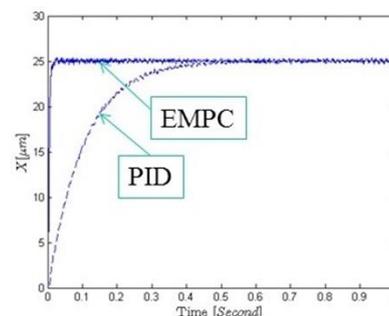
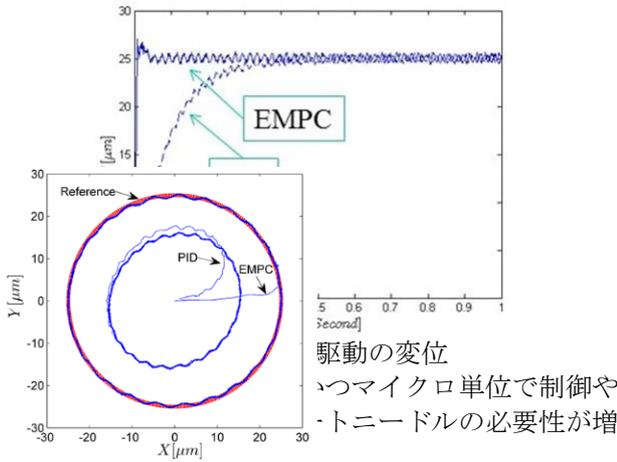


図7 X軸駆動の変位



駆動の変位  
 1μm単位で制御や  
 10μm単位での必要が増

#### 4.1. マイクロヒートニードルの原理

機構の原理としては、タングステン製のニードルに絶縁のためのアロンセラミックを塗布し、その周りにニクロム線を巻く。ニクロム線に電流を流すことで発熱させ、その熱がセラミックを通してニードルに伝わり、ニードルの先端温度が上昇するという原理である。図10に試作したマイクロヒートニードルを示す。このニードルの周りに断熱材を巻いたものを実験で用いる。実際に癌細胞を加熱することや血を凝固させることを想定し、試作を行った。

#### 4.2. 先端の発熱量の評価

マイクロヒートニードル先端の発熱量が分かることで、ニードルが対象物へ与える熱量を計算することが出来る。そこから対象物を何分で、何度まで温度上昇させることができるかが分かり、癌細胞等の加熱の際に使用することが出来ると考えられる。しかし、先端が500[μm]以下の場合、熱電対で正確に温度を測定することは難しい。そこで、水滴をマイクロヒートニードルで加熱し、水滴の温度上昇を測定することで、先端の発熱量を評価していく。ニードルの直径と水滴への刺し込み量を変え、微小領域を加熱することが出来るかを検証する。

##### 4.2.1 発熱量と放熱量

ニードルの発熱量を測定する際に主に必要となるのは水滴が受け取った熱量と空気中への放熱量である。水滴の質量を  $m$ [g]、水滴の初期温度を  $T_1$ [℃]、水滴の終温度を  $T_2$ [℃]、加熱時間を  $t$ [s]、水の比熱を  $c$ [J/gK] とすると、水滴の受け取った熱量  $P_1$ [W]は

$$P_1 = \frac{m \times c \times (T_2 - T_1)}{t} \quad [W] \quad (3)$$

となる。これにより水滴の受け取った熱量を求めることが出来る。

次に水滴から空気中への放熱量は対流熱損失と放

射熱損失の和で計算することが出来る。水滴の表面積を  $A$ [m<sup>2</sup>]、外気への対流熱伝達率を  $h$ [W/m<sup>2</sup>K]、水滴の温度を  $T_3$ [℃]、外気温を  $T_4$ [℃] とすると対流熱損失量を  $P_2$ [W]は

$$P_2 = (T_3 - T_4) \times A \times h \quad [W] \quad (4)$$

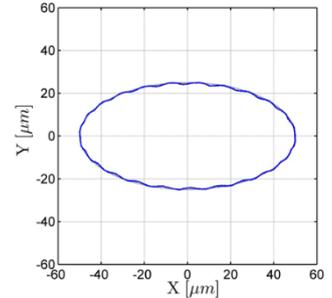


図9 円と楕円の軌跡

となり、水滴表面の放射率を  $B$ 、 $\sigma$  をボルツマン定数とすると放射熱損失量  $P_3$ [W]は

$$P_3 = ((T_3 + 273.15)^4 - (T_4 + 273.15)^4) \times A \times B \times \sigma \quad [W] \quad (5)$$

となる。これらの式を用いて、マイクロヒートニードル先端の発熱量を評価する。

##### 4.2.2 水滴の加熱による発熱量の評価

図11にニードル先端の発熱量測定装置を示す。撥水シートの上に水滴を、水滴の中に熱電対温度計を、上方にマイクロヒートニードルを設置し、マイクロスコープを用いて刺し込み量を調節し、実験を行った。直径500[μm]、300[μm]、100[μm]のニードルで刺し込み量500[μm]、300[μm]、100[μm]と設定して行った。直径500[μm]、刺し込み量500[μm]時のデータとして、図12に加熱時の水滴の温度変化、図13に放熱量の変化、図14に100[ms]毎の水滴の受け取った熱量と放熱量を示す。図13から加熱時間が長いほど、放熱量が増加していることが分かる。放熱量は雰囲気と水滴の温度差によって決まる。加熱すると雰囲気との温度差が大きくなり、放熱量が増加したと考えられる。また、図14は熱電対温度計のサンプリング周期が100[ms]であったため、100[ms]毎の発熱量となっている。図14のニードルの発熱量から加熱時間が2[s]までは発熱量が大きく、最大で0.037[W]となっている。加熱時間が長くなると共に急激に発熱量が減少しており、このことから熱の流れは加速度的に変化していることが分かる。また、空気中への放熱量と水滴が受け取った熱量が等しい部分が温度平衡であると考えられる。これは水滴が受け取る熱量と放熱量が等しく、温度が維持されている状態であると考えられる。

このグラフから得た値を式(3)から(5)に代入し、各々の値を求めた。表1に各直径、刺し込み量における各々の値を示す。表1から直径が同じならば、刺し込み量が減少すると、水滴が受け取った熱量、

総放熱量, 平均発熱量が減少していることが分かる. ニードル先端の平均発熱量は直径 500[um], 刺し込み量 500[um] のとき 0.151[W] となっている. 現在, 早期発見できる癌細胞の大きさは 7[mm] であり, 癌細胞の 7 割は水で構成されている. 癌細胞を 7[mm] の立方体の水滴と考え, マイクロヒートニードルにより 0.151[W] で加熱したとすると,

ニードル直径[um]	刺し込み量[um]	水滴が受け取った熱量[W]	総放熱量[W]	平均発熱量[W]
φ500	500	0.134	0.0172	0.151
φ500	300	0.090	0.0145	0.104
φ500	100	0.051	0.0072	0.058
φ300	500	0.074	0.0085	0.082
φ300	300	0.051	0.0058	0.057
φ300	100	0.024	0.0034	0.028
φ100	500	0.049	0.0061	0.055
φ100	300	0.015	0.0021	0.018
φ100	100	0.010	0.0015	0.012

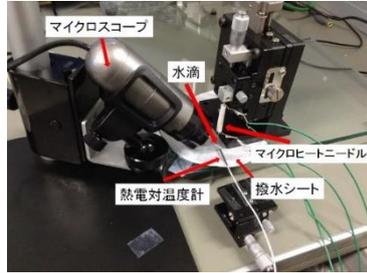


図 10 試作したマイクロヒートニードルの発熱量測定装置

10[s] の加熱で約 7.2[°C] 分の温度が上昇する. 癌細胞は 43[°C] で死滅するため, 人間の体温とされる 36.5[°C] との差である 6.5[°C] 分を加熱すれば良いことになる. よって, 10[s] の加熱で癌細胞を死滅させる温度まで上昇させられ, すぐに処置を行うことができ, 実用的である. 実際は雰囲気温度が体内温度であるため実験時よりも高く, この時間よ

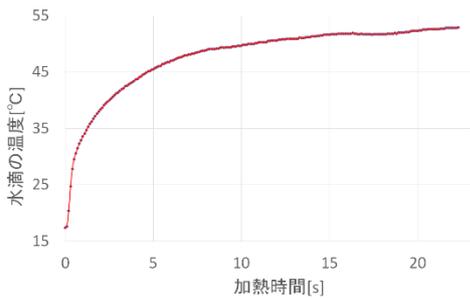


図 12 加熱時の水滴の温度変化

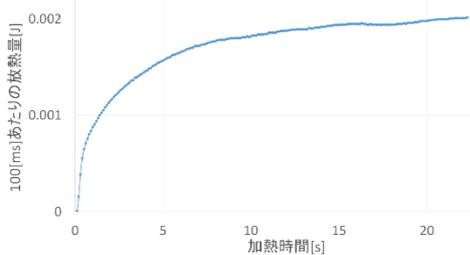


図 13 加熱時の放熱量の変化

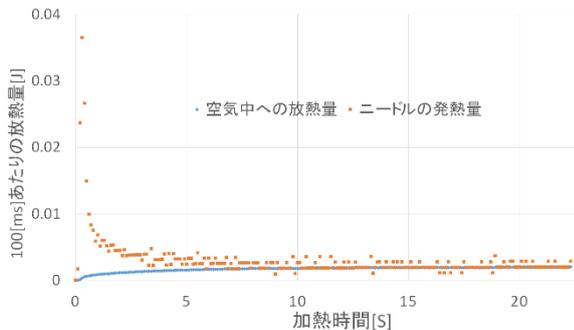


図 14 100[ms]毎の水滴の受け取った熱量と放熱量

表 1 各直径, 刺し込み量における各々の値

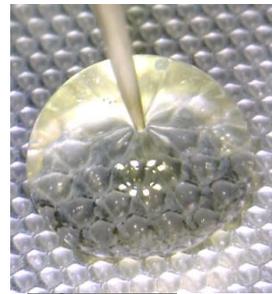


図 15 差し込んだ直後の白身

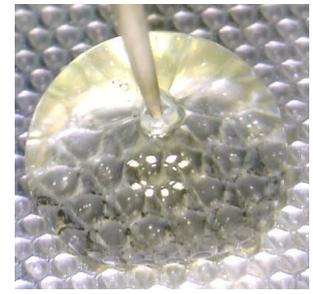


図 16 30[s] 後の白身

りも早く死滅させることができると考えられる.

## 8. 生体細胞の微小領域の加熱

応用実験として生体細胞を加熱する. うずらの卵の白身にマイクロヒートニードルを刺し, 微小領域のみの加熱ができるかを検証する. うずらの卵の白身の部分はたんぱく質で構成されており, 約 70[°C] で固まる. マイクロヒートニードルを用いてうずらの卵を固めることが出来れば, 物は違うが, 対象物を約 70[°C] まで加熱したことが分かり, 癌細胞にも有効であるといえる.

微小領域の加熱を行うため, 先端が 10[um] の直径であるニードルを用いて加熱した. 図 15 に差し込んだ直後の白身, 図 16 に 30[s] 後の白身を示す. 二つの図を見比べると, ニードルの周辺のみが白くなっていることが分かる. ニードルの周辺のみが白くなっているため, 約 70[°C] まで温度が上昇していることと, 微小領域が加熱されていることが確認された. この結果から, 健康な細胞を傷つけずに癌細胞のみを加熱できる可能性を示した.

## 9. 結論

本研究では, ニードルの先端を精密位置制御できる電磁石駆動式非接触マイクロマニピュレータ, および微小領域を加熱できるマイクロヒートニードルを開発した. 位置決め実験では誤差約 3[um] 以内という精度で制御することができ, 円や楕円等の軌跡を描くことに成功した. また, うずらの卵の白身を加熱することで, 微小領域を加熱できることを示した. しかし, 実際に使用される環境は体内であり, 対象物は白身のような液体ではない. そこで, 今後は体内の温度において実験を行うことと, 対象物を癌細胞に近いものに変えることが望まれる. また, 熱源であるニクロム線の熱量を効率よくニードルの先端に加わるよう, 断熱材等の改善を行うことで, より短い時間で加熱できると考えられる.

## 参考文献

- [1]大塚二郎：精密・超精密位置決め技術の基礎  
精密工学会誌 Vol.77 No.7 2011 pp.656-659
- [2] 大中逸雄, 岡本達幸, 平田好則, 大川富雄,  
高城敏美, 山内勇：輸送現象論（大阪大学新世紀レ  
クチャー） 2003.4.1
- [3] 菊地 綾, Sungwan Boksuwan, 青山 尚之：電  
気通信大学, ペンシル型ハンドヘルド非接触マイク  
ロニードルの位置制御機構の開発, 平成 25 年度 日  
本機械学会 ‘ROBOMECH’ 14 講演論文
- [4] Ryo Kikuchi, Boksuwan Sungwan, and  
Prof.Hisayuki Aoyama , ”Development of  
mechanism to control pencil-shaped handheld  
micro needle with non-contact, ”Proceedings of  
6<sup>th</sup> International Conference on Positioning  
Technology, pp.333-336. Kitakyusyu, Japan,  
2014

## 5. ショートトレーニング

### Global Leadership Training

#### 背景

社会のグローバル化に伴い、航空機は我々の生活に無くてはならない存在になってきており、航空機の需要は益々増加していくと考えられている。そのため本邦では、国産の小型ジェット旅客機の開発計画が進められ、2014年に小型旅客機MRJ (Mitsubishi Regional Jet) の完成へと至った。これにより、我が国の航空産業は新たな局面を迎えているが、航空機での輸送量増加や運航数の増大に伴い、CO<sub>2</sub>削減や騒音低減、高い安全性に関する研究・開発が益々求められるようになってきている。

以上のような背景の下、本ショートトレーニングでは、学生に航空機分野における最先端の研究・開発を直で感じてもらうべく、航空・宇宙分野においてリーダー的存在である宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の調布航空宇宙センターを訪問し、施設見学と講演会を実施した。

#### 実施概要

2015年1月13日(火)の14時00分～17時00分まで宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の調布航空宇宙センターにて施設の見学会を実施した。また、JAXAの研究者である鈴木正也を講師に、『民間ジェットエンジンの安全性について』と題した講演会を実施した。参加者は7名であった。

#### 調布航空宇宙センターの見学会および講演会の概要

調布航空宇宙センターの施設見学では、まず、展示室を案内され、JAXAの設立経緯や航空機開発の歴史、研究・実験設備に関する説明を受けた。また、スペース・ミッション・シミュレータによる宇宙や月への模擬操縦を体験した。その後、敷地内に常設してある国産中型旅客機のYS-11のコックピット内部やスーパーコンピュータ棟を見学した。

施設見学後は、JAXAの研究者である鈴木正也氏に、『民間ジェットエンジンの安全性について』と題して航空機の安全性に関する最先端の研究成果について講演していただいた。講演では、まず、航空機の安全性に関する規定や最近の事故を例に挙げながら事故が起きる原因について説明された。また、ジェットエンジンの安全性を脅かすものとして環境中からの異物の吸い込みがあり、その対策として数値シミュレーションによる解析が有効であることが説明された。そして、その具体例として、環境中から微粒子を吸い込んだ際にジェットエンジン内に生じる現象である「サンドエロージョン (壊食)」や「デポジション (粒子付着)」、「着氷」に関する最新の研究成果を紹介して頂いた。それぞれの内容は以下の通りである。

#### サンドエロージョン (壊食)

サンドエロージョンとは、固体粒子が壁面に衝突することにより、壁面が機械的損傷を受け、その一部が脱落していく現象である。ジェットエンジンでは、吸気からの吸込、燃焼過程により生じる熔融粒子、輸送管などから剥がれ落ちた固体粒子などによりサンドエロージョンが発生する。サンドエロージョンの発生は、性能低下を引き起こすだけでなく、事故を起こす可能性もあるため、一定量の砂を吸い込んでも健全に稼動することが求められる。

ジェットエンジンにおいては、特に圧縮機が深刻な損傷を受けることが知られているため、圧縮機におけるサンドエロージョン現象の解明と設計支援のための予測手法の確立が求められている。そこで、単段圧縮機におけるサンドエロージョンの三次元数値予測を行い、エロージョンによる性能変化、固体粒子の運動、エロージョンの発生箇所の分析を行った。また、実験データとの比較を行い、予測の妥当性を検証した。

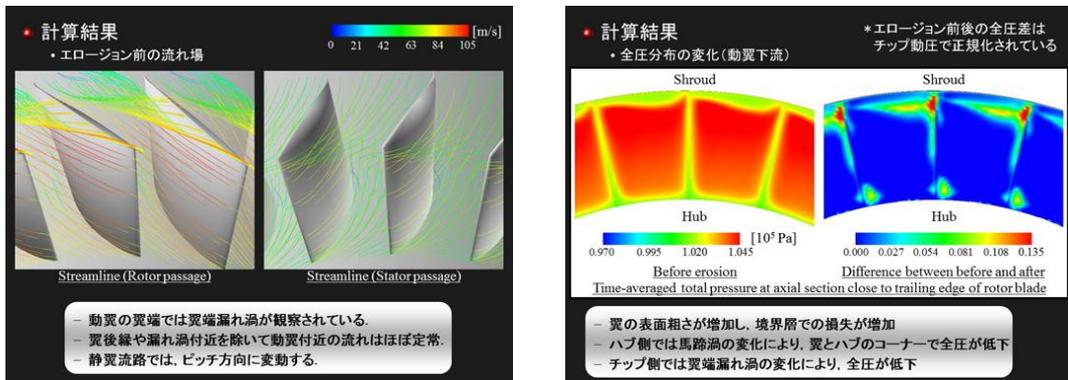


Fig. 1 サンドエロージョンのシミュレーション結果の一例

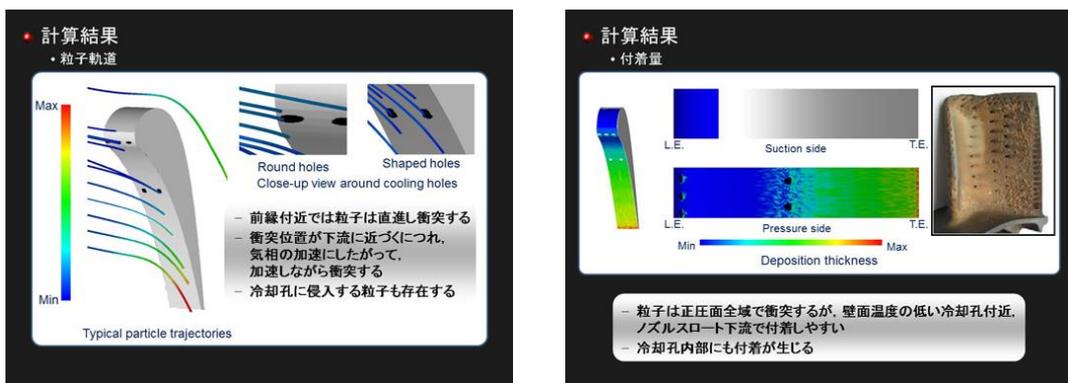


Fig. 2 デポジションのシミュレーション結果の一例

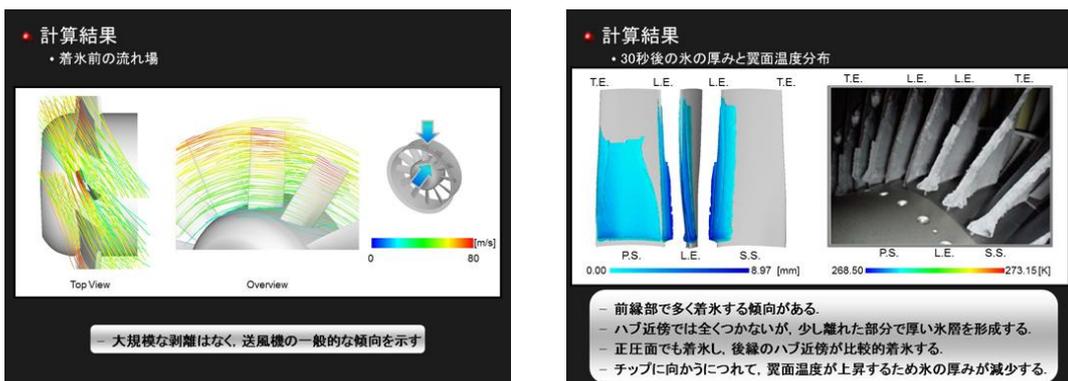


Fig. 3 着氷のシミュレーション結果の一例

### デポジション (粒子付着)

デポジションとは、ガスタービンの燃焼室を通過する際に溶解した砂や塵が、比較的温度の低いタービン翼やエンドウォールの表面で急冷されて付着する現象である。翼表面や冷却孔出口部で起きるデポジションは、材料を劣化させ、膜冷却流を乱すため、ガスタービンの冷却効率に大

きな影響を及ぼす。また、冷却孔内部で起きるデポジションは冷却孔の部分的あるいは完全閉塞をもたらす。これらの影響は、翼やその他の部品の性能と寿命を低下させる。そこで、実機における粒子の堆積結果を再現できるデポジションモデルを開発し、膜冷却タービン静翼の前縁を模擬したテストピースにおけるデポジション現象の三次元数値予測を行い、そのメカニズムおよび熱流体場への影響を調査した。

## 着 氷

着氷とは、大気中の過冷却水滴が物体に衝突することで固体表面上に氷層を形成する現象である。航空機における着氷は、離着陸時や雲を通過する際に生じ、航空機の性能を低下させる原因となる。例えば、ジェットエンジンインテークにおける着氷の発生は、エンジンに流入する空気の流れを乱すほか、氷が飛散した際にエンジンに吸い込まれ、エンジンに機械的損傷を与える恐れがある。特に、エンジンファンなどの動翼は着氷が生じやすい要素の一つであり、遠心力による氷の飛散の危険性も高いため、着氷形状を知ることは重要だと考えられる。そこで、エンジンファンを想定した市販の軸流送風機の動翼に対して着氷シミュレーションを行い、動翼に対する着氷形状について調査を行った。

## まとめ

本ショートトレーニングでは、調布航空宇宙センターの見学会と JAXA 研究員による民間航空機の安全性に関する講演を実施した。前半の施設見学では、説明員の方々に積極的に質問を投げかける学生の姿が見られ、有意義な体験が出来たものと思われる。また、後半の民間航空機の安全性に関する講演では、最新の研究成果を知ることが出来ただけでなく、活発な議論も行われ、非常に充実した講演会となった。いずれも普段の大学院の講義ではあまり体験できない内容であり、参加した学生にとって新しい知識・体験を得るための良い機会になったものと思われる。





Fig. 4 施設見学および講演会の様子

## 6.カデット講演会報告書

### 6.1 自動車システムにおける制御理論の応用

フランスの Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis の AnhTu NGUYEN 氏をお招きし、自動車業界で制御理論の応用例について、解説して頂いた。講演の詳細は以下に述べる。

日時 : 2014年11月27日(木) 14:40-16:10

会場 : 電気通信大学東4号館802室(AV会議室)

参加人数 : 24名

講演者 : AnhTu NGUYEN 氏 Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

講演題目 : 「Advanced Control Design Tools for Automotive Applications」

Abstract:

Nowadays, modern vehicles must meet several challenges which are often conflicting. On the one hand, the pollutant emissions legislations imposed by governments at the international level are becoming more and more stringent because of environmental concerns. On the other hand, customers' demands in terms of performance and efficiency are also severely increasing. All of these objectives must be delivered at affordable cost and high reliability for series production vehicles. Engine downsizing and electric hybridization are two common technologies in automotive industry which are known as promising solutions to achieve these objectives. The purpose of this research is to present some advanced control tools for these automotive applications.

The first part of the talk aims at presenting some energy management strategies, which are based on the Pontryagin's Minimum Principle in optimal control theory, for vehicular electric power systems in a hybrid engine configuration. To this end, both offline optimization approach using the future information of driving conditions and online implementable one have been developed and evaluated in an advanced simulator.

The second part addresses the control of a turbocharged air system of a spark ignition (SI) engine. To this end, theoretical design tool based on switching Takagi-Sugeno systems is applied. To the best of our knowledge, it is the first nonlinear MIMO controller which can guarantee the stability of the whole closed-loop turbocharged air system while taking into account the fuel-optimal strategy.

講演概要 :

近年、自動車業界では様々な困難な問題を抱えている。特に、自動車が発生する排気ガスによる環境問題および燃費の改善問題が世界で注目を浴びている。それらの問題の対策として、エンジンの小型化およびエンジンのハイブリッド化が期待されている。本講演では上記で述べられた問題の一つの解決策となる制御理論の応用例について解説する。講演の様子は図1に示す。

本講演は「ハイブリットエンジンにおけるエネルギー管理の最適化」および「電気点火機関のターボチャージャ付きの空気冷却装置の制御」の二部に分かれており、工業的な背景や結果の解析などについて論じる。

第1部では、ハイブリットエンジンにおける電力システムに対する、エネルギー管理の方法の提案について解説した。従来の車両における電力消費は年を追うごとに重要になってきている。提案された管理方法では、制御の目的として、走行サイクルにおける車両の燃料消費を最小化することが採用されていた。制御目的を実現するために、動的計画法と Pontryagin's Minimum Principle (PMP)の二つの手法を用いていた。PMPを使用した理由には、決められた走行サイクルに対して最適な解を与えられること、実時間実現が容易に可能であること、計算時間から見て効率がよいことが挙げられていた。結果、実際の走行サイクルを使った動力付の車両のシミュレータの検証を行い、約2.5%の燃料の節約が可能となっていることが示されており、共同研究を依頼した企業も大満足だった。

第2部は、電気点火機関のターボチャージャ付きの空気冷却装置の制御についての説明をしていただいた。制御目的を複数持たせており、1つはオーバーシュートすることなくエンジントルクの応答を速めること、2つ目はロバストなパフォーマンスを得ること、3つ目は入力制限を考慮すること、4つ目は定常状態でのエネルギー消失を最小化することである。制御モデルに Switching Takagi-Sugeno モデルを使用している。シミュレーション結果として、オーバーシュートなく収束していること、追従特性が保証されていること、外乱が抑制されていること、飽和ありなしでの違いが示されていた。



図1 講演の様子

質疑応答：

本講演の質疑応答の様子は図2に示す。質疑応答で議論された話題を以下に述べる。

1. 提案手法の短所
2. 実用化への問題
3. Switching Takagi-Sugeno モデルの安定条件の閉ループシステムの有界性条件
4. 提案手法で求められたゲイン
5. エネルギー管理の最適化で扱っているダイナミクスの詳細
6. エネルギー管理の最適化アルゴリズムの目的および適用性
7. Switching Control によるチャタリングの対策

質疑応答に教授だけでなく学生も参加し、活発な質疑応答が行われた。

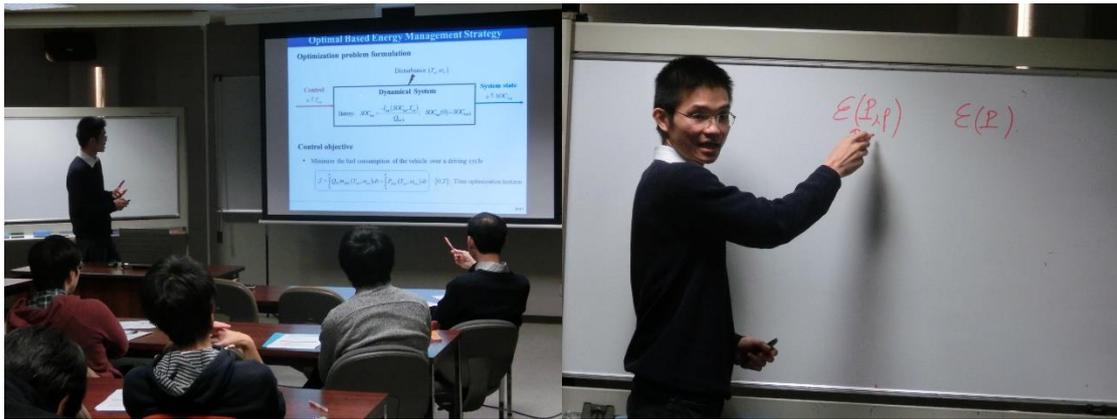


図2 質疑応答の様子

## 6.2 基幹メカトロシステムのためのモデルに基づくシステム工学と安全性評価の統合

「国際メカトロ研究教育機構(IOREM)」と魅力ある大学院教育「メカノインフォマティクス・カデット教育」では、フランスパリにある高等機械大学院大学(SUPMECA)の Jean-Yves CHOLEY 氏をお招きし、基幹メカトロシステムのためのモデルに基づくシステム工学と安全性評価の統合について、講演していただいた。詳細は下記に述べる。

日 時： 2014 年 12 月 1 日(月曜日) 10時40分～12時10分(質疑応答含む)

会 場： 電気通信大学東4号館222室

参加人数：23名

講 師： Prof. Jean-Yves CHOLEY, SUPMECA, Paris, France

講演題目：「Integrated Model-Based System Engineering and Model-Based Safety Assessment for Mission-Critical Mechatronic Systems」

概要：

Nowadays, mission-critical complex systems make extensive use of mechatronic systems, such as electro-mechanical actuators on a more electric aircraft. In order to better design those systems, an integrated methodology is proposed, relying on MBSE and MBSA, and taking into account multi-physic and 3D constraints in the early phase of the design process.

最近、基幹複合システムは多くのメカトロ要素を利用している。例えば、多く電子化された飛行機におけるメカトロアクチュエータなどがある。これらのシステムを設計するために、講演者はモデルに基づくシステム工学とモデルに基づく安全性評価を統合化し、設計の早期段階においてマルチフィジックスや3次元拘束条件を考慮できる手法を提案している。

講演会では、まずモデルに基づくシステム工学とモデルに基づく安全性評価を分かりやすく解説した。次に、そのためのモデリング方法、言語、システム構築を具体的に説明した。次に、モデルに基づくシステム工学とモデルに基づく安全性評価の統合コンセプト、具体的な例を挙げて統合方法を紹介した。

本講演の内容は本学の学生にとって新しい話題であり、学生たちが興味深く聴講し、積極的に質問したり、あとでPPT資料を取り寄せたり、熱心に勉強した。





## 7 地域貢献

### 7.1 オープンキャンパス

本学開催の平成 26 年度第 1 回オープンキャンパスは平成 26 年 7 月 20 日（日曜日） 10 時 00 分から 16 時 00 分まで開催された。この 第 1 回オープンキャンパスでは、大学説明会、研究室公開、Ⅰ類（情報系）、Ⅱ類（融合系）、Ⅲ類（理工系）の説明会、入試説明会、模擬講義をはじめとして、多くのイベントが実施された。そのうち知能機械工学科の研究室紹介の場所を一部割ってもらって、ガジェット教育プログラムの紹介をおこなった。

### 7.2 調布市立科学センターでの「電気工作」講座

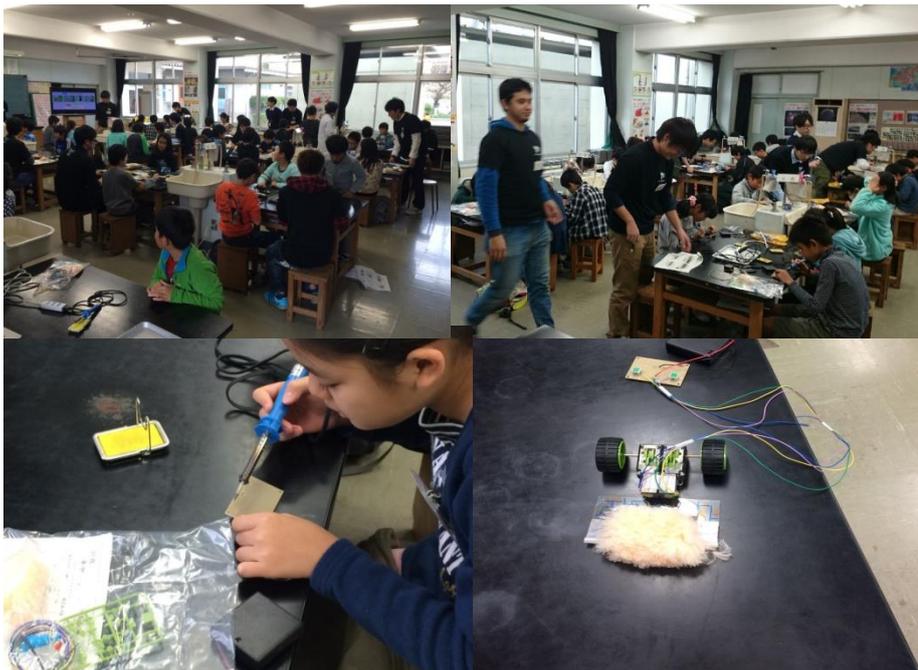
調布市科学センターには小学校 5・6 年生を対象とした理科系の講座があります。本学では教職課程を履修している学生がこの講座にほぼ毎月ボランティア活動として指導補助の形で参加しています。

1 2 月 6 日に行われた「電子工作Ⅱ」では、教職課程の学生に加え、「魅力ある大学院教育イニシアティブメカノインフォマティクス・カデット教育」プログラムの一環として知能機械工学専攻の大学院生が参加、企画、運営、指導を行いました。

今年は、『ワイパー君 4 号』とその改良型アタッチメントを教材に使用しました。講座当日までに教職学生の学部生は事前に田中研究室（知能機械工学専攻）の大学院生から回路の説明、ハンダ付けの指導を受けると共に小学生に教える際の注意点等の確認を行いました。

当日は、抽選に選ばれたおよそ 40 名の児童が参加し、1 3 時 3 0 分に調布市科学センターの職員の方のあいさつで講座を講座がはじまりました。全体の説明を佐藤順亮さん（知能機械工学専攻 2 年）が担当し、細かい部分は 1 テーブルに児童 3 人に対し学生または大学院生 1 人が指導に当たりました。センターの職員からのあいさつの中でも仰られておりましたが、この講座は同センターの中でも一番の人気講座になっています。そのこともあってか、児童たちは熱心に話を聞き、ハンダ付けの仕方や電子回路の仕組みを学びました。ロボットを完成させ、動かすことが出来た児童は歓声を上げていました。

このように、物を自分で作り、その成り立ちについて学ぶことが出来る本講座は高い評価を得ています。



(左上から) 全体の説明を聞く児童、テーブルごとに教えている様子、実際の作業、完成品

## 8. RoboCup サッカー

### 8.1. RoboCup サッカー Japan Open2014 概要

2014年5月4～6日に福岡県飯塚市にある九州工業大学 飯塚キャンパスにて RoboCup Japan Open 2014 が開催された。中野-船戸研究室は fWing207 として 6 台のロボットでサッカーを行う小型リーグ (Small Size League : SSL) に参加した。今年度は SSL に、8 チームのエントリーがあった。Japan Open では例年、大会初日および 2 日目には 2 つのリーグに分かれての各リーグ内総当たりの予選リーグが行われ、3 日目には予選リーグを勝ち抜いた上位 4 チームによる決勝トーナメント戦が行われる。今大会では各リーグ 4 チームずつの参加となった。

### 8.2. 今大会に向けた fWing207 の取り組み



図 1 大会風景



図 2 fWing207 の試合風景



図 3 2013 年型のロボット



図 4 2013 年型で揃えたチーム

Japan Open 2012 から 2013 ではロボットを新型に改良した。これにより移動やボールのキックにおいてロボットの性能が向上した。しかし、全体の改良をしたことにより、以前のロボットとは別の不具合が起こる等、実際に試合をしてみて扱い方の注意点や細かな問題点等が見つかった。また、予算の都合もありチームの半分のロボットが 2012 年型であったため、今年はすべてのロボットを 2013 年型のロボットに統一するため、残りのロボットの 2013 年型への変更およびそれらの細かな修正を行った。細かな修正の内容は緩衝材の使用やキッカー部の材質等である。

### 8.3. 前大会から今大会へのルール改正

本大会よりダブルフィールドが導入された。ダブルフィールドはこれまでの大会で使用されていたフィールド(シングルフィールド)の 2 倍の大きさで、世界大会のフィールドサイズをダブル

フィールドに移行するという動きに合わせ、導入された。フィールドサイズが2倍になることでロボットの状態を撮影するカメラも以前は2つであったのに対し、4つ使用することになるため、それらの情報を統合する Vision システム全体に少し変更が必要なる。この理由から本大会は移行期間とされ、希望によってシングルフィールドでの試合も可能というルールになった。fWing207は開発環境がシングルスペースに対応しており、今年中の移行は難しいと判断し、大会ではシングルフィールドで試合を行った。

#### 8.4. 今大会の fWing207 の成績と大会全体について

fWing207は予選リーグBに出場し、1勝2敗で4チーム中3位の成績となった。リーグ戦3位になったことで予選リーグAの2位となったOP-Ampとの敗者復活戦に進んだ。ゴールを決めることはできたものの負けてしまい、結果としては予選リーグ敗退となった。表1は予選リーグAの結果、表2は予選リーグB結果、図5は決勝トーナメントの結果、図6は3位決定戦の結果を示している。また、敗者復活戦はOP-Amp対fWing207が5-1、ODENS対MCTが3-0という結果だった。

今大会では各チーム昨年以上にロボットが良く動くようになった印象を受けた。昨年は決まりきった動きで点数を重ねるチームもあったが、今年はそれでは点数を重ねることができず、オフenseとディフェンスの両面でサッカーらしい試合を見ることができた。fWing207も敗者復活戦を含めた4戦の内、開幕戦を除く3戦で点を取ることができ、ハードウェアとソフトウェアの両面で昨年からの向上が見られた。

表1 予選リーグAの結果

リーグA	RoboDragons (愛知県立大)	MCT (松江高専)	OP-Amp (浅神製作所)	Owaribito-CU (中部大)
RoboDragons (愛知県立大)		5 - 0	10 - 1	10 - 0
MCT (松江高専)	0 - 5		0 - 1	9 - 0
OP-Amp (浅神製作所)	1 - 10	1 - 0		5 - 0
Owaribito-CU (中部大)	0 - 10	0 - 9	0 - 5	

表2 予選リーグBの結果

リーグB	KIKS (豊田高専)	ODENS (大阪電通大)	仙台高専	fWing207 (電通大)
KIKS (豊田高専)		3 - 0	0 - 0	6 - 0
ODENS (大阪電通大)	0 - 3		6 - 0	4 - 1
仙台高専	0 - 0	0 - 6		0 - 1
fWing207 (電通大)	0 - 6	1 - 4	1 - 0	

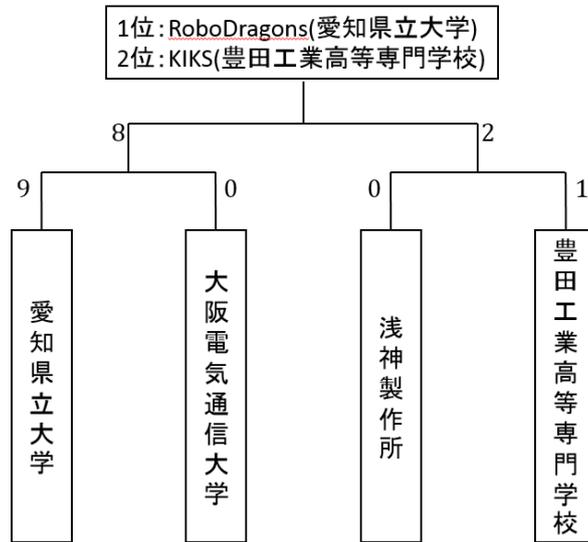


図5 決勝トーナメント結果

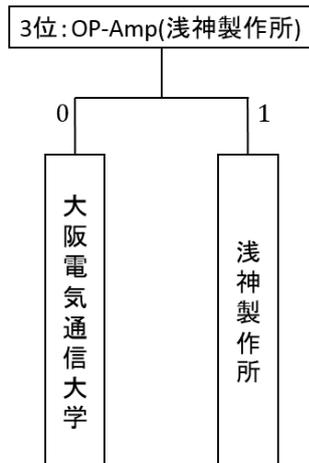


図6 3位決定戦結果

## 9. 大学院生による研究成果発表

### 【ジャーナル論文】

1. Wenjing zhao, Aiguo Ming, Makoto Shimojo, Yohei Inoue, and Hiroshi Maekawa, "Fluid-Structure Interaction Analysis of A Soft Robotic Fish Using Piezoelectric Fiber Composite," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 26, No. 5, pp. 638-648, 2014.

### 【学術論文】

1. Sungwan Bokuwan, "Robust hybrid control for two-dimensional handheld micromanipulator," Int. J. of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.3, pp.331-340, 2014.

2. Tsukasa Ito, Hideyuki Mochizuki, Tomoo Watanabe, Toshinori Kubota, Takatoshi Furukawa, Takuji Koike, Seiji Kakehata, Safety of Ultrasonic Bone Curette in Ear Surgery by Measuring Skull Bone Vibrations, Otology & Neurotology, 35(4), e135-9 (2014)

3. Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Hiroshi Ohtake, Kazuo Tanaka, Hua O. Wang, "Discrete Polynomial Fuzzy Systems Control", IET Control Theory & Applications, 8/ 4, 288-296,2014

16. Motoyasu Tanaka, Ken Yamaguchi, Daisuke Ogura, Ying-Jen Chen, and Kazuo Tanaka, "Nonlinear control of F16 aircraft via multiple nonlinear model generation for any trimmed equilibriums", International Journal of Fuzzy Systems, 16/ 2, 140-152,2014

4. Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kosuke Inoue, Hiroshi Ohtake, Kazuo Tanaka, Thierry Marie Guerra, Alexandre Kruszewski, and Hua O. Wang, "A Nonmonotonically Decreasing Relaxation Approach of Lyapunov Functions to Guaranteed Cost Control for Discrete Fuzzy Systems" IET Control Theory & Applications, 8/ 16, 1716-1722, 2014

5. Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hua O. Wang, "Stability Analysis and Region-of-Attraction Estimation Using Piecewise Polynomial Lyapunov Functions: Polynomial Fuzzy Model Approach", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Accepted, 2014

6. Wenjing zhao, Aiguo Ming, Makoto Shimojo, "Dynamic Analysis and Optimization of Soft Robotic Fish Using Fluid-Structural Coupling Method," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1474-1479(2014.06).

7. Aiguo Ming, Toshinori Tahata, Kimitake Ueki and Makoto Shimojo : Development of a Novel Leg Mechanism in the Shape of Backward Convex with a Mechanical Joint Stop for bipedal robot, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China, pp. 107-112(2014.08).

8. Aiguo Ming, Kazuya Enomoto, Mizuki Shinozaki, Ryuki Sato and Makoto Shimojo: Development of an Entertainment Robot System using Kinect, Proceedings of Mecatronics 2014, Tokyo, Japan, pp. 127-132(2014.11).

9. Aiguo Ming, Takahiro Ichikawa, Wenjing Zhao, Makoto Shimojo: Development of a Sea

Snake-like Underwater Robot, Proceedings of IEEE ROBIO 2014, Bali, Indonesia, pp.761-766(2014.12).

10. Chunquan Xu, Aiguo Ming, and Qijun Chen: Characteristic Equations and Gravity Effects on Virtual Passive Bipedal Walking, Proceedings of IEEE ROBIO 2014, Bali, Indonesia, pp.1296-1301(2014.12)..

11. Sungwan Bokuwan, "Design and Control of Magnetic Driven Active Handheld Medical Micromanipulator with Explicit Model Predictive Control, "Proc. of New Actuator and 8th Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, pp.377-380, 2014[査読有]

12. 田中基康, 佐藤順亮, 田中一男, 松野文俊: 冗長シリアルリンクロボットの多点接触における衝突回避制御, 計測自動制御学会論文集, accepted.

#### 【学術雑誌】

1. Naoaki Niizuma, Kazushi Nakano, Teturo Funato, and Kohji Higuchi. Group motion control of multi-agent systems with obstacle avoidance: Column formation under input constraints, Artificial Life and Robotics, Vol.20, No.1, pp.70-77, (2015).
2. Katsumichi Sameshima, Kazushi Nakano, Tetsuro Funato and Shu Hosokawa. StRRT-based path planning with PSO-tuned parameters for RoboCup soccer, Artificial Life and Robotics, vol.19, No.4, pp.388-393 (2014).
3. Shu Hosokawa, Joji Kato and Kazushi Nakano. A reward allocation method for reinforcement learning in Stabilizing control tasks, Artificial Life and Robotics, Vol.19, No.2, pp.109-114, (2014)
4. 浦邊研太郎 (UEC 特別研究学生, NAIST), 小木曾公尚, “McKibben 型空気圧ゴム人工筋モデルの妥当性”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 4, 2015 (掲載予定)

#### 【国際会議発表】

1. Naoaki Niizuma, Kazushi Nakano, and Teturo Funato. Formation Control of Multi-agent Systems with Input Constraints and Obstacle Avoidance. The 1st IEEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control (SAMCON 2015), TT5-1, Nagoya, Japan, March 2015.
2. Sekiya Noro, Tetsuro Funato, Shinya Aoi, Kazushi Nakano and Kazuo Tsuchiya. Experimental validation of nonlinear PID model for human standing with large body sway, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2014), 1346, Nakhon

Ratchasima, Thailand, May 2014.

3. Eduardo Rivera Jaramillo, Katsuhiko Hirose, Yoshihiro Ogino, Kazushi Nakano, Tetsuro Funato and Hidetoshi Oya. A Wavelet Approach to Identification of Ventricular Fibrillation Including State Transition, International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB'14), OS17-5, Beppu, Japan, Jan 2014.
4. Naoaki Niizuma, Kazushi Nakano, Tetsuro Funato and Kohji Higuchi:  
On group motion control of multi-agent systems with obstacle avoidance the case of column formation under input constraints, International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB'14), OS16-5, Beppu, Japan, Jan 2014.
5. Katsumichi Sameshima, Kazushi Nakano, Tetsuro Funato and Shu Hosokawa. StRRT based path planning with PSO tuned parameters for RoboCup soccer, International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB'14), OS16-6, Beppu, Japan, Jan 2014.
6. Sungwan Bokuwan, "Tremor suppression robust hybrid control for handheld micromanipulator," Proc. of Control, automation and systems, October 22-25, 2014, KINTEX, Korea.
7. Ryo Kikuchi, "Development of mechanism to control pencil-shaped handheld micro needle with non-contact", Proc. of the 6th Int. Conf. on Positioning Technology, Nov.18-21,2014
8. Kentaro Urabe(UEC 特別研究学生, NAIST), Kiminao Kogiso(UEC), "Application of Hybrid Model Predictive Control to McKibben Pneumatic Artificial Muscle System", SICE International Symposium on Control Systems (ISCS), 514-5, Tokyo, 2014/03/05

#### 【国内会議発表】

1. 小林 倫, 鈴木学, 中野和司, 船戸徹郎. マルチエージェントのための隊列維持を考慮した拡張リーダー追従型隊列誘導, 第一回制御部門マルチシンポジウム (MSCS'14), 5D5-5, 東京, (2014.3)
2. 山田大貴, 木田隆. モデル予測制御による通信遅れを考慮した人工衛星のフォーメーションフライト, 第一回制御部門マルチシンポジウム (MSCS'14), 7G1-4, 東京, (2014.3)
3. 伊藤優馬, 金森哉吏:  
「楽器演奏ロボットに関する研究-バイオリン MUBOT の運指機構の開発」  
第 15 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(SI2014), 講演 番号:1G2-4, 東京ビッグサイト, 2014 年 12 月 15 日(月)~17 日(水).
4. 田附雄一, 松村周平, 金森哉吏:  
「移動サービスロボット向け屋内外位置情報サービスに関する研究」  
第 15 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(SI2014), 講演番号:3F4-2, 東京ビッグサイト, 2014 年 12 月 15 日(月)~17 日(水).

5. 伊藤優馬, 金森哉吏 :  
楽器演奏ロボットに関する研究-バイオリン MUBOT の運指機構の開発-  
2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 講演番号:Q07,  
東洋大学白山キャンパス, 2015 年 3 月 17 日(火)~19 日(木).
6. 近藤怜史, 金森哉吏 :  
回り階段も移動可能な直交四脚車輪ロボットの開発,  
2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 講演番号:Q19,  
東洋大学白山キャンパス, 2015 年 3 月 17 日(火)~19 日(木).
7. 藤田貴大(UEC 特別研究学生, NAIST), 小木曾公尚,  
“RSA 暗号に基づく線形制御器の暗号化”,  
第 2 回 計測自動制御学会 マルチシンポジウム, 721-2, 東京, 2015/03/07
8. 李信英, 松岡里奈, 池田勝久, 橋本卓弥, 小池卓二, 聴性誘発反応を用いた胎児の聴覚検査システムの検討, 日本機械学会 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 2015 年 1 月 9 日 (金) ~10 日 (土), 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟県)
9. 大瀧直也, 横井大介, 橋本卓弥, 小池卓二, 蝸牛内イオン流動を解析可能な蝸牛モデルの開発, 日本機械学会 第 25 回バイオフィロンティア講演会, 2014 年 10 月 3 日 (金) ~4 日 (土), とりぎん文化会館 (鳥取県)
10. 岡安 真偉雅, 橋本 卓弥, 小池 卓二, コウモリの特徴的な蝸牛形状が聴覚に及ぼす影響” 日本機械学会 第 25 回バイオフィロンティア講演会, 2014 年 10 月 3 日 (金) ~4 日 (土), とりぎん文化会館 (鳥取県)
11. 田中絵里, 林直輝, 神崎晶, 羽藤直人, 橋本卓弥, 小池卓二, 骨導補聴器用トランスデューサーにより発生する振動の三次元計測, 日本機械学会 第 25 回バイオフィロンティア講演会, 2014 年 10 月 3 日 (金) ~4 日 (土), とりぎん文化会館 (鳥取県)
12. Maia Okayasu, Takuji Koike, Effects of characteristic cochlear configuration in bats on vibration of basilar membrane, The 19th Auditory Research Forum, 2014 年 12 月 13 日 (土) ~14 日 (日), 同志社びわこリトリートセンター(滋賀県)
13. 大瀧直也, 橋本卓弥, 小池卓二, 基板振動と内有毛細胞膜電位モデルによる蝸牛内機械・電気変換機構の解析, 日本機械学会 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 2015 年 1 月 9 日 (金) ~10 日 (土), 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟県)
14. 岡安 真偉雅, 橋本 卓弥, 小池 卓二, ヒトとコウモリの蝸牛形状の違いが聴覚に及ぼす影響, 日本機械学会 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 2015 年 1 月 9 日 (金) ~10 日 (土), 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟県)
15. 田中絵里, 林直輝, 金子渥(B4), 神崎晶, 羽藤直人, 橋本卓弥, 小池卓二, 埋め込み型骨導補聴器の信号伝送効率の改善, 日本機械学会 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 2015 年 1 月 9 日 (金) ~10 日 (土), 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟県)
16. 中島瑞, 田中基康, 田中一男, 松野文俊, “スライダリンク機構を用いた曲面に適応可能なヘビ型ロボットのユニット開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'14, 3A1-J01, May/2014.
17. 田中基康, 中島瑞, 田中一男, “接地点切換えを用いた能動車輪型多連結ロボットの移動障害物回避”, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 2D2-04, 2014.

18. 中島瑞, 田中基康, 田中一男, “相対姿勢情報を用いたヘビ型ロボットの斜面進入”, 第15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, 1G1-6, 2014.
19. 植木公威, 田畑利憲, Hammadi Moncef, 明愛国, Choley Jean-Yves, 下条誠: 二足歩行ロボットの運動性能の向上に関する研究 - 変減速交差リンクとストッパの併用による膝関節の開発 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 1A1-S03, (2014. 05)
20. 市川貴大, 趙文静, 明愛国, 下条誠: 圧電繊維複合材料を用いた生物模倣型ソフト水中ロボットの研究開発-ウミヘビ型ロボットの試作-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 1P1-E05, (2014.05)
21. 西村冬威, 明愛国, 下条誠: 圧電繊維複合材料を用いた生物模倣型ソフト水中ロボットの研究開発-立体魚型ソフト水中ロボットの設計-, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 103-04, (2014.9)

#### 【大会出場など】

1. 木村匠吾, 山田大貴, 小玉隆志, 佐藤陽太, 三宅農  
RoboCup Japan Open 2014 サッカー小型ロボットリーグ出場  
予選 A リーグ 1 勝 2 敗, (2014.5)
2. 関連学生参加ロボコン  
<http://www.uec.ac.jp/news/prize/2014/20141118-4.html>

#### The International Micro Robot Maze Contest (MAZE)

カテゴリー0 努力賞 田邊幸大 (知能機械工学専攻博士前期 1 年)

【機体名】 U.O.Machine VII

カテゴリー1 1 位 田邊幸大 (知能機械工学専攻博士前期 1 年)

【機体名】 U.O.Machine VII

3. 2014 年度ロボカップジャパンオープン レスキュー実機リーグ  
【場所】 新潟工科大学  
【日時】 2014/5/4-5/6  
【内容】 チーム名: 電通大田中研+根 (田中基康, 根和幸, 中島瑞)  
【受賞】 計測自動制御学会システムインテグレーション部門賞
4. 第4回武蔵野エリア産業フェスタ  
【場所】 吉祥寺東急イン 3F  
【日時】 2014/11/12

【内容】ヘビ型ロボットの動作デモンストレーション

【特許】

大学整理番号：09-004JP00

出願国：日本

出願番号：特願 2009-212086（出願日 2009/09/14）

登録番号：特許第 5499355 号（登録日 2014/03/20）

発明の名称：「移動環境認識装置及び方法」

発明者(4名)(敬称略)：金森 哉吏, 飛田 和輝, 山崎 暁, 小川 博教

出願人：国立大学法人電気通信大学, 日本精工株式会社

【その他】

1. 修士1年木村匠吾が夏期短期交換研修プログラムによりキングモンクット工科大学トンプリ校(タイ)へ留学, (2014.8)

研修内容：Localization for mobile robot by using Kalman-Filter

2. 修士1年木村匠吾を中心に夏期短期交換研修プログラムによるキングモンクット工科大学トンプリ校(タイ)の学生の受け入れ対応を行った. (2014.6)

研修内容：動的 PSO による関数の最適化

【他大との共同研究】

田中絵里(M2), 林直輝(M1), 「埋め込み型骨導補聴器の開発」

慶應大学医学部耳鼻咽喉科, 愛媛大学医学部耳鼻咽喉科

李信英(B4), 「胎児の聴力検査システムの開発」

順天堂大学医学部耳鼻咽喉科

李信英(B4), 大瀧直也(M2) 「内視鏡鼻科手術危険度モニタリングシステムの開発」

順天堂大学医学部耳鼻咽喉科

マウンソウ(B4), 「害虫が忌避する木伝導振動の計測とシミュレーション」

農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター

(戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 採択研究)

マウンソウ(B4), 「カミキリムシにおける基質付着の制御機構の解明」 森林総合研究所

## 【受賞】

### 1. Best Presentation 賞

Naoaki Niizuma, Kazushi Nakano, and Teturo Funato. Formation Control of Multi-agent Systems with Input Constraints and Obstacle Avoidance, The 1st IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control (SAMCON 2015), TT5-1, Nagoya, Japan, March, 2015.3.

### 2. ICCAS 2014 best presentation award

Sungwan Bokusuwan, Taworn Benjanarasuth, Chisato Kanamori and Hsayuki Aoyama: "Tremor Suppression for Handheld Micromanipulator using Robust Hybrid Control", 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014), pp.267-271, Oct. 22–25, 2014 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea.  
the best presentation award

### 3. 第 57 回 自動制御連合講演会 優秀発表賞

藤田貴大(UEC 特別研究学生, NAIST), 小木曾公尚,

“RSA 暗号に基づく線形制御器の暗号化” ,

第 2 回 計測自動制御学会 マルチシンポジウム, 721-2, 東京, 2015/03/07

### 4. 日本機械学会若手優秀講演フェロー賞

田中絵里, 骨導補聴器用トランスデューサーにより発生する振動の三次元計測, 日本機械学会 第 25 回 バイオフロンティア講演会, 2014 年 10 月 3 日 (金) ~ 4 日 (土), とりぎん文化会館 (鳥取県)

### 5. 2014 年度 ロボカップジャパンオープンレスキュー実機リーグ, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門賞, 田中基康, 根和幸, 中島瑞

## 【新聞掲載】

“人工筋肉もっと自然に” , 日本経済新聞, 2014/10/21

## 10. 謝辞

本プログラムは本学からの援助（事項名：メカノインフォマティクス・カデット教育、予算詳細コード：MM0Q7、予算詳細名：メカノインフォマティクス・カデット教育）で行われたことを記し、ここに厚く御礼申し上げます。

本教育プログラムは国際的視野とリーダーシップに富んだ志高い学生「世界に通じる研究者の卵」を育成することを目的としており、今年度もその活動を通して、本学の大学院教育に少なからず貢献できた。平成 27 年度以降も今年度までの活動を充実・拡大すべき積極的に活動を行っていく予定である。