

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 25 年度報告書

＝平成 26 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 センサフュージョンによる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

視覚像再構成を用いたBMI(Brain-Machine Interface)の開発

4.2 佐藤順亮 田中研 修士1年 冗長多リンクマッサージロボットの開発

4.3 Radian Furqon 田中研 修士1年 情報収集用飛行ロボットプラットフォームの開発

4.4 田中絵里 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

～振動子の振動シミュレーションおよび最適化～

4.5 篠崎瑞生 明研 修士1年

センサーフュージョンによるヒューマンアシストに関する研究

4.6 宮本一郎 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 遠藤隆宏 田中研 修士2年

複雑非線形システムのためのモデル自動生成と多目的制御器自動設計汎用ツールの開発

4.8 往古直之 青山研 修士2年 ワイヤ駆動式精密姿勢位置制御システムの開発

4.9 市野塚朝 青山研 修士2年 対向微流動を用いた微小物の非接触把持システム

4.10 Sungwan Boksuan 青山研 博士2年

Optimal Steering of handheld Micro Manipulators

4.11 Wenjing Zhao 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

5. ショートトレーニング

5.1 Global Leadership Training

「開発途上国のための適正技術 (Appropriate Technology)」

遠藤謙 (SONY コンピューターサイエンス研究所・アソシエイトリサーチャー)

5.2 機械加工トレーニングと安全管理教育・免許制度について

6 カデット講演会

6.1 「時間と周波数の同時解析を可能にするウェーブレット変換」

戸田浩（豊橋技術科学大学機械工学系）

6.2 「電力系統の安定運用のために

－空気のような電気を支える電力・エネルギー技術－

吉村健司（電力システム領域 領域リーダー上席研究員）

6.3 「リーダ追従型隊列誘導と私 -これまでとこれから-」

鈴木 学（函館工業高等専門学校 特命助教）

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 まとめ

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る。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。本報告書は「メカノインフォマティクス・カデット教育」において2013年度に実施したプログラムの取組み内容と成果などを報告するものである。

本教育プロジェクトでは、ものづくりを国際的視野で実践できるリーダーシップを持った若い研究者、技術者の育成である。本教育プログラムはインターデスプリナリな知識を集約し、容易に解決できない実践的な問題をブレークダウンして解ける問題として設定・解決する能力をもち、国際的視野とリーダーシップに富んだ志高い学生「創造的ものづくりカデット」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ものと自負している。

これも一重に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る。

2014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

2.1 概要

本書は、9月2、3、9、11日の13:00から16:10に行われた、「MATLAB エリート学問塾 夏の学校 in UEC」に関する報告書である。このMATLABセミナーは、「MATLAB ハンドブック」の著者である、法政大学の小林一行先生を講師にお招きして、東4号館615室で行われ、計20名程の学部・院生が本セミナーに参加した。講義内容は、前半2日間の「MATLAB プログラミングの基礎と制御工学」編では、MATLABの基本的な事項から、特有な演算子・表現、Simulinkとの連携について、後半2日間の「MATLAB によるロボットアームのシミュレーション」編では、MATLABの様々なグラフィックと、同時変換行列を用いたロボットアームのシミュレーションについてであった。図1から図4がその様子である。各回の詳細な内容については次項にて説明する。



図1 講義風景(9月2日)



図2 講義風景(9月3日)



図3 講義風景(9月9日)



図4 講義風景(9月11日)

2.2 制御編

(1)1日目 (9月2日)

1日目は、MATLABの基本的な使い方や特徴についての講義が行われた。具体的な講義内容は

以下の通りである。

- MATLAB の動作の注意点および特有の演算子
- C や Java との類似点、相違点
- ラプラス変換
- モータのモデル化

初めに先生から諸注意がなされた。MATLAB はスクリプトファイルを作って実行することができるが、ファイル名には制約があり、全角文字が使えないことはもちろんだが、特に注意する点として、変数名と同じ関数やファイル名を設定した場合、変数が優先される。このためにファイルを実行できないなどの不具合が生じることがあるなどの注意が最初になされた。以降、特有の演算子についての説明があった。MATLAB にはコロン演算子、配列演算子、バックスラッシュ演算子などいくつかある。特に 1 日目では、MATLAB でのプログラミングの際により汎用性のある、バックスラッシュ演算子について詳しい説明がなされた。バックスラッシュ演算子の特徴を概説すると、ある行列の逆行列(inverse)を計算するための演算子である。この演算子の最大の特徴は、正方でない行列の逆行列も擬似的に計算できてしまう点である。これは、最小二乗法の計算メソッドと同じ原理を用いることで実現している。よって単純に、最小二乗法を使って直線を求める際も、この演算子を用いることでスクリプトの行数を大幅に減らすことができる。

次に、C や Java といった他言語との比較を行った。講義中に取り上げられたのは、for 文、if 文などである。相違点はいくつかあるが簡単なもので言うと、C 系統の言語では for 文、if 文のかたまりを {}(中括弧)で囲う必要があるが、MATLAB では、かたまりの最後に end を使用する点である。また for 文、if 文の条件式が、行列に対応しているのも MATLAB の特徴であると言える。

また、MATLAB におけるラプラス変換の記述法についての解説も行われた。この時に、Symbolic Math toolbox という未知変数定義法について説明がなされ、これはラプラス変換の際に使用されるものである。

最後に、初めに習ったバックスラッシュによる解を求めるノウハウと、MATLAB におけるラプラス変換の記述法および状態方程式を組み合わせることで、MATLAB でのモータのモデル化が行われた。全体として人数が多いこともあり学生側からの質問に対して細かいサポートをいただいた関係で予定していたモータの応答の確認まではすることができなかったが、これが次の日までの宿題として出された。

(2)2 日目 (9 月 3 日)

2 日目は、一日目から引き続きモータのモデル化を行なった後に、Simulink の基本的な使い方についての講義が行われた。講義の具体的な内容は以下の通りである。

- モータのモデル化
- 最小 2 乗法によるモータの入出力から伝達関数の推定
- 電気・機械系のモデリングを想定し、Simulink に実装
- ブロック線図の描画
- モデルのサブシステム化
- モデルブロックのマスク化

- 1 のモデルに PID コントローラを追加
- シミュレーションの自動化

まず、モータのモデル化を行い MATLAB でモデルの応答をシミュレーションした。また、最小2乗法を用いてモータの入出力から、伝達関数のパラメータを求めた。

次に Simulink の基本的な使い方について説明を受け、想定したモデルにおいて成立する微分方程式を、Simulink のブロック線図で表した。ここで各ブロックの持つ意味やパラメータの確認などを行った。そして、実際にシミュレーションを行い、スコープで時間応答やその他出力結果を確認した。

次に、モデルのサブシステム化の方法について説明がなされた。

そして、モデルブロックのマスクの作成方法について、式を与えて plot 関数で描画する方法と、figure 上にマウスを使って描画する方法の2通りについて確認が行われた。

次に、最初に作成したモデルを PID コントローラで制御することを想定し、モデルに PID 制御用のブロックを追加した。

次に、作成したモデルを MATLAB から呼び出して、シミュレーションの自動化をするための、プログラムの説明がなされた。ここでは、MATLAB から Simulink のモデルを呼び出す方法の解説が行われ、PID の各ゲインを変化させていった時に、オーバーシュート量がどのように変化するかの推移を、自動で描画するプログラムを作成が最終目標であった。

最後に実機を使い実際のパラメータを推定するデモで2日目の講義を締めた。

以上のように2日目では、ブロック線図の作成から出力結果の確認、そしてより利便性を図るための方法など、Simulink の基本的な使い方・仕様を把握することができた。

2.3 ロボット編

(3)3 日目 (9月9日)

第3回の講義では第1回、第2回の講義の復習とその応用が初めに行われた。標準で行列を扱う MATLAB 特有な演算子を用いた効果的なプログラミングについて説明が行われた。講義で説明されたものは以下のものである。

- コロン演算子
- 配列演算子
- plot 関数 関数の多重定義
- MATLAB でのアニメーションと GUI

コロン演算子に関しては、演習問題を通して具体的な挙動を確かめることにより理解を深めた。またこの際、MATLAB における行列の表現について注意が促された。これは、行列の内部記憶順序が Fortran と同様になっており、直感的な順序と食い違うためである。配列演算子は、スカラーの場合は式通りに、データが行列の場合も式通りに計算が行われる演算子で、C などの言語には見られない演算子である。また、通常の行列演算ではなく各要素ごとに演算を行う方法や、それらを用いた効果的なプログラミング方法の説明がなされた。plot 関数は多くの多重定義がなされている関数であり、それらの活用についての説明が行われた。また、入力としてスカラーを用いた場合や行列を用いた場合の挙動について、実際に演習を行いながら理解を深めた。plot 関数を補助するための関数軍についても実際に用いながら説明が行われた。アニメーションについて

は、for 文を用いた方法の説明が行われた。この際、for 文や plot 文の処理が遅いことが取り上げられ、同時にハンドラを用いた処理の高速化の説明が行われた。実際に両方のプログラムを用いて経過時間の計測を行い、ハンドラを用いることの有用性を示した。また、HandleGraphics を用いた簡単な GUI についても説明が行われ、スライダやラジオボタンなどの設定方法についての説明が行われた。

(4)4 日目 (9 月 11 日)

4 日目は、以下に示すような前後半の 2 部構成であった。

- 3 日目の復習および MATLAB による 3 次元同時変換行列の作成、演習
- MATLAB によるロボットアームシミュレーション及び演習

1 点目、前半の内容としては、主に MATLAB の handle graphics についてのものであった。具体的には、get および set 関数の使った効率的なアニメーション作成、また簡単な GUI の作成方法について復習が行われた。その後回転行列、3 次元同時変換行列についての説明があり、直方体を回転させる演習を行った。また任意回転軸周りの回転についても少し触れられた。

2 点目、MATLAB によるロボットアームシミュレーションに関して説明を受けたのは以下 3 つの点である。

- 回転行列および同次変換行列を用いたロボットアームの絶対座標表現
- 同次変換行列による 2 次元 2 軸シリアルリンクのシミュレーション
- 同次変換行列を使った 3 次元ロボットアームシミュレーション

ロボットアームシミュレーションにおいて、ローカル座標、グローバル座標系への変換に回転行列、同次変換行列を使用しラグランジュ方程式を用いることで運動方程式を導くことが出来る。本講義では、同次変換行列およびラグランジュ方程式の MATLAB におけるソースコードの書き方の説明が行われた。

また後半の、MATLAB によるロボットアーム演習では、前半の補足および演習を行った。ここでは、3 日目および 4 日目の時点で、まだよく理解していなかったことについて随時説明を受け、また先生が作ったソースコードを編集することで、多リンクのモデルを様々な形で構築する演習を行った。

●総括●

全体を通して非常に丁寧に教えてくださったので、ほとんど MATLAB を触れたことのない人にも理解できたかと思う。講義の内容はすぐに活用できるようなものが多く、また効果的なプログラミングという点に重点を置いた説明がなされていた。講義形式としては演習を行うことによって理解を深める形式をとっていたためよく身についた。MATLAB を通じて実際にモータを制御するデモを行うことで実用性を実感することが出来た。

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

本課題では本プログラムに参加する大学院生を中心に、淡江大学のグループとインターネットを介して遠隔制御するロボメカシステムを共同開発し、実際に双方向でそれらのメカトロシステムを遠隔制御させ、問題点の抽出と解決および自己評価と改善を検討させ、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している。図1に示すように、昨年度(2013年)では現地と本学の間で構築していたシステムを用いて競技を実施した。本年度ではキネクトを介して、遠隔操作を使った競技を実施することが目的である。



図1 昨年度、両大学が行った競技の様子

2. 本年度の取り組み概要

本年度も2つの大学間でインターネット回線を利用し、キネクトを介して遠隔制御システムを共同開発し、その性能を評価する。(図2に本取り組みの概念図を示す)

本競技ではキネクト操作によるロボットでの球入れ競技となっている。また、本競技は双方向の参加を重視しているため、装置の製作、配置から競技のルールなどまで、お互いに検討しながら進めた。(図3に競技装置の配置を示す)

それに、キネクトを使用することに関して、相応なプログラムの作成や機能の調整にいろいろな技術面の対応が非常に重要である。この問題について、ソフトウェアに精通している電通大院生の指導を中心となっている。一方、学生だけでなく、教員との密接に打ち合わせることも行い、参加する学生と教員がお互いに高い信頼に基づき、良いコミュニケーションすることも出来た。

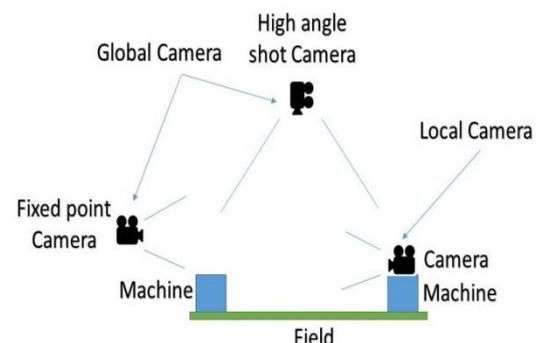
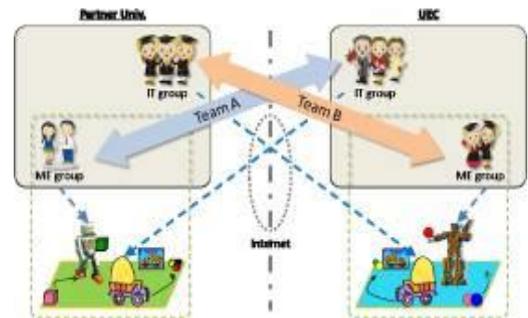


図3 競技装置の配置

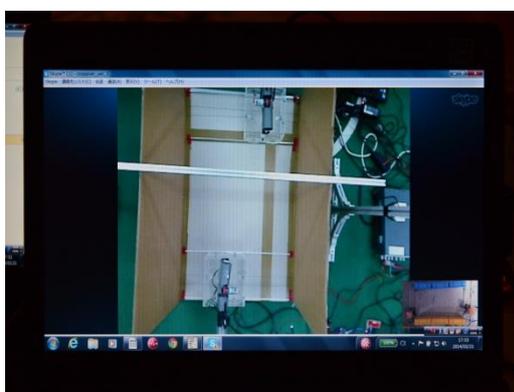
3. 本年度の取り組み成果

本年度は、3名の学生を台湾の淡江大学（TKU）に派遣し、現地指導を行った。図4に示すように、マシンの配置や競技規則の詳細を詰める議論を行った。この際に、遠隔操作におけるキネクトの動作検出遅延や指令操作の難易度などの問題点について議論し、改善対策の検討を行った。

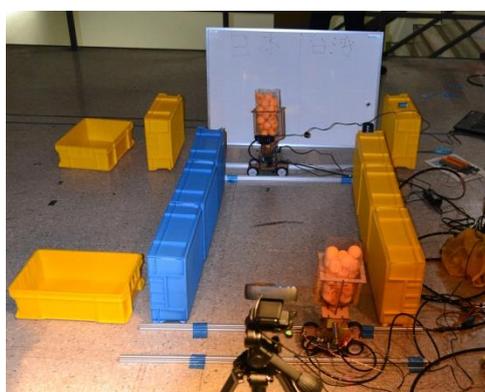


図4 淡江大学側との面談会議

本年度、市販されているキネクトを用いて、競技を行った。VPNを利用した仮想プライベートネットワークにより、キネクトを介してインターネットで遠隔制御できる競技マシーンをローカル側、グローバル側それぞれ2台を製作した。図5に示すように競技マシーンを示す。



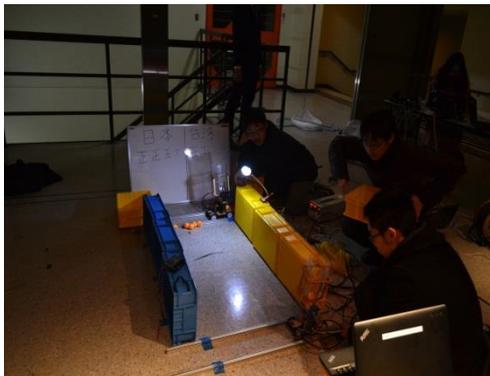
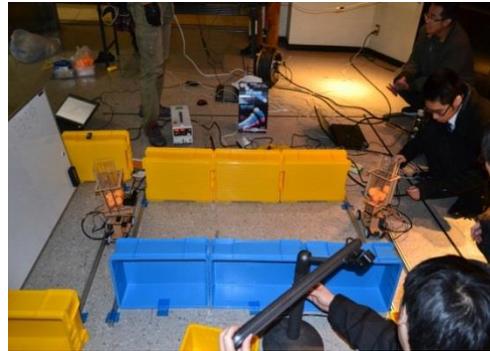
グローバル側の競技マシーン



ローカル側の競技マシーン

図5 競技マシーンの設定

図6には本番競技の様子をします。本番の競技ではそれぞれの大学側のグループがチームを構成し、インターネット遠隔制御によりマシーンをコントロールし、協調動作をさせることに成功した。その際に、各位置に設定したカメラとキネクトの画像検出において、インターネット環境上に遅延時間が多少あったが、指令を正しく制御コマンドにより達成した。今後も予測不能な状況においてもお互いに対応できことが課題となっている。



4. まとめ

本年度はキネクトを用いて、インターネット介して双方向のマシーンを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し、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。今後は環境問題、少子化問題などを取り込み、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。

3.2 センサフュージョンによる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) 移動マニピュレータと各種センサ（ステレオカメラ、レーザレンジセンサ、RFID など）からなる移動マニピュレータシステムを構築して、ホームサービスなどにおける作業を実現するために、センサフュージョンと移動マニピュレーションの制御を融合した方法とアルゴリズムの提案と実装を行う。

2) ヒューマノイドロボットを用いた授業を行い、センサの基本特性とセンサフュージョンを用いた簡単なフィードバック制御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) 移動マニピュレータシステム

ホームサービスへの移動マニピュレータの応用を研究目的とし、そのためのセンサフュージョンによる効率のよい環境認識と環境認識の結果を活用した効率のよい移動マニピュレーションを実現する。

本システムは、図 1 のように、移動マニピュレータ、スキャン式レーザレンジセンサ（以降レーザスキャナ）、カメラ、遠距離用の RFID と、3次元カメラおよび触覚センサを備えたアシストアームからなる。

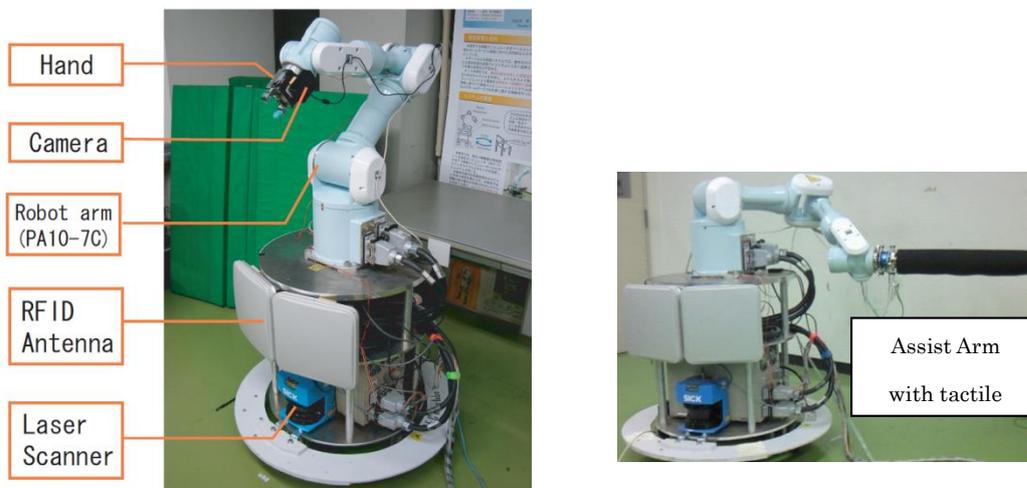


図1 システムの構成

ホームサービスにおいて、人間を含み、椅子、食器などの場所固定でないものと壁などの固定しているものからなる環境を認識する必要がある。移動マニピュレータの移動及びマニピュレーションにこれらの情報を把握する必要があるし、また人間との密なインターアクションもサービス作業をスムーズに行うには不可欠である。これについてのアプローチとして、従来のステレオカメラやレーザスキャナによる認識方法に、人間、ロボット、そして家具などのすべてに RFID を導入して、各 RFID に付帯するデータベースも活用して、これらの認識を素早く、効率よく行う。

RFID と 3 次元カメラなどのセンサによる認識実験、アシストアームに実装した触覚センサによる制御実験を行った。

2) ヒューマノイドシステム

図 2 に示された自作のヒューマノイドロボットに 3 軸加速度センサと 2 軸ジャイロセンサを搭載した。

スペック

- 身長 320mm
- 体重 2.5kg
- 自由度 15
(足12 腕2 体1)
- 使用サーボ
 - ・RX-28 (Robotis社)
トルク38kgf・cm
- センサ
 - ・ジャイロセンサ
(ロール・ピッチ)
 - ・加速度センサ (XYZ)

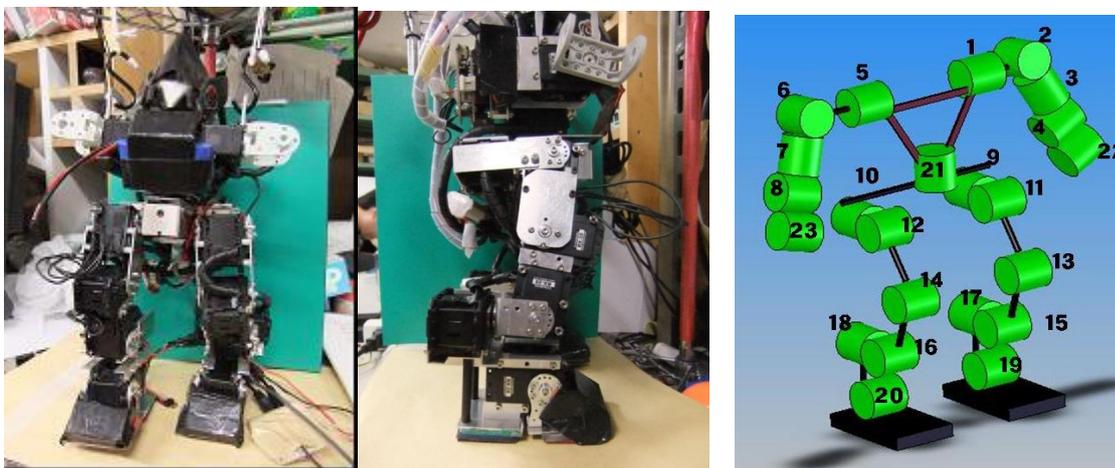


図 2 実験用ヒューマノイド

作成したロボットとソフトウェアを用いて、小型ヒューマノイドロボットに関する講義および簡単な実験を行った。まずロボットを実際手に取りながら要素やソフトウェア、制御方法、センサの利用法などを説明した。センサ説明時には加速度センサ、ジャイロセンサの値、角速度積分値（角度）とロボットの動きの関係を実際に動かしながら説明した。

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95名の学生が4グループに分けられて、各実験に参加した。

3.2.5 まとめ

移動マニピュレータと各種センサ（カメラ、レーザレンジセンサ、RFID、触覚センサなど）からなる移動マニピュレータシステムにより、ホームサービスなどにおけるアプリケーションに関する実験を行った。また、小型ヒューマノイドを用いて加速度センサやジャイロセンサによるフィードバック制御実験を行った。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と学習効果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

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、昨年度は、この PVDF フィルムによる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を試みた。今年度は、昨年度の研究を発展させ、内視鏡による鼻腔内手術を安全に行える簡便なシステムを構築することを試みた。

3.3.2 背景

副鼻腔炎(ちくのう)という鼻の病気を治療する手段として、内視鏡下副鼻腔炎手術が一般的になっている。内視鏡下副鼻腔炎手術とは、鼻用内視鏡で鼻内から手術を行い、副鼻腔の粘膜をすこしずつ鉗除し、各副鼻腔と鼻腔の間に十分な交通をつける術式である。副鼻腔炎の原因となる部分のみを切除するので、侵襲が少なく、出血も少量で、術後の腫脹も軽度で治療成績も良好である。内視鏡下副鼻腔炎手術では主にマイクロデブリッター(以下、MD)と呼ばれる器具を用いる。MDとは、Fig. 1 に示すような、高速回転する刃で組織を切除し吸引する吸引機付きのメスのことである。MD の刃先は先端から約 10 mm に渡って半分が開放されていて、その中を刃が 5 回回転し、5 回逆回転するという動作することによって切除・吸引を行う。そのため、回転方向が変化する際に振動しない瞬間がある。

(a)



(b)



Fig. 1 Photo of a microdebrider

(a) Drill part, (b) Control panel

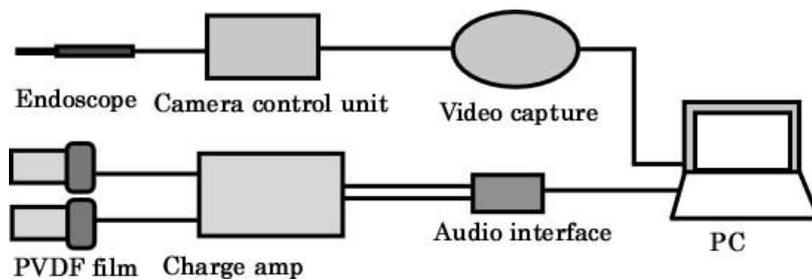


Fig. 2 Measurement system

MD を用いた内視鏡手術は効率的である一方、MD が眼窩内に入り、眼球や視神経を傷つけてしまうが報告されている。このような副損傷を防ぐためには、眼球を前方から手で押し、内視鏡を用いて鼻からその動きを観察することで眼窩に近いことをするが、患者の眼球への負担が大きく、医師の経路に左右され、また、常に監視することは困難でそこで、微小な振動を計測することができる PVDF を脛に取り付けて、手術中に手術器具が眼窩に近づいたことを計測するデバイスの検討を行った。

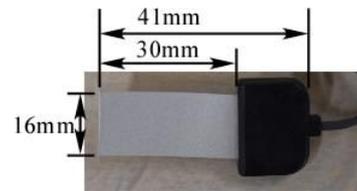


Fig. 3 Photo of a PVDF film

先端事例通常内側確認やある。

3.3.3 実験方法

本実験の解析に用いた振動データは全て、手術時に患者の脛に PVDF フィルムを装着し、Fig.2 に示すような計測システム用いて計測した。PVDF とは、ひずみが生じると分極が起こる強誘電性のポリマーである。PVDF から作られた PVDF フィルム (Fig.3)は歪みを加えると電荷を生じる特性がある。PVDF フィルム(SDT1-028K; 東京センサ)に加わる振動によって生じた電荷信号は、チャージアンプ(MODEL-4035; 昭和測器)によって電荷から電圧に変換され、オーディオインターフェースとよばれる AD コンバータ (Fire face 400; Synthax Japan) で AD 変換され、パソコンに取り込まれる。PVDF は脛に乗せた上から丸めたガーゼをかぶせ、テープで止めるという形で患者に装着した。また、内視鏡の映像はビデオキャプチャー(GB-USB; I-O DATA DEVICE)を介してパソコンに取り込んだ。振動データ集録用に Adobe Audition (Ver. 3.0; Adobe Systems)を、映像集録ソフトに Power Producer(Ver. 5.0; Cyber Link)を用いた。

集録したデータを Adobe Audition によって映像・振動を同時に見ながら手術時の操作箇所と波形確認や短時間 FFT 解析を行った。

3.3.4 結果・考察

3.3.4.1 短時間 FFT 解析

手術中に MD を使用している時間帯を短時間 FFT 解析(Short-time Fourier transform, STFT)した結果を Fig. 4 に示す。MD の動作の特徴である特殊な回転が短時間 FFT 解析結果に縦縞のような模様で現れている。また、FFT 解析を行った結果、80 Hz あたりに周波数ピークがあることも確認できた。これは MD の回転数の設定値が 5000 rpm (約 82 Hz)であったことが原因であ

ると考えられる。

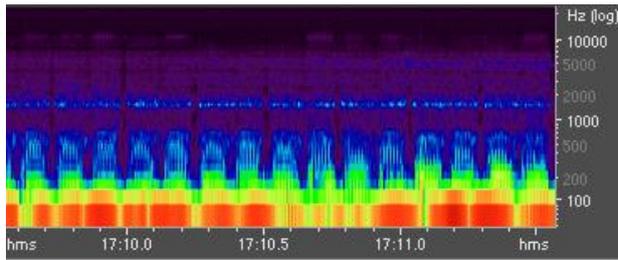
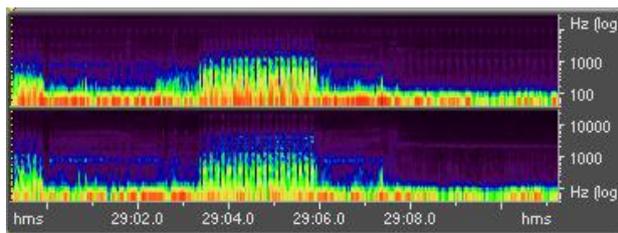


Fig. 4 Frequency spectra of the vibration measured at the eyelid

(a)



(b)

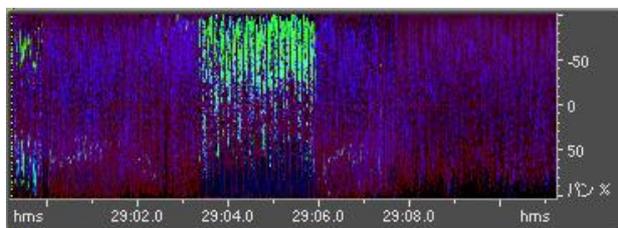


Fig. 5 Analysis result when right sinus ethmoidales are operated

(a)Result of STFT analysis (b) Panpot spectrum display

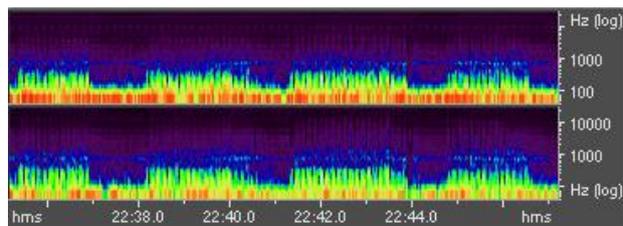
3.3.4.2 パンスペクトル解析

振動データから手術操作している箇所を検出するために、Adobe Audition のパンスペクトル表示機能を用いてパンスペクトル解析を行った。パンスペクトル表示機能とは、ステレオオーディオの左右の音の成分の差からパンポット(音像定位)を求め、表示する機能である。

左篩骨洞で操作している時間帯の短時間 FFT 解析結果とパンスペクトル解析結果を Fig. 5 に示す。結果より、短時間 FFT 解析ではどちらの副鼻腔で操作を行っているかがわかりにくいですが、パンスペクトル解析では左方向にパンも偏っていることがわかる。また、左篩骨洞で鼻中隔側に操作している時間帯の FFT 解析結果とパンスペクトル解析結果を Fig. 6 に示す。短時間 FFT 解析では低周波数において左側が強いように見えるが、パンスペクトルでは左右対称になっていることがわかる。これは、低周波数では左に偏っているが、高周波数では右に偏り、それらを足し合わせた結果、偏りがなくなったものと考えられる。これより、パンスペクトル表示は短時間 FFT 解析ではわかりづらい高周波数での偏りも示せていることがわかった。以上より、パンスペクトル解

析を行うことによってデータから振動の左右の定位が判別できた。

(a)



(b)

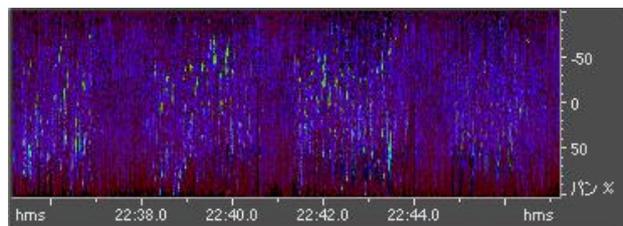


Fig. 6 Analysis result when nasal septum is operated

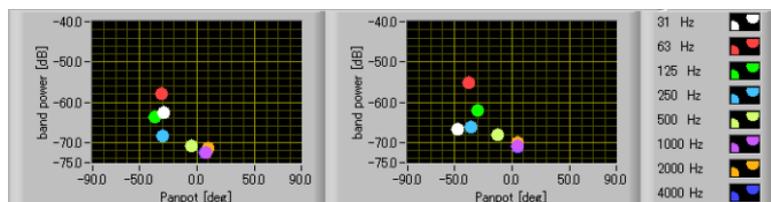
(a)Result of STFT analysis (b) Panpot spectrum display

3.3.4.3 振動定位・強度・周波数の同時解析

前項より、周波数スペクトルを解析することによって手術器具の判別ができた。また、パンスペクトルを解析することによって振動データから手術中に左右どちらの副鼻腔を操作しているかが判別できた。しかし、Adobe Audition では周波数とパンスペクトルを両方同時に解析することができない。よって、パンスペクトル解析の原理を用い、左右の振動の定位と強度を示し、周波数別にも解析可能なプログラムを LabVIEW(Ver.8.6; National Instruments)によって作成した。

作成したプログラムは、左右の振動データの強度差より振動の左右の定位を求め、横軸に、左右の強度の平均を求め縦軸にし、リアルタイムで表示するものである。Adobe Audition のパンスペクトル表示と違い時間軸がないので、解析対象の操作をしている時間帯の解析を複数回行い、解析結果とした。

左篩骨洞・右篩骨洞で眼球方向に操作を行っているときの解析結果を Fig. 7、Fig. 8 に示す。左篩骨洞操作時に 63 Hz 周辺のバンドを中心にパンが左に偏り、強度も強くなっているのがわかる。MD の回転数による振動が 80 Hz なのでこれはほぼ期待通りの結果が得られている。また、右篩骨洞操作時の結果は、同じく 63 Hz あたりのバンドが右に偏るような結果が出ているが、左篩骨洞に比べて再現性が低い結果となった。これは、左篩骨洞よりも眼球から遠い部分を操作していたことや、計測時に左のチャンネルのゲインが少し強かったことが原因だと考えられる。



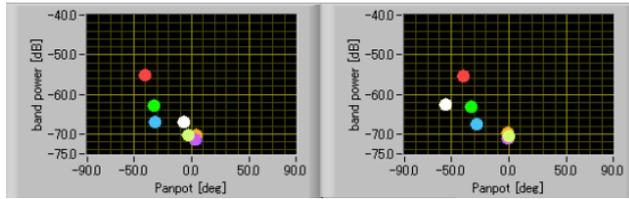


Fig. 7 Analysis result by LabVIEW program when left sinus ethmoidales are operated

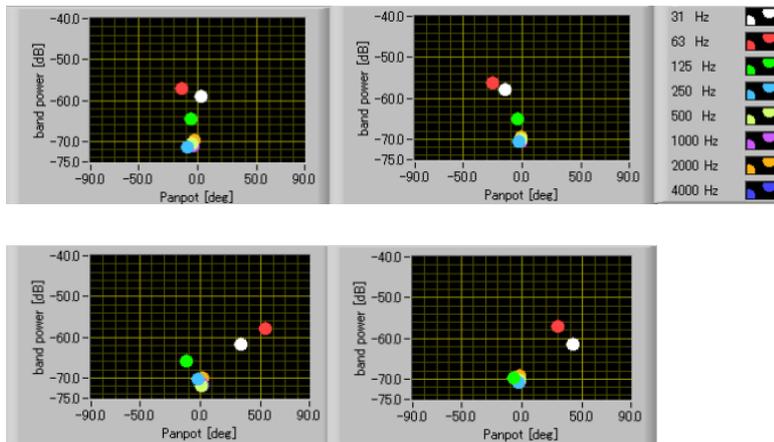


Fig. 8 Analysis result by LabVIEW program when right sinus ethmoidales are operated

これより、作成したプログラムは計測時に左右のデータのゲインを微調整しなければならないが、ある程度は二つの振動源のパンと強度を表示されていることがわかった。今後の改良点としては、左右の微妙なゲインの差を補正すること、時間軸の情報を保持させること、医師と相談し、明確な危険度の指標を作成することなどが挙げられる。

3.3.5 結言

Adobe Audition で周波数スペクトルを解析した結果、振動データから手術器具の判別が可能であった。また、パンスペクトルを解析した結果、操作箇所が判別できた。その原理を用いた自作のプログラムは左右どちらの副鼻腔を操作しているかある程度判別でき、周波数ごとの解析も可能であるが、左右のゲインの微調整をしなければならないことや、時間軸の成分の情報が失われてしまうこと、明確な危険度の指標がないことなどの問題が挙げられる。

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 35 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、ヒトを対象とした実験を通して、生体対象実験特有の注意

点などを理解させることが出来た。来年度も引き続き、座学だけではなく、実際の実験を多く講義に取り入れ、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

はじめに

本書は、3月15日（土）から3月23日（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。

1. ボストンおよび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、独立十三州のうちの一つであるマサチューセッツ州の州都である。独立に至る中でボストンは大きな事件、役割を持つ。たとえば、米英戦争を戦い、現在も航行可能な最古の船であるコンスティテューション号はボストンの造船所で建造された船である。今回のボストンの市内見学においてこの船を訪れることが出来、アメリカ海軍による解説を聞くことが出来た。当時の水平の暮らしや砲の種別等もさることながら、この船の異名である「オールド・アイアンサイド」の由来となった英海軍の叫びを英語で聞くことが出来たのはボストンを訪れたからであろう。また、途中途中のジョークには同じく独立にかかわった茶会事件の話もあった。コンスティテューション号はアメリカ独立戦争の際の重要物をまわることができるフリーダムトレイルの終端にもなっている。それ以外にも、世界各地の多くの美術品が収められたボストン博物館や過去の研究成果が収められた MIT Museum がある。特に後者は理系の学生として先人たちの苦労や現代につながる技術の一端を見ることが出来、非常に興味深いものであった。

海自体ともかかわりが深いボストンは海鮮が有名でもある。特にロブスターとクラムチャウダーは有名であり、土産店ではロブスターのぬいぐるみなどが売られている様子が目に付いた。実際これらは日本のものよりも濃厚で美味しい。オイスター（牡蠣）もとても美味しく、レモンの酸っぱさとともに広がるまるやかさは日本のものに比べ後味がすっきりしていた。

また、ボストンは学生の街としても知られている。ボストンには二つの著名な大学、ハーバード大学、マサチューセッツ工科大学がある。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。



図 2.1 USS コンステイテューション



図 2.2 クインシーマーケット



図 2.3 ハーバード大学正門

2. 出発前後の準備について

出発前の段階で、ボストン大学での研究発表のための資料の作成、ESTA の申請、パスポートの取得等を行った。この際、以下のような海外用の WiFi ルータを空港で借り、ボストン渡航後

の連絡手段を確保した。ホテルに移動して以降、無料で WiFi が使えることはあったが、研究室とリモートで接続して画像を転送するなどにはできなかったため、ホテルで発表の準備をする際に役に立った。また、移動の際にも所在地等の検索、場所の持つ歴史等をその場で検索できるため、必須のものであった。



図 3.1 海外用 WiFi ルータ

3. ボストン大学での交流内容

3.1 発表および授業参加

3.1.1 Powered paraglider research project

研究概要

近年、自立型無人飛行機(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)の研究が軍事、民事問わずに広く行われている。UAV は人の立ち入ることのできない危険地帯での情報収集手段や災害地への偵察、物資の輸送などの用途について実用化されている。その機体形態の多くは回転翼機・固定翼機であるが操作の難しさ、また動力を失ったときの危険性が問題となっている。そこで本研究では異なる機体形態として以下の PPG を使用している。

パラグライダーに動力を付加した動力付きパラグライダー (PoweredParaglider,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上、万が一のトラブルで動力を失った場合であって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。

本研究では PPG で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モデリングが制御系設計、各種飛行経路生成機能についての開発と検証を行う。

発表内容

・ PPG の概要

PPG が他の UAV プラットフォームと比べてのメリットとデメリットについて発表した。また、PPG の操舵方法や搭載されているアクチュエータについての詳細を示した。

- ・モデリング/コントローラ設計

本研究室で導出した PPG の 3 次元 6 自由度モデルについて高度方向と方位方向の 3 自由度ずつの別のモデルを導出し、T-S ファジィモデル化した後にそれぞれのモデルからラダーとスロットルについての制御入力を出力するコントローラ的设计を行った点について示した。

- ・自動飛行/自動着陸実験

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 を自動飛行させた場合の結果について示した。

また, 高度を徐々に下げるように Waypoint を設定することで自動着陸が可能であることを示した。

- ・新しいハードウェアの開発

PPG で使用しているハードウェア上の制約を取り払うべくマイコンの交換を含めたシステム全体の性能向上について示した。

- ・最適レギュレータ/風外乱オブザーバ的设计

高度方向の 2 つのコントローラが存在することから 2 つのモデルの干渉を考慮していないことになるため, モデルの線形化を行い高度と方向の同時制御モデルを構築した事を示した。また, 風に弱いという PPG の弱点を補うべく風外乱オブザーバを設計したことについても示した。

発表風景と質疑応答

Wang 先生との質疑応答は発表をしながら逐一行われた。その内容は基本的な PPG の性質やメカニズムが分かりにくいということなどであった。また全体的に量が多く時間も長くなってしまい, 英語もなかなか出てこないような状況であった。

そこで今回次の Wang 先生の授業中発表に向けて学生が分かるように, 内容を単純化すると共に図を多用して PPG というプラットフォームのメカニズムについて知ってもらう, そして興味を持ってもらうように修正を行うようにとのアドバイスを受けた。



図 4.1 Powered paraglider research project の発表風景

3.1.2 Motion of Snake Robot on 3D environment

研究概要

生物のヘビを模倣したヘビ型ロボットは、生物のヘビ同様の細長い体形を持ちさまざまな動作が可能である。このことから、ヘビ型ロボットには狭所や災害現場などでの活躍が期待されている。ヘビ型ロボットは、関節が多く複雑なため制御が非常に難しくなっている。そのため、数多くの動作、制御に関する研究行われてきた。生物のヘビは推進方向にすべりやすく、横方向に滑りにくい体幹を有しており、この摩擦の異方性を受動車輪により実現したロボットが数多く研究開発されている。また、速度拘束を与える受動車輪を取り外すことによって、ロボット先端の目標軌道に対して一意に動作が決定しなくなる運動学冗長性が生まれる。この運動学的冗長性を用いることにより先頭の軌道追従に加えて特異姿勢回避などの動作を行わせることができる。ヘビ型ロボットは2次元平面上を想定した研究が多くなされているが、近年3次元環境を想定した研究も盛んに行われている。段差環境や2平面間、円柱などの不連続な3次元環境や3次元曲面における動作、制御に関する研究が行われている。これらの中でも3次元曲面での研究は、実機を用いた検証が行われている研究もあるが、事前計画した動作を行わせているのみで、先頭の位置・姿勢の安定化を理論的に保証した内容ではない。

これらの背景を受けて、研究室では3次元環境での理論的な保証のある先頭追従を目的とする。モデル化の際に仮定を設定し簡易化することで、3次元モデルではなく2つの2次元モデルを用いて制御を行う。このことにより従来の2次元環境上での理論的保証のある制御を使用することが出来る。

このモデル化の工夫を用いて、不連続な3次元環境である段差や壁間、滑らかな曲面環境である円柱上での保証のある先頭追従制御を、シミュレーション及び実機実験を通して検証を行う。

発表内容

研究室で行ってきた「3次元環境下でのヘビ型ロボットの動作」について以下の内容を発表した。

- ・ 段差環境での接地センサを用いた自動昇降制御

不連続な3次元環境である段差において、接地センサを用いた自動昇降制御の提案と検証について説明した。設置センサを用いることでカメラなどからロボットの絶対位置・姿勢を取得せずに、段差と衝突せずに自動昇降を行うことを実験で示した。

- ・ 壁間環境での滑落回避を考慮した推進制御

壁間環境において、滑落回避を考慮した先頭の軌道追従制御の提案と検証について説明した。壁面に車輪を押し付けることにより滑落回避を行う際、運動学的冗長性を用いて姿勢を工夫することでより滑落しづらい姿勢を取らせる制御を行う。

- ・ 曲面適応機構の開発と検証

円柱などの滑らかな曲面に対して適応する車輪ユニットの開発と検証について説明した。車輪どうしを連動させるスライダリンク機構と体幹部分と車輪部分とのコンプライアンスを用いることにより、曲面に対しても適切な接触を保つ機構の開発を行い、この機構を用いたヘビ型ロボットを円柱上で動作させることで機構の有効性の検証を行った。

発表風景と質疑応答

発表は Wang 先生，田中(基)先生と UEC の二名の学生の前で行った．総評としては発表内容が多く時間が長くなってしまったため，もう少し内容をまとめるべきだった．質疑としては使用したセンサの種類や，ロボットの推進速度等，先頭の軌道について聞かれた．



図 4.2 Motion of Snake Robot on 3D environment の発表風景

3.1.3 Fuzzy Control Research in Tanaka Lab.

研究概要

田中研究室のテーマのうちの一つ，ファジィ制御に関する研究である．世の中に存在する，機械，流体，流体等は非線形現象であることが多い．こうした非線形要素を取り扱う方法として様々な非線形制御手法が提案されている．しかし，高度な数学的知識が必要なため，利用するのは難しい．これに対し，ファジィモデルを用いた制御では非線形システムから T-S ファジィモデルという線形なモデルを作成し，それに対して安定条件や安定化条件，ロバスト設計条件などを適用する．これらの条件は線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality, LMI) で表され，MATLAB の LMI Tool box 等で解を求めることが出来る．このため，自然かつ効果的に制御系の設計や安定解析を行うことが出来る．現在では，非線形システムから多項式ではない要素を分離し，多項式モデルを作成する多項式ファジィモデルに関する研究が行われている．これらの条件は二乗和の形式 (Sum of Squares, SOS) で表され，LMI と同様に MATLAB 上の SOS の解を求めることが出来るツールで解くことが出来る．現在，田中研究室では多項式ファジィモデルに関して 3 人の学生がそれぞれのテーマを持って研究を行っている．

発表内容

「田中研究室で行われているファジィ制御の研究」について，3 人の研究の概要の発表を行った．

・「Robust Controller Design for Polynomial Fuzzy systems」

修士 2 年の遠藤の研究内容である．多項式ファジィモデルにおける双線形 SOS を用いたロバスト制御器の設計条件について示した．また，条件の持つ特徴として，双線形となる理由，Copositive Relaxation，決定変数の追加についての説明を行った．従来の双線形 SOS を用いた安定化条件との比較を行い，新しい条件の優位性を示した．

・「On higher order derivatives of Lyapunov functions of fuzzy systems」

学部 4 年の小倉の研究内容である．Ahmadi によるリアプノフ関数の拡張系である高次微分要素を用いたリアプノフ関数には，現在の使用できるツールを用いた際システムが多項式に限定され

るという問題がある。これを田中研究室で用いられている多項式ファジィモデルの考え方により解決し、多項式以外の項を含む非線形システムの SOS 安定条件を導出したことを示した。また、これにより導出した条件が従来手法よりも緩いことを示した。

・「Stabilization Analysis of Single-Input Polynomial Fuzzy Systems using Control Lyapunov function」

修士1年の Furqon の研究内容である。Control Lyapunov Function というリアプノフ関数を求めることがそのまま、制御器設計につながるという考え方をファジィモデルに適用したものである。これを解くために必要なイタレーションの考え方を含め、条件を示し、例題において制御が行えていることを説明した。

発表風景と質疑応答

発表は Wang 先生と田中基康先生、UEC の学生二名の前で行った。Ahamadi のリアプノフ関数の説明についてリアプノフ関数全体の式がどうなっているかなど、説明がわかりにくかったため、質問を頂き、ホワイトボードで示した。全体のリアプノフ関数の例示を怠ったことは反省しなければならない。



図 4.3 Fuzzy Control Research in Tanaka Lab の発表風景

3.1.4 Nonlinear Systems (講義) および On higher order derivatives of Lyapunov functions of fuzzy systems (発表)

授業内容

授業は KHALIL による NONLINEAR SYSTEMS に沿って行われており、対象はボストン大学大学院の PhD を含む院生、春休み明け最初の授業のようであった。内容は田中研究室の制御分野とも関連があるシステムの安定性の判別についてであり、ヤコビ行列を用いた平衡点近傍での線形化を用いた安定性の判別、フルビッツ行列を用いた判別、二次形式のリアプノフ関数の P 行列の固有値を用いた判別等の説明が行われ、その後、例題による確認があった。

授業中には、質問が頻繁に行われ、ヤコビ行列のとり方や固有値の求め方の確認をする学生が見

られた。質問する姿勢とそれを受け入れる授業者という日本とは違った授業の風景を見ることが出来た。

発表内容

4.1.3における発表内容の小倉の部分を抜き出した資料を基に発表を行った。しかし、前回と同様に Ahmadi のリアプノフ関数の部分に関してはわかりにくかったようでホワイトボードで説明する必要が生じた。また、事前に Nonlinear Systems の授業内での発表と聞いていたため、リアプノフ関数そのものについての説明や条件を緩くすること、ソルバについての説明等を省いてしまっていた。その点で、聴者との間に齟齬が生まれ、英語自体が拙いこともあって伝わらなかった点が多かった。Wang 先生に全体の概要を再説明していただき、納得していただいて発表は終了となった。



図 4.4 講義内発表（小倉）

3.1.5 Aerodynamics (講義)および PPG (発表) 授業内容

授業は Aerodynamics という題目でボストン大学の学部生向けに行われていた。題目は航空力学になっているが電気通信大学の学部の授業における「基礎制御工学および演習」に極めて近い内容であり、春休み明け初回の授業である今回は、伝達関数について扱っていた。インパルス応答、ステップ入力や極、零点についての話は聞いていて懐かしいものであり、制御の基礎分野の教え方はアメリカも日本も（限定的に言えばボストン大学も電気通信大学も）変わらないということを実感した。

発表内容

4.1.1 項で指摘された点について修正を行い、より要点同士を接続する語に注目することで英語であれある程度スムーズにしゃべることができた。これにより PPG の細かい内容というよりも概要とプラットフォームについての理解をボストン大学の学生に理解してもらえたように思う。

また、発表語の質疑応答では HILS をなぜ用いるのか、上昇気流の強い場所での安定性に問題は無いのかなどの質問を学生から得ることが出来た。

その後 Wang 先生と T-S ファジィモデルや PPG の安定性の重要性、HILS の必要性をメインにデ

ディスカッションを行うことができた。



図 4.5 講義内発表 (伊藤)

3.2 セミナー参加

著名な二人の先生のセミナーに参加した。両名とも IEEE の Fellow である。

Distinguished Scholar Award & Lecture (Christos Cassandras)

イベントを主として切り替わるシステム等についての講演だった。内容については難解でその場で理解することが出来なかったが、具体的にどのような場において応用されるのかについては工場の例を示しながらとても分かりやすく説明されていたのが記憶に残っている。

Control of Switched Systems with Limited Information(Daniel Liberzon)

ある条件下でシステムを表す式が切り替わる系を Switched system という。そのような形式の離散系システムにおいて、ある特定の時刻 t においてのみ、どの式でシステムが表現され、どの状態であるのかを得られるとした場合の安定条件を示すものであった。システムの切り替えが起こるという点においてはファジィモデルと似た部分もあり、扱っている安定条件のほとんどの部分については見たことがある形に近いものであったため、セミナーそのものを聞くことはできた。しかし、制限された情報における詳しい安定化条件の話は前提となる部分が十分に理解できていないため、理解が追い付かなかった。参加するセミナーの内容を事前に確認し、予習をするべきであったと反省するばかりである。



図 4.6 セミナーの告知ポスター

3.3 研究室およびミーティング見学

研究室のミーティングでは、群制御の内容の発表が行われていた。これは、見学先の研究室で用いられているクアドロータの制御に応用するためのものである。見学した発表では、離散的な座標について目標をいくつか与え、これに対しクアドロータを想定した複数の点が移動することを考えるものであった。研究では、目標点への到達が干渉なくできるかどうかを解析し、保証していた。将来的な PPG の運用に応用できる点が多々あったと思う。

研究室見学では、実機のクアドロータを運用している様子を目撃させていただいた。外部からのセンサ情報をもとに制御を行っていた。また、田中研究室で次の研究テーマで使いそうな固定翼と同じものを使用していた。同じような研究が、世界各地で行われるということが身近に起きていることを実感するとともに、世界の強豪に勝つための研究を行わなければならないと認識をした。



図 4.7 研究室で扱われていた飛行ロボット



図 4.8 実際に飛ばしてもらっている時の様子

5.成果報告会

ボストンからの帰国から1週間後の4月1日に成果報告会を智能機械工学科の学科長室をお借りして行った。ボストンでの大学交流プロジェクトに参加した3人がそれぞれ発表を行った。それぞれがボストンでの交流中に学んだことや発表の方法、準備や講義やセミナー、ミーティング等の進行の仕方の違いについて広く伝えることができたと思う。

6.おわりに

今回の経験を通じ、世界と自分たちの研究との差や共通点を知ることが出来た。よりグローバルな場での活躍をしなければならないと感じ、自らの研究の意義を深く考えることが出来た。このような経験を与えて頂いた田中一男先生ならびに田中基康先生、ご協力をくださったボストン大

学の Wang 先生に感謝申し上げます.

<http://www.bu.edu/admissions/bu-basics/fast-facts/>

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、25年度は11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 25 年 5 月 31 日（金）

研究提案ヒアリング： 平成 25 年 6 月 17 日（月） 13：15～16：15

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 200,000 円
視覚像再構成を用いた BMI(Brain-Machine Interface)の開発
2. 佐藤順亮 田中研 修士 1 年 200,000 円
冗長多リンクマッサージロボットの開発
3. Radian Furqon 田中研 修士 1 年 180,000 円
情報収集用飛行ロボットプラットフォームの開発
4. 田中絵里 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
～振動子の振動シミュレーションおよび最適化～
5. 篠崎瑞生 明研 修士 1 年 210,000 円
センサーフュージョンによるヒューマンアシストに関する研究
6. 宮本一郎 明研 修士 2 年 190,000 円
ダイナミックヒューマノイドロボットの開発
7. 遠藤隆宏 田中研 修士 2 年 220,000 円
複雑非線形システムのためのモデル自動生成と
多目的制御器自動設計汎用ツールの開発

8. 往古直之 青山研 修士 2年 150,000 円
ワイヤ駆動式精密姿勢位置制御システムの開発
9. 市野塚朝 青山研 修士 2年 230,000 円
対向微流動を用いた微小物の非接触把持システム
10. Sungwan Boksuwan 青山研 博士 2年 220,000 円
Optimal Steering of handheld Micro Manipulators
11. Wenjing Zhao 明研 博士 3年 200,000 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

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 26 年 3 月 6 日（木）13:00～17:45
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）

4.1 視覚像再構成を用いた BMI(Brain-Machine Interface)の開発

報告者

学籍番号： 1332018

氏名：菊島達也

指導教員

田中一男教授（知能機械工学科）

佐藤美佳准教授(筑波大学大学院リスク工学専攻)

プロジェクト提案・予算報告書

視覚像再構成を用いた BMI(Brain-Machine Interface)の開発

プロジェクト概要

本プロジェクト名は「視覚像再構成を用いたインターフェースの開発」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)にお願いをした。

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：桑田智幸，筑波大学大学院リスク工学専攻博士後期課程 4 年佐藤研究室

プロジェクトメンバー：梶原俊也，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 9 クラスの 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、9 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 であると言えることができる。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、EEG による視覚像再構成[1]の例は類を見ない。したがって、視覚像再構成を用いた BMI 自体の例もない。ここに本プロジェクトの独創性を見ることができる。

3. 構築システム提案

本プロジェクトでは、視覚像再構成を用いたインターフェースの開発をする。図 3 にシステムの概要を示す。

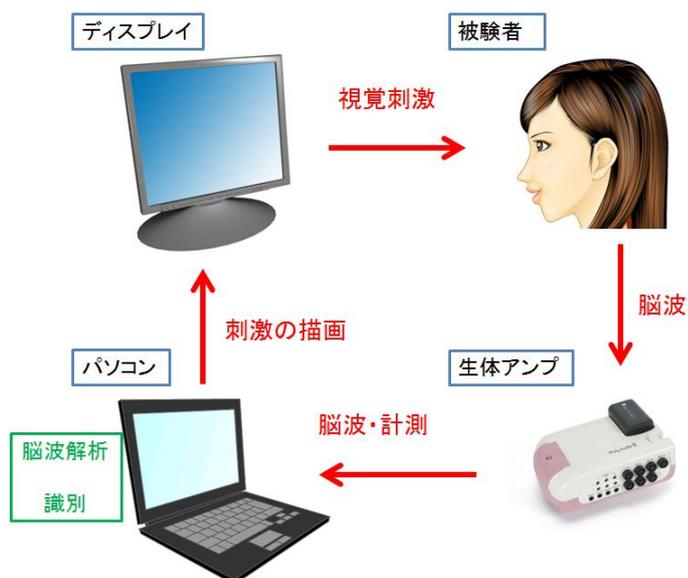


図 1 構築システムの概要

脳波識別のアルゴリズムや被験者に対するガイダンスを与える GUI の作成などを行う。GUI

は本プロジェクト予算を用いて購入した高フレッシュレートディスプレイ上で使用することで視覚刺激をより効果的にする。提示する視覚刺激は 3×3 から成るセルを使用し、計 9 セルから構成される。被験者が見るセルによってクラス識別を行うので、9 クラスの識別インターフェースとなる。図 2 に提示する視覚刺激案を示す。

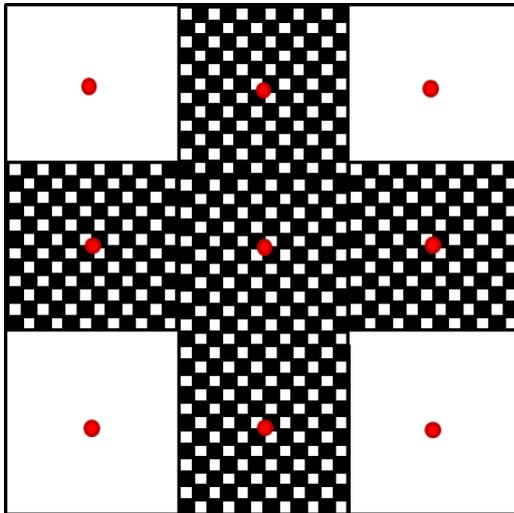


図 2 視覚刺激案(赤点が使用者に見てもらおう点)

4. 視覚像再構成実験

インターフェースの構築を行う前に、視覚像再構成についての確認実験を行った。本実験は、学習ステップと予測ステップの2つの手順からなる。以下、学習ステップを random image session，予測ステップを figure image session と記述する[1]。

random image session の 1trial は 35[s]の休憩から開始される。後、開始画像で 5[s]の予告を行い、6[s]の random 画像を提示する。さらに 6[s]の休憩時間を与え、次の random 画像を提示する。この1連の流れを 1block とすると、計 10block の random 画像を提示することで 1trial を終える。これを計 10trial 行った。

figure image session は 1trial が 8block で構成され、計 4trial 行った。

刺激提示時間と刺激提示の間の休憩時間を 12[s]とし、他は random image session と同じように設定した。但し、提示画像は特定の図形とする。

提示画像は 5×5 のパッチと呼ばれるセルから構成され、解析には内側の 3×3 のパッチ部分を使用する。刺激のパッチは spatial frequency を $1.80[\text{cycle}^\circ]$ 、temporal frequency を $6[\text{Hz}]$ とした。

上記の実験を健康な成人男性 6 人に対して実施し、その時の脳波を測定し、視覚像の再構成を行った。脳波計測は、Polymate II (アクティブ電極 $\times 12$)を使用し、電極位置は国際 10-20 法(5%)に従い、Pz,POz,Oz,Iz,PO3,PO4,O1,O2,I1,I2,PO7,PO8 の位置に計 12 個貼付した。またサンプリング周波数は $1000[\text{Hz}]$ とした。

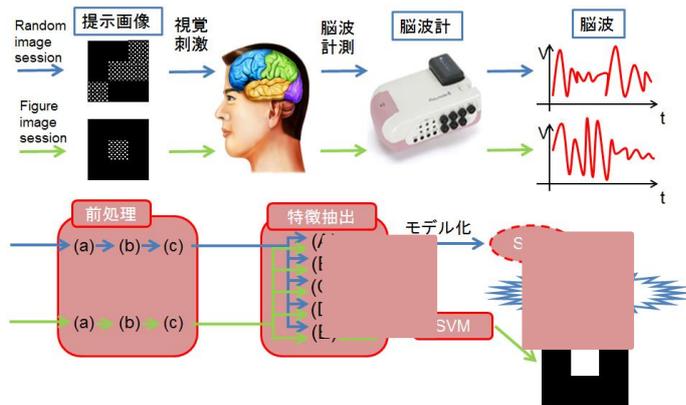


図 3 実験の概要

また、解析における前処理部は、電極間ラプラシアンフィルタ [2] を適用した。特徴抽出では、SSVEP をとらえるために周波数解析後の刺激周波数のパワーを抽出する処理を行っている。また、機械学習部では SVM を採択した。

提示画像と再構成画像の類似度の指標として、2 値画像での再構成実現度 S を定義する。各セルの階調値は黒を 0、白を 1 とする。提示画像の m 行 n 列のセルの階調値を G_{mn} 、再構成画像の m 行 n 列のセルの階調値を G'_{mn} とすると 3×3 のセルの場合の S は(1)式のように定義した。

$$S = 1 - \sum_{n=1}^3 \sum_{m=1}^3 \frac{|G_{mn} - G'_{mn}|}{9} \quad (1)$$

表 1 に、前述した前処理・特徴抽出に従って判別モデルを作成し、figure image session のデータを通した時の再構成実現度 S (評価データ 32 サンプル中の平均値と標準偏差) を示す。また、提示画像と再構成画像において 9 セル中いくつかのセルが正解であるか、と再構成実現度 S との関係を表 2 に示す。また表 1 より、高い S を記録した被験者 4 の再構成画像を図 4 に示す。

表 1 被験者別再構成実現度

Subject Number	Mean	Std
1	0.73	0.14
2	0.67	0.15
3	0.62	0.15
4	0.76	0.08
5	0.65	0.13
6	0.56	0.19
Mean	0.67	0.14

正解数	S
9	1
8	0.89
7	0.78
6	0.67
5	0.56
4	0.44
3	0.33
2	0.22
1	0.11
0	0

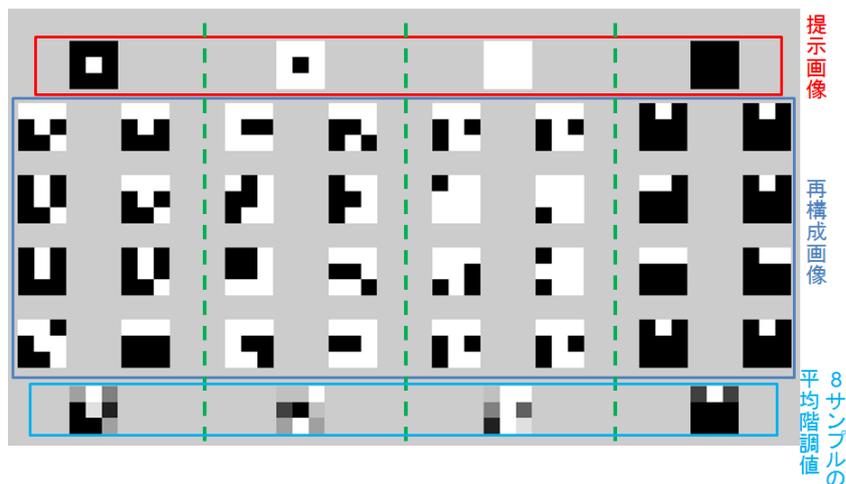


図 4 再構成画像

これらより，個人差はあるものの 3×3 の大きさでは，平均で 0.67 の再構成実現度であった．これは 9 セル中 6 セル正解する程度の結果である．このことから，EEG による視覚像再構成の可能性を提示できたと言える．そこで，次章に述べるインターフェースの開発へ移る．

5. インターフェースの開発

前章にて述べた視覚像再構成の技術をインターフェースへ応用するために，図 5 に示すような，刺激インターフェースを作成した． 3×3 のパッチから構成されるインターフェースで，それぞれのパッチの中心に固視点を設けた．これは，被験者がみるべき点である．また，チェッカーボードのパッチは 6Hz で点滅している．この刺激インターフェースは，ある固視点を見たときに，対応する脳波が誘発され，それを視覚像再構成の技術を使用し， 9 クラスの判別を行うものである．刺激周波数が 1 つであるのに対し， 9 クラスの判別ができることが本インターフェースの特筆すべき点である．また，刺激提示と脳波計測の処理を同時に行うことは PC に多大な負荷をかけるので，刺激提示用 PC と脳波計測用 PC の 2 つに分け，システムを構成した．このシステム図を図 6 に示す．

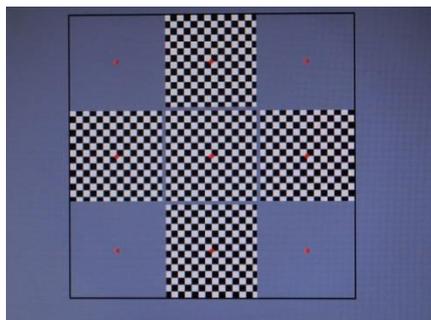


図 5 提案した刺激インターフェース

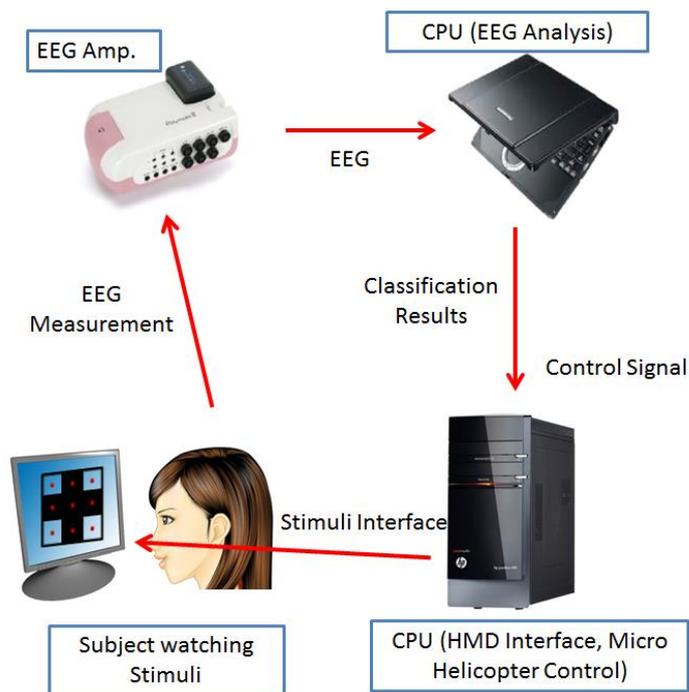


図 6 プロジェクトのシステム図

6. 結論

本プロジェクトでは、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解決の3点を満たすような、視覚像再構成を用いた BMI の開発を目指し、プロジェクトを進めてきた。そして実験にて、被験者平均で 0.67 の再構成実現度をもって、視覚像再構成されることを確認した。また、この技術を用いた BMI の構築を行った。今後は、前述したインターフェース上での有用性を検証する。

7. 予算および支出

予算：200000 円

支出

視覚刺激提示用 PC	100000 円
高フレッシュレートディスプレイ	30000 円
アース付属 USB ケーブル, 電極等実験環境整備機器	50000 円
アルコールパッド, Ten20 ペースト(消耗品)	20000 円

8. 参考文献

[1] Yoichi Miyawaki, Hajime Uchida, Okito Ya-mashita, Masa-aki Sato, Yusuke Morito,

Hiroki C. Tanabe, Norihito Sadato, and Yukiyasu Kamitani, “Visual Image Reconstruction from Human Brain Activity using a Combination of Multiscale Local Image Decoders”, *Neuron* Vol.60, pp915-929 2008

[2] Prueckl R, Guger C, “Controlling a robot with a brain-computer interface based on steady state visual evoked potentials”, *Neural Networks (IJCNN)*, The 2010 International Joint Conference on, pp1-5 2010

4.2 冗長多リンクマッサージロボットの開発

報告者

学籍番号：1332030

氏名：佐藤 順亮

指導教員

田中 基康 助教

松野 文俊 教授(京都大学)

プロジェクト報告書

～ 冗長多リンクマッサージロボットの開発～

1 プロジェクト概要

本プロジェクト名は「冗長多リンクマッサージロボットの開発」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(知能機械工学専攻)と松野 文俊教授(京都大学)にお願いした。

プロジェクトリーダー：

佐藤 順亮 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 工学部 機械理工学専攻 博士後期課程 2 年

渡邊 雄介 京都大学 工学部 機械理工学専攻 博士前期課程 2 年

中島 瑞 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(知能機械工学科)

松野 文俊 教授(京都大学)

2 研究目的

近年、人間に代わってマッサージを行うマッサージロボットに関する研究が盛んに行われている[1-7]。マッサージロボットは人間が行うマッサージ動作の模倣だけでなく、人間が実現不可能であるような精密かつ高い周波数での介入が可能であり、有用であると言える。人間が行うマッサージでは、施術者の二本の腕（場合によっては脚）を用いて患部の固定と圧迫を同時に行う。よって、マッサージロボットは多点を同時に接触する多点同時接触制御が必要となる。マッサージロボットの従来研究は、冗長マニピュレータの手先で対象物に接触を行う研究がある[1,2]。これは対象物との接触箇所が 1 点であるため、多点同時接触を行うためには複数の冗長マニピュレータを用意する必要があり、システム全体としてはコスト増加と装置サイズの大型化が問題となる。

これに対し、文献[3-7]ではロボットハンドの複数の指の先端で対象に接触することにより、多点同時にマッサージ動作を行っている。しかしながら、ロボットハンドでは同時に接触できる範囲が狭い領域に限られてしまう。また、文献[1-6]はマッサージ動作を模倣することを目的とし、ロボットの動作は任意に与えられた目標位置・力によって決定される。これに対し、文献[7]は被験者の「快・不快」をマッサージ動作に反映させることを目的とし、ロボットの動作は生体情報によって決定される。そして、今後のマッサージロボットは文献[7]のように生体情報を取り入れることが望ましいと考えられる。

以上の課題に対して、著者らは冗長多リンクロボットに着目し、生体情報を取り入れたマッサージシステムの研究を目指している[8,9]。細長い冗長多リンクロボットの末端部分だけでなく、体幹における複数の部分を対象物に接触することで、より広い領域に対して多点同時接触を行うことができる。文献[8]では位置制御および冗長性を利用した干渉回避方法の提案を行った。また、文献[9]では力のセンサ情報に基づくPI制御にて位置目標値を修正し、従来の位置制御系[8]に導入することで力制御を行った。シミュレーション及び実機実験により制御則の有効性を検証した。しかしながら、実機実験において実空間と内界センサに基づく位置とに大きな誤差が生じていた。また、生体情報は扱っていなかった。

そこで本研究では、より高精度な制御を行うことを目的とし、制御則の改良、ロボットの駆動部となるサーボの高精度化を行う。また、被験者の「快・不快」といった感覚をロボットのマッサージ動作に反映させることを目的とし、生体情報センサについても検証を行う。

3 冗長多リンクマッサージロボットの位置・力制御

3.1 モデリング

本研究では、Fig.1 に示すようにリンク数が n リンクからなる 2 次元冗長多リンクロボットが円形の対象物に 2 箇所接触する場合について考える。対象物の位置および大きさは既知であるとする。対象物と接触する車輪を接触車輪、接触車輪の間にある車輪を接触間車輪、先頭側の接触車輪 1 を第 n 車輪、ベース側の接触車輪 2 を第 m 車輪とする。第 i 関節の x, y 座標位置を x_i, y_i 絶対角を θ_i とし、接触車輪である第 n, m 車輪の位置・姿勢を $\mathbf{w} = [x_n, y_n, \theta_n, x_m, y_m, \theta_m]^T$ 、関節角を $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ とすると、幾何学関係より、

$$\mathbf{w} = f(\mathbf{q}) \quad (1)$$

となる。(1)式を時間微分することで、運動学モデルは次式のように求められる。

$$\dot{\mathbf{w}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

ここで、ロボットを冗長システムとするために行列 \mathbf{J} は横長、すなわち $6 < n$ とする。また、ベースから第 m 車輪までの関節数および第 m 車輪から第 n 車輪までの関節数は十分大きい数であるとする。

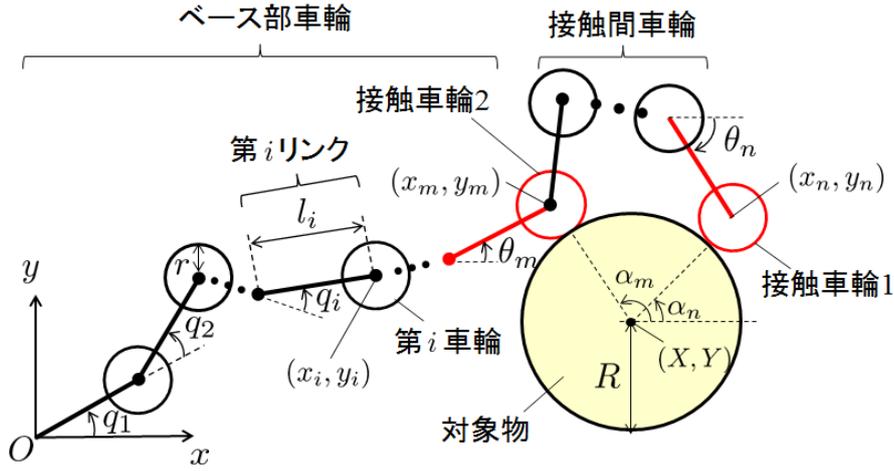


Fig.1: 2次元冗長多リンクロボットと対象物

3.2 制御設計

位置制御

2つの接触車輪の中心位置と姿勢 \mathbf{w} を制御することをメインタスクとし、サブタスクは対象物と接触間車輪の干渉回避とする。対象物は円形であるため、 \mathbf{w} の目標値 \mathbf{w}_d を次式のように表す。

$$\mathbf{w}_d = \begin{bmatrix} X + (R + r) \cos \alpha_n \\ Y + (R + r) \sin \alpha_n \\ \theta_{nd} \\ X + (R + r) \cos \alpha_m \\ Y + (R + r) \sin \alpha_m \\ \theta_{md} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 θ_{nd}, θ_{md} は第 n, m リンク姿勢の目標値であり、Fig.1 に示すように α_n, α_m は第 n, m 車輪の目標位置までの角度である。制御入力 $\dot{\mathbf{q}}$ を次式のように設定する。

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger \left(\dot{\mathbf{w}}_d + \mathbf{K}_P \mathbf{w}_e + \mathbf{K}_I \int \mathbf{w}_e dt \right) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \mathbf{K}_V \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \right) \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{w}_d は被制御量 \mathbf{w} の目標値、 \mathbf{w}_e は被制御量の偏差 ($\mathbf{w}_e = \mathbf{w}_d - \mathbf{w}$)、 \mathbf{K}_P 、 \mathbf{K}_I は比例ゲインおよび積分ゲイン、 \mathbf{K}_V は冗長性に関するゲイン、 \mathbf{J}^\dagger は \mathbf{J} の疑似逆行列、 $\mathbf{I} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ は単位行列、 V は評価関数である。入力を(4)式のように与えることで \mathbf{w} は \mathbf{w}_d に収束する。入力(4)式における右辺第2項は運動学的冗長性に起因する項であり、被制御量の運動には影響を与えない。サブタスクである対象物と接触間車輪の干渉回避を行うため、評価関数は次式のように設定する。

$$V = \sum_{i=m+1}^{n-1} \frac{1}{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 - (R + r)^2} \quad (5)$$

ここで、 X, Y は対象物の中心位置、 R, r は対象物および接触車輪の半径である。 V は対象物と接触間車輪の距離が小さいほど大きな値をとる。 V の時間微分は

$$\dot{V} = \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \dot{\mathbf{q}}$$

$$= \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \mathbf{J}^+ \left(\dot{\mathbf{w}}_d + \mathbf{K}_P \mathbf{w}_e + \mathbf{K}_I \int \mathbf{w}_e dt \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \right)^T (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \mathbf{K}_V \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \right) \quad (6)$$

となる. ここで, $(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) > 0$ である. よって, $\mathbf{K}_V < 0$ とすることで(6)式の右辺第 2 項が常に負となり V が減少化され, 干渉リスクを低減できる.

力制御

接触力のセンサ値に応じて位置制御の目標値を修正することで力制御を行う. 第 n, m 車輪の目標位置修正量 $\Delta r_i (i = n, m)$ を次式のように設定する.

$$\Delta r_i = K_{Pfi} (f_{refi} - f_i) + K_{Ifi} \int (f_{refi} - f_i) dt \quad (7)$$

ここで, $f_i, f_{refi}, K_{Pfi}, K_{Ifi} > 0$ はそれぞれ第 i 車輪における接触力のセンサ値, 接触力の目標値, 位置および積分ゲインである. そして目標値 \mathbf{w}_d を次式のように修正する.

$$\mathbf{w}_d = \begin{bmatrix} X + (R + r + \Delta r_n) \cos \alpha_n \\ Y + (R + r + \Delta r_n) \sin \alpha_n \\ \theta_{nd} \\ X + (R + r + \Delta r_m) \cos \alpha_m \\ Y + (R + r + \Delta r_m) \sin \alpha_m \\ \theta_{md} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(7), (8) は, 接触力が目標値に満たない場合はより押し付ける方向に目標位置を修正し, 接触力が目標値を超えた場合は対象物から離れる方向に目標位置を修正することを意味する. 以上のように目標位置を修正することで, 各接触車輪が対象物に与える力の制御を行う. 制御器全体を Fig.2 に示す.

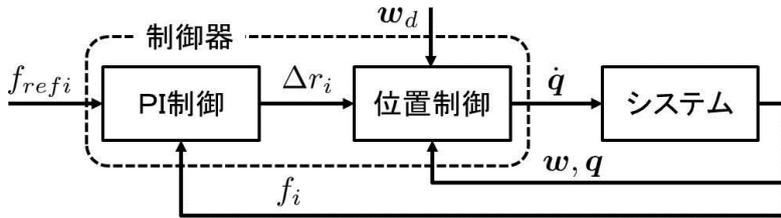


Fig.2: 制御器

3.3 実機実験

実験環境を Fig.3 に示す. 対象物の半径は $R = 0.08[\text{m}]$, ロボットのリンク数は $n = 14$, 各リンク長さは $l_i = 0.067[\text{m}]$, ロボットの全長はおよそ $1[\text{m}]$ であり, $m = 6$ とした. 接触車輪である第 6, 14 車輪の車軸には力センサが取り付けられており, 車輪の接触力を測定することができる. アクチュエータは ROBOTIS の Dynamixel AX-18A を使用し, 力センサはテック技販の USL06-H5-200N を用いた. なお, 現在値 \mathbf{w} は内界センサにより検出された関節角 \mathbf{q} を幾何学関係式(1) に代入することで算出した.

人間が行うストリッピングやクロスファイバーストロークといったマッサージは, 圧力を加えながら接触点を連続的に移動させて行われる[10]. そこで, 本システムを用いて力を与えながら対

象物表面に沿って接触車輪を移動させる実験を行った。目標接触力は $f_m = f_n = 2[\text{N}]$ ，接触車輪の目標姿勢は $\theta_{nd} = -\frac{2\pi}{3}$ および $\theta_{md} = \frac{\pi}{4}$ ，接触車輪 1（第 n 車輪）の目標位置は $\alpha_n = \mathbf{0}$ と与えて一定値とし，接触車輪 2（第 m 車輪）の目標位置は $\alpha_m = \frac{\pi}{6} \left(7 - 2 \sin \frac{\pi t}{200} \right)$ と与えて時間変化させた。

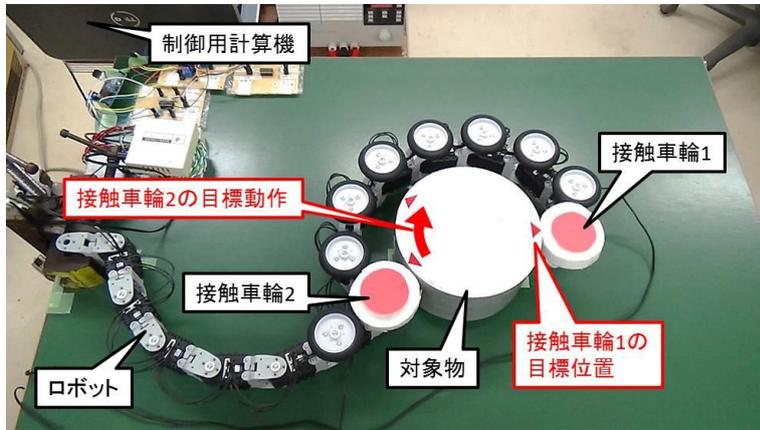


Fig.3: 実験環境

結果を Fig.4-6 に示す。Fig.4,5 はそれぞれ w, f_i の時間応答であり，点線は目標値を表している。接触車輪の位置・姿勢が目標値に収束しており，接触力についても目標値に近い値となっている。また，Fig.6 はロボットの動作の様子であり，時変目標値に対してロボットの接触間車輪が対象物との干渉を回避し続けていることがわかる。このように，接触車輪の位置および接触力の制御をある程度実現することができた。また，本システムは内界センサ値に基づき車輪位置を算出しているため，Fig.6 に示すように接触車輪 2 は実空間上で目標位置に到達できていない。接触車輪 1 についても，実空間上では目標位置近傍にあるが，Fig.4 に示すように力制御によって x_n の目標値が初期目標値から $0.05[\text{m}]$ も小さい値となっており，実空間と内界センサに基づく位置とに大きな誤差が生じている。

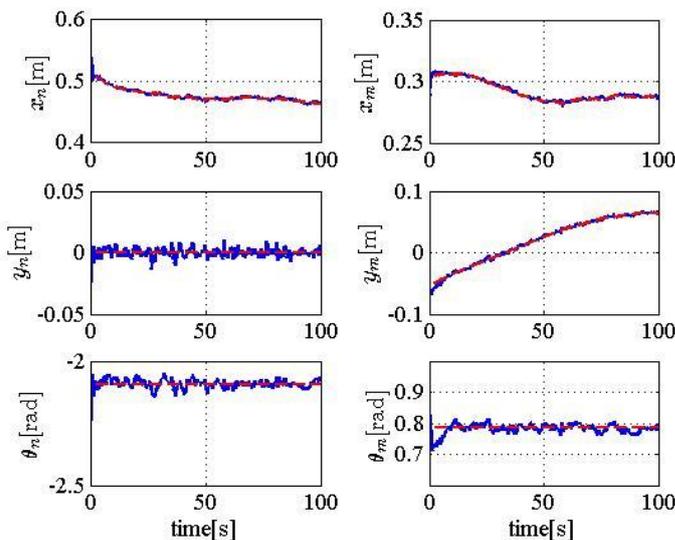


Fig.4: w の時間応答

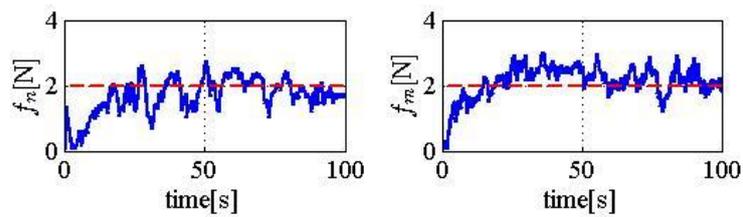


Fig.5: 接触力の時間応答

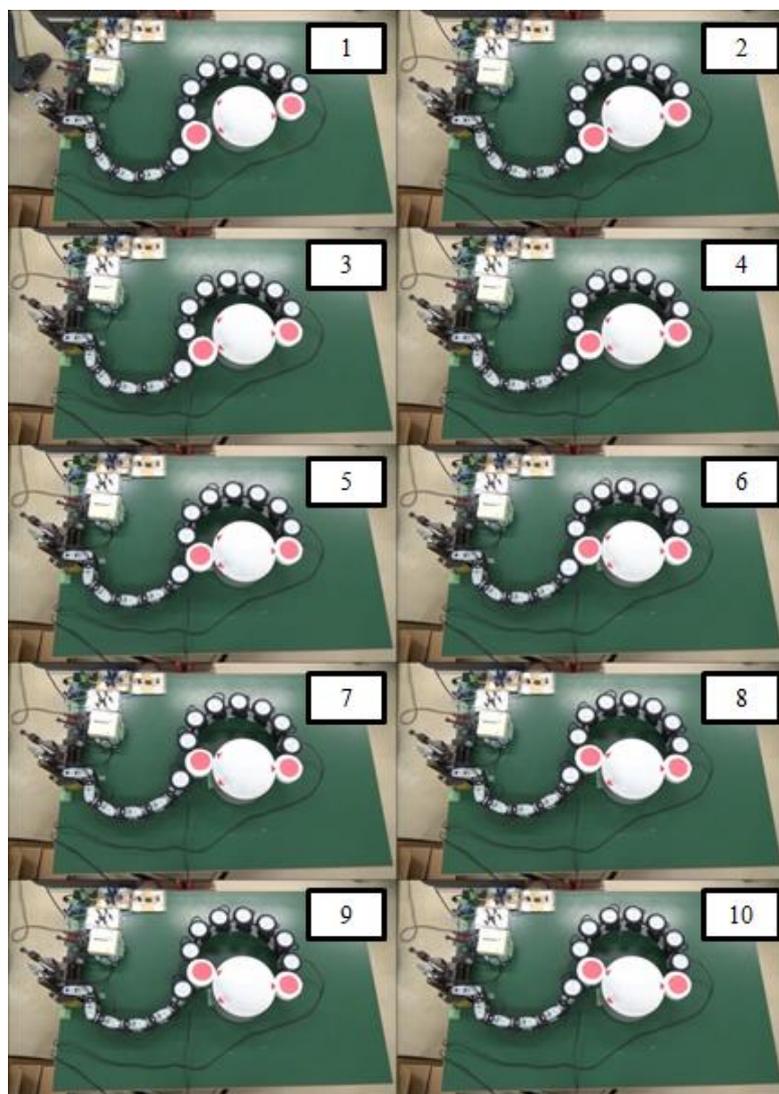


Fig.6: 動作の様子

4 研究報告

4.1 制御則の改良

評価関数を用いた対象物との干渉回避は接触間車輪のみであり，ベース部車輪と対象物の干渉は考慮されていなかった．そこで，接触間車輪だけでなくベース部車輪と対象物の干渉回避についても同時に行う．また，互いのタスクがトレードオフなく実行されることを解析的に確認する．

評価関数 V_1, V_2

ベース部車輪の干渉回避を目的とした評価関数を V_1 、接触間車輪の干渉回避を目的とした評価関数を V_2 とする。また、ベース部車輪(base)、接触間車輪(between)に関する関節角をそれぞれ $\mathbf{q}_{base} \in \mathbf{R}^{m \times 1}, \mathbf{q}_{bet} \in \mathbf{R}^{(n-m) \times 1}, \mathbf{q} = [\mathbf{q}_{base}^T, \mathbf{q}_{bet}^T], \mathbf{w} = [\mathbf{w}_n^T, \mathbf{w}_m^T]$ とする。評価関数 V_1, V_2 はそれぞれ次式のように設定した。

$$V_1 = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{\{\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2} - (R + r)\}^2} \quad (9)$$

$$V_2 = \sum_{i=m+1}^{n-1} \frac{1}{\{\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2} - (R + r)\}^2} \quad (10)$$

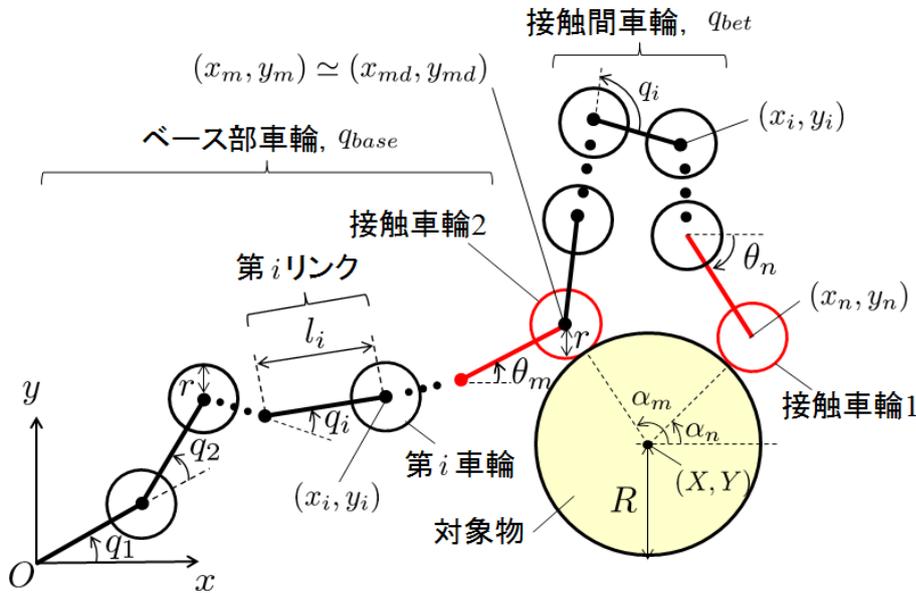


Fig.7: ベース部車輪および接触間車輪の関節角

$(I - J^+J)$ の導出

(2)式のヤコビ行列 J は第 n 車輪と第 m 車輪の位置と姿勢の関節位置に関するヤコビ行列であり、次式のように求められる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_n}{\partial q_1} & \frac{\partial x_n}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial x_n}{\partial q_m} & \cdots & \frac{\partial x_n}{\partial q_n} \\ \frac{\partial y_n}{\partial q_1} & \frac{\partial y_n}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial y_n}{\partial q_m} & \cdots & \frac{\partial y_n}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \theta_n}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_n}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial \theta_n}{\partial q_m} & \cdots & \frac{\partial \theta_n}{\partial q_n} \\ \frac{\partial x_m}{\partial q_1} & \frac{\partial x_m}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial x_m}{\partial q_m} & \cdots & \frac{\partial x_m}{\partial q_n} \\ \frac{\partial y_m}{\partial q_1} & \frac{\partial y_m}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial y_m}{\partial q_m} & \cdots & \frac{\partial y_m}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \theta_m}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_m}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial \theta_m}{\partial q_m} & \cdots & \frac{\partial \theta_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(11)式を次式のように置き換える.

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで, $J_{11} \in \mathbf{R}^{3 \times m}, J_{12} \in \mathbf{R}^{3 \times (n-m)}, J_{21} \in \mathbf{R}^{3 \times m}$ である. J の転置行列は次式のようになる.

$$J^T = \begin{bmatrix} J_{11}^T & J_{21}^T \\ J_{12}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで, $J_{11}^T \in \mathbf{R}^{m \times 3}, J_{12}^T \in \mathbf{R}^{(n-m) \times 3}, J_{21}^T \in \mathbf{R}^{m \times 3}$ である. 次に JJ^T を計算する.

$$JJ^T = \begin{bmatrix} J_{11}J_{11}^T + J_{12}J_{12}^T & J_{11}J_{21}^T \\ J_{21}J_{11}^T & J_{21}J_{21}^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)を次式のように置き換える.

$$JJ^T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで, $A \in \mathbf{R}^{3 \times 3}, B \in \mathbf{R}^{3 \times 3}, C \in \mathbf{R}^{3 \times 3}, D \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ である. 次に JJ^T の逆行列を求める. ブロック行列の逆行列は次式のようになる.

$$\begin{aligned} (JJ^T)^{-1} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} (A - BD^{-1}C)^{-1} & -A^{-1}B(D - CA^{-1}B)^{-1} \\ -(D - CA^{-1}B)^{-1}CA^{-1} & (D - CA^{-1}B)^{-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

$J \in \mathbf{R}^{6 \times n}, 6 < n$ であるため, J の疑似逆行列は次式のようになる.

$$J^\dagger = J^T (JJ^T)^{-1} \quad (17)$$

以上から, $(I - J^\dagger J)$ は次式のようになる.

$$\begin{aligned} (I - J^\dagger J) &= I - J^T (JJ^T)^{-1} J \\ &= \begin{bmatrix} J_{Ker1} & J_{Ker12} \\ J_{Ker21} & J_{Ker2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで, それぞれの要素は次式のようになる.

$$\begin{aligned} J_{Ker1} &= I - J_{11}^T (A - BD^{-1}C)^{-1} J_{11} \\ &\quad + J_{12}^T (D - CA^{-1}B)^{-1} AA^{-1} J_{21} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} J_{Ker12} &= -J_{11}^T (A - BD^{-1}C)^{-1} J_{12} \\ &\quad + J_{12}^T (D - CA^{-1}B)^{-1} CA^{-1} J_{12} \\ &\quad + J_{11}^T A^{-1} B (D - CA^{-1}B)^{-1} J_{22} \\ &\quad - J_{21}^T (D - CA^{-1}B)^{-1} J_{22} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} J_{Ker21} &= -J_{12}^T (A - BD^{-1}C)^{-1} J_{11} \\ &\quad + J_{12}^T A^{-1} B (D - CA^{-1}B)^{-1} J_{21} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} J_{Ker2} &= I - J_{12}^T (A - BD^{-1}C)^{-1} J_{12} \\ &\quad + J_{12}^T A^{-1} B (D - CA^{-1}B)^{-1} J_{22} \end{aligned} \quad (22)$$

(20),(21)式に $A = J_{11}J_{11}^T + J_{12}J_{12}^T$, $B = J_{11}J_{21}^T$, $C = J_{21}J_{11}^T$, $D = J_{21}J_{21}^T$ を代入して計算すると,

$$J_{Ker12} = 0 \quad (23)$$

$$J_{Ker21} = 0 \quad (24)$$

となる. よって(18)式は,

$$(I - J^\dagger J) = \begin{bmatrix} J_{Ker1} & 0 \\ 0 & J_{Ker2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

となる.

制御入力の改良

メインタスクを接触車輪の位置, リンクの姿勢, サブタスクを接触間車輪とベース部車輪の干渉回避とする制御則を次式のように設定する.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= J^\dagger \left(\dot{w}_d + K_P w_e + K_I \int w_e dt \right) \\ &\quad + (I - J^\dagger J) K_{Ker} \eta \\ &= J^\dagger \left(\dot{w}_d + K_P w_e + K_I \int w_e dt \right) \\ &\quad + \begin{bmatrix} J_{Ker1} k_{Ker1} I \frac{\partial V_1}{\partial q_{base}} \\ J_{Ker2} k_{Ker2} I \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

ここで, $K_P \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$, $K_I \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ はゲイン, $J^\dagger \in \mathbf{R}^{n \times 6}$ は J の疑似逆行列, $K_{Ker} \eta$ はそれぞれ次式のように設定する.

$$K_{Ker} = \begin{bmatrix} k_{Ker1} I & 0 \\ 0 & k_{Ker2} I \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial q_{base}} \\ \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}} \end{bmatrix} \quad (28)$$

評価関数 V_1, V_2 の時間微分

評価関数 V_1 の時間微分は次式のように求められる.

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= \left(\frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \dot{\mathbf{q}} \\
&= \left[\frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{base}}{}^T \quad \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{bet}}{}^T \right] J^\dagger \left(\dot{w}_d + K_P w_e + K_I \int w_e dt \right) \\
&\quad + \left[\frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{base}}{}^T \quad \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{bet}}{}^T \right] \begin{bmatrix} J_{Ker1} k_{Ker1} I \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{base}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\
&\quad + \left[\frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{base}}{}^T \quad \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{bet}}{}^T \right] \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ J_{Ker2} k_{Ker2} I \frac{\partial V_2}{\partial \mathbf{q}_{bet}} \end{bmatrix} \\
&= \left[\frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{base}}{}^T \quad \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{bet}}{}^T \right] J^\dagger \left(\dot{w}_d + K_P w_e + K_I \int w_e dt \right) \\
&\quad + \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{base}}{}^T J_{Ker1} k_{Ker1} I \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{base}} \\
&\quad + \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{bet}}{}^T J_{Ker2} k_{Ker2} I \frac{\partial V_2}{\partial \mathbf{q}_{bet}} \tag{29}
\end{aligned}$$

(29)式の第3項は $V_1 = g(\mathbf{q}_{base})$ であるため、 $\frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{q}_{bet}}{}^T = \mathbf{0}$ となる。また、右辺第2項は $J_{Ker1} \geq \mathbf{0}$ なので、 $k_{Ker1} < 0$ とすることで第2項全体が非正となり、 V_2 の変化に影響されることなく、 V_1 の減少化に貢献し、干渉リスクを低減できる。

次に評価関数 V_2 の時間微分について考える。(25)式はヤコビのカーネル空間であるため、次式のような関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
J(I - J^\dagger J) &= \mathbf{0} \\
\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{Ker1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & J_{Ker2} \end{bmatrix} &= \mathbf{0} \tag{30}
\end{aligned}$$

(30)式から、 $J_{11}J_{Ker1} = \mathbf{0}$ 、 $J_{12}J_{Ker2} = \mathbf{0}$ 、 $J_{21}J_{Ker1} = \mathbf{0}$ となる。また、評価関数 V_2 の時間微分は次式のように求められる。

$$\begin{aligned}
V_2 &= \left(\frac{\partial V_2}{\partial q} \right)^T \dot{q} \\
&= \frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T \dot{w}_m + \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T \dot{q}_{bet} \\
&= \frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T J_{21} \dot{q}_{base} + \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T \dot{q}_{bet} \\
&= \left[\frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T J_{21} \quad \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T \right] \dot{q} \\
&= \left[\frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T J_{21} \quad \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T \right] J^\dagger \left(\dot{w}_d + K_P w_e + K_I \int w_e dt \right) \\
&\quad + \left[\frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T J_{21} \quad \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T \right] \begin{bmatrix} J_{Ker1} k_{Ker1} I \frac{\partial V_1}{\partial q_{base}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\
&\quad + \left[\frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T J_{21} \quad \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T \right] \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ J_{Ker2} k_{Ker2} I \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}} \end{bmatrix} \\
&= \left[\frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T J_{21} \quad \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T \right] J^\dagger \left(\dot{w}_d + K_P w_e + K_I \int w_e dt \right) \\
&\quad + \frac{\partial V_2}{\partial w_m}{}^T J_{21} J_{Ker1} k_{Ker1} I \frac{\partial V_1}{\partial q_{base}} \\
&\quad + \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}{}^T J_{Ker2} k_{Ker2} I \frac{\partial V_2}{\partial q_{bet}}
\end{aligned} \tag{31}$$

ここで、 $J_{21} J_{Ker1} = \mathbf{0}$ であるため、(31)式右辺第2項は0となる。右辺第3項 $J_{Ker2} \geq \mathbf{0}$ なので、 $k_{Ker2} < 0$ とすることで、第3項全体が非正となり、 V_1 の変化に影響されることなく、 V_2 の減少化に貢献し、接触間車輪の干渉リスクを低減できる。

4.1 サーボの高精度化

ロボットの駆動部であるサーボの高精度化を行った。変更前(番号:1)と後(番号:2)の比較を Table1 にまとめる。

Table1: サーボの比較

番号	製造会社	型番	角度分解能
1	Dynamixel 社	AX-18A	300° /1024=0.293°
2	Dynamixel 社	MX-64R	360° /4096=0.0879°

番号1のサーボを使用し、実空間で誤差が生じた様子を Fig.7 に示す。

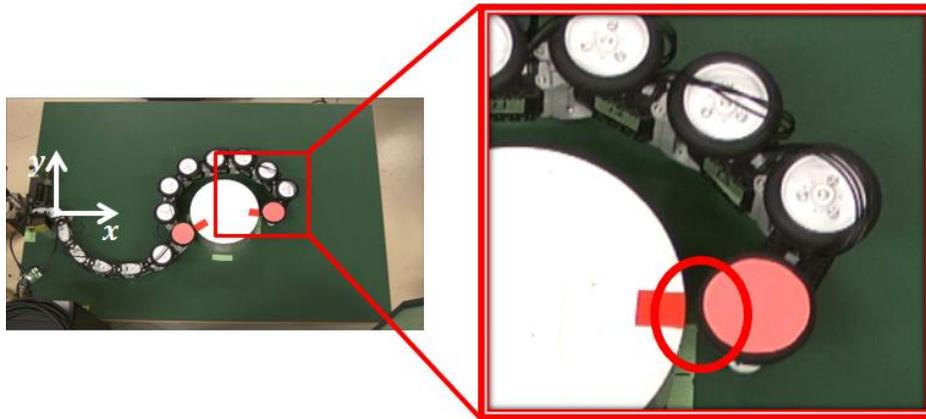


Fig.8: 実空間での誤差(サーボ：番号 1)

番号 2 のサーボに置き換え、同様に実験を行った様子を Fig.8 に示す.

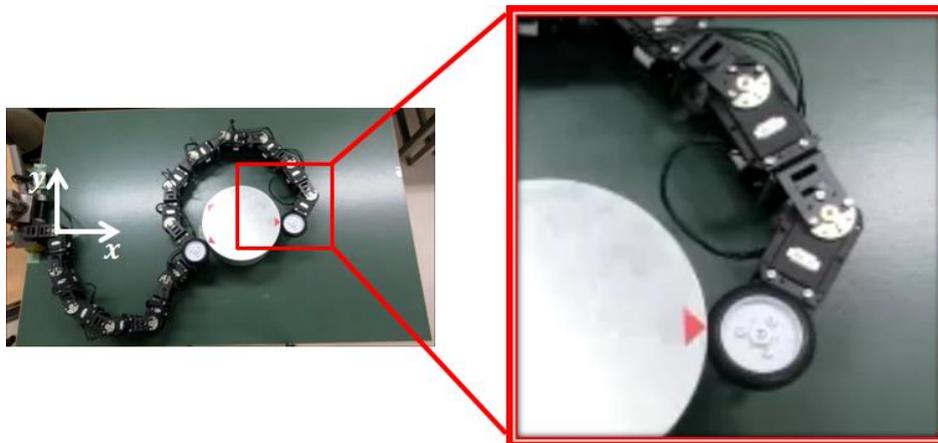


Fig.9: 実験の様子(サーボ：番号 2)

定量的な評価は行っていないが、Fig.8 から実空間においても、ロボットが目標値に収束していることを確認した.

4.2 生体情報センサの検証

被験者の「快・不快」をマッサージ動作に反映させることを目的とし、生体情報センサをシステムに組み込むことを目指している。そして、筋電センサといった筋の電位を計測する生体情報センサの検証を行う。

筋活動は、脊髄のなかにある α 運動ニューロンの興奮から始まる。 α 運動ニューロンが、脳からの指令や脊髄を経由する種々の反射によって興奮すると、その興奮インパルスが神経軸索を経由して筋電流あるいは筋電位として目指す筋に伝えられる。筋電センサは電極を用いてこの筋電位を計測する装置である。そして、人体が外部から衝撃を受け、痛みを感じると運動神経が興奮し、筋が緊張する。文献[7]はこの原理を用いて、被験者の「痛み」を感知し、連続した過負荷なマッサージ動作を回避している。

筋電センサを用いて、外部から衝撃を加えた場合の筋電図の変化を調べる。筋電センサは追坂電子機器社の表面筋電センサ(乾式3極タイプ)を用いた(Fig.10)。



Fig.10: 表面筋電センサ(乾式3極タイプ)

Fig.11 に示すように筋電センサを腕に装着し、筋電センサを装着した腕に2秒ごとに衝撃を2回加えた。

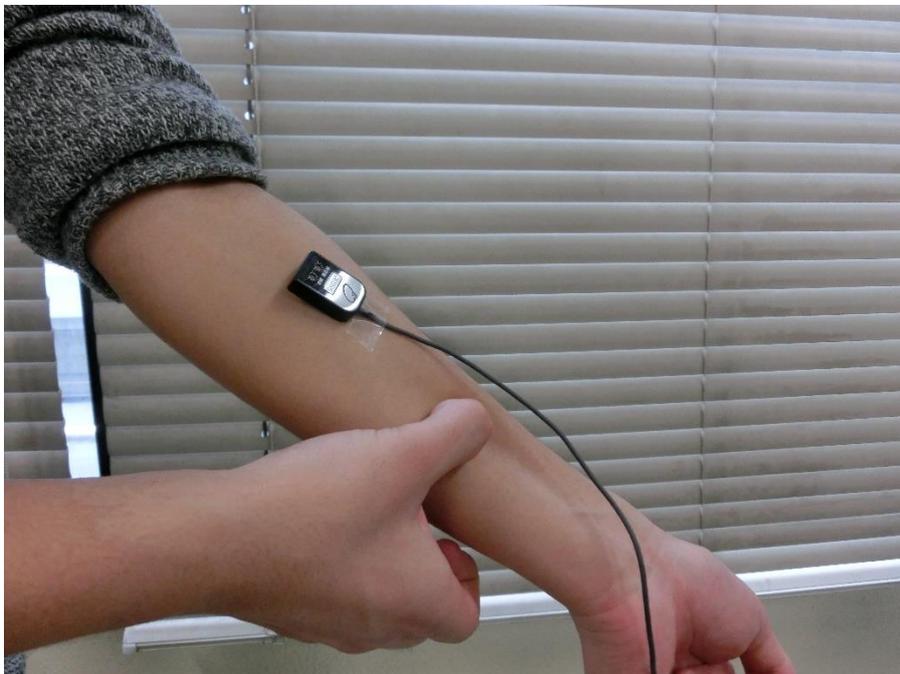


Fig.11: 筋電センサの装着

計測した筋電図(EMG)と積分筋電図(IEMG)を Fig.12,13 に示す。ここで、積分筋電図とは筋電図の振幅の絶対値を求め(整流化)、ある時間範囲にわたって整流化した波形を積分した値である。

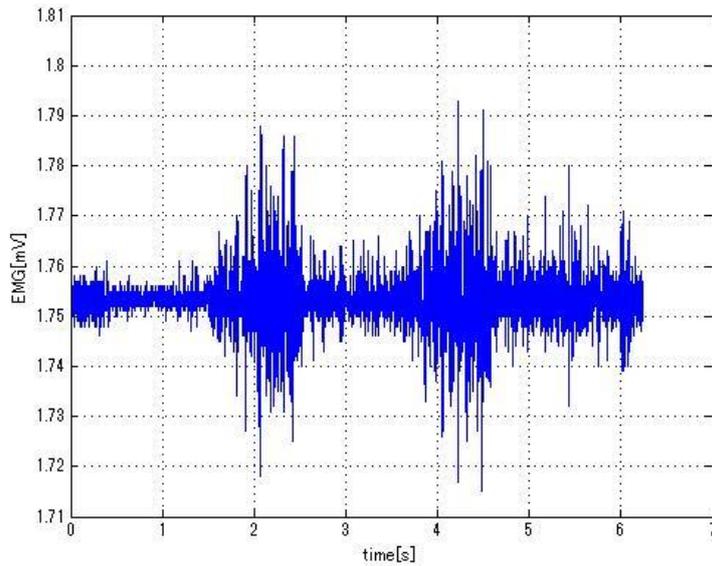


Fig.12: 筋電図(EMG)

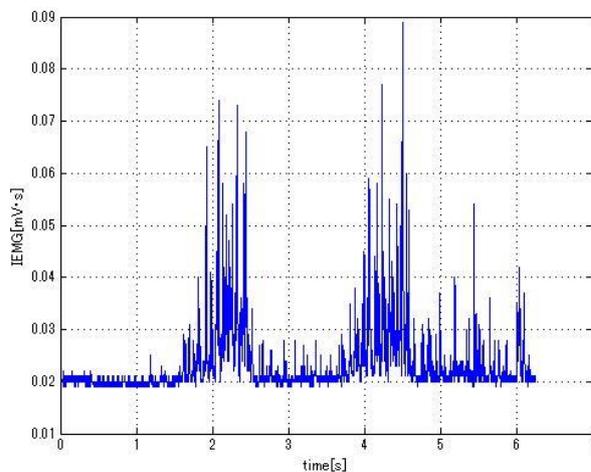


Fig.13: 積分筋電図(IEMG)

Fig.12,13 から、外部から刺激を加えた場合、筋電図、積分筋電図に変化が見られた。マッサージシステムへ組み込む場合は、積分筋電図に任意の閾値を設けることで、被験者の「痛み」を検知し、連続した過負荷なマッサージ動作を回避する。

5 まとめ

本研究では生体情報を取り入れた冗長多リンクロボットによるマッサージシステムの実現を目指し、制御則の改良、サーボの高精度化、生体情報センサの検証を行った。制御則を改良することで接触間車輪だけでなく、ベース部車輪の干渉回避も考慮し、互いのタスクがトレードオフの関係でないことを示した。高分解能のサーボに変更することで、より精度の高い位置制御の実現を確認した。また外部から衝撃が加えられた場合の筋電図の変化を確認した。

今後は筋電センサ以外の生体情報も取り入れることで、被験者の「快・不快」をマッサージ動作に反映するマッサージロボットの開発・制御を行う。

6 予算

購入物品	費用
ロボット用アクチュエータ	¥190,000
生体情報センサ	¥100,000
ロボット用消耗品	¥10,000
合計	¥200,000

参考文献

- [1] J.Wang and Y.Li, “Massaging Human Feet by a Redundant Manipulator Equipped with a Tactile Sensor,” Proc. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.7-12, 2010.
- [2] K.C.Jones and W.Du, “Development of a Massage Robot for Medical Therapy,” Proc. IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol.2, pp.1096-1101, 2003.
- [3] P.Min Yong, K.Mouri, H.Kitagawa, T.Miyoshi and K.Terashima, “Hybrid Impedance and Force Control for Massage System by Using Humanoid Multi-fingered Robot Hand,” Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.3021-3026, 2007.
- [4] M.Kume, Y.Morita, Y.Yamauchi, H.Aoki, M.Yamada and K.Tsukamoto, “Development of a Mechanotherapy Unit for Examining the Possibility of an Intelligent Massage Robot,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol.1, pp.346-353, 1996.
- [5] Y.Xiaoqin and X.Yonggen, “Design and Simulation of Chinese Massage Robot Based on Parallel Mechanism,” Proc. Int. Conf. on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), pp.2512-2512, 2010.
- [6] K.Mouri, K.Terashima, P.Min Yong, H.Kitagawa and T.Miyoshi, “Identification and Hybrid Impedance Control of Human Skin Muscle by Multi-fingered Robot Hand,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2895-2900, 2007.
- [7] R.C.Luo and C.C.Chang, “Electromyographic Evaluation of Therapeutic Massage Effect Using Multi-finger Robot Hand,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2431-2436, 2011.
- [8] 佐藤順亮, 田中基康, 田中一男, 松野文俊, “冗長多リンクロボットを用いたマッサージシステムの開発と制御”, 2P1-J06, 2013.

- [9] 佐藤順亮, 田中基康, 田中一男, 松野文俊, 田中悠也, “冗長多リンクロボットを用いたマッサージシステムの力制御”, 3F1-03, 2013.
- [10] J. H. Clay, D. M. Pounds: クリニカルマッサージ. 医道の日本社, 2004.
- [11] 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵, “表面筋電図”, 東京電機大学出版局, 2006.

4.3 情報収集用飛行ロボットプラットフォームの開発

報告者

学籍番号：1332077

氏名：Radian Furqon

指導教員

田中一男 教授

明愛国 准教授

7 プロジェクト概要

本プロジェクト名は「情報収集用飛行ロボットプラットフォームの開発」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)と明愛国准教授(知能機械工学科)をお願いをした。

プロジェクトリーダー：

Radian Furqon 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 Cheng 知能機械工学専攻 特別研究員 田中研究室

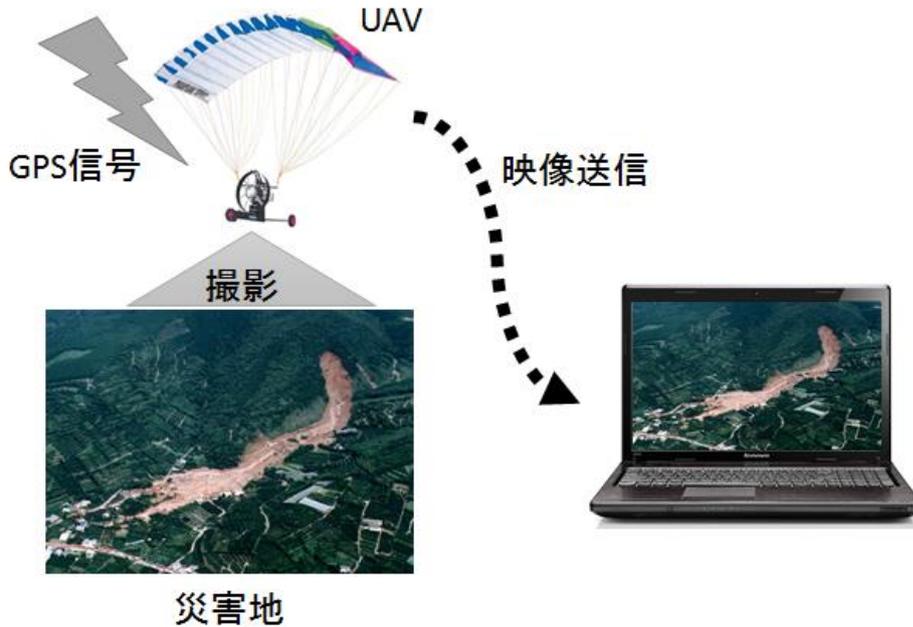
高野祐 知能機械工学専攻 博士前期1年 明研究室

伊藤唯 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（知能機械工学科），明愛国准教授（知能機械工学科）

8 プロジェクト目的

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。



9 プロジェクトの独創性・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

現在実用化されている UAV の多くは固定翼機あるいは回転翼機である。これらの飛行体は制御が難しく、目視での無線操縦ならともかく目の届かないような遠隔地での無線操縦や、人の手を借りずに自律飛行させるような場合、機体の制御のために高性能で高価なセンサが必要となる。また、それらセンサを搭載するために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、滑空して目標地点に着陸することが可能なため、高い安全性を持ったシステムでもある。地上観測を目的

とした場合、飛行速度が小さいため狭い領域での滞空飛行が出来るという利点がある。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。

10 プロジェクト報告

HILS の導入

情報収集用飛行ロボットプラットフォームを開発するのに、PPG を選定して、開発が進められた。今回はシステム開発を効率化するために HILS(Hardware in the Loop Simulator)を導入した。

HILS とは試験対象以外の部分を全てハードウェアで仮想的に実現するシミュレータのことで、実際の制御対象やプラントを用いることなく、机上で制御系全体の動きを見ながら開発・設計が可能で、制御用ソフトウェアの検証が行える。特に、極めて高い安全性が要求される UAV の制御システム開発では有用な方法であると考えられる。

我々が開発した制御システムを搭載した PPG の自律飛行中の写真を示す。図 1 は本研究で作成した HILS の全体図およびその全体写真を示している。まず、PPG の 3 次元 6 自由度モデル、Aerodynamic モデル、センサ、アクチュエータの特性モデル、風外乱モデルを構築し、これらのダイナミクスをコンピュータ内の MATLAB 上で PPG の飛行をシミュレートできる環境を整えた。計算機内のモデルからは疑似センサ値を我々が開発した PPG の実機の制御ユニットへシリアル通信で送信し、また、PPG の実機の制御ユニットから 2 つのモータ（推進用 DC モータ、操舵用サーボモータ）への出力を計算機内のモデルへシリアル通信で送信する。実際の制御ロジック実行部分は PPG の実機の制御ユニットを用いる。制御ユニットはガイダンスおよび制御ロジック部のほかに、センサからの信号入力部やアクチュエータへの信号出力部から構成されており、実機実験を行う場合にはユニット全体が使用される。一方で、HILS で実験を行う場合はガイダンスおよび制御ロジック部のみが利用される。図 2 にその制御ユニット、アクチュエータ、通信ユニットなどのシステム構成図を示す。実機の制御では、制御周期が 1 秒であることから、HILS 環境上での制御周期も 1 秒になっている。すなわち、図 1 の HILS experimental flow の繰返しの周期は 1[Hz]となっている。

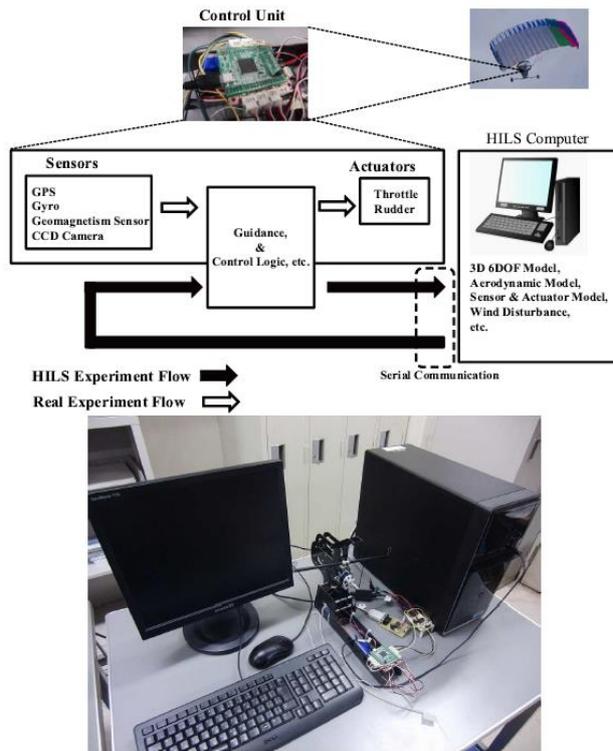


図 1 HILS の概念図

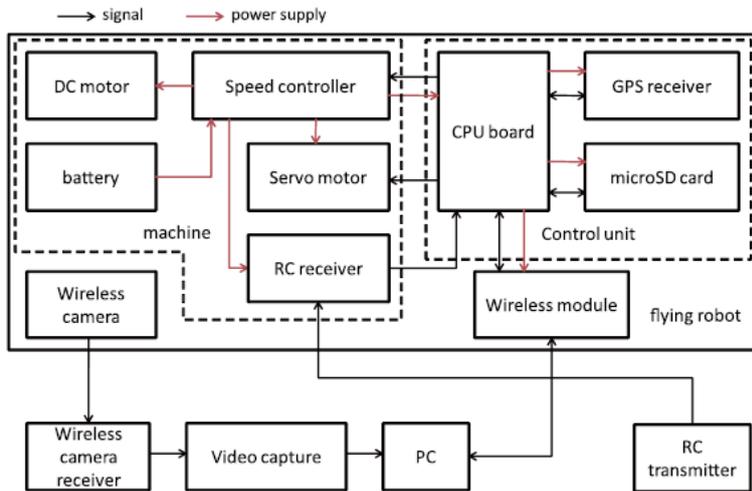


図 2 PPG システムの概念図

HILS を用いた方向制御

昨年度では PPG の高度安定化制御器の設計と実験による検証を行っており, 図 3 のように信頼性の高い高度制御および搭載されたカメラを用いた情報収集のミッションが成功した (離陸は手動で行われ, 図 3 の緑色の部分が自律制御の部分となる) [1]. しかし, 実験での方向制御の実現までにはまだ至っておらず, 方向に関しては人間による操縦に頼っていた.

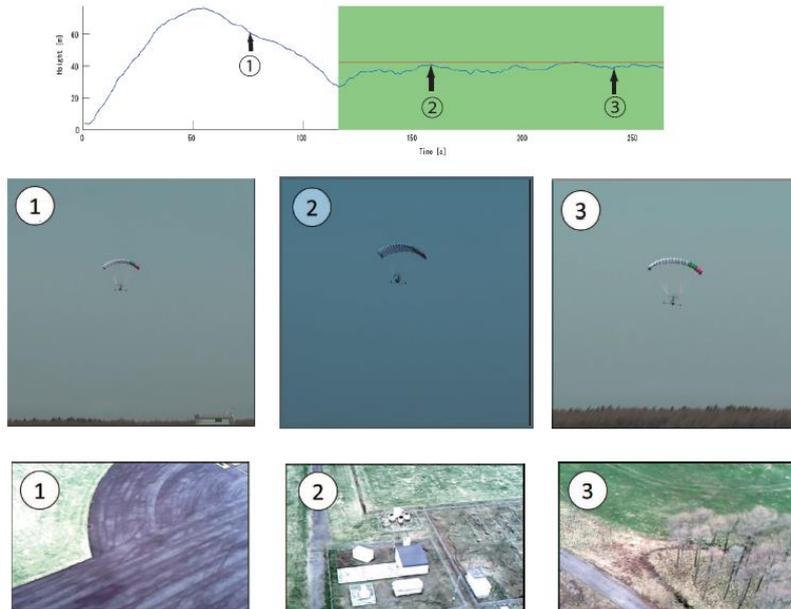


図3 高度安定化制御結果(グラフ：, 縦：高度, 横：時間)

今年度では HILS を用いて方向制御設計を行い, 完全自律制御可能性の検討を行う. 機首の方向と way-point の方向との角度偏差に対する PID 制御器を HILS 環境上に実装する. また, PPG は風邪の影響を受けることから, 風邪外乱モデルを用いて設計した制御器の性能の検討を HILS 環境上で行う.

HILS での制御結果は図 4-6 に示す. JAXA 大気航空宇宙実験場での滑走路を初期値店として飛行を開始, 海岸線に沿って飛行をしながら, 初期値点へ帰還することを想定している. 図 4 は無風時の制御結果, 図 5 は北東方向から, 図 6 は南西方向からの角サンプリングで 0[m/s]から 6[m/s]までの範囲で風速 (風外乱) を一様乱数で発生させた場合の制御結果である. PPG が飛行可能な風速は 6[m/s]までであるため, この風外乱の設定は極めて悪条件とみなせる. 飛行タスクは初期値店から離陸し, 高度 60[m]を保ちながら, way-point01 から順番に way-point05 まで飛行し, 初期値店まで戻ってくるものである. 現目標 way-point の 30[m]範囲に入ったら, 目標を次の way-point に切り替えている.

これらの結果から,

- 無風邪の時には各 way-point 上を完全に通貨した制御を実現できていることおよび
- 悪条件の風外乱が存在する場合でも, 各 way-point 付近に到着し, 初期地点まで帰還している

ことがわかる. なお, 高度制御の結果は割愛するが, いずれも目標高度 60[m]を安定して飛行している. 以上より, 設計した制御器の有効性を HILS 環境上で検証できた. しかし, 風外乱に対して制御系の安定性を理論的に保証しているわけではないので, 今後は風外乱に対してロバスト安定な制御系設計を行う予定である.

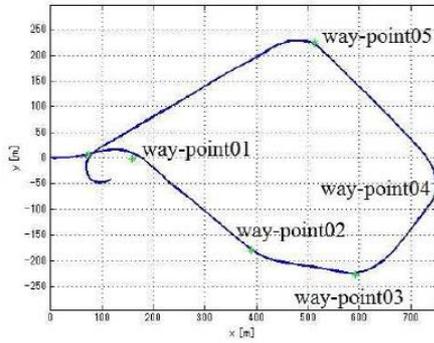


図 4 制御結果（風外乱なし）

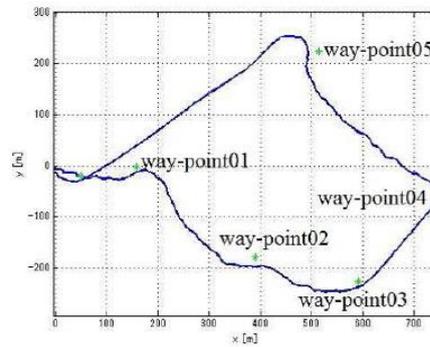
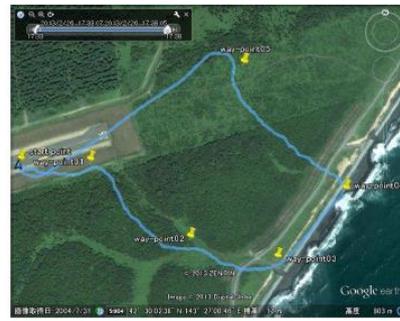


図 5 制御結果（風外乱北東方向から）

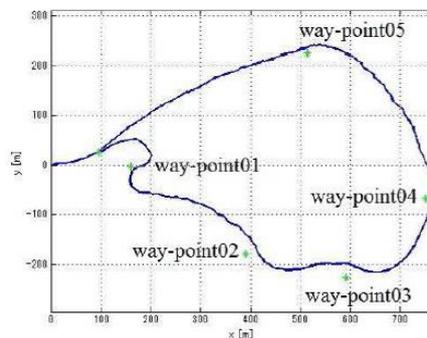
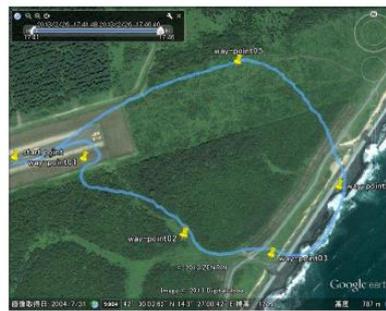


図 6 制御結果（風外乱南西方向から）

バッテリー残量を考慮した自動 way-point 選択の実装

バッテリー残量が少なくなると、墜落の危険性があり、飛行運用上、バッテリーの管理も重要な要素となる。本件旧ではバッテリー残量に応じて way-point を自動選択できるプロトタイプのプログラム開発も HILS 環境で合わせて行っている。現在 PPG に電圧センサは搭載していないため、バッテリー残量は制御ユニットのマイコン上のタイマを用いた飛行時間から導出する。提案した自動

way-point 選択アルゴリズムは以下の通りである.

- Step 1: 飛行時間の上限をあらかじめ設定する (ただし, 風の影響もあるので, 無風で飛行できる総時間に安全率をかけた時間を設定している). また, 各 way-point の優先度をあらかじめ設定しておく.

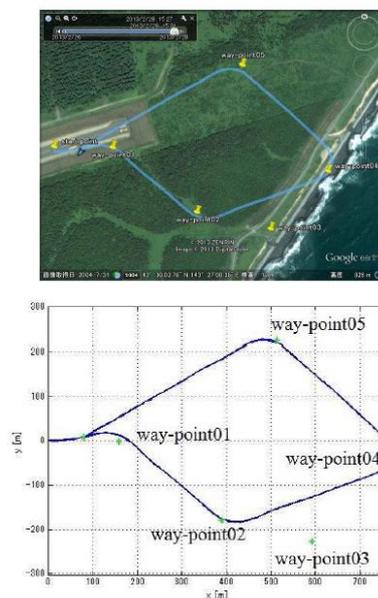
- Step 2: way-point に到着し, 最終の way-point であれば終了そうでなければ, 現在の飛行時間と GPS データによる移動距離から現時点までの平均速度を求める.

- Step 3: 今後その平均速度で飛行することを仮定し, 残りの way-point をすべて通過する時間を計算し, 設定した上限の飛行時間までに帰還できるかどうかの判断を行う.

残りの way-point をすべて通過することが可能と判断された場合は次の way-point を目指し, Step 2 へ戻る. 不可能と判断された場合は Step 4 へ進む.

- Step 4: 通過していない way-point の中で優先度の低い way-point を削除し, Step 3 に戻る.

図 7 に提案したアルゴリズムを用いたシミュレーション結果を示す. 前章と同 way-point を設定し, 限界飛行時間を 300 秒とした. また, 削除される way-point の優先順位は way-point03, way-point05, way-point02, way-point04 とした. way-point01 を通過した時点で, 300 秒では全ての目標点を飛行できないと判断されたため, 優先度の低い way-point03 をカットし, 限界飛行時間より短い 293 秒で帰還した. 以上の結果より, 本アルゴ



リズムが正常に動作していることが確認できた.

図 7 提案アルゴリズムによる自動 way-point 選択

11 まとめ

本研究では, 飛行実験での時間と労力をなるべく減少させるために, PPG 制御システム開発用の HILS 構築を行い, HILS を用いた方向制御のための制御器の設計及びその有効性の検討を行った. HILS の最終的な有効性を示すためにも, 今後は実機を用いた飛行実験を行う. また, 飛行実験時のデータを解析し, HILS の計算機内部のモデル精度を向上させる予定である. また, 方

向制御については、今回 PID 制御器を用いることにとどまったが、高度制御同様に、制御系の安定性およびロバスト安定性を保証する制御系設計[2, 3, 4] を行い、HILS による検証を経て、実機実験を行う予定である。

12 予算執行

予算	:	¥ 180,000
計算機	:	¥ 90,000
飛行体のパーツ	:	¥ 20,000
マイコン, センサなど	:	¥ 40,000
バッテリー・充電器	:	¥ 30,000
合計		¥ 180,000

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 Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, May, 2013.
- [2] H. O. Wang, K. Tanaka and M. F. Griffin, “An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems,” Vol.4, No.1, pp.14-23 (1996).
- [3] 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.
- [4] 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.

4.4. 超磁歪素子を利用した埋め込み型骨導補聴器の開発 ～振動子の振動シミュレーションおよび最適化～

[プロジェクトリーダー]

1332048 田中絵里 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 1年 小池研究室

[プロジェクトメンバー]

林直輝 情報理工学部 知能機械工学科 4年 小池研究室

Geoffrey Ball MED-EL

渡部高久 慶應大・医 大学院 3年

本村朋子 慶應大・医 大学院 3年

[指導教員]

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

1.研究目的

難聴者の処置の一つ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。

骨導補聴器は、外耳や鼓膜を介さない聴覚経路である骨導を用いた補聴器であり、気導補聴器の欠点を克服できる点から注目されている。骨導補聴器には非侵襲型、侵襲型がある。侵襲型は人工中耳といった、耳小骨を直接加振させる補聴器と、BAHAなどの、側頭骨に振動子を埋め込む補聴器がある。侵襲型は非侵襲型に比べ、音圧、音質ともに優れ補聴性能が良いが、設置時の侵襲が大きい、衛生管理が難しく感染症のリスクがあるなど、患者への負担が大きいことが課題となっている。近年、皮膚下に完全に埋め込む骨導補聴器である BoneBridge (BB) が開発された。出力、衛生面において従来の骨導補聴器より優れているが、振動子部分が大きいため埋め込みの際に骨を大きく削る必要がある。従って、補聴性能が良く、低侵襲で衛生管理がしやすい補聴器が求められている。

2.超磁歪素子を利用した埋め込み型骨導補聴器

皮膚下に完全に埋め込む新しいタイプの骨導補聴器が提案された。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で構成される。体内外ユニット間の信号伝送はコイルによる相互誘導によって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、側頭骨の完全な埋め込みと衛生面の改善が実現できた。

体内ユニットの振動子を Fig. 2 に示す。振動子には超磁歪素子 (Giant Magnetostrictive Material, GMM) を用いる。磁歪とは、磁性物質が磁化するとその寸法が変化する性質のものである (Fig. 3)。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、発生応力が優れている。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。

本補聴器の問題点として、特に 1 kHz 以下での低周波数域における出力不足が挙げられる。本報告では出力上昇を目指し作成した、新しい形状の振動子と従来の振動子との比較を行った。その際に、ある一点のみの振動を計測して比較するのではなく、面全体の振動を測定し、各振動子で最も振幅が大きい点での比較を行った。

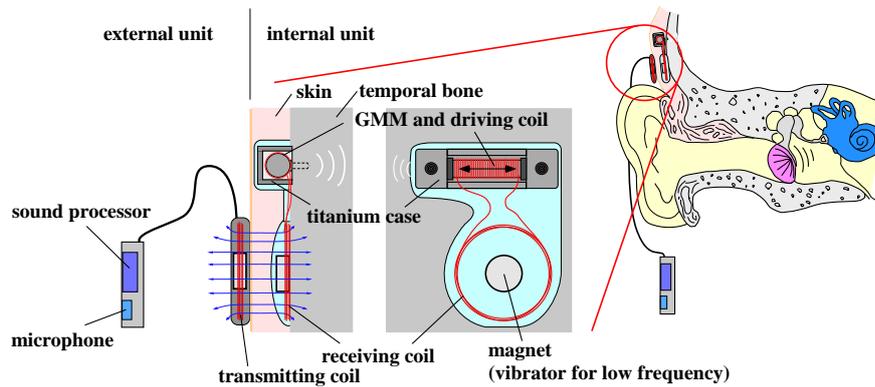


Fig. 1 Implantable hearing aid

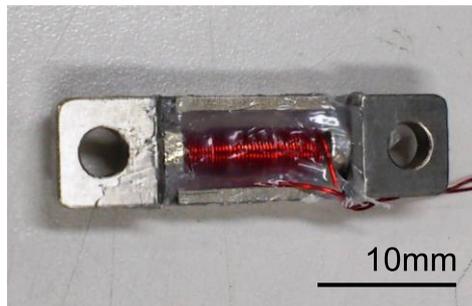


Fig. 2 Vibrator

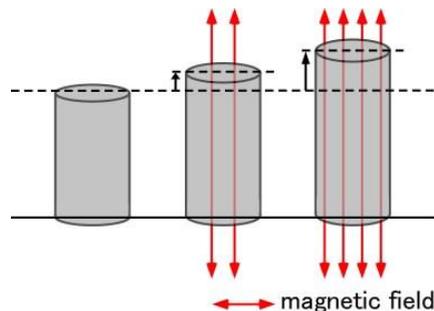


Fig. 3 Magnetostriction

3. スキャニングレーザによる板の振動計測

3.1 実験方法

板の中央に振動子を固定し、電流を流した時に板がどのような挙動を示すか 3D スキャニングレーザによって計測を行った。また今回の計測では、参考のために BB 用振動子の計測も行った。今回の計測で使用した振動子を Fig. 4 に示す。(a) は一点固定の振動子、(b) はヒンジ型二点固定の振動子、(c) は低周波の改善を図るため新たに設計したバネ型二点固定の振動子、(d) は BB 用振動子である。

実験のシステムを Fig. 5 に示す。白い不透明なポリ塩化ビニルの板 (300×300×5 mm) の中心に振動子をインプラントネジによって固定した。振動子には、ファンクションジェネレータ (NF, WF1945B)、アンプ (NF, HSA4011)、デジタルパワーメータ (YOKOGAWA, WT210) を介し、0.5, 1, 2, 4, 8 kHz の正弦波を入力した。振動子内の駆動コイルに電流が流れることで GMM が伸縮を起こし、板が振動する。板の振動は 3D スキャニングレーザ (Polytec, PSV-500-3D) によって全体が計測される。計測したデータを PC に読み込み処理することで板全体の振動を解析した。全ての周波数の計測をした後、(b)、(c) の振動子を固定した板に取り替え、同様に計測を行った。その後、同様に板に固定した BB 用振動子の計測を行った。スキャニングの精度を上げるため、板の表面に現像剤を塗布した。本実験では、GMM 振動子に与える電圧は 0.3 V、BB 用振動子に与える電圧は 1 V とした。

3.2 実験結果・考察

振動の計測結果をスライド、および Table 1, 2 に示す. Table 1 は板の垂直方向の振幅, Table 2 は板の平面上の振幅を示している. 表は, 振動子上の最大振幅と, 板上の最大振幅を載せている. スキャニングによる結果は周波数が高くなるほど多くの波が干渉し波形が複雑となった. 従ってスライドには比較が容易であり, かつ本補聴器の課題となっている低周波 (0.5, 1 kHz) における計測結果を載せた.

一点固定振動子は振動子自体の振幅が大きい, これはネジで固定していない部分が大きく振動したためである. 一点固定は 0.5 kHz と 1 kHz で振幅が最大となる場所が異なっているため, この振動子を用いる場合, 全ての周波数においてフラットな補聴効果を得るのは難しい可能性がある.

ヒンジ型の振動子とバネ型の振動子は板の振動モードが同じであることがわかる. どちらの振動子も軸方向で最大振幅を取る傾向があるため, 二点固定振動子を用いる場合, 埋め込み場所を考慮しないと高い補聴効果が得られない可能性がある. バネ型の振動子の方はヒンジ型よりも, すべての周波数において大きい振幅値を取る結果となった. バネ型にしたことでチタンケースの変形の仕方が変わり, GMM の力がチタンケースに無駄なく伝わったためだと考えられる. 従って, チタンケースの形状を適切に設計することにより本補聴器の課題である低周波数域での加振力不足を改善できると考えられる.



(a)

(b)

Fig. 4 Transducers

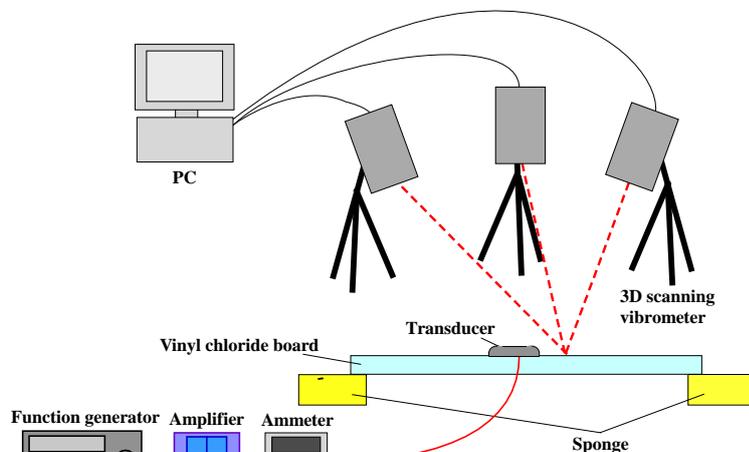


Fig. 5 Measurement system

Table 1 Maximum amplitude of vertical direction

Frequency (kHz)	Maximum amplitude of vertical direction (nm)							
	(a)		(b)		(c)		(d)	
	transducer	board	transducer	board	transducer	board	transducer	board
0.5	760	17	22	13	400	130	960	840
1	820	23	6.7	6.3	310	45	940	1800
2	1770	240	11	8.8	477	104	100	128
4	437	176	15	9.2	715	96	75	40
8	97	23	11	4.9	352	25	8.6	3.3

Table 2 Maximum amplitude of surface direction

Frequency (kHz)	Maximum amplitude of surface direction (nm)							
	(a)		(b)		(c)		(d)	
	transducer	board	transducer	board	transducer	board	transducer	board
0.5	99	4.5	20	4.7	188	18	78	147
1	128	4.3	12	3.7	214	6.3	452	298
2	219	77	12	3.3	247	25	19	29
4	359	81	13	4	599	26	17	14
8	175	24	23	2.7	638	54	3.9	1.4

4. 板の振動シミュレーション

4.1 解析方法

解析条件を正しく設定することで、振動子の改良をシミュレーションによって容易に行えるようにすることを目的とする。今回は設定した境界条件や減衰比が正しいか調べるため、振動の仕方が本補聴器よりも単純である BB 用振動子の計測結果を用いて、板の振動シミュレーションを行った。

今回のシミュレーションでは SolidWorks Simulation を用いた。板の材料はヤング率 4 GPa, ポアソン比 0.3825, 密度 1500 kg/m³ のポリ塩化ビニルとした。板は自由端とするため, Fig. 6 (a) に示すように, 50 mm 下にある板と繋がるよう 100 pN/m のばねを四隅に取り付けた。板の中心には 500 Hz, 1 N の力を加えるよう設定した。1 周期を 10 分割するステップとし, 20 周期分の解析を行った。また減衰にはレイリー減衰を用い, パラメータは先行研究の値を参考に $\alpha = 1000$, $\beta = 0.0001$ とした。

4.2 結果・考察

シミュレーションの結果および実測との比較をスライドに示す。実測と振動モードが異なり, ばね定数やレイリー減衰のパラメータを変更しても挙動に変化は見られなかった。BB 用振動子

の平面の振動を見ると，わずかに平面方向に振動していることがわかる．この振動によって振動モードの違いが現れたか検証していく必要がある．

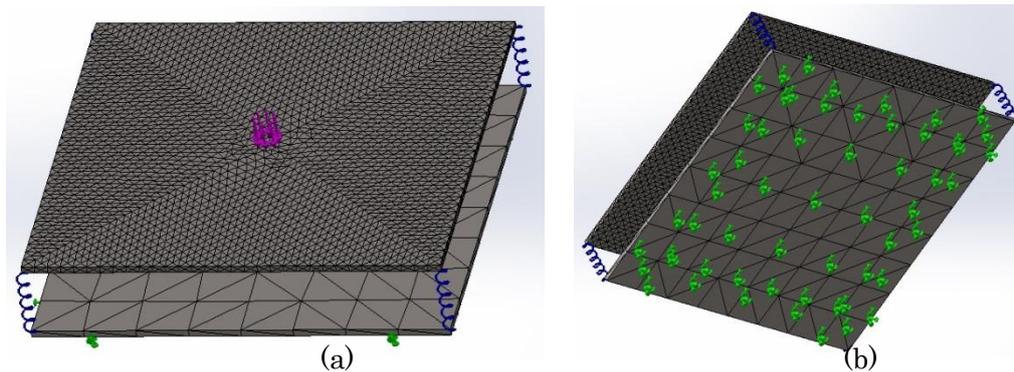


Fig. 6 Boundary condition

5.結言

バネ型振動子は従来の振動子に比べ，低周波における振幅値の改善が見られた．

どの振動子においても周波数によって最大振幅を取る点が異なるため，どの周波数を重視するかによって埋め込む場所を決定する必要があると考えられる．

また，適切なシミュレーション結果を得るには条件を見直していく必要がある．

6.今後の展望

シミュレーションの設定値を変更し，実測に近い振動モード，振幅が得られるようにする．また，超磁歪素子の自己復調機能を利用して，受信コイルと振動子のみで体内に埋め込めるよう最適な搬送波周波数，振動子形状の検討を行っていく．

7.物品購入リストおよび価格

品名		単価	個数	項目価格
チタン加工物	一点固定	¥19,000	3	¥57,000
	ヒンジ型	¥12,000	3	¥36,000
	バネ型	¥19,000	2	¥38,000
SolidWorks		¥10,500	1	¥10,500
インプラントネジ		¥3,250	20	¥65,000
合計				¥206,500

4.5 センサーフュージョンによるヒューマンアシストに関する研究

[プロジェクトリーダー]

篠崎 瑞生 知能機械工学専攻 修士1年 明研究室

[プロジェクトメンバー]

Yueen Hou 機械工程学院 博士3年 李研究室
 蔡 孝棟 知能機械工学専攻 修士2年 下条研究室
 榎本 一弥 知能機械工学科 学部4年 明研究室

[指導教員]

明 愛国 准教授
 下条 誠 教授

研究背景・目的

内閣府の調査によると、現在我が国は高齢化率 24.1%，今後も増加傾向の中長期的な高齢化問題を抱えている。図 1 に高齢化の進行状況と推移について示す。同調査では、2030 年には 30% を超える推計となっており、今後、要介助高齢者の増加，労働力の不足が懸念される。この状況に経済産業省，厚生労働省は、「ロボット技術の介護利用における重点分野」を策定した。この政策では、移乗介助，移動支援，排泄支援，認知症の方の見守りの 4 分野をロボット技術により行うことを重点分野として定めている。

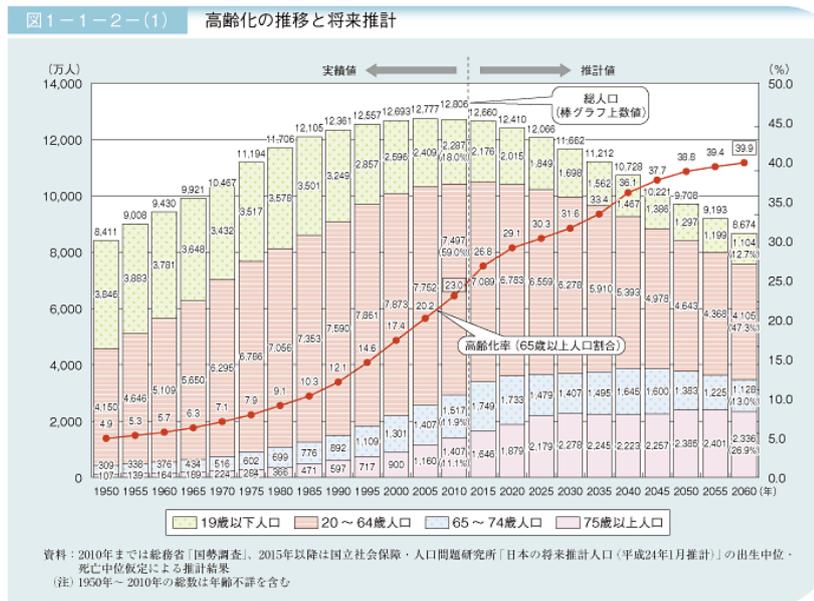


図 1 高齢化の推移

本研究室では、コップの把持や椅子の片付けなどをはじめ、様々なホームサービスを移動マニ

コンピュータにより実現してきた。近年では、ホームサービスの一環として高齢者の立ち上がり動作の支援について取り組んでいる。立ち上がり動作支援は介助士の足腰への負担が大きく、企業においてもロボットによる支援の研究開発が行われている。しかしながら、これらは開発段階であり、実用化には至っていないのが現状である。本年では、立ち上がり動作支援システムの改良を行い、同時にホームサービスの範囲を広めるべくメンタル面でのサービスについて行った。そこで、遊び相手として利用者のパートナーとなれるようなホームサービスロボットシステムの開発を目的とし、具体的には移動マニピュレータと視覚・聴覚センサ Kinect v2 を用いて、ジャンケン・あっち向いてホイロボットシステムの開発を行った。図 2 に本研究で使用する装置を示す。

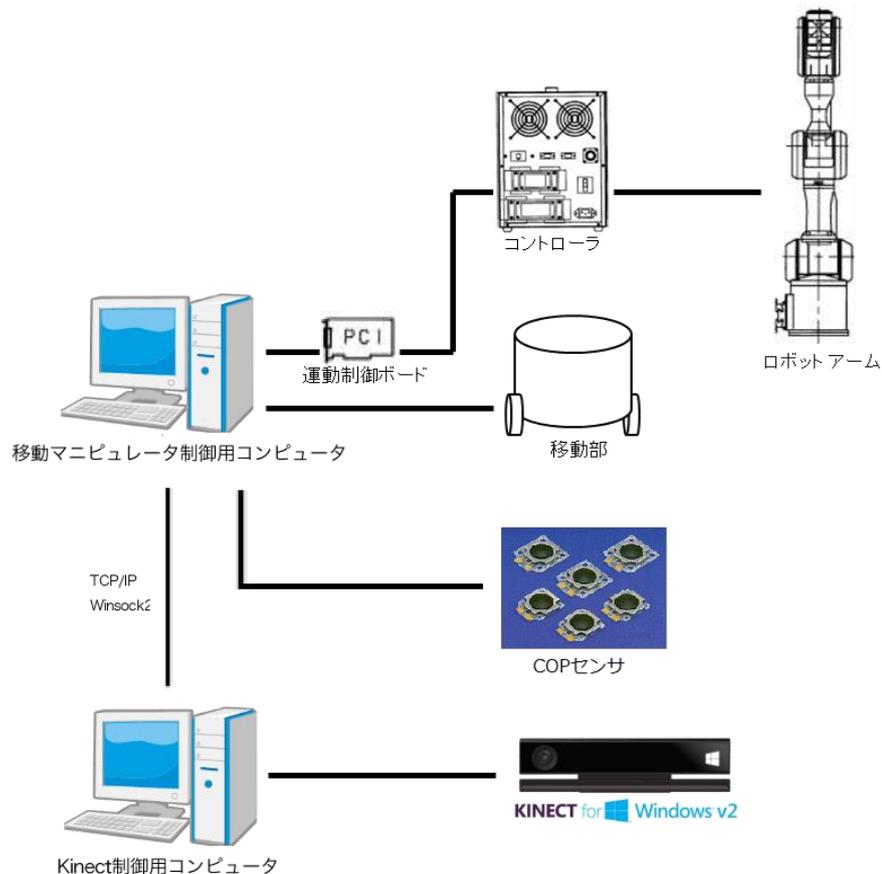


図 2 システム構成

1. 研究の独創性・有用性

多様なホームサービスに対応するために、立ち上がり動作の支援というフィジカルサポートと「ジャンケン、あっち向いてホイ」というメンタルサポートを移動マニピュレータにより行う。

立ち上がり動作支援では、個人差に応じた支援を行うため、ロボットと人間の接触状態などのローカルな情報と人間の姿勢などのグローバルな情報が必要となる。そこで、視覚センサと触覚センサのセンサフュージョンを行い、安全な支援を目指していく。視覚センサには Kinect for Windows V2（以下、Kinect V2）のデベロッパ版を使用し、触覚センサには CoP センサを使用する。視覚センサの Kinect V2 では3次元距離画像と RGB 画像が同時に取得することができ、既存のライブラリを用いることで簡便に姿勢情報を取得することができる。そのため、人間の姿

勢情報や危険姿勢の監視などを行うことができる。触覚センサの CoP センサでは、人間共存ロボットにおいて必要不可欠であるといえる接触情報の取得が行える。また、CoP センサはセンサ素子を離散的に配置することができるため、自由曲面に配置することができ、応答速度が高速であるためフィードバック制御に有用である。これらのセンサを連携して使用することで、非介助者の動きや姿勢を判別し、適切な支援を行う。

一方、「ジャンケン、あっち向いてホイ」の動作では、ロボットと人間の相互的なコミュニケーションが必要である。「ジャンケン、あっち向いてホイ」では、かけ声に合わせてお互いの手を見せる必要があるため、音声認識が必要である。また、被験者の手から勝敗の判断等を行っていく必要がある。そこで、視覚センサと聴覚センサのセンサフュージョンにより相互的なコミュニケーションを可能とする。ここで、視覚センサは Kinect V2、聴覚センサも Kinect V2 内部に搭載されたマイクを使用した。「ジャンケン、あっち向いてホイ」の動作は高齢者の脳の活性によいとされているため、遊びながら頭の体操になるので非常に有効な手段であるといえる。

2. 研究成果

2.1. システムの改良

Kinect V2 は windows8 の環境下でのみ動作し、マンピュレータは windows XP 以下の環境下で動作する。そのため、これらの OS の問題を解消するためにシステムの改良を行った。結果として、2 台の PC を LAN ケーブルで接続し、TCP/IP 通信を用いて必要な情報の通信を行うシステムを構築した。図 2 は改良後のシステム構成である。

2.2. ジャンケン、あっち向いてホイ ロボットの実現

本研究のエンターテインメントロボットシステム、ジャンケン・あっち向いてホイロボットの実現のために、4 つの認識が必要となる。その 4 つの認識とはジャンケン時のプレイヤーの出した手の種類（グー・チョキ・パー）の認識、あっち向いてホイ時のプレイヤーの差した方向の認識、そしてあっち向いてホイ時のプレイヤーの向いている方向の認識、プレイヤーの掛け声（音声）の認識である。

2.3. 手の状態認識

Kinect V2 では骨格データから手の開閉を Closed, Open, Lasso という状態で知ることができる。Closed は手を握った状態（グー）であり、Open は手を開いた状態（パー）、Lasso は二本指が出ている状態（チョキ）である。よって、これらの認識は Kinect V2 の機能を使用して行っていく。

2.4. 指差し方向の認識

3D の骨格情報から指差し方向を認識するアルゴリズムを二つ考え、図 3 ような実験を行い、認識率の結果からどちらを採用するか決定した。その二つの方法とは「掌の中心と手先の座標の位置関係を用いるアルゴリズム」と「肘と手先の座標を用いるアルゴリズム」である。これらのアルゴリズムをアルゴリズム 1、アルゴリズム 2 として以下に示す。5 人の被験者にそれぞれのア

ルゴリズムで 8 回ずつ方向を差してもらったところ, 認識率はどちらも 100% となった. そこで, より細かいところも考慮することができる前者のアルゴリズムを採用した. これは, 肩や肘を大きく動かさなくても認識可能なためである.



図 3 指差し方向の認識の実験の様子

1. 掌の中心と手先の座標を用いるアルゴリズム

```
if(|掌関節のx座標 - 手先関節のx座標| > |掌関節のy座標 - 手先関節のy座標|){  
    //左右どちらかを差している  
    if(掌関節のx座標 < 手先関節のx座標){  
        正面から見て右を差していると判定する;  
    }else{  
        正面から見て左を差していると判定する;  
    }  
}else{  
    //上下どちらかを差している  
    if(掌関節のy座標 < 手先関節のy座標){  
        正面から見て下を差していると判定する;  
    }else{  
        正面から見て上を差していると判定する;  
    }  
}
```

2. 肘と手先の座標を用いるアルゴリズム

```
if(|肘関節のx座標 - 手先関節のx座標| > |肘関節のy座標 - 手先関節のy座標|){  
    //左右どちらかを差している  
    if(肘関節のx座標 < 手先関節のx座標){  
        正面から見て右を差していると判定する;  
    }else{  
        正面から見て左を差していると判定する;  
    }  
}else{  
    //上下どちらかを差している  
    if(肘関節のy座標 < 手先関節のy座標){  
        正面から見て下を差していると判定する;  
    }else{  
        正面から見て上を差していると判定する;  
    }  
}
```

2.5. 振り向き方向の認識

3D の骨格情報から振り向き方向を認識するアルゴリズムを二つ考え、図 4 のように実験を行い認識率の結果からどちらを採用するか決定した。その二つの方法とは「頭と両肩の座標の位置関係を用いるアルゴリズム」と「頭と両肩、首の座標を用いるアルゴリズム」である。それぞれを、アルゴリズム 2.1 とアルゴリズム 2.2 として以下に示す。

5 人の被験者にそれぞれのアルゴリズムで 8 回ずつ振り向きを行ってもらったところ、認識率は前者のアルゴリズムで 77.5%、後者のアルゴリズムで 95%となったので、より認識率の高い後者のアルゴリズムを採用した。この結果となった原因として前者のアルゴリズムでは左右の振り向き判定に両肩の前後関係を用いているが、誤認識の多かった被験者では肩を動かさず顔だけを動かして振り向き動作を行っていたことが上げられる。また、後者のアルゴリズムでの誤認識は被験者が女性の時に現れていた。後者のアルゴリズムでは閾値を用いて左右の判定を行っているが、この閾値は筆者を基準に設定したため、男女の体格や動作の大きさの違いから誤認識が生まれたと考えられる。



図 4 振り向き方向の認識の実験の様子

2.1 頭と両肩の座標を用いるアルゴリズム

```
if(|左肩関節のz座標 - 右肩関節のz座標| > |頭関節のz座標 - (左肩関節のz座標+右肩関節のz座標)/2|){
//左右どちらかを向いている
if(左肩関節のz座標 < 右肩関節のz座標){
    正面から見て右を向いていると判定する;
}else{
    正面から見て左を向いていると判定する;
}
}else{
//上下どちらかを向いている
if(頭関節のz座標 < (左肩関節のz座標+右肩関節のz座標)/2){
    正面から見て下を向いていると判定する;
}else{
    正面から見て上を向いていると判定する;
}
}
```

2.2 頭と両肩，首の座標を用いるアルゴリズム

```
if(|首関節のx座標 - 頭関節のx座標| > 0.01){
    //左右どちらかを向いている
    if(首関節のx座標 < 頭関節のx座標){
        正面から見て右を向いていると判定する;
    }else{
        正面から見て左を向いていると判定する;
    }
}
}else{
    //上下どちらかを向いている
    if(頭関節のz座標 < (左肩関節のz座標+右肩関節のz座標)/2){
        正面から見て下を向いていると判定する;
    }else{
        正面から見て上を向いていると判定する;
    }
}
}
```

2.6. 音声認識

Kinect v2 の SDK には音声機能がまだ追加されていないため、マイクは Kinect v2 のものを使い、音声の認識は Windows8 にインストールされている SAPI5(speech API)を用い、C++で開発した。プレイヤーが発話してからマイクに音声が入り、解析してロボットにジャンケン等の指令を送り、ロボットが実際に動作を行うため、マニピュレータとのコミュニケーションは時間がかかってしまう。そこで辞書に「さい」「じゃん」「あい」などの合図の最初の言葉だけを登録し、認識に用いた。「さい」は「最初はグー」、「じゃん」は「ジャンケンポン」、「あい」は「あいこでしょ」の最初の言葉である。これにより人間が言い終えるより先にロボットに指令を送ることが出来るようになりスムーズにジャンケン・あっち向いてホイができるようになった。

2.7. ジャンケン，あっち向いてホイ ロボットの実験

図5のように実験参加者5人にジャンケン・あっち向いてホイ ロボットで実際に遊んでももらい、アンケートを取ったところ、マニピュレータの動作の遅さなど問題点もあったが、ジャンケン・あっち向いてホイを概ね楽しんでもらうことが出来た。



図 5 実際にじゃんけんをする様子

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]

1250040 宮本 一郎 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]

1250024 田畑 利憲 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

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 1年 明研究室

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

1012059 佐藤 隆紀 知能機械工学科 学部 4年 明研究室

[指導教員]

明 愛国

下条 誠

鈴木 陽介

[提出日]

2014年3月6日

1・プロジェクトの研究目的

従来のロボットは産業分野での利用が主であり、単独タスクのみの実行や、工場内といった限定された作業空間での効率が重要視されていた。しかし、現在では一般家庭における介護や、原子力関連施設など人の立ち入ることのできない領域での活躍が期待され、ロボットには複数タスクの実行と作業領域の拡大が求められている。

ヒューマノイドロボットは人間と同じ形態を持ち、脚によって移動を行う。これらの特徴はロボットの利用範囲の拡大に適しているといえ、多くの研究機関でヒューマノイドロボットの研究が盛んに行われている。しかし、現在のヒューマノイドロボットは動作が静的な動作に限られている点や、稼働時間の制約など多くの問題を抱えている。これらの要因から実環境で使用が可能であるヒューマノイドロボットは開発されていない。そこで、本研究室では生体模倣や機構的な側面からアプローチを行いヒューマノイドロボットの性能向上に取り組んでいる。

今年度本研究プロジェクトでは生物模倣的なアプローチである“動物の腓腹筋と筋腱複合体を規範とする脚機構の研究開発”と機構的なアプローチである“後方凸形状脚機構の開発”を行い、ヒューマノイドロボットの運動性能向上に取り組んだ。

2・動物の腓腹筋と筋腱複合体を規範とする脚機構の研究開発

2.1 研究背景・研究目的

ロボットの移動形態の一つである脚移動は車輪での移動に比べ不整地走破性等多くの利点を有している。しかし、リアルタイムでの制御の困難さ・アクチュエータ等が問題になり脚移動ロボットの運動性能は低く実用的ではない。

そのため実空間で高い運動性能を持つ動物を規範に、運動性能のブレークスルーを狙った研究も多く存在する。それらの研究は多くの成果を上げているが同時にいくつかの問題も抱えている。いくつかのロボットでは、直動アクチュエータである動物の筋肉を再現するために空気圧や油圧を使用している。油圧アクチュエータを使用するためには油圧の供給源としてエンジンなどの大型の原動機が必要になる。そのためシステムの大型化が必須になり、ロボット全体の重量の増加、運動性能の低下につながる。

そこで、本研究では脚移動ロボットの運動性能向上を目的とし、脚移動ロボットのアクチュエータとして電磁モータを用いた動物の筋骨格バイオメカニクスを規範とする脚機構を提案する。

本研究では動物の腓腹筋に着目した。腓腹筋は膝関節と足首関節を跨ぐように配置された筋腱複合体であり、跳躍時の力の伝達において非常に重要な二関節筋である。跳躍動作時、腓腹筋の全長は変化せず膝関節トルクを足首関節へと伝達するリンクとして動作する。この作用を腓腹筋の協調動作機能と呼ぶ。また、腓腹筋は連続跳躍時に予備緊張と呼ばれる筋繊維の収縮動作を示す。これによって腱組織は引き伸ばされ、衝撃を吸収し、着地時のエネルギーを弾性エネルギーとして保存することが可能になる。筋腱複合体に保存されたエネルギーは跳躍時に再利用され、エネルギーの効率的な利用や、より多くの運動エネルギーを得ることに使われる。

本研究では動物の腓腹筋と筋腱複合体を規範とする弾性要素を有するパラレルリンク脚を提案する。提案機構を脚に採用することで腓腹筋の持つ協調動作機能が再現され、床反力方向制御による制御の簡易化や跳躍高さなど運動性能の向上が期待される。また、弾性体により着地時の衝撃を弾性エネルギーとして保存・再利用が可能になり、コンプライアンス性の向上・運動性能の向上が期待される。

2.2 生物の腓腹筋を規範とする弾性パラレルリンクモデル

腓腹筋を弾性パラレルリンクで置き変えたモデルを作成し、解析及びシミュレーションを行った。各パラメータは実機を想定して設定し、アクチュエータの重量などを考慮しモデルの上端に300[g]の質点が設定されている。モデルの重心が接地点のほぼ真上になるように初期姿勢を決定した。図1に設定した各モデルを示す。

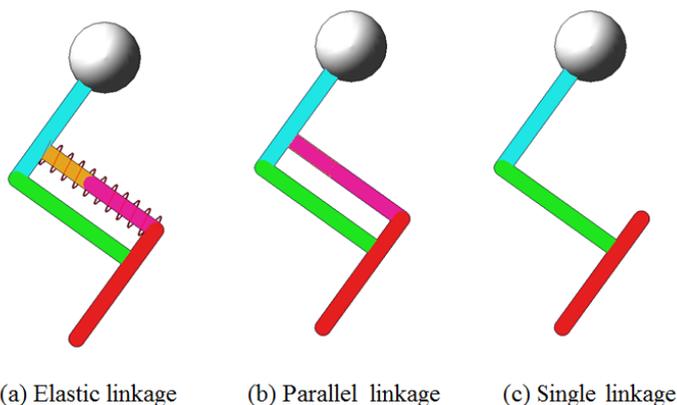


図 1 シミュレーションモデル

図 1(a) は弾性パラレルリンク機構に用いたモデルである。跳躍時に床反力によってリンクに挿入されたバネが引き伸ばされパラレルリンクを構成する。図 1(b) は剛体パラレルリンク機構を用いたモデルである。図 1(c) はパラレルリンク機構を用いないモデルであり、足首関節は $90[\text{deg}]$ で固定されている。

設定したモデルを用いて跳躍動作の動力学シミュレーションを行った。足先と地面の摩擦係数は 1 とし、足先が接地している状態から膝関節に角度入力を行い跳躍動作を行った。図 2 にシミュレーションから得られた膝関節駆動トルクを示す。

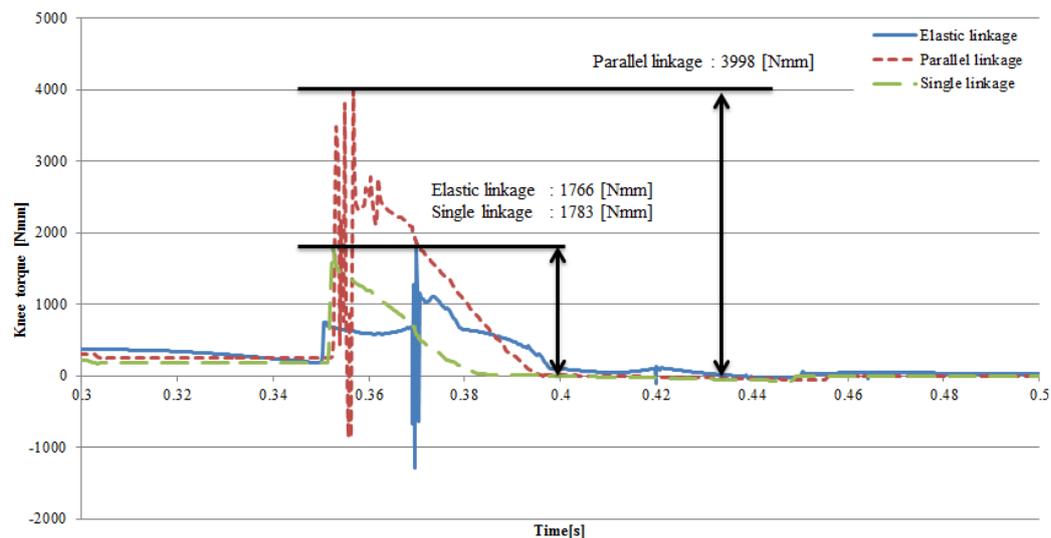


図 2 膝関節駆動トルク

跳躍高さの結果として、弾性パラレルリンクが $201[\text{mm}]$ 、パラレルリンクモデルが $153[\text{mm}]$ であるのに対し、シングルリンクモデルが $42[\text{mm}]$ であり、跳躍高さが大きく劣っていた。シングルリンクモデルでは各関節の協調動作が起きないため、床反力が重心方向から外れてしまい、運動エネルギーが回転運動に変換され跳躍高さが低くなったと考えられる。また、膝関節の駆動トルクを比較すると弾性パラレルリンクの必要トルクはパラレルリンクモデルのほぼ半分であった。これはバネにより足首関節にトルクが発生し、膝関節から足首関節に分配されるトルクが減ったためであると考えられる。以上のシミュレーションより弾性パラレルリンクは運動制御の簡易化・運動性能向上について非常に有用であると考えられる。

2.3 跳躍ロボットの設計と製作

以上のシミュレーションを参考に弾性パラレルリンクを持つ脚の設計と製作を行った。図 3 に製作したロボット「Sugoi-Neco Legs」の外観を示す。

Sugoi-Neco Legs の膝関節は減速比が 23.2 と小さく、高いバックドライバビリティ性を持つ。そのため、膝関節に PD 制御を適用することで膝関節は仮想的なバネ・ダンパ系として動作する。結果、ロボットのコンプライアンスを向上させることに繋がり、柔らかな着地の実現や不整地で

の受動的な適応性の向上が期待される。

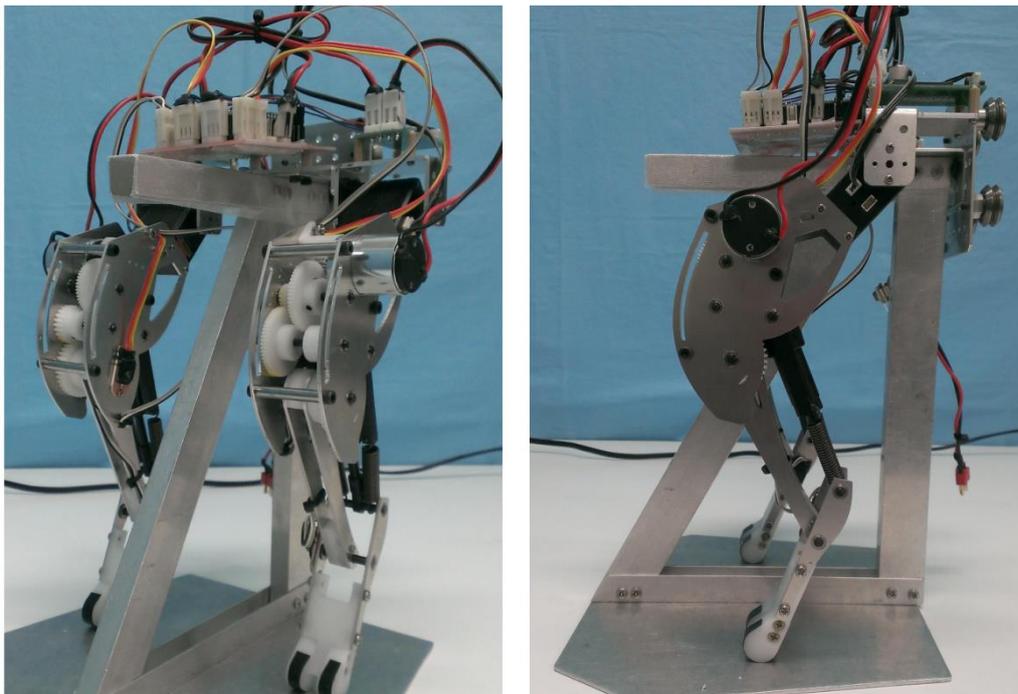


図 3 Sugoi-NecoLegs 外観

2.4 実験

着地実験

スライドレールに設置した Sugoi-Neco Legs を腰関節位置が 400[mm] の高さまで持ち上げ、落下させた。ロボットには初期姿勢を維持するように制御を行った。弾性パラレルリンクとパラレルリンクそれぞれの床反力を図 4 に示す。

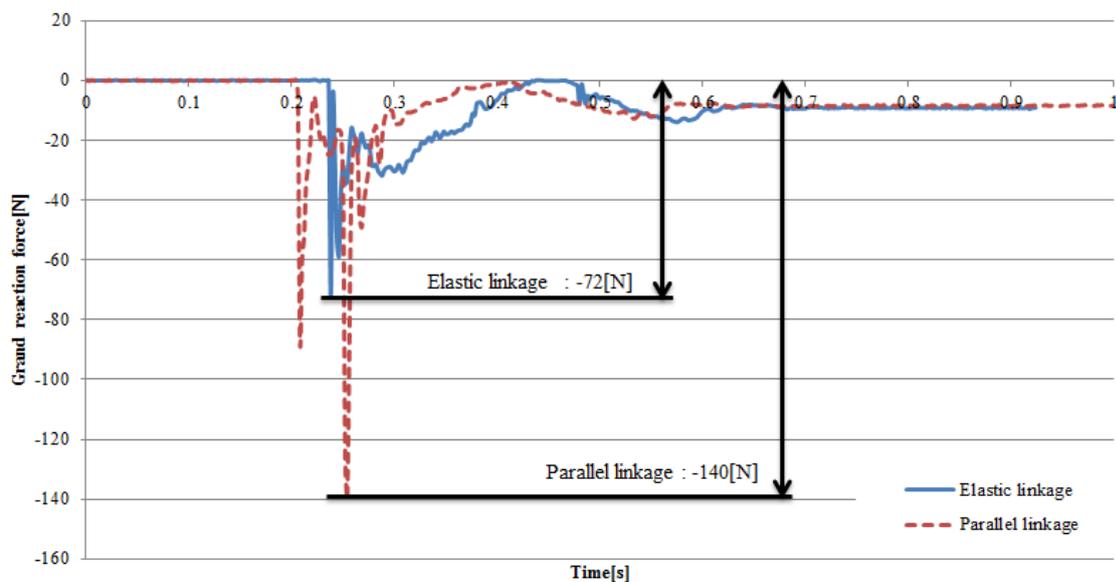


図 4 着地実験-床反力

最大床反力について見てみると、弾性パラレルリンクがパラレルリンクの約半分になっているこ

とがわかる。また、パラレルリンクでは着地時に二つのピークが見られ、着地時に関節角度を制御しきれず、リンクが干渉してしまっているためであると分かった。これは、PD 制御による仮想バネ・ダンパ系がアクチュエータの反応遅れなどの要因により対応できていないと為であると予想される。このことから弾性パラレルリンク・PD 制御を共に適用することで、制御では間に合わない瞬間的な変化をバネで、バネでは対応できない変化する力を制御で対応することが可能である。

跳躍実験

Sugoi-Neco Legs を待機姿勢にし、最大電圧で膝関節を伸展し跳躍を行った。跳躍後は再び待機姿勢になるように制御を行い着地を行った。弾性パラレルリンクとパラレルリンクそれぞれの股関節位置を図 5 に示す。

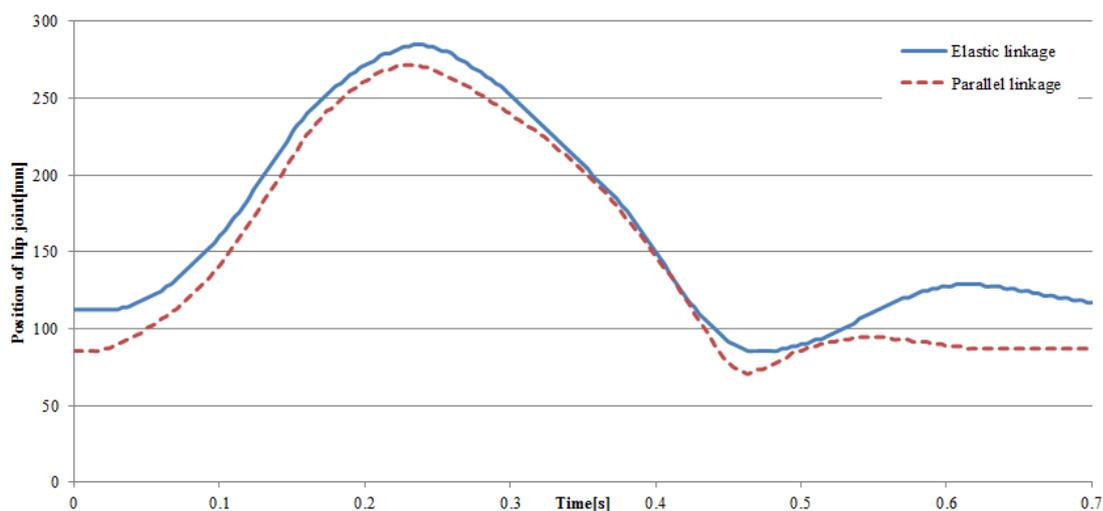


図 5 単純跳躍-腰関節位置

弾性パラレルリンク・パラレルリンクでは待機姿勢での股関節位置が異なるため、その点を考慮すると最大跳躍高さは弾性パラレルリンク・パラレルリンク共にほぼ同じ高さであると思われる。弾性パラレルリンクモデルをハイスピードカメラで確認するとバネは跳躍時にほぼ伸展せず、跳躍動作に何ら影響を及ぼしていないことがわかった。これは、機械的抵抗やモータの反応遅れ等の原因により、瞬間的に大きなトルクを得られず、バネを引き延ばすことが出来なかったためであると考えられる。

連続跳躍実験

単純跳躍と同様に Sugoi-Neco Legs を待機姿勢にし、膝関節を伸展し跳躍を行った。着地後、膝関節が屈脚され一定角度以上になると着地したと判断し、同様の制御で膝関節を伸展し、連続跳躍を行った。図 6 に跳躍動作の様子を示す。

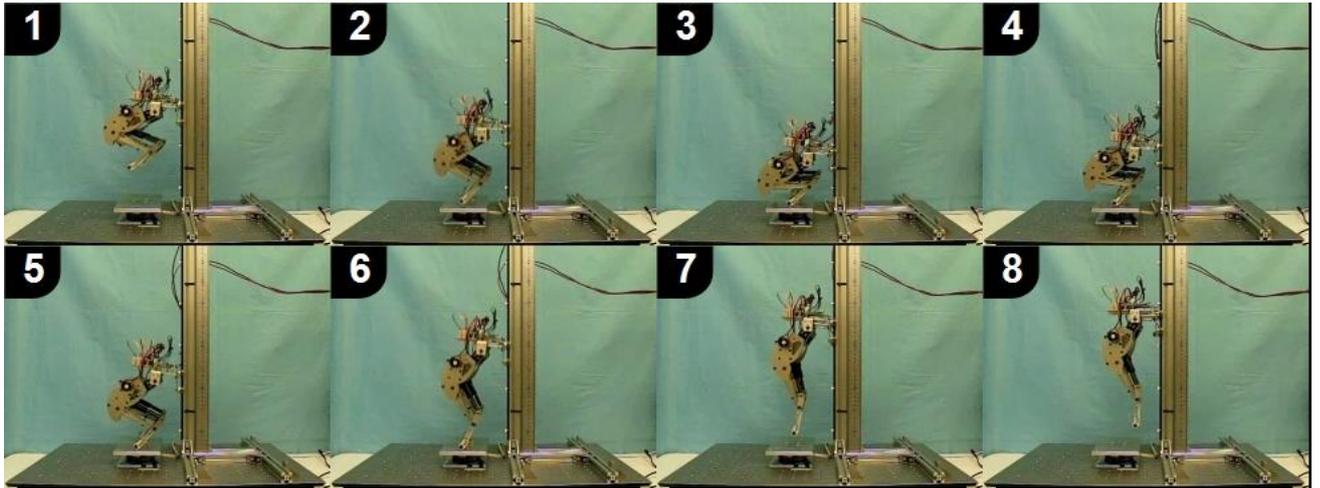


図 6 連続跳躍-弾性パラレルリンク

弾性パラレルリンクモデルでは滑らかな連続跳躍が行えた。対して、パラレルリンクモデルでは着地時の衝撃でギアが破損してしまった。このことから連続跳躍という負担が大きい運動において、弾性パラレルリンクの持つ高いコンプライアンス性は非常に有効であるといえる。しかし、着地時に引き伸ばされたバネは跳躍動作に移行する前に収縮してしまい、保存された弾性エネルギーを跳躍に有効利用できていないことがわかった。現在の跳躍動作ではバネの長さの変化を考慮していないため、跳躍にバネの弾性エネルギーを有効に利用できていないと考えられる。そのため弾性パラレルリンクを最も有効に利用するためにはバネの伸長量を測定し、最もバネが伸展したタイミングで跳躍を行うといった運動計画が必要になると考えられる。

2.5 成果

本研究では、動物の腓腹筋及び筋腱複合体を規範とする弾性要素を有するパラレルリンク脚を提案し、提案した弾性パラレルリンク脚を持つロボット「Sugoi-NecoLegs」を開発し、実験により高い運動性能とコンプライアンス性を示した。今後の課題として、弾性パラレルリンク脚を有効利用するための運動計画が必要であることを確認した。

3・後方凸形状脚機構の開発

3.1 研究背景・研究目的

ヒューマノイドロボットの特徴である脚機構による移動方式は不整地に強く、様々な環境に対応しやすいという利点がある。しかし移動時の速度やエネルギーに関しては車輪駆動に比べ効率が良いとは言えない。様々な環境での利用を考える場合、駆動に必要なエネルギーは外部供給ではなく内部で補えることが望ましい。内部電源では利用可能なエネルギーは限られることから移動効率の向上は課題である。

歩行時の消費エネルギーを低減する方法としてロック機構を導入する方法がある。ロック機構は関節を固定する機構で、関節の状態を維持する際に関節を固定することでアクチュエータの仕事量を減らす効果が得られる。Kalin らはアクチュエータでリンクを回し膝を固定するロック機構 [1]を、Gijs らはリンク構造によるロック機構 [2]を提案している。モータや電磁磁石等を利用した

ロック機構は関節を固定、フリーにするタイミングを操作できるといった利点がある。しかし、関節の駆動用とは別のアクチュエータなどを追加することで重量の増加や機構の大型化といった問題がある。リンク構造によるロック機構にも機構の大型化や遊脚中などロックの必要ないタイミングでもロックが作動するといった問題がある。

本研究では歩行動作に着目し、立脚時のみ擬似的なロックが作用する後方凸形状脚機構の考案および開発を行う。この後方凸形状脚機構によって歩行時のロボットの膝関節での消費エネルギー低減化を図る。

3.2 後方凸形状脚機構

図 1 に後方凸形状脚機構の簡易モデルを示す。凸形状機構はももリンクとすねリンク。ストップパで構成されている。ももとすねのリンクは膝関節が後方に凸となるように曲がっており、膝関節には伸展状態以上曲がらないようにストップパがついている。

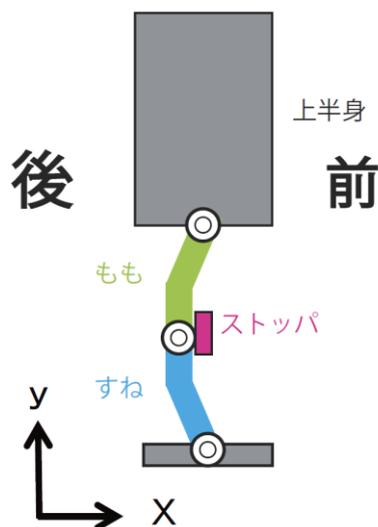


図 1 後方凸形状脚機構の簡易モデル

立脚時に膝が伸展している場合は床反力と上部の重量によって膝関節に伸展方向へのトルクが加わる。しかし、膝関節にはストップパにより伸展状態以上は曲がらないため、ももリンクはストップパで支えられる。これによりももリンクとすねリンクが固定されリンク一つの場合と同じ働きをすると期待できる。この重力と床反力を利用した後方凸形状脚機構による機能を擬似ロック機能と呼ぶこととする。この機構は床反力がない限り擬似ロック機能は働かないため、足裏が地面に設置しない遊脚時は膝関節をフリーの状態にすることができる。

後方凸形状脚機構の形状設計のために簡易モデル（図 1）のパラメータを設定する。各パラメータは市販されているホビーロボットのチョロメテと実際の人間の数値を参考に設定した。参考にした数値と設定したモデルの数値を表 1 に示す。

表 1 参考データおよび簡易モデルのパラメータ

人間		チョロメテ		簡易モデル	
長さ	重さ	長さ	重さ	長さ	重さ

	[cm]	[kg]	[cm]	[kg]	[cm]	[kg]
全身	175	60	37	1.4	36	1.5
上半身	83	33.5	11	0.82	13	0.8
もも	43	4.5	7	0.12	8	0.15
すね	41	2	7	0.04	8	0.05

人間の関節には中心付近ではほぼゼロで、一定角度以上に曲げる、もしくは伸ばした際に非線形に上昇する反力が発生する特性がある。この特性により人間の膝関節には伸展時に 10.42[Nm] の反力[3] が発生する。この反力を人間とロボットの質量比で割った 0.2605[Nm] を超えるトルクが直立状態で膝関節に発生するようにリンクを設計する。直立状態で膝関節に発生するトルクを算出し、発生する静トルクが 0.2605[Nm] を超えることと、股関節と足首関節に加わるトルクはほぼゼロ、今回は 0.002[Nm] 以下となることと、股関節と足首関節の x 軸方向の位置のずれが小さいことを条件として選定した。リンクの曲げ位置、曲げ角度などのパラメータを図 2 のように設定する。この際のリンク形状は、計算および 3 つの条件から選定を行った結果から表 2 とした。

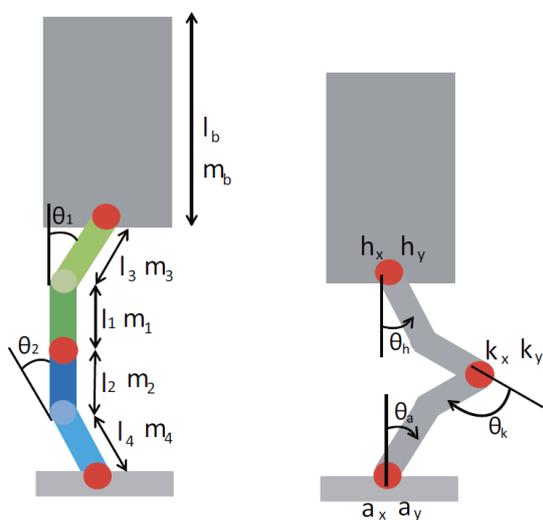


図 2 簡易モデルのリンク曲げ位置と角度

表 2 ももリンクとすねリンクのパラメータ

もも曲げ位置	もも曲げ角度	すね曲げ位置	すね曲げ角度
(l1)	($\theta 1$)	(l2)	($\theta 2$)
0.007[m]	23[deg]	0.008[m]	21[deg]

3.3 後方凸形状脚機構ロボットの試作と実験

設計をもとに試作した実機 (図 3・図 4) を用いて本提案の効果検証を行った。

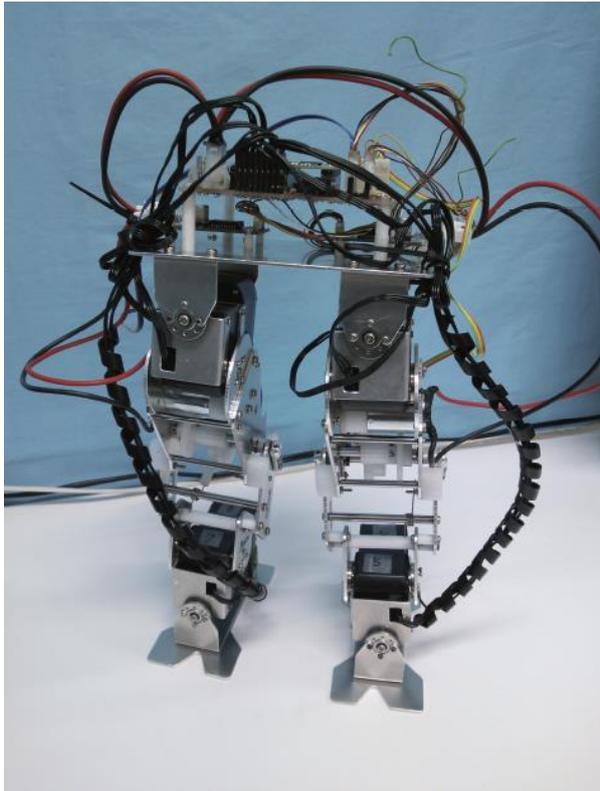


図 3 実機外観



図 4 膝関節拡大図

平坦な床での歩行動作実験

平坦な床面で歩行を行い、後方凸形状脚機構がある場合と後方凸形状脚機構がない従来の機構の

場合において行い効果を比較検討する。凸形状機構では伸展歩行のみを、従来の機構では伸展歩行と屈曲歩行の2パターンを行う。図5に各歩行動作での時間に対する右膝関節のトルク変化を、図6には左膝関節のトルク変化を示す。 T_{Rr} ：凸形状機構の右膝関節トルク、 T_{Rl} ：凸形状機構の左膝関節トルク、 T_{Er} ：従来の機構の伸展歩行の右膝関節トルク、 T_{El} ：従来の機構の伸展歩行の左膝関節トルク、 T_{Br} ：従来の機構の屈曲歩行の右膝関節トルク、 T_{Bl} ：従来の機構の屈曲歩行の左膝関節トルクとする。また、各歩行動作での総消費電力量を表3に示す。遊脚中は歩行動作によるトルクの違いが見られないことから、凸形状機構は遊脚中では擬似ロック機能が働かないと言える。また、立脚時のトルクは従来の機構の屈曲歩行と比べ低いことから、立脚時は凸形状機構によるトルクの補助ができていると言える。

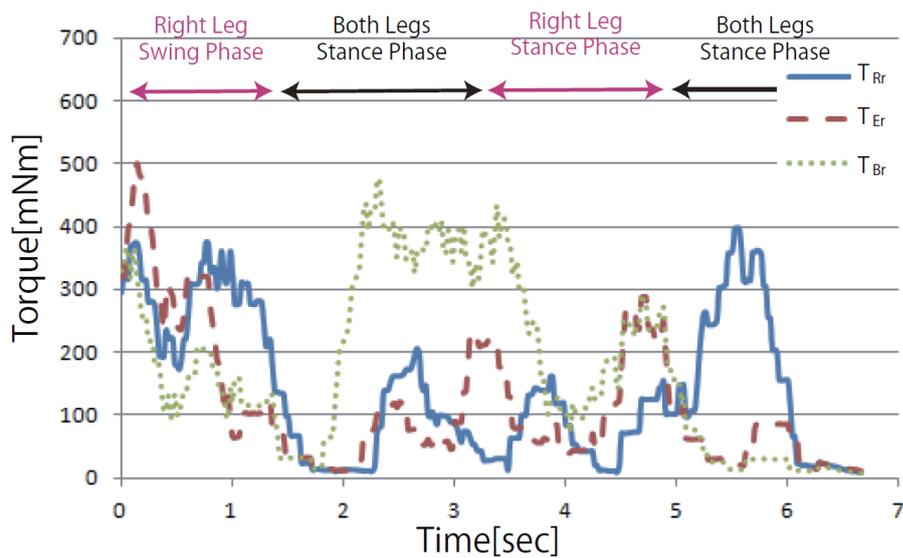


図5 右膝関節トルク変化

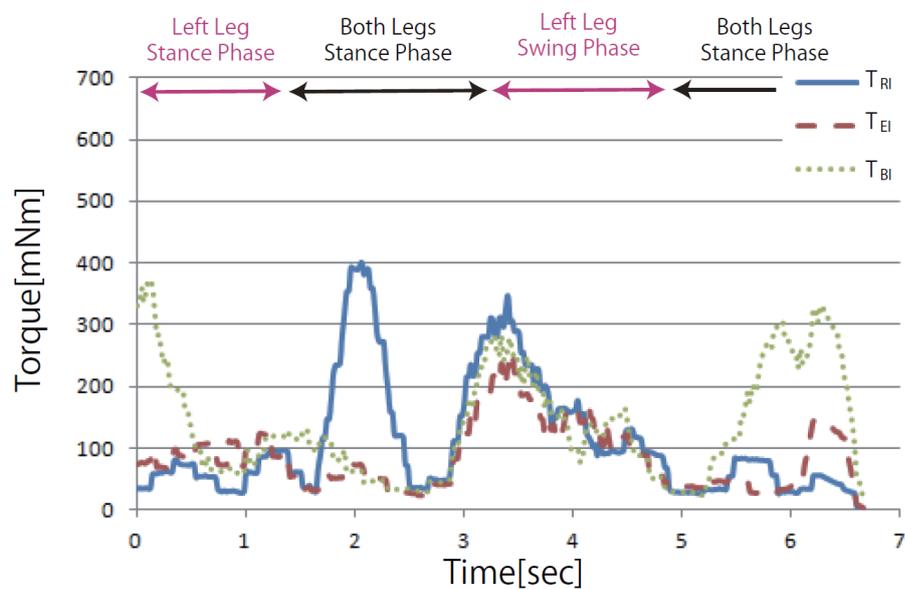


図6 左膝関節トルク変化

表 3 歩行時の総消費電力量(平坦な床)

歩行動作	右膝[J]	左膝[J]
凸形状機構	18.56	13.84
従来機構伸展	15.09	10.79
従来機構屈曲	22.86	18.48

しかし、従来機構での膝伸展歩行と比較した場合、凸形状機構の消費電力量の方が多くなっている。これは、体重移動で膝を屈曲させており、その際に擬似ロック状態を解除するのにトルクを必要とするためである。立脚時に常に膝を伸展させて凸形状機構によるトルクの補助を行えば、伸展時と同等以下の消費電力量での歩行が可能であると思われる。一例として、後方凸形状脚機構を搭載した場合はDC モータを駆動させず膝関節をフリーにした状態で歩行が可能かどうかの検証実験を行った。その結果、膝関節をフリーにした状態でも歩行が可能であることを確認できた。このことから、平坦な床での歩行でならば後方凸形状脚機構を用いることで膝関節の消費電力量を完全に抑えることも可能であることがわかった。

坂道での下り動作実験

坂道の下り動作を行い効果を検証する。坂の角度は 2.5[deg]～12.5[deg]まで 2.5[deg]ずつ変化させる。実験の結果、10[deg]の坂を下れたのは屈曲歩行のみ。12.5[deg]の坂はどの歩行動作でも下ることができなかった。歩行可能であった動作での総消費電力量を表 4 に示す。

表 4 坂角度に対する各歩行動作の総消費電力量

坂角度[deg]	歩行動作	右膝[J]	左膝[J]
	凸形状機構	20.53	18.01
2.5	従来機構伸展	16.73	13.99
	従来機構屈曲	26.17	21.68
5	凸形状機構	15.43	16.51
	従来機構伸展	14.29	15.26
	従来機構屈曲	22.94	16.36
7.5	凸形状機構	12.51	13.06
	従来機構伸展	14.15	13.68
10	従来機構屈曲	20.16	17.11
	従来機構屈曲	17.11	15.06

坂の角度が大きくなるごとに消費電力量が少なくなることが分かった。理由として、重力による前方方向に倒れようとする力が大きくなることが考えられる。立脚時の膝関節アクチュエータは伸展方向にトルクを出力しており、重力による力がアクチュエータの補助となり低減されたと思われる。特に、凸形状機構は重力を利用した機構であるため、重力による影響が増すことで機構による効果も高まり他の歩行に比べて大きく低減できたと考えられる。

3.4 成果

本研究では、後方凸形状脚機構を 2 足歩行ロボットに導入することで歩行時における膝関節のトルクおよび消費電力量の低減化を試みた。後方凸形状脚機構を持つ試作機を作製し、平坦な床での歩行動作実験、膝関節がフリーでの状態での平坦な床の歩行実験、坂道での下り動作実験による検証を行った。実験から、後方凸形状脚機構によって歩行時のトルクを補助し消費電力量を低減できることを確認した。また、安定性の向上や効率の良い歩行軌道の生成によりさらなる効果が期待できると予想される。今後は歩行時安定性の向上および歩行軌道の生成を行い、消費電力量のさらなる低減化を目指す。また、機構によるトルクの補助を考慮し、低減速比のアクチュエータを搭載した凸形状機構での効果についても検討する必要がある。

参考文献

- [1] Kalin B.Tnifonov, Shuji Hashimoto : “Active Knee-release Mechanism for Passive-dynamic Walking Machines and Walking Cycle Research”, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.179-184, 2008.
- [2] Gijs van Oort, Raffaella Carloni, Dian J.Borgerink, Stefano Stramigioli : “An Energy Efficient Knee Locking Mechanism for a DynamicallyWalking Robot”, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2003-2008, 2011.
- [3] Robert Riener, Thomas Edrich : “Identification of passive elastic joint moments in the lower extremities”, Journal of Biomechanics 32, pp.539-544, 1999.

4.7 複雑非線形システムのためのモデル自動生成と多目的制御器自動設計汎用ツールの開発

プロジェクトリーダー 1232013 遠藤隆宏

指導教員 田中一男 大竹博

目的、背景

本プロジェクトでは制御系と制御器の自動設計が可能なツールの開発を目標とする。

プロジェクトの背景は以下の2点があげられる。

- ・非線形制御のニーズ

強い非線形性を持つシステムを対象とした場合、線形近似では制御要求が満たせない場合があるため。

- ・制御目標に対してモデルが変化する可能性

制御要求によってはモデルの非線形特性が変化し同一の制御器では制御できなくなる可能性があるため。

以上より

- 1, 非線形システムの制御系設計を行うことができる。

- 2, オンラインでモデルの変化に対応して自動的に制御系の生成を行う。

という2点を満たす制御系設計ツールの開発を行う。

制御系設計には当研究室が取り組んでいるファジィモデルに基づく制御[1]を取り入れる。

本研究の有効性、独創性について以下に示す。

- ・有効性

目標とする自動設計汎用ツールを開発することで以下のような有効性が得られると考えられる。

例えばトリム点が無数にある様な航空機等の制御において、それぞれのトリムに合わせた制御器をリアルタイムに生成し制御することができると考えられる。この事により、様々な状態の制御器をリアルタイムに設計することが可能である。従来の制御手法では不可能だった、さまざまな飛行状態への制御を可能とする。

Fig.1: 航空機モデルの高迎角状態例

- ・独創性

制御系設計のシステムには当研究室が取り組んでいる非線形制御手法の1つであるファジィモデルに基づく制御を用いて制御器の設計を行う。この制御手法では、他の非線形制御手法に比べて「簡単に・自然に・効果的に」非線形制御を実現できることが特徴である。ファジィモデルに基づく制御では高度な数学技術を必要とせず、非線形システムから高木・菅野 (T-S) ファジィモデ

ルという線形なモデルを作成し、このファジィモデルに対して並列分散的補償（PDC）の考え方をを用いることにより線形な制御器を設計する。ファジィモデルに基づく制御は Sector nonlinearity の考え方をを用いてファジィモデル化する際に「global sector」と呼ばれるセクターを見つけることが出来ればシステムは大域的な非線形を保証されたといえる。よって、この考え方をを用いて制御対象のシステムを記述出来れば、制御対象の非線形性を損なうことがないまま制御器の設計を行うことができる。

1 制御システム

1.1 システム

制御対象の挙動を記述する非線形方程式を入力する事で制御モデルの自動構築と制御器設計を行うようなシステムとする。

自動設計汎用ツールは 2 つのブロックに分ける事ができる。オリジナルの非線形システムに対する制御系の生成を行うプログラムと、得られた制御系に対して制御器の設計を行うプログラムである。制御系の生成では非線形システムを高木・菅野のファジィモデルで表現する。制御器設計では、並列分散的補償（PDC）の考え方に基づいて制御器を構築し線形行列不等式（LMI）を解くことによって制御器のフィードバックゲインを決定する。また、制御対象は自動設計汎用ツールから与えられた制御器を用いて制御ループを繰り返す、その際モデルの更新が行われた場合は自動設計汎用ツールにてそのつど制御器の再設計が行われる。全体のシステム図を Fig.1 に示す。

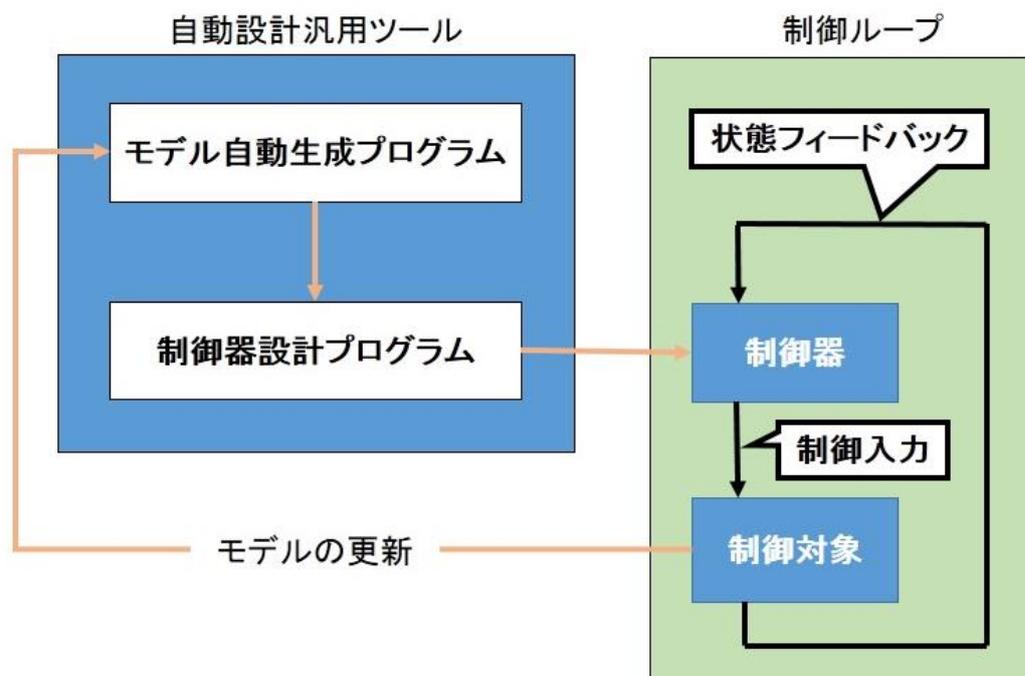


Fig.1:システム図

以降では制御系を生成するプログラムと制御器設計を行うプログラムについて説明する。

1.2 モデル自動生成プログラム

非線形システムを高木・菅野のファジィモデルで表現する。非線形システムが物理モデルで表現可能なときは、その物理モデルから sector nonlinearity の考え方をを用いてファジィモデルを構築する。ファジィモデルは(1) 式に示すような If-then 形式でモデルを表現する。また、(1) 式のように後件部 (then 部) に線形モデル (もしくはアファインモデル) を有するものを高木・菅野のファジィモデル (以降, T-S ファジィモデル) と呼ぶ。

Model Rule i :

$$\begin{aligned} &\text{If } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \cdots \text{ and } z_p(t) \text{ is } M_{ip} \\ &\text{then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $i = 1, 2, \dots, r$, $z_p(t)$ 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、または、時間そのものが用いられる。 $M_{ij}(h = 1, 2, \dots, p)$ はファジィ集合である。ファジィシステム全体は各規則の後件部の線形モデルをファジィ結合することによって表される。状態 $\mathbf{x}(t)$ と入力 $\mathbf{u}(t)$ を与えることによって、ファジィシステムの出力は次のように計算される。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{z}(t)) \{ \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \}}{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{z}(t))} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(\mathbf{z}(t)) \{ \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$w_i(\mathbf{z}(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)) \quad (3)$$

ここで

$$h_i(\mathbf{z}(t)) = \frac{w_i(\mathbf{z}(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{z}(t))}$$

である。 $h_i(\mathbf{z}(t))$ はメンバシップ関数と呼ばれる If-then 規則の基準化された重み関数であり、次の条件を満たす。

$$h_i(\mathbf{z}(t)) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, r$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(\mathbf{z}(t)) = 1$$

ファジィモデルに基づく非線形制御ではこの T-S ファジィモデルが用いられる。非線形システムが物理モデルで表現可能なときは、その物理モデルから T-S ファジィモデル(2) を構築する。本研究においては sector nonlinearity という考え方に基づいてモデルを構築した。

1.3 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、それぞれのファジィ規則に 1 対 1 に対応した制御器を作り、それらの制御器をファジィ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。

Control Rule i :

$$\begin{aligned} &\text{If } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_p(t) \text{ is } M_{ip} \\ &\text{then } \mathbf{u}(t) = -\mathbf{F}_i \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

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(If 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。

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

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、ファジィ制御系は次のように記述できる。

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

ここで、線形制御理論に基づいて \mathbf{A}_i 、 \mathbf{B}_i のみからフィードバックゲイン \mathbf{F}_j を求めても、制御系全体(5)の安定性を保証できないことが知られている。これを踏まえて、2次形式リアプノフ関数に基づくファジィ制御系全体(5)の安定性を保証する条件が導出されており、これは線形行列不等式(LMI:linear matrix inequality)の形で表現されている。LMIの特徴は、その形式で表現された問題の解があるならば解けるということである。LMIに基づく制御器設計のもう1つの特徴は、これらの条件を同時に解くことによって、全ての条件を満足する制御器が設計可能であることである。LMIに基づく制御器設計は非常に効果的な制御器設計法である。自動設計ツールに組み込んだLMI条件は速応性を実現する条件、アクチュエータ出力の飽和を防止する条件、出力値の幅を制限する条件の3つである。

それぞれの条件を以下に示す。

- 速応性を実現する条件

$$X > 0, Y \geq 0, \alpha > 0$$

$$-XA_i^T - A_iX + M_i^T B^T + BM_i - (s-1)Y - 2\alpha X > 0$$

$$2Y - XA_i^T - A_iX - XA_j^T - A_jX + M_j^T B_i^T + B_iM_j + M_i^T B_j^T + B_jM_i - 4\alpha X \geq 0$$

- アクチュエータ出力の飽和を防止する条件

$$\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}(0)^T \\ \mathbf{x}(0) & X \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$\begin{bmatrix} X & M_i^T \mathbf{u}_j^T \\ \mathbf{u}_j M_i & \mu_j^2 I \end{bmatrix} \geq 0$$

μ_j は入力値を制限するためのパラメータである.

- 出力値の幅を制限する条件

$$\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}(0)^T \\ \mathbf{x}(0) & X \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$\begin{bmatrix} X & X C_k^T \\ C_k X & \lambda_k^2 I \end{bmatrix} \geq 0$$

λ_k は出力値を制限するためのパラメータである.

2 制御シミュレーション

作成した自動設計汎用ツールの検証をシミュレーションにて行った. 例題として F16 モデル[2]を用いる事で検証を行った. オリジナルのダイナミクス[2]に制御器を適用することでシミュレーションを行った. 制御系設計では簡単化のため水平方向のみの運動を考えた制御モデルを用いて行った. Fig.1

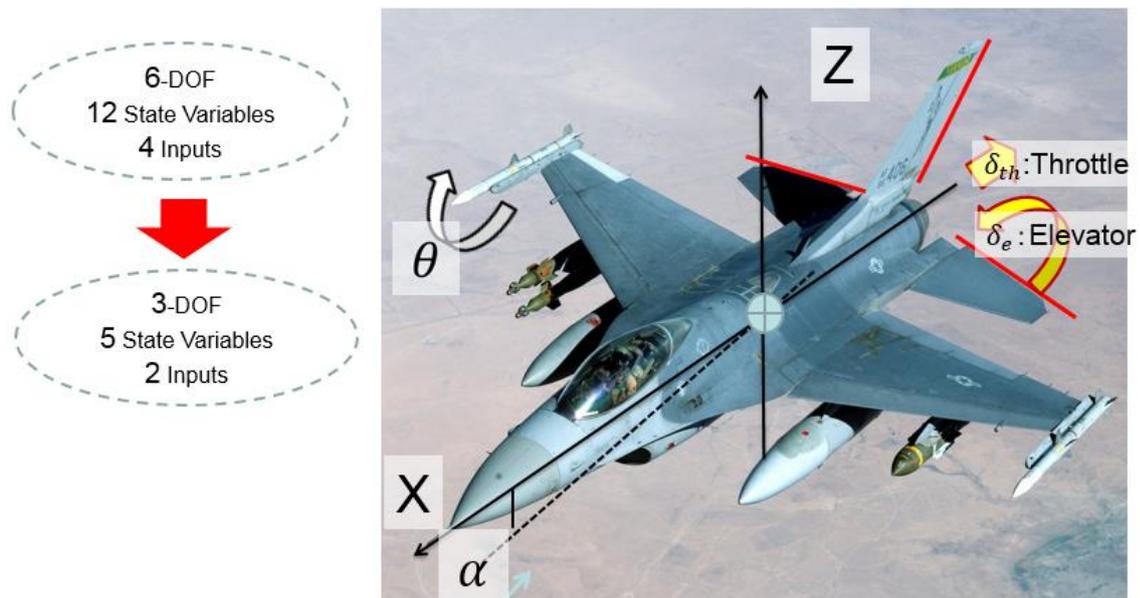


Fig.2:水平方向のモデル

得られた制御器で高度一定制御を行った。制御モデルの状態変数は速度 V_T [m/s], 迎え角 α [rad], ピッチ角速度 q [rad/s], ピッチ角度 θ [rad], 高度 z_E [m]の5状態変数である。またその時の入力はスロットルとエレベータの2入力となっている。目標状態が変更されるたびに新たな T-S ファジィモデルが生成される。生成したファジィモデルに対して LMI を解き目標状態に応じた制御器を設計し直す。

2.1 制御モデルと制御器設計

自動設計を行う際に用いる T-S ファジィモデルを以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{\alpha} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & 0 \\ a_5 & a_6 & a_7 & 0 & 0 \\ z_1 & z_2 & z_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_8 & 0 & a_9 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ \alpha \\ q \\ \theta \\ z_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{10} & a_{11} \\ a_{12} & a_{13} \\ 0 & a_{14} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{th} \\ \delta_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

状態変数 x と入力 u は

$$x = [V_T, \alpha, q, \theta, z_E]^T$$

$$u = [\delta_{th}, \delta_e]^T$$

である。

z_1, z_2, z_3 はファジィ化された迎え角, ピッチ角速度, 機体速度に関する非線形要素である。これらの変数の sector nonlinearity を用いて定めた範囲を以下に示す。

- 迎え角: $-20[\text{deg}] \sim 20[\text{deg}]$

- ピッチ角速度: 45[deg/s]～45[deg/s]
- 機体速度: 100[m/s]～200[m/s]

目標高度が変化するたびに z_1 , z_2 , z_3 のファジィ化領域は変化して T-S ファジィモデルは新たに生成し直される. 非線形要素を以下に示す.

$$\begin{aligned}
z_1(V_T, \alpha, q) &= \frac{\rho S \bar{c} V_T}{I_y} \left\{ C_x(\alpha, \delta_{es}) + \frac{q \bar{c}}{2 V_T} C_{xq}(\alpha) \right. \\
&\quad \left. + (x_{cgr} - x_{cg}) \left(C_z(\alpha, \delta_{es}) + \frac{q \bar{c}}{2 V_T} C_{zq}(\alpha) \right) \right\} \\
&\quad - \frac{\rho S \bar{c}^2}{4 I_y} \left\{ C_{mq}(\alpha) + (x_{cgr} - x_{cg}) C_{zq}(\alpha) \right\} \\
z_2(V_T, \alpha, q) &= \frac{\bar{q} S \bar{c}}{I_y} \left\{ a_m + \frac{q \bar{c}}{2 V_T^2} a_{mq} + (x_{cgr} - x_{cg}) \left(a_z + \frac{q \bar{c}}{2 V_T^2} a_{zq} \right) \right\} \\
z_3(V_T, \alpha, q) &= \frac{\bar{q} S \bar{c}^2}{2 V_T I_y} \left\{ C_{mq}(\alpha) + (x_{cgr} - x_{cg}) C_{zq}(\alpha) \right\}
\end{aligned}$$

またその他の T-S ファジィモデルの要素については[3]と同様の定義である.

制御器設計では速応性を実現する条件, アクチュエータ出力の飽和を防止する条件, 出力値の幅を制限する条件の3つを LMI 条件として解き制御器を設計した.

この時の入力制限 μ_j , 出力制限 λ_k の値は

$$\mu_1 = 1, \mu_2 = \frac{25}{180} \pi$$

$$\lambda_1 = \frac{20}{180} \pi, \lambda_2 = \frac{45}{180} \pi$$

である.

2.2 シミュレーション

今回のシミュレーションで制御系設計を行う際の演算に用いた計算機のスペックと計算環境を示す.

CPU: Intel® Core™ i7-3770 CPU @2.93 GHz

Memory: 8.0GB

MATLAB version: R2011b

以降のシミュレーションは制御器の自動設計の有効性の検証を行ったものである.

以下の2点の制御目標を設けそれぞれの制御目標に対しての制御器をリアルタイム設計し制御器を反映させたシミュレーションを行った. 目標地点の定義を Fig.3 にて示す.

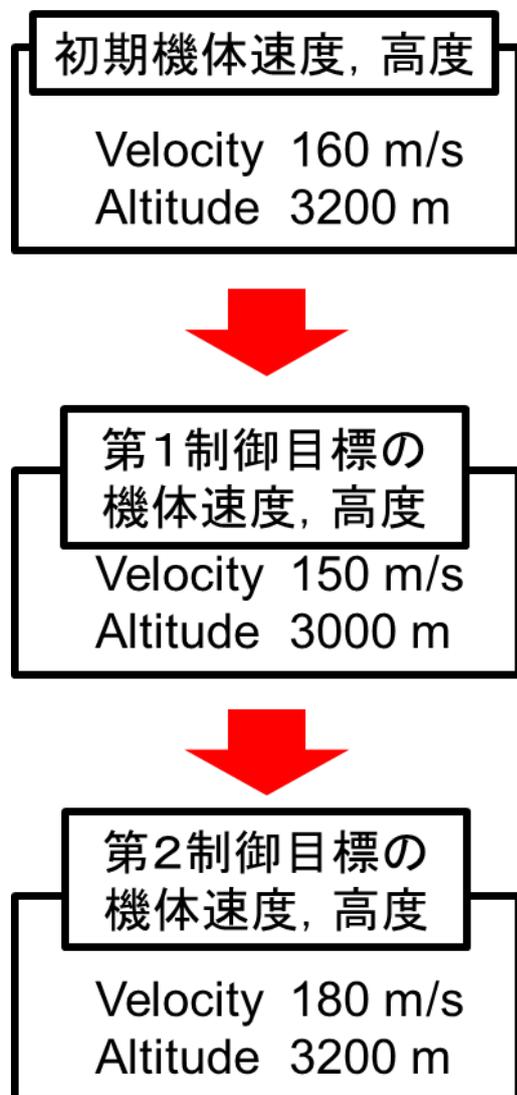


Fig.3:目標地点定義

この制御目標定義でのシミュレーション結果は以下ようになった.

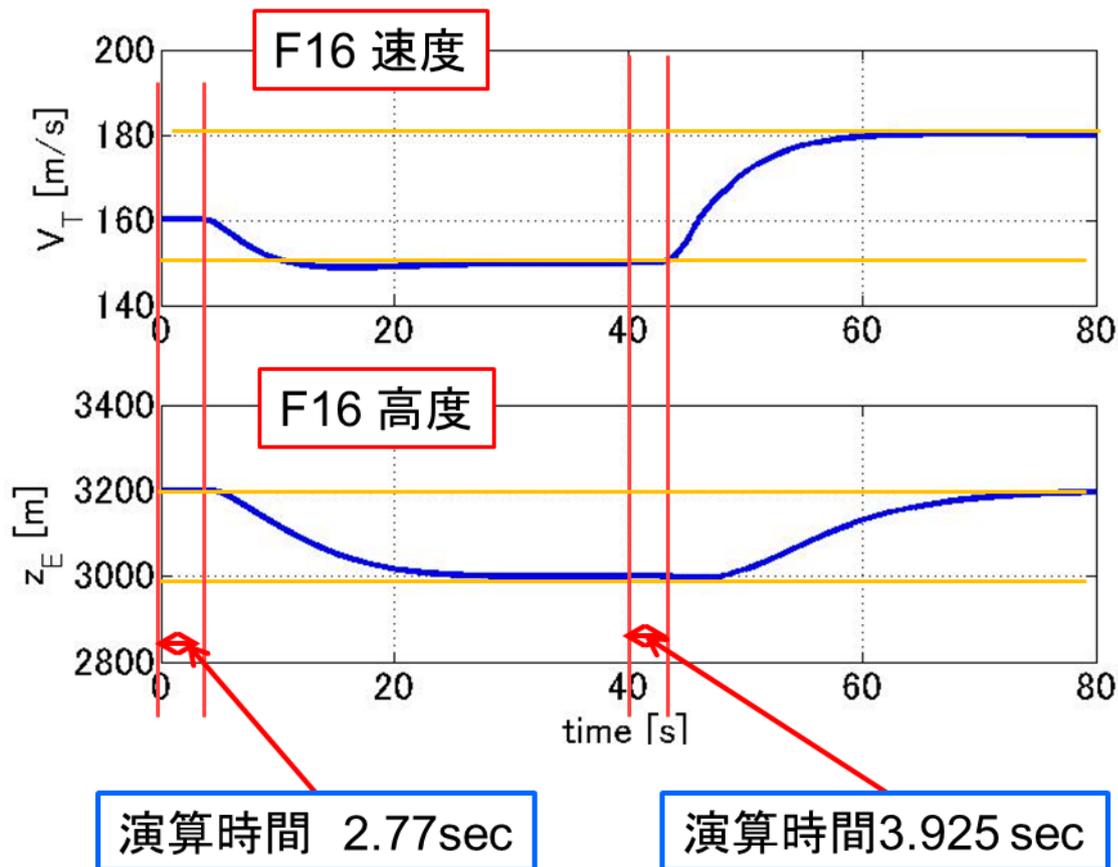


Fig.4:自動制御器設計ツールシミュレーション結果

第1目標に向けての制御器設計に要した演算時間は2.77[sec]で第2目標地点では3.925[sec]であった。演算の後制御器が機能して目標地点に収束しているのが分かる。以上より自動制御器設計プログラムがリアルタイムに制御器を設計している事が分かる。

3 予算および支出

予算：220000円

支出

HILSシステム検証用マイコン(Fig.5)×2 120000円

演算用デスクトップPC 100000円



Fig.5:HILS用マイコン

4 結論

制御系のオンライン生成と制御器の自動設計を行うツールの開発を行った。制御系設計には当研

研究室が取り組んでいる T-S ファジィモデルに基づいた制御系設計を取り入れ、非線形な制御系においても制御器設計を可能とした。また、提案したツールの検証のため F16 戦闘機モデルを用いたシミュレーションを行った。高度一定制御を行うシミュレーションにおいてオンラインで制御器設計が行われている事を確認した。また、設計した制御器を用いる事で目標高度へと到達している事も確認した。

5 今後の展望

本研究では自動設計汎用ツールの開発とその検証をシミュレーションにて行った。今後は当研究室が研究を進めている HILS システムに本ツールを組み込むことでより実機に近い環境でのシステム構築を目指す。最終的には HILS システムで検証を行ったシステムを実機に適用し、Fig.6 に示す機体を用いて実機実験を行う。シミュレーションでは高度一定制御のみを行ったが実機では方向制御も取り入れることを目標とする。



Maveric

Fig.6:実機実験用機体

参考文献

- [1] K. Tanaka, Hua O. Wang, “Fuzzy Control System Design and Analysis”, 2001
- [2] Lars Sonneveldt, “Nonlinear F-16 Model Description V0.3”, 2006
- [3] K. Yamaguchi, K. Tanaka, “Tanaka, Fuzzy Modeling and Control of Nonlinear Aircraft Model”, 2012
- [4] D. Ogura, Y-J Chen, M. Tanaka, K. Tanaka, “A Practical Design Approach to Automatic Model Construction and Controller Design for F16 Aircraft”, iFuzzy , Taipei, 2013

4.8 ワイヤ駆動式精密姿勢位置制御システムの開発

指導教員：青山尚之教授、金森哉史准教授

プロジェクトリーダー

往古直之 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. 入江優花 知能機械工学専攻 博士後期課程 3年
2. 見崎大吾 工学院大学機械システム工学科准教授
3. Montree Pakkatoke タイ国立計量研究所・主任研究員
4. Sawai Pongswatd キングモンクット工科大計測工学科准教授

1. 諸言

近年、バイオ分野の生体細胞利用技術などで自動機械の高度化が進み、より高いレベルの機器が要求されている。このような技術発展のためには、製造・研究の現場において顕微鏡観察下でより複雑な微細操作が必要不可欠となっている[1][2]。これに伴い、様々な要求に応じた微細操作システムが開発されてきた。現在の微細操作システムは、倒立顕微鏡にマイクロマニピュレータを搭載することにより、ツール先端を精密位置決めすることで顕微鏡下における位置決め操作が可能となっている。このような装置は自動化されたシステムが開発されており、バイオテクノロジーや医療分野で活用されている。しかし、それらの多くは顕微鏡周辺に何らかのマニピュレータを固定して取り付ける比較的大型かつ据え付け型の装置であり、価格が高価であることが課題として挙げられる[3]。

本研究では、顕微鏡下で扱う微細操作システムに適用可能な小型で高自由度なマニピュレータとして、ワイヤ駆動式マニピュレータを提案、設計試作し、有用性を明らかにすることを目的とする。ワイヤ駆動式マニピュレータにより、ワイヤ駆動の特徴である小規模な機構でありながら高自由度・高ストロークな動作の実現が期待される。特に本研究装置では、Fig.1のような小型でありながら傾斜角 θ 及び回転角 φ に姿勢制御し、さらに平面移動可能な自由度を有することで、他のマニピュレータにはない広範囲な自在動作が可能となり、多様な用途に対応できることが期待される。本論文では、マニピュレータで操作させたインジェクタの位置・角度を計測することで、ワイヤ駆動方式の有用性を検証し、自由度の高い動作が可能であることを示す。また、開発したワイヤ駆動式マニピュレータの高精度化について述べる。

2. ワイヤ駆動式マニピュレータ

小型かつ多自由度な動作を実現するため、Fig.2のように3本一組のワイヤをインジェクタの上段と下段の二箇所にて設け、合計6本のワイヤによる制御システムを構築した。この構造により、ワイヤ駆動方式で多自由度な動作が行えることを確認するため、試作したワイヤ駆動式マニピュレ

ータの上段と下段のワイヤ接続点は 1 点で接続されていると近似し、動作時のワイヤ制御では複雑な制御を用いなくて行った。このため、ワイヤ下段は平行移動として機能させ、ワイヤ上側は角度制御として機能させた[4]。

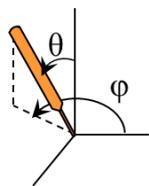


Fig.1 傾斜角 θ ・回転角 φ

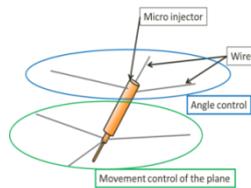


Fig.2 システム構成

3. 改良型ワイヤ駆動式マニピュレータ

改良型ワイヤ駆動式マニピュレータの目標仕様として、平面移動範囲を直径 10mm で移動分解能を 0.1mm とし、誤差を 0.01mm とした。角度制御においては、回転角 φ を $0^\circ \leq \varphi < 360^\circ$ 、傾斜角 θ を $-30^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ とし、角度分解能が 1° で誤差を 0.1 とした。以上の目標仕様を満たす装置として、Fig.3 を開発した。装置全体の大きさは $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 90\text{mm}$ である。また、Fig.3 の装置中央に配置されているインジェクタも開発した。開発した装置の性能評価として、平面移動・傾斜角・回転角動作の確認を行い、開発した装置の精度を検証した。

3.1 制御方法

任意の位置へインジェクタを制御させるため、装置の中心を原点として、インジェクタの針先の XY 座標とインジェクタの傾斜角 θ 及び回転角 φ の入力値から制御を行うシステムを開発した。入力値に対して、必要となる各ワイヤの長さを制御することで目的の動作を行わせる。各ワイヤ長を導出するには、入力値に対してインジェクタのワイヤ接続部の空間座標を導出することが求められる。Fig.4 の左図は、インジェクタが傾斜した際のインジェクタのワイヤ接続点を輪切りにして上方からみたイメージ図である。このときワイヤ接続部は Fig.4 の右図のようになり、この座標を導出することが求められる。この導出には、インジェクタ傾斜方向によって複数の場合分けを要する球座標系を用いることで可能である。ここでは一例として、回転角方向 $90 \sim 180^\circ$ へ傾斜させた場合の一つのワイヤ接続部の座標の理論式を数式(1)~(3)として示す。

$$\psi = \varphi - \beta - 90 \quad (\psi > 0) \quad (1)$$

$$\beta = (\varphi - 90)\cos\theta \quad (90 < \varphi < 180) \quad (2)$$

$$\alpha = \theta\sin(\varphi - 90) \quad (90 < \varphi < 180) \quad (3)$$

3.2 平面移動実験

平面移動精度を検証するため、Fig.3 のインジェクタを 0.174mm 毎の移動量で XY 平面上の原点を中心とする直径 1mm の円を描く動作を行った。XY 平面上の X 軸正方向を 0° とし、 0° 方向から 20° ごとに 360° まで動作させて測定を行った。この時のインジェクタの傾斜角度についても測定し、平面移動時の精度を検証した。円動作の軌跡を測定するため、インジェクタの上端にマーカを設置し、装置の上方に設置した定点カメラで撮影して他の測定とは別に円軌道の測定を行った。また傾斜角度の測定は、インジェクタの側面に二箇所のマーカを設け、これを 2 方向に配置したカメラで撮影することによりインジェクタの姿勢を測定する。装置の Y 軸方向のカメラによる画像は、マーカの三次元情報として X,Z 方向の情報が取得でき、X 軸方向のカメラからは Y,Z

情報が得られるため、それぞれの画像情報から回転角と傾斜角の値を算出した。実験結果は Fig.5 の緑の点で示す。目標位置と実測値との距離の差を比較した結果、平均誤差が約 0.033mm で入力値との誤差が 19%であった。また、この時の傾斜角 θ の平均誤差は 0.05°であった。この結果から、移動時の傾斜角度の精度は高いが、平面移動の精度が低いことが確認されたため、位置決め精度の改善が必要であることがわかった。

3.3 角度制御実験

開発した装置による傾斜角・回転角方向の動作について検証を行った。角度の測定は、3.2 と同様である。傾斜角の精度を検証するため、回転角方向の 0°,45°,90°,135°,180°の 5 つの方向に対して傾斜角 0°~30°までの範囲で 1°毎に傾斜させる実験を行った。Fig.6 に誤差が最も大きかった 135°方向への傾斜結果を緑の線で示す。実験結果から、傾斜角 30°の誤差は約 3.08°であった。また、傾斜毎の指令値との平均誤差は約 0.10°であった。傾斜角の誤差が最大約 3.08°であった理由として、傾斜角の指令値の誤差が 0.10°であり、この誤差が 30 度まで 1°毎に傾斜したことで累積し、結果として大きな誤差になったと考えられる。

次に回転角動作の検証を行った。回転角の動作は、任意の回転角に傾斜させていく場合の回転角精度と、歳差運動の場合の回転角精度が考えられるので、両方の検証を行った。任意の回転角に傾斜させていった場合の実験条件は、0°,45°,90°,...,315°の各回転角方向に対して、5°毎に 30°まで傾斜させて再度 5°毎に原点に戻る往復動作を行った。Fig.7 に誤差が最も大きかった回転角 90°方向の傾斜の結果を緑の線で示す。この結果から、最も誤差が大きい結果として回転角方向が 90°方向でおおよそ 3.19°であった。この誤差の原因は、移動量が大きいことによって、ワイヤがプーリ頂点から離脱してしまうことが原因であると考えられる。以上の結果から、回転角度方向への傾斜は目標精度を満たせておらず、高精度化が必要であると言える。

回転角動作として、歳差運動をさせた場合の回転角精度の検証について述べる。実験条件は、インジェクタが原点に傾斜角 0°で位置した状態から、傾斜角を 5°,10°,...,30°に傾斜させた状態を維持させ、それぞれの傾斜角の状態において回転角度方向に 0°,20°,40°,...,360°と 20°毎に回転させる測定を行った。測定方法は、インジェクタの後端に固定したマーカを Z 軸方向の定点カメラから撮影して行った。この結果、25°,30°の傾斜による測定は、測定中にワイヤがプーリから離脱し、制御不可能な状態になることが判明した。このため測定が行えた結果の一例として、傾斜角 5°の結果を Fig.8 に示す。結果は、傾斜角の平均誤差が 1.27°、回転角の平均誤差が 2.41°であった。誤差の原因は、ワイヤのプーリ頂点からの離脱が主要な原因であると考えられる。以上の結果から、25°以上の傾斜角を維持した回転動作は一周することができず、本装置における回転動作は目標としている動作で行えない条件が有ることがわかった。また、傾斜角・回転角動作は共に連続動作による累積誤差が影響し易いことがわかった。以上から、回転角動作の誤差が大きいため、改善が必要であると考えられる。

3.4 角度制御時のインジェクタ針先位置動作検証

これまではインジェクタの位置と角度について検証を行ってきたが、実際にインジェクタを対象物に適用するためには、インジェクタの針先の位置精度が重要である。このため、インジェクタの針先の位置精度を検証した。検証方法は、本装置で精度が低い動作である歳差運動で行った。実験条件は前節と同様に、5°の傾斜角を維持した状態で行った。針先を認識するため、インジェ

クタ先端部にもマーカを設置し、2方向からの測定で回転動作時の先端部の変位を測定した。実験結果を Fig.9 と Fig.10 の緑の線で示す。Fig.9 は、針先を X 方向から撮影して YZ 平面として測定した結果であり、Fig.10 は Y 方向から撮影して XZ 平面として測定した結果である。この結果から、XY 平面方向で $\pm 0.3\text{mm}$ 程度の変位が生じており、また傾斜角を 0° から傾斜させることで Z 方向に変位してしまうことが判明した。平面方向に変位が生じる原因は、ワイヤがプーリ頂点から離脱することによるワイヤ長制御の誤差が影響していると考えられる。Z 軸方向の変位の原因は、ワイヤの張力が影響していると考えられる。なぜなら、各ワイヤはある程度の張力がかかっている状態であり、インジェクタの針先を中心に傾斜することでインジェクタのワイヤ接合部の位置は Z 軸下方に変位し、このため全てのワイヤに上向きの力が発生すると考えられるためである。本システムでは、縦方向の変位は制御できないため、現状の機構ではこの誤差を修正することは難しいと考えられる。対応策としては、本装置自体を Z 軸方向へ変位させる機構にすることや、インジェクタの針先を伸縮させることが考えられる。また、Fig.9 と Fig.10 の結果で Z 軸の変位に差があるのは、カメラの設置角度が影響していると考えられる。

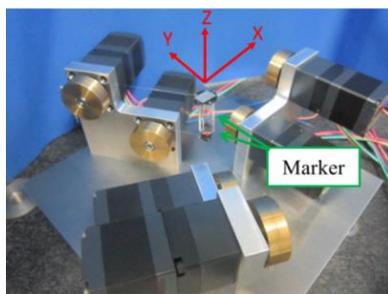


Fig.3 ワイヤ駆動式マニピュレータの外観

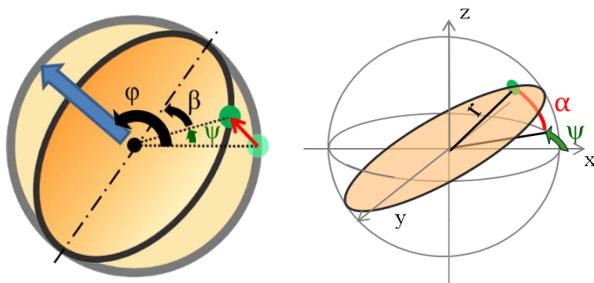


Fig.4 インジェクタ傾斜時のワイヤ接続部の変位イメージ

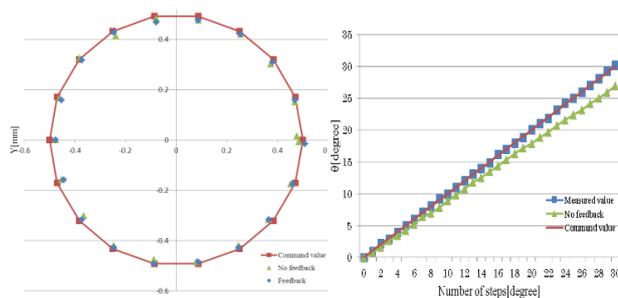


Fig.5 $\phi 1\text{mm}$ 円の軌跡

Fig.6 傾斜角測定結果

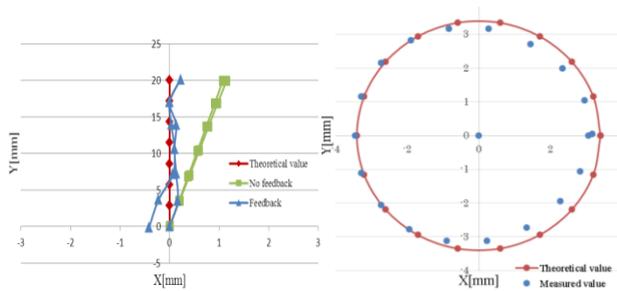


Fig.7 傾斜時の回転角精度 Fig.8 傾斜角 5°の歳差運動

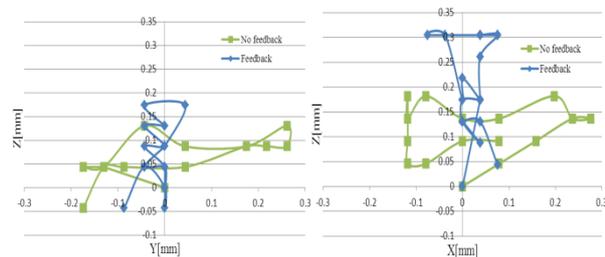


Fig.9 針先の YZ 平面変位 Fig.10 針先の XZ 平面変位

4. 改良型ワイヤ駆動式マニピュレータの高精度化

開発した装置による誤差が角度制御に対して大きいことが判明したため、その改善が必要である。誤差の影響として、ワイヤのプリー頂点からの離脱が主要な原因であると考えられるため、この原因を解決することが望まれる。しかし、動くプリーに対してハード的にワイヤを固定できるような機構にすることは難しいと考えられる。したがって、抜本的な改善策ではないが、誤差の影響がある状態において誤差分を測定し、その誤差分を補正する動作を行うことで誤差の影響を減らす手法を行うことにした。誤差を補正する方法として、これまでの測定で用いたカメラ画像による画像処理が有用であると考え、画像処理フィードバックを用いた。

4.1 平面移動実験

画像処理フィードバックの効果を検証するため、精度が不十分であった平面移動について画像フィードバックを適用し、検証した。実験条件は 4.2 と同様に行った。この結果を Fig.5 の青の点で示す。平均移動誤差が 0.014mm で誤差を 58%低減することができ、精度の向上に成功した。入力値に対する誤差が 8%であり、目標精度で動作でき、画像処理フィードバックの有用性が確かめられた。

4.2 角度制御実験

画像処理フィードバックにより、傾斜角・回転角精度の向上について検証した。傾斜角については、3.3 と同様の実験条件のもと、最も誤差が大きい結果であった回転角 135°方向に傾斜させた場合で行った。この結果を Fig.6 の青線で示した。30°まで傾斜させた最終的な誤差は 0.14°であり、フィードバック前の 3.0°の誤差に比べ高精度化に成功した。また、1°毎の指令に対する平均誤差は約 0.01°で平均誤差を 90%低減されたことから、連続した動作の累積誤差の影響が補正されていることがわかった。また、傾斜角の入力値に対して 1%の誤差で目標の精度で動作ができおり、傾斜角動作の高精度化が行えた。また、傾斜角動作においてもフィードバック処理の有用性が示された。

次に、任意の回転角方向に傾斜した際の回転角精度の結果として、最も誤差が大きい結果であった 90°方向の傾斜について実験を行った。実験条件は 4.3 と同様である。この結果を Fig.7 の青線で示す。この結果、30°まで傾斜した際の誤差が 0.65°であった。目標誤差の精度よりは大きい結果であるが、フィードバック処理を行う前の結果が 3.19°の誤差であり、誤差を 79%低減することができた。

歳差運動の場合の回転角精度の結果として、指令値に対して傾斜角度の誤差が最も大きかった傾斜角 5°の場合に対して実験を行った。実験条件は 3.3 と同様である。この結果、回転角 φ の平均誤差は 1.07°、傾斜角 θ の平均誤差は 0.01°であり、回転角 φ の誤差が 55%低減し、傾斜角 θ の誤差が 99%低減した結果を得られた。以上の結果から、フィードバック制御により、傾斜角・回転角動作の精度が向上し、その有用性を示せた。しかしながら、回転角方向への位置決め精度は目標としている精度に到達することができなかった。この動作の精度を向上させるには、フィードバック処理だけでなく、ワイヤがプーリ頂点から離脱させない機構にしなければ難しいことがわかった。

4.3 角度制御時のインジェクタ針先位置動作検証

インジェクタの針先の位置精度として、縦方向の変位については装置の仕様上補正を行うことができないが、XY 平面上では補正制御が行えるため、平面位置精度の向上を検証した。比較のため、実験条件は 3.4 と同様にして行った。実験結果を Fig.9 と Fig.10 の青線で示す。この結果、インジェクタの針先の XY 平面上の変位が $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の結果となった。フィードバックを行う前と比較し、誤差を 66%低減させることができた。したがってフィードバック処理の効果が確認された。しかしながら、平面移動精度としては不十分な結果であった。この問題を解決するためには、歳差運動時におけるワイヤがプーリ頂点から離脱する問題の改善が求められると考えた。また、この測定ではインジェクタの側面マーカを複数撮影する都合上カメラを離して測定していたことで測定分解能が 0.047mm であり、針先の測定としては精度が低い状態であったことも原因と考えられる。したがって、より詳細に測定を行うための方法として、他のセンサを併用するなどの複合的な測定による検証が必要であると考えられる。

5. 結言

本研究では、平面移動・傾斜角・回転角の制御が行えるワイヤ駆動式マニピュレータを開発した。ワイヤを用いることで目標とした動作を実現でき、また動作時の誤差を画像フィードバックにより補正できることを示した。平面移動・傾斜角・歳差運動時の回転角動作については目標精度で動作が可能であることを明らかにし、開発した装置の有用性を示した。しかし、回転角位置決め動作は画像フィードバックを用いても目標精度より大きな誤差があり、改善が必要であることがわかった。また、傾斜角が大きい場合の歳差運動は、ワイヤがプーリから離脱し、制御ができない条件があることがわかった。したがって今後の課題として、回転角動作の精度を向上させることが挙げられる。このためには、ワイヤがプーリから離脱することを防止する機構を実現することが、最も効果が高いと考えられる。

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、ASPEN2013 の参加費に関して、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、ご協力を頂いた入江優花氏、見崎大吾氏、Montree Pakkatoke 氏、Sawai Pongswatd 氏に感謝申し上げます。

参考文献

[1] 新井健生：マイクロマニピュレーション、バイオメカニズム学会誌 22(4)、(1998)、pp. 146 - 151.

[2] 新井史人：マイクロ・ナノマニピュレーション技術の将来展望、精密工学会誌 68(11)、(2002)、pp. 1389 - 1392.

[3] 仇中軍：顕微鏡下における細胞操作用マイクロマニピュレーションシステムの開発 - 画像情報によるマニピュレーションの自動制御 - 、精密工学会 2004 年度春季大会学術講演会講演論文集、(2004)、pp. 81 - 82.

[4] 往古直之,高橋修平,高屋翼,青山尚之.”ワイヤ駆動式精密姿勢位置制御システムの開発” ロボテイクスメカトロニクス講演会 2013 講演論文集, No.13-2 1A2-P17, Tsukuba, Japan, May 22-25, 2013

4.9 「対向微流動を用いた微小物の非接触把持システム」

報告者：学籍番号：1232008

氏名：市野塚 朝

指導教員： 青山 尚之

プロジェクト報告：

1. 諸言

近年、マイクロ操作や組立などの微細操作技術に対する需要は、バイオ医療応用、マイクロエンジニアリングのみならず多くの分野で増加している。微細操作技術は、機械的接触把持および非接触把持システムと 2 つのカテゴリに大別される[1]。機械的接触を持つシステムに対し、非接触把持システムは対象試料への物理的な損傷のリスクを低減することが可能である。非接触把持システムにはレーザー光や超音波を用いるなど、数多くの手法が提案されている。中でも、レーザーマニピュレーターは、強度の低い微小試料の操作を可能としていることからバイオテクノロジーで広く使用されている。しかしながら、レーザーが試料に対し熱損傷を引き起こすことがある。このような課題を解決する手法として、本研究グループでは顕微鏡下における微小流を用いた非接触把持システムの開発を行ってきた[2]。本システムでは、試料を液体環境内に保持したまま流れの力のみを用いて操作することで、試料に対し物理的な損傷を与えることなく三次元的な操作を可能とすることが期待される。また、本研究では、先行研究で動作が確認された 2 本の流れを用いたシステムから、用いる流れを 6 本に増やすことで操作性と安定性の向上を目指し、先行研究で課題となった対象物の作業領域外への飛び出しの抑制も行う。

2. 6本の流体を用いた非接触把持システムの試料の操作原理

本研究では、微小流を用いた非接触マニピュレーションの次のステップとして、6本の極細管を用いた三次元非接触マニピュレーションシステムを提案する。図 1 に微細管と試料の配置を示す。3本ずつ組にした 6本の同一線上に並ばない極細管を用いる。6本構造を用いることで、極細管単独の移動なく試料の回転が可能であり、3つの回転軸を用いることで三次元的に操作を行うことが可能となる。全管口から同量の流量を放出した時、対象物は作業空間の中央に位置決めされ、左右の流量を変化させた時、対象物は流量の小さい方へ移動する。また、対角に配置されている左右二本の管口から同量の流量を放出した時、対象物は二本の管が作る平面と垂直方向の軸で回転する。これらを実験的に検証する。

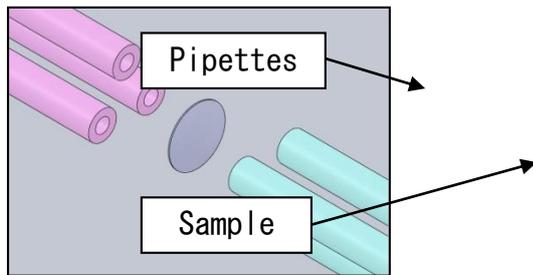


図1 6本の流れを用いた非接触マニピュレーションシステム

3. 6本管システムの動作確認試作実験

ガラス管, シリコンチューブ, 回転式ポンプを用いて三次元非接触マニピュレーションシステムを製作し, 6本管非接触マニピュレーションシステムの動作確認実験を行った. 本実験では, 第一段階として6本管を用いた場合の把持の可能性について確認した. 観察性向上の為, 本動作確認実験では対象物に2 [mm]角の紙片を用いた. 極細管の内径 $\Phi d = 500 [\mu m]$, 管の配置中心直径 $\Phi D = 3 [mm]$, 管の先端距離 $l = 10 [mm]$, また一本当たりの流量 $0.007 [m/s]$ の時, 対象物を極細管の先端に挟まれた空間である作業領域内に保持できる可能性を示した. 作業領域空間はおおよそ直径3 [mm]の面積と長さ10 [mm]を持つ円柱形状である. 対象物は作業領域内に留まったが, 試作実験において試料の作業領域外への離脱現象が数多くみられた. 試作実験における配置では, 二種類の方向の流れが重なり合う部分が存在せず, ひとつの方向の3点の流れと流れの距離の幅が試料よりも広く取られているため, その部分から試料が作業領域外へ流れ出る現象が起こっていると考えられる. これらの考察から, 図2に示すような管口部を試作した. 2種類の方向への流れの重なりあう部分を持ち, 重なりあう部分同士の距離を試料の直径に比べて狭く配置することで試料の作業領域外への離脱を防ぐことが可能であると考えられる. また, 流れが重なり合う部分同士の距離よりも直径が小さい試料を用いる場合においては試料の離脱現象が発生すると考えられる. 検証実験では対象物を直径200 [μm]のブラインシュリンプの卵とするため, 管口の配置は200 [μm]程度のサイズの対象物の作業領域からの離脱抑制が可能なものとする. 管口の内径を300 [μm]とし, 各管口の中心点が直径500 [μm]に内接する六角形の頂点の位置に配置した. この時の流れが重なる部分の間隔の最小値は134 [μm]であり, 試料の直径と比べて十分に小さく, 検証条件を満たしている. また, 動作確認実験において対象物は回転及び左右方向への揺れを示した. このような現象の要因として一つの回転式ポンプからの水流を6つの微細管に分岐し用いた為, 6本の流量が厳密に一定ではないと考えられる. また, 本実験で用いた回転式ポンプの水流には先行実験において脈動が観測されており, その現象が大きく影響していると考えられる. これらの問題点を解決するため, 大気圧の力を用いたピンチバルブ方式の流量制御システムを試作した. 流体制御システムは, 長時間のマニピュレート操作に必要な流量に対し直径300 [μm]の6本の管口から流速100 [mm/s]で1時間流し続けた時, 水源を1つ持ち, 6本の流路はそれぞれ個別のシリコン製のチューブを介してチューブ開閉部に接続されている. チューブ開閉部は独立した直動式アクチュエータを用いたピンチバルブ方式で流路の大きさを変化させることで流量を精密に制御する.

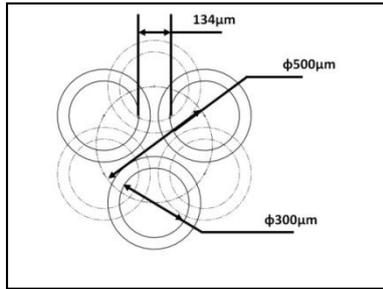


図 2 検証実験の管口配置構成の設計

4. 片側 3 本の流れを用いたマニピュレーションシステムの動作位置決め実験

試作した管口部 1 個と流体制御システムを用いて、片側の 3 本の流れを可視化、流れの確認を行った。3 本の流れの流速をおよそ $11.6[\text{mm/s}]$ とした時の背面視点 X-Z 面上の可視化した流れを図 3 に示す。Z 軸方向上下に分かれた 2 種類の流れの間に作業領域となる空間が確認され、この空間は十分に時間が経過した後も失われることはなかった。また、X-Y 面上可視化した流れは Y 軸方向上下に流れる 2 本の流れの間に作業領域となる空間が確認された。以上のように、X-Z 平面方向、X-Y 平面方向、両方向から確認した可視化した流れは作業領域となる空間をもち、6 本の流れを用いた非接触マニピュレーションシステムに用いる際に求められている条件を満たしていることが確認された。次に、管口部に対面するようにアクリル樹脂製の壁面を用意し 3 本の流れと壁面とを用いて対象物が位置決め可能かを実験的に確認した。各流速約 $9.02[\text{mm/s}]$ のとき、図 4 に示すように対象物が壁面と管口の先端部との間の空間に回転動作をしながらとどまることが確認された。対象物の振れ幅は X 軸方向およそ $0.54[\text{mm}]$ 、Y 軸方向およそ $0.61[\text{mm}]$ 、Z 軸方向およそ $0.43[\text{mm}]$ であった。この結果から図 5 に示すように、流れに囲まれた作業領域内に入った対象物は 3 本の管口からの流れに乗り、画面左から右の方向へ移動する。壁面にぶつかった 3 本の流れはそのほとんどが壁面に沿って外側へ流れるが、一部の流れは 3 本の流れの中央方向である作業領域内へ流れ込み画面右から左への方向の流れを生み出すことが予想される。作業領域内の対象物は壁面付近でその流れに押され画面右から左への方向に移動するが、壁面から十分に離れた位置において再び 3 本の流れに乗り画面左から右方向へ移動するという動作を繰り返すと考えられる。本システムでは、片側 3 本の流れが流れの面を形成し外側の 3 方向へ流れる力が対象物を中央部に留めつつ対象物を壁面に押しつける作用をもつことが期待されていたが、3 本の流れに囲まれた空間にある対象物は 3 本の流れの内側に向かう流れに乗り壁面から離れる方向に引き戻される現象が確認されたことから対向微流動を用いた非接触マニピュレーションシステムに用いる流れは管口から流れる噴流のみならず、本システムにおける 3 本の流れの内側方向への流れのような加えた流れが周辺空間内に流れでる経路が大きく支配的であることが明らかとなった。

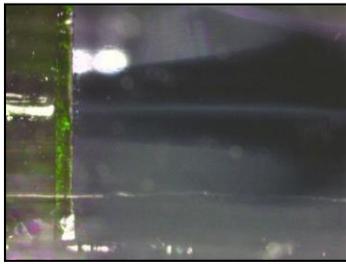


図3 3本の流れの可視化-XZ平面

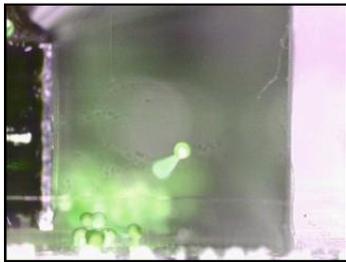


図4 3本の流れを用いた位置決め動作検証実験-位置決め動作

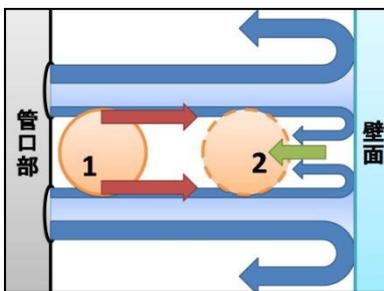


図5 3本の流れを用いた位置決め動作検証実験-流れと対象物

5. 6本の流れを用いた非接触マニピュレーションシステムの位置決め動作検証実験

試作した管口部と流体制御システムを用いて、対向した6本の流れを可視化、流れの確認を行った。流れの可視化には、右側の流体制御システム側に水溶性の黒色墨液を、左側の流体制御システム側に無色透明の蒸留水を充填し、無色透明の蒸留水内に流した。6本の流れの流速をおよそ70.5[mm/s]としたときのX-Z面における可視化した流れを図6に示す。対面した管口部から発せられる着色された右側の流れと無色の左側の流れが画面中央部の作業領域において衝突し、力が釣り合う境界面を形成していることが確認された。また、左側の流れをおよそ66.4[mm/s]に変更したとき、力の中立点は画面左側に移動しその場所で境界面を形成していることが確認された。これにより、対象物のX軸方向への移動動作の可能性が示唆された。次に、6本の流れを用いた非接触マニピュレーションシステムを用いて、ブラインシュリンプの卵を対象物とした位置決め動作の検証実験を行った。右側3本の流れをおよそ30.2[mm/s]、左側3本の流れをおよそ12.5[mm/s]とした時の対象物のX-Z面における対象物の動作の様子を図7に示す。前項で確認された対象物の動作と同様に図の左の3本の流れの内側の位置に留まったが、対象物は3本の流れ

を用いた場合と比べ大きく回転していることが確認され、その対象物が回転しながらも留まる位置は3本の流れを用いた場合に比べ左側にある様子が確認できた。図8に示す通り、これは前項においてアクリル樹脂製の壁面が担っていた流れのぶつかる部分が反対方向からの流れに置き変わった状態であると考えられる。また、流速をおよそ70.5[mm/s]とした時、対象物のX-Y-Z軸方向の揺れ幅は前述した条件の結果と比べ揺れ幅が大きいことが確認された。この結果から、現状の空間内に対象物を留ませる手法を用いた位置決め動作を行う際には最低限の速度の流れの力を持って行うことが対象物の揺れの抑制につながる可能性が示唆された。

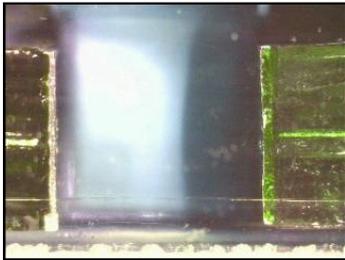


図6 6本の流れを用いた動作検証実験-対向流の可視化

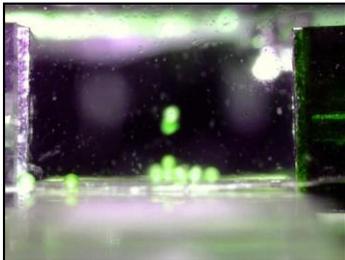


図7 6本の流れを用いた位置決め動作検証実験-低速時の対象物の動作

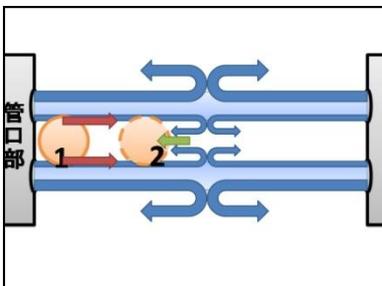


図8 6本の流れを用いた位置決め動作検証実験-流れと対象物

6. 6本の流れを用いた非接触マニピュレーションシステムの移動動作検証実験

流れが対向するように設置された管口部ユニットとY軸方向への移動機構を用いて、6本の流れを用いた非接触マニピュレーションシステムのY軸方向移動動作検証実験を行った。図9に管口部と対象物の位置の関係のグラフを示す。前項で述べた通り対象物は流れの中で強く位置を固定

化されていないが、管口部の Y 軸正方向への移動に伴い流れの渦のなかで回転している対象物の位置も Y 軸正方向に移動していることが確認された。管口部に対し対象部の移動量におよそ $50[\mu\text{m}]$ のずれが見られる部分があるが、おおよそ対象物は管口部の移動に対して追従し、また流れの中にある対象物は管口部の移動中離脱することはなかった。以上の結果から、Y 軸方向の管口部の移動とともに対象物を移動させる手法の有用性が確認され、今後の対象物の位置決め動作の性能の向上とともに本手法は対向微流動を用いた非接触マニピュレーションシステムの対象物の操作方法のひとつとして確立することが可能であると考えられる。次に、管口部ユニットと Z 軸方向への移動機構を用いて、6 本の流れを用いた非接触マニピュレーションシステムの Z 軸方向移動動作検証実験を行った。図 10 に管口部と対象物の位置の関係のグラフを示す。管口部の Z 軸正方向の移動に対して、対象物が追従することができず流れから離脱し重力に引かれる Z 軸負方向へ落下していく様子が観察された。対象物が管口部の移動に追従できない要因として前述の通り対象物が流れの中で強く位置を固定化されていないということが考えられるが、管口部の Y 軸方向への移動に対して対象物の位置の追従が確認されていることから、Y 軸方向への移動と Z 軸方向への移動動作では大きく条件が異なる要因として重力の存在があげられると考えられる。Y 軸方向の移動動作では Z 軸方向の高度は常に一定であるため、対象物が重力から受ける力ほぼ一定であると考えられるが、Z 軸方向の移動では、移動量に対して対象物は重力から受ける力の大きさが変化すると考えられる。今回の結果においては、管口部が $60[\mu\text{m}]$ 上昇した時間を超えて対象物が管口部の移動とは反対に落下していくことが確認されている。本実験において対象物として使用しているブラインシュリムの卵は、比重が 1 よりも大きく、通常流れの力を加えていない場合には重力方向へ落下する。本システムでは、流れが 3 本ずつを組にして対抗しているため、Z 軸方向への落下を抑える力のみ大きくすることは難しく、本システムと本実験における対象物であるブラインシュリムの卵においては管口部の Z 軸方向への移動に伴う対象物の移動動作手法の利用は有効ではないと考えられる。

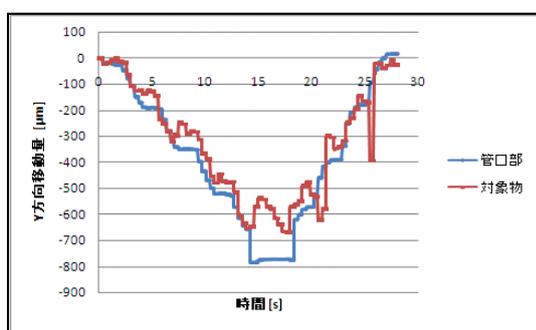


図 9 6 本の流れを用いた移動検証実験-Y 方向移動-管口部対象物位置グラフ

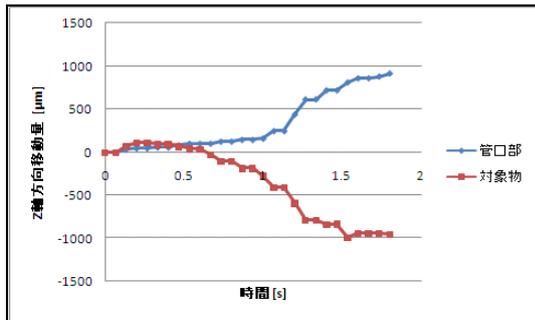


図 10 6本の流れを用いた移動検証実験-Z方向移動-管口部対象物位置グラフ

7. 結言

本研究の今後の課題について述べる。壁面と片側の3本の流れを用いた位置決め動作において、対向微流動を用いた非接触マニピュレーションシステムに用いる流れは管口から流れる噴流のみならず、本システムにおける3本の流れの内側方向への流れのような加えた流れが周辺空間内に流れでる経路が大きく影響していることが明確化されたことをふまえ、対向微流動を用いた非接触マニピュレーションシステムの構築する上で、流れのシミュレーションなどを用いた加えた流れの周囲に流れ出る経路についてより深い検討が必要である。加えて、対象物の揺れが抑制のため、流れ最低限の速度とし、流れの形状を管口の直径と等しいサイズで考えるのではなく、管口からの距離に対して扇型形状になることをふまえ各座標における流れの直径と流れの強さを考慮する必要がある。そのためには3次元座標における各点の流れの力の向きと大きさを測定する必要がある。また、Z軸方向への管口部ユニットの移動に伴う対象物の移動動作の実験的検証が行われたが、対象物は管口部の移動動作に追従することなく重力方向へ落下した。この結果から、Z軸方向の操作に用いる力はほかのX軸方向Y軸方向の力に比べ十分に大小操作できる必要が示唆され、前述した流れの力の向きと大きさの測定とともに、重力の影響を抑制するシステムの構築を行う必要がある。対象物の移動動作については、Y軸方向Z軸方向への管口部ユニットの移動は移動ステージを用いた手動動作であったが、マニピュレーションに使用する流速ごとの管口部ユニットの移動速度と対象物の追従性検証のため、管口部ユニットの移動機構には自動ステージを用いることが望ましいと考えられる。

本研究成果の一部は、2013年10月アメリカ合衆国ミネソタ州で行われたASPE2013(米国精密工学会年次総会)に採択され、発表を行った。

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、研究を進める上で、ASPE2013への参加費等、カデット教育学生プロジェクトの支援をいただけことに、感謝申し上げます。

参考文献

- [1] F. Arai, M. Ogawa and T. Fukuda: Non-contact Micromanipulation by Bilateral Control: Control of Micro Tool Using Laser Micromanipulator: Journal of Robotics Society of Japan, 20(4), pp. 417-424 (2002) [in Japanese]
- [2] A. Toyoshima, S. Hirata, H. Aoyama, H. Weijun and Z. Qin: Study of a noncontact positioning method with micro countercurrent flows continued report: checking of operation by experiment, Proceedings of JSPE Semestrial Meeting, Spring Conference (2012) [in Japanese]

参加学会 :

学会名称 : “28th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering”

期間 : October 20 – 25, 2013

開催地 : St. Paul, Minnesota, USA

題名 : ” Development of Noncontact Hydrodynamic Micro Handling System”

発表形式 : Poster presentations

収支報告書 :

収支報告書

(2013年6月～2013年12月)

科目	費目	細目	収入
予算			230,000

科目	費目	細目	支出
旅費			230,000
	航空運賃 [成田-ミネアポリス]・宿泊費	190,000	
	学会参加費	40,000	
合計			230,000

残高 0

4.10 Optimal Steering of Handheld Micro Manipulators

Project leader: Mr. Sungwan Bokuwan, Department of Mechanical engineering and Intelligent systems, Doctoral course 2nd years, Prof. Aoyama's laboratory.

Members:

- 1) Asso.Prof. Dr. Taworn BENJANARASUTH, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.
- 2) Asst.Prof. Dr. Shinnosuke HIRATA, Department of Mechanical and Control Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo Institute of Technology.
- 3) Dr. Montree PAKKRATOKE, Hardness Laboratory, National Institute of Metrology, Thailand.
- 4) Mr. Ryo KIKUCHI, Department of Mechanical engineering and Intelligent systems, Master course 1st years, ID: 0914024.
- 5) Mr. Nicolas MAUTULEET, Exchange Student, ENSMM FEMTO-ST Beasoncon, French.
- 6) Mr. Masaru TAKIZAWA, Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Bachelor Course 4th years, ID: 1012073.

Supervisor: Professor Aoyama Hisayuki and Professor Dr.Chisato Kanamori

Abstract— Optimal control of the two-dimensional handheld micro manipulator is proposed with $100\ \mu\text{m}^2$ working oriented to such biocell handling. The manipulator consists of two flexible links, each of which independently moves in an X-axis and Y-axis. A combination of electric coils and permanent magnets is utilized as an actuator to form double drivers for each link. The micromanipulator is controlled by an explicit model predictive control in order to damp the vibration of the mechanism and achieve an excellent reference tracking such as a circle and disturbance rejecting performance. To investigate the effectiveness, the experimental results are compared with the PID controller ones.

INTRODUCTION

A handheld micromanipulator oriented to operations on bio cells is increasingly important, especially in microsurgery. Active handheld micromanipulators [1]-[4] have been developed for microsurgery and cell manipulation. Such manipulators are composed of piezoelectric actuators which require a high voltage driving. In addition, piezoelectric actuators inherently have hysteresis and nonlinearity characteristics. The designs of these tools become complicated in view of a control system design because such characteristics result in a complexity in terms of producing a mathematical description. Although a dynamic behavior can be approximated as a linear time-invariant system, the resulting mathematical model contains high order and delay which limit an achievable performance [5].

Recently, an advanced control method called Model Predictive Control (MPC) [6]-[11] has established itself in the community of industrial applications. In the MPC framework, the control problem is fundamentally formulated as a finite-horizon open-loop optimal control

problem, the optimal solution of which turns out to be the optimal control signal of the system at each sampling instant. Basically, the optimal policy for operating the system may come from two main paradigms. The first is called on-line optimizing control, in which a sequence of an optimal input is obtained by solving the optimization problem with new measurements at each sampling time. The first entry of the optimal sequence is applied to the system, while the others are all discarded. At the next sampling time, all computational processes are repeated. The second is named off-line optimizing control, in which the optimal control law is explicitly computed at the outset. This approach is also called explicit model predictive control [12], or EMPC. In addition, both paradigms rely on a state feedback control scheme, which implies that all state variables must be available at each sampling time. The well-known Kalman filter, therefore, is frequently used to estimate such state variables.

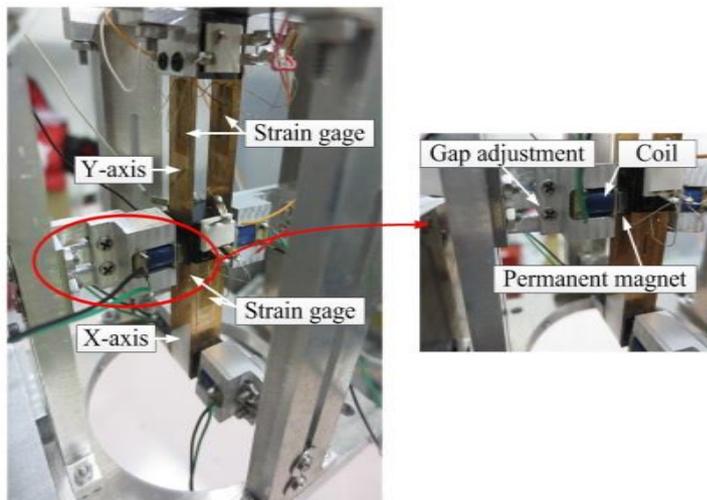


Fig. 1 Handheld micromanipulator prototype.

In this paper, a new handheld micromanipulator is proposed to operate in a micro scale. The main objectives and features of the proposed manipulator are as follows.

- 1) $100\mu\text{m}^2$ working range in XY plane with $1\mu\text{m}$ resolution in each axis.
- 2) Simple structure and fabrication to achieve a low order mathematical model and decoupling behavior.
- 3) Simple driving mechanism in order to obtain a linear behavior and to avoid a hysteresis.
- 4) Optimal tracking performance in working range.
- 5) In corporation of system constraints and disturbances as well as imperfect fabrications in the controller synthesis in order to eliminate external feedforward paths that are sensitive to parameter variations.

With respect to the existing literature, the main contribution of this paper is to present a

design of new handheld micromanipulator with a simple structure and fabrication in order to achieve high performance under the control of an explicit model predictive control.

Manipulator design

Mechanical structure

We propose a new handheld micromanipulator that is able to move in an XY plane within 100 working range. The manipulator mechanism is shown in Fig.1 The structure consists of two links where the top and bottom link move in the Y-axis and X-axis, respectively. Each link is composed of a parallel beam mechanism, which results in a flexible micromanipulator which exhibits a simple dynamic behavior. The proposed structure has significant features [13]:

- 1) The tip moves in parallel at the end.
- 2) Each link does not interfere each other.
- 3) Small force requirement to steer.

However, imperfect fabrication may lead to some degree of interference in practice. A decoupling feature is crucial in a control system design because the procedure turns to be simple in terms of modeling, control design and implementation.

For actuators, the combination of permanent magnets and electric coils are utilized because such mechanism offers a simple and linear relation of an electric force and a voltage in a specified working range. Since the proposed micromanipulator itself is composed of a flexible structure, the driving mechanism requires a small force, i.e., a low voltage and current.

Mathematical modeling

Because of no interfere between X-axis and Y-axis, the mathematical description of each link can be modeled independently. Each link is constructed from a flexible structure which shows a high oscillation and takes a long time before settle whenever the structure subjects to the external force. Since the working range in each axis is very tiny, a behavior of the micromanipulator can be equivalently described by the mass spring damper model (modeling details are omitted). The corresponding discrete-time state space for X-axis and Y-axis can be respectively written as

$$\begin{aligned} x(t+1) &= A_x x(t) + B_x u_x(t) \\ z_x(t) &= C_x x(t) + D_x u_x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y(t+1) &= A_y y(t) + B_y u_y(t) \\ z_y(t) &= C_y y(t) + D_y u_y(t) \end{aligned} \quad (2)$$

where t is a discrete time index, $x(t) \in \mathfrak{R}^2$ and $y(t) \in \mathfrak{R}^2$ are the state vector, $u_x(t) \in \mathfrak{R}^1$ and

$u_y(t) \in \mathfrak{R}^1$ are the input variables, $z_x(t) \in \mathfrak{R}^1$ and $z_y(t) \in \mathfrak{R}^1$ are the output variables.

Explicit model predictive control formulation

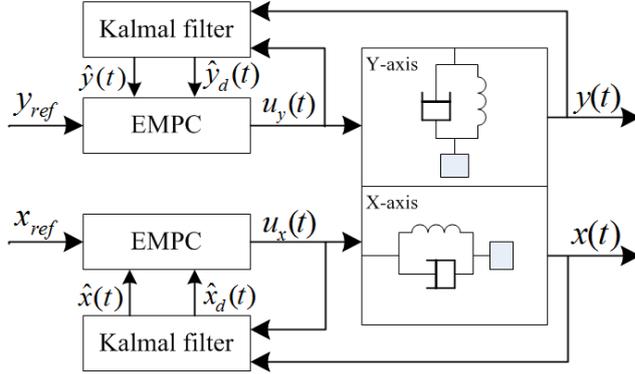


Fig. 2 Explicit model predictive control scheme.

A block diagram of the proposed control scheme for a micromanipulator is shown in Fig.2. An explicit model predictive control is employed in order to optimally compute the input voltage for steering the micromanipulator. To achieve zero steady state error, the problem of offset-free is handled by the internal model principle. The explicit MPC is fundamentally based on a full state feedback. Therefore, a Kalman filter is used to estimate state variables and disturbances by means of the measurement of X and Y positions. Since the design procedure of both links is exactly the same, the design of X-axis is only described. The main ingredients of the explicit MPC for linear constrained discrete-time systems consist of:

- 1) Discrete-time model: The discrete-time models Eq. 1 is directly suitable for the explicit MPC. Additionally, an integral action is required to reach zero steady state error. A technique of offset-free is to augment the disturbance estimation state at the output of system dynamics.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(t+1) \\ x_d(t+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_x & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ 0 \end{bmatrix} u_x(t) \\ z_x(t) &= \begin{bmatrix} C_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_d(t) \end{bmatrix} + D_x u_x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

where the disturbance states is $x_d(t)$. The augmented models are used to predict a system evolution.

- 2) State and disturbance estimator: For offset-free tracking, state variables are estimated using

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x(t+1) \\ x_d(t+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_x & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ 0 \end{bmatrix} u_x(t) + \\
\begin{bmatrix} G_x & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x(t) \\ w_d(t) \end{bmatrix} \\
z_x(t) &= \begin{bmatrix} C_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_d(t) \end{bmatrix} + D_x u_x(t) + v_x(t)
\end{aligned} \tag{4}$$

where $\begin{bmatrix} w_x(t) & w_d(t) \end{bmatrix}^T$ and $v_x(t)$ are assumed to be white Gaussian noise signals. The Kalman filter is used to estimate all states. The design is accomplished using a Matlab control system toolbox.

- 3) Objective function: the main purpose of the micromanipulator is to track the reference signal without the steady state error. As a common tracking problem, the quadratic cost function is employed in this paper which can be expressed as

$$J_x = \sum_{t=0}^N \left\| z_x(t) - z_x^{ref} \right\|_{Q_x}^2 + \left\| u_x(t) \right\|_{R_x}^2 \tag{5}$$

where $\|x\|_M^2 \equiv x^T M x$, $Q_x \geq 0$ and $R_x > 0$. The reference signal is z_x^{ref} .

- 4) Constraints: For a safety operation, the maximum and minimum voltages supplied into electric coils have to be constrained to protect an over current. In addition, the maximum displacement in each link must be limited because the space between electric coils and permanents are fixed $100\mu m$. These limitations can be express as

$$|x(t)| \leq x^{\max} \quad \text{and} \quad |u(t)| \leq u_x^{\max} \tag{6}$$

- 5) Explicit control law synthesis: The explicit control law is obtained by minimizing Eq.5 subject to Eq.4 and Eq.6. The optimal control laws is defined over a polyhedral partition of the state space in which the control law is continuous and piecewise affine. In implementation, the procedure to compute the optimal input function turns into identifying the active region which corresponds to the initial state, e.g.,

Find i such that $\begin{bmatrix} \hat{x}(t) & \hat{x}_d(t) \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}_x^i$

$$u_x^*(t) = K_x^i \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{x}_d(t) \end{bmatrix} + k_x^i$$

Note that the estimated state and disturbance are used in the control law. The explicit solutions can be obtained using the multi-parametric toolbox [14].

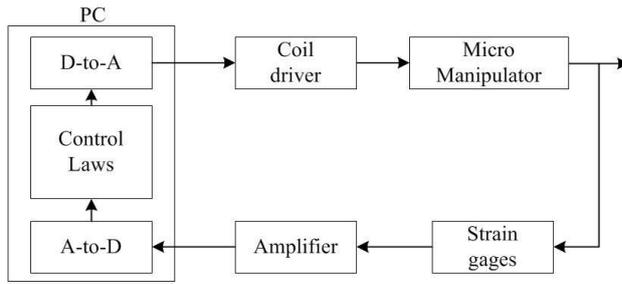


Fig. 3 Block diagram of the experiment setup.

Experiments

Experimental set-up

An experimental set-up of micromanipulator is depicted by the simplified block diagram Fig.3 in which the explicit MPC is implemented on a desktop PC with Intel ®Core™ 2 Duo CPU 3 GHz and RAM 4 GB running on window 7 operating system. The A-to-D and D-to-A card is the PCI-6259 from the national instrument. Additionally, the positions of each link are measured by the full bridge circuits of strain gages which have 1928 Ohm gage resistance, 178 gage factor and $\pm 3000 \mu m / m$ maximum allowable strain. The output voltages of the full bridge are amplified by the DA-710A module from KYOWA which the signal is 200 times amplified.

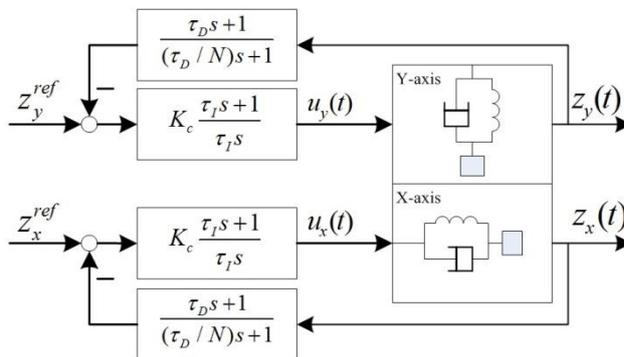


Fig. 4 PID scheme of handheld micromanipulator.

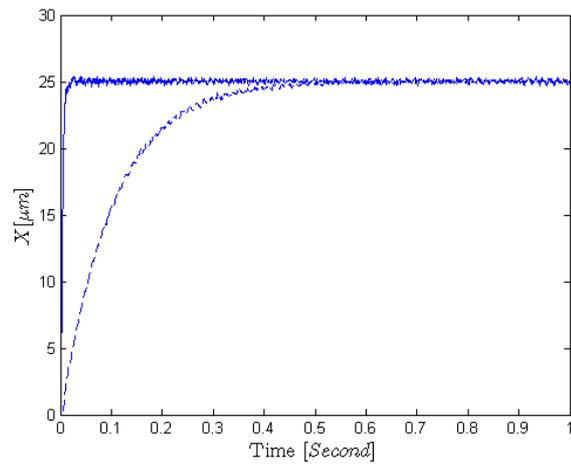
Link	τ_c	K_c	τ_I	τ_D
X-axis	0.1	0.0008	0.0029	0.0028

Y-axis	0.1	0.0007	0.0016	0.0016
--------	-----	--------	--------	--------

Table 1. The values of PID controller parameters.

Experimental results

As an investigation of the effectiveness of the proposed method, the explicit model predictive control scheme is compared with a PID control scheme Fig. 4. The two degree of



freedom PID controller is employed and

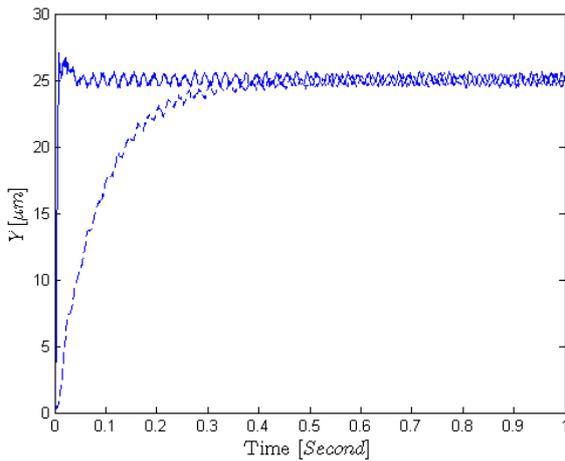


Fig. 2 Step comparison of the PID (dash line) and proposed control scheme (solid line)

designed by the tuning rule presented in [15], where the transient performance is specified by τ_c . With a sampling time 0.001 second, dynamic behaviors of X-axis and Y-axis are approximately identified and described by the discrete-time state spaces:

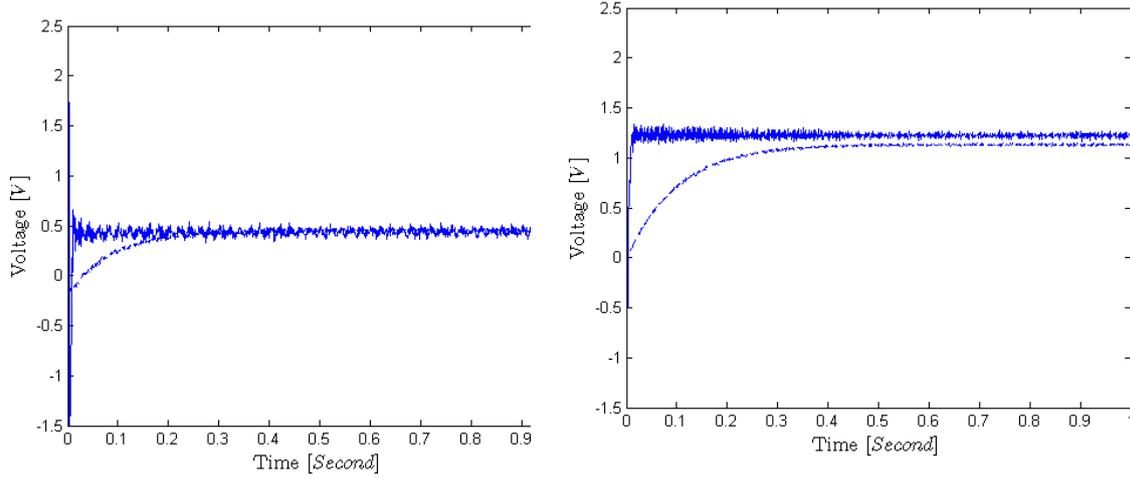


Fig. 6 Control inputs due to step responses of the PID (dash line) and proposed control scheme (solid line).

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 0.943 & 0.314 \\ -0.316 & 0.949 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.001 \\ 0.015 \end{bmatrix} u_x(t)$$

$$z_x(t) = [468.596 \quad 27.755] x(t)$$

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} 0.975 & 0.165 \\ 0.166 & 0.985 \end{bmatrix} y(t) + \begin{bmatrix} 0.001 \\ 0.011 \end{bmatrix} u_y(t)$$

$$z_y(t+1) = [544.079 \quad 28.043] y(t).$$

The values of PID controller parameters are shown in Table 1. The value of a parameter τ_c affects directly the speed of response. In the experiment, the smallest value is used to gain the fastest response. The smaller value of τ_c

causes the system sensitive to noises. Furthermore, the value of parameter N plays important role in reducing the response deviation, i.e., the larger value the smaller deviation. Anyways, a value of a parameter N has to be selected carefully because the large N causes

also the system sensitive to noises. The response comparisons of $25\mu m$ step response of two links are shown in Fig. 5. and the corresponding control input are shown in Fig. 6. The responses of both links controlled by the explicit MPC are 10 times faster than the PID response. An X-axis requires twice voltages comparing with a Y-axis. Both controllers can excellently handle the fluctuation, the magnitude of which is less than $1\mu m$.

The comparison of a circle tracking task is depicted in Fig. 7 in which the reference signals of X-axis and Y-axis link are sine and cosine function with the magnitude $25\mu m$ and the frequency $2Hz$, respectively. The micromanipulator controlled by the explicit model predictive control successfully constructs the circle with the radius $25\mu m$ whereas the magnitude is strongly attenuated when the manipulator is controlled by PID controller.

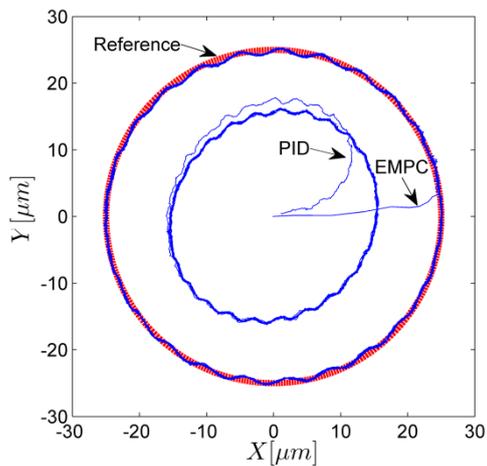


Fig. 7 Comparison of circle tracking .

Conclusion and future works

A new handheld micromanipulator has been proposed for two-dimensional axis applications. The explicit model predictive control combined with the Kalman filter allows handling the tracking reference effectively. Additionally, the resulting control law provides very fast response time. The effectiveness of the proposed control scheme is demonstrated experimentally by the comparison with the PID control scheme to investigate the tracking performance, which the experimental results reveal that the proposed scheme is more effective.

In the future, the Z axis and the vibration of the user's hand will be considered. In addition, the heated needle will be the first end effector for the application of the proposed handheld micromanipulator to cut tissue.

References

- [1] D.Y. Choi and C.N. Riviere, Flexure-based Manipulator for Active Handheld Microsurgical Instrument, in Proc. IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, China, Sep (2005) , pp. 5085-5088.
- [2] W.T. Latt C.Y. Shee and W.T. Ang, A Compact Hand-held Active Physiological Tremor Compensation Instrument, 2009 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent

Mechatronics, Singapore, July (2009), pp. 711-716.

- [3] S. Yang, R.A. MacLachlan and C.N. Riviere, Design and Analysis of 6 DOF Handheld Micromanipulator, 2012 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., USA, May (2012), pp. 1946-1951.
- [4] R.A. MacLachlan, B.C. Becker, J.C. Tabares, G.W. Podnar and C.N. Rivier, Micron: an actively stabilized handheld tool for microsurgery, IEEE Trans. Robot., 28 (2012) 195-211.
- [5] S. Skogestad and L. Postletwaite, Multivariable Feedback Control: Analysis and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2005.
- [6] C.E. Garcia, D.M. Prett and M. Morari, Model Predictive Control: Theory and Practice--a Survey, Automatica, Vol.25, No.3, (1989), pp. 335-348.
- [7] M. Morari and J.H. Lee, Model Predictive Control: Past, Present and Future, Computers and Chemical Engineering, Vol. 23, (1999), pp. 667-682.
- [8] A. Bemporad and M. Morari, Robust Model Predictive Control: A Survey, J. Robustness in Identification and Control, Vol. 245, (1999), pp. 207-226.
- [9] D.Q. Mayne, J.B. Rawlings, C.V. Rao and P.O.M. Scokaert, Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality, Automatica, Vol. 36, (2000), pp. 789-814.
- [10] J.M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [11] S. Qin and T. Badgwell, A survey of Industrial Model Predictive Control Technology, Control Engineering Practice 11, (2003), pp.733-764.
- [12] A. Bemporad, F. Borrelli and M. Morari, Model predictive control based on linear programming--the explicit solution, IEEE Trans. Autom. Control, 47 (2002) 1974-1985.
- [13] H. Sato, T. Fukuda, F. Arai, H. Iwata and K. Itoigawa, Analysis of parallel beam gyroscope, in Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., May (1999) 1632-1637.
- [14] M. Kvasnica, P. Grieder and M. Baotic, Multi-parametric toolbox (MPT), ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2004.
- [15] S. Skogestan, Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, J. of process control, 13 (2003) 291-309.

4.11 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 3年 明研究室

[プロジェクトメンバー]

1232041	仕舘 宗大	知能機械工学専攻	博士前期課程 2年	明研究室
1232021	河合 大志	知能機械工学専攻	博士前期課程 2年	田中研究室
1232031	小松 優祐	知能機械工学専攻	博士前期課程 2年	明研究室
1332055	西村 冬威	知能機械工学専攻	博士前期課程 1年	明研究室
1012012	市川 貴大	知能機械工学専攻	学部 4年	明研究室
1012055	佐々木 貴史	知能機械工学専攻	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]

2014年3月6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べられる。

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

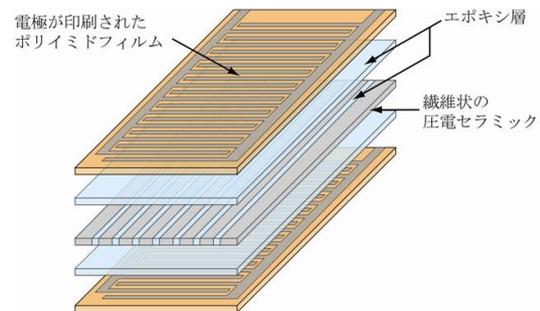


図 2 MFC の構造

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簡単化する事が出来、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、解明されつつある鳥や昆虫などの羽ばたき飛行の高い機動性を活かし、レスキュー探査、災害時における空撮、農薬散布や沿岸監視、テロ現場での情報収集等に応用しようと羽ばたきロ

ボットの研究が盛んに行われている。現在の羽ばたきロボットは回転型アクチュエータであるモーター主流ではあるが、回転動作を羽ばたき動作に変換する方法では羽への運動変換の際にエネルギーを消耗し、また変換機構が機体全体におけるスペースを占め、さらに重量が大きくなるといった問題がある。さらに、硬いアクチュエータや構造を持つロボットであるため、自然界の生物のような柔らかい動きの実現も困難になる。従って、飛行性能を向上するためには、飛行生物に近い動きの実現ができるソフトなロボットが必要とされている。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、モータに比べ簡素な変換機構で動作するソフトなロボットの研究開発を行っている。

昆虫の羽ばたき軌道の模倣

本研究では羽ばたきロボットの飛行性能を向上させるために、昆虫の羽ばたき軌道に着目した。自然淘汰で生み出された効率良く飛行に有用な力を生み出す羽ばたき軌道に近づけるため、従来機の羽付け根角度の変更と昆虫を規範とする翅脈の開発を行い、0 の字軌道や 8 の字軌道と呼ばれる羽ばたき運動の実現を目指す。

・昆虫の羽ばたき

昆虫の羽は鳥と異なり、骨・筋肉が内蔵されていないため、胴体からの駆動で羽ばたきが行われる。図 3 に示す羽ばたき軌道は羽が体軸に対して上下の運動、羽前縁部に対して捩じる運動、体軸に対して前後の運動を組み合わせたものである。

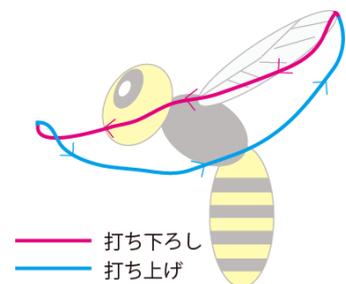


図 3 羽ばたき軌道

羽ばたき時、流入してくる相対流により、飛行に必要な垂直力と推進力は得ることができる。図 4 は羽が打ち下ろし時と打ち上げ時の相対流から受ける力を示した一例である。流体力は垂直力と推進力に分解され、常に垂直力が地面に対して上向きになるように羽を羽ばたかせることができる。本研究ではこのような羽ばたき軌道が行えるように試作機の作製を行っていく

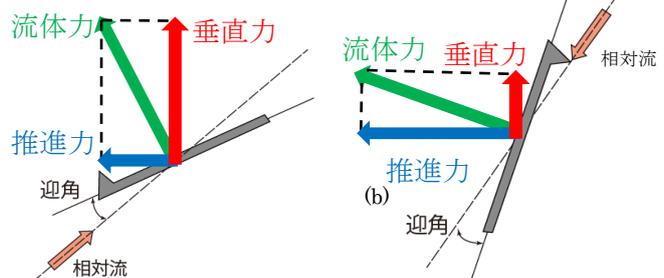


図 4 羽が受ける力

・試作機の設計

(i) 羽取付位置の調整

図 5 に示す従来機では羽の取付位置は駆動モジュールの中心部分であった。この取付位置の場合、変位量は最も大きくなるものの、打ち上げと打ち下ろしで辿る軌跡の異なる昆虫の羽ばたき軌道の実現は困難であると考えた。そこで羽取付位置の調整を行った。

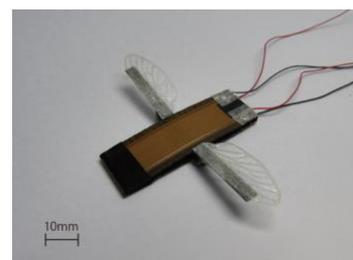
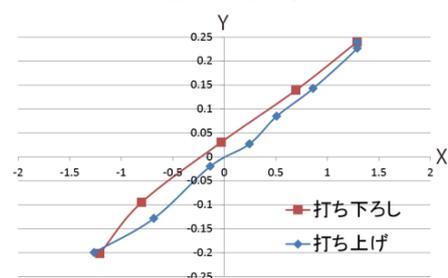


図 5 従来機

付位置調整の効果を検証するためにシミュレーションを行った。左羽先端の羽ばたき時の軌道を図 6 に示す。従来機と異なり、打ち下ろしの軌跡と打ち上げの軌跡が異なる



軌跡を辿る設計がシミュレーション上で確認することができた。

(ii) 翅脈の作製

虫の羽には骨と筋肉がついていないため、その動作には流体が強く影響を与える。流体から受ける力を飛行に有用に使うために、翅脈は重要な働きを担っている。翅脈には羽前後方向の動きと羽振り方向の動きを拡大するヒンジが設けられている。これらのヒンジを模倣し、シミュレーション上でヒンジの効果を検証し、作製した翅脈を図7に示す。

図6 羽ばたき軌道(シミュレーション結果)

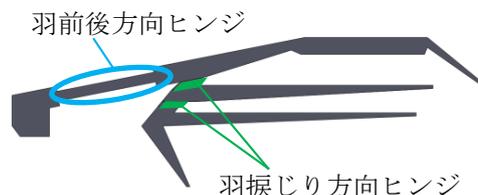


図7 二方向のヒンジを設けた翅脈

・試作機の作製

設計に基づき、作製した試作機を図8、試作機の仕様を表1に示す。



図8: 試作機

表1 試作機の仕様

質量[g]	1.56
体長[mm]	38
片翼長[mm]	30
共振周波数[Hz]	40

・実験

(i) 羽ばたき軌道の観測

作製した試作機が描く羽ばたき軌道を生成するため、駆動時に側面から動画を撮影し、羽先端の軌跡をトラッキングしたところ、図9のようになった。この結果より、羽ばたき軌道は8の字の形を描くことが実験で確認することができた。

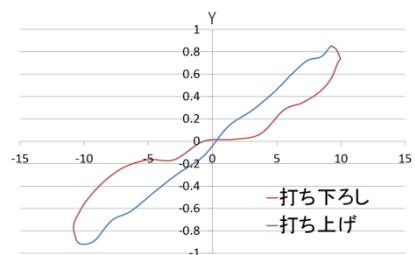


図9 試作機の羽ばたき軌道

(ii) 垂直力の測定

作製した試作機に対して翅脈にヒンジ有無における垂直力を比較するために測定を行った。結果を表2に示す。ヒンジ有の場合はヒンジ無の場合と比較して平均垂直力が2.46[mN]大きくなっており、性能向上を図ることができた。しかし、ヒンジ有の場合でも垂直力重量比は1未満であり、単体での飛行を行うことはできなかった。

表2: 垂直力測定結果

翅脈	平均垂直力[mN]	垂直力重量比
ヒンジ無	0.96	0.06
ヒンジ有	3.42	0.22

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、昆虫の羽ばたき軌

道に着目した。これを模倣するため従来研究で作製したロボットに対して昆虫を規範として羽取り位置の調整、翅脈のヒンジ作製を行い、8の字形状の羽ばたき軌道を生成することに成功した。垂直力測定の実験では性能が向上していることも確認できた。

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

魚類の高い機動性を実現する運動の一つとして急旋回動作が挙げられる。生物の高い機動性をロボットに取り込むのであれば、旋回動作の模倣による旋回性能の向上は重要であると考えられるが、本研究室での従来研究においてはその動作の複雑さから旋回動作は模倣に基づく設計ではなく、実験的に旋回動作を開発してきた。その結果、旋回動作性能は全身動作性能と比べ芳しいものではなかった。そこで本研究では、魚類の急旋回動作を規範とした旋回動作設計を行うことで、ソフト水中ロボットの旋回性能の向上を目指す。

魚類の急旋回動作

魚類の旋回動作は一般的に身体を大きく折り曲げ、それ折り曲げる時よりも遅いスピードで元の姿勢に戻すことにより、左右の流体より受ける力のバランスを崩すことで回転に必要なモーメントを発生させる。この際、多くの魚は身体の後半部を主に用いる。このような動作をロボットにおいて模倣するためにはアクチュエータに大変位や分散配置といった条件が課せられるが、MFC がこのような条件をみたすことは困難である。そこで、本研究ではキタカワカマスやニジマスの逃避・捕食の際に見られる驚愕反応に注目する。この動作は図 10 から分かるように、全身を動作することで大きな方向転換を行っていることがわかる。また、一般的な旋回動作と比べると、身体の変形が比較的小さい。このことから、ソフト水中ロボットで模倣する動作として適していると考えられる。ただし MFC を用いたロボットでは、変形量が十分でないので全く同様の動作を行おうとしても難しい。そこで本研究では、驚愕反応の特徴である S 字姿勢と C 字姿勢に着目し、動作内でのその時間割合を規範として旋回動作の設計を行うことにより、旋回性能の向上を目指す。



図 10 驚愕反応の動作シーケンス

姿勢推移の模倣による旋回動作の実現

旋回動作設計を行うにあたり、実験機として従来研究で用いた



図 11 胴体屈曲推進型ロボット

胴体屈曲推進型ロボットを選択した。

まず、このロボットで S 字姿勢及び C 字姿勢を実現する方法を考える。従来手法において旋回に用いていた正弦ノコギリ波による姿勢遷移を、ANSYS を用いたシミュレーションで確認したところ、S 字姿勢は確認できたが C 字姿勢が確認できなかった。ただし、駆動部から離れた部分の変形が遅れることにより S 字姿勢が発生していると推測できるような挙動であったので、最初の変形から逆向きの変形を与える入力までの待ち時間を設けることで、C 字姿勢を発生させることができると考えられる。そこで、矩形波を入力することで姿勢遷移の検討を行った。その結果、C 字姿勢の発生を確認できた。

矩形波を入力することにより、S 字姿勢、C 字姿勢を実現することができたが、旋回に必要な左右の力の偏りを発生させるためには矩形波は不向きである。そこで、矩形波の 0 出力の部分で正弦波の 1/4 周期分に置き換えたような波形を設計した。以後この波形を飽和正弦ノコギリ波と呼称する。

S 字姿勢、C 字姿勢、逆 S 字姿勢がそれぞれ驚愕反応における姿勢遷移の時間割合と同じになるような周波数、及びデューティ比を設定し、図 12 に示すような波形を設計した。

設計した波形を用いて動作と従来動作による旋回角度と時間の関係を図 13 に示す。同様の時間でより大きい角度が旋回できていることがわかる。旋回速度でおよそ 1.6 倍、1 周期ごとの旋回角度を表す旋回効率ではおよそ 2.7 倍の向上が確認できた。

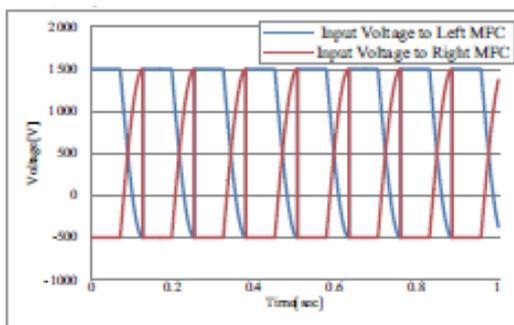


図 12 設計した入力波形

高

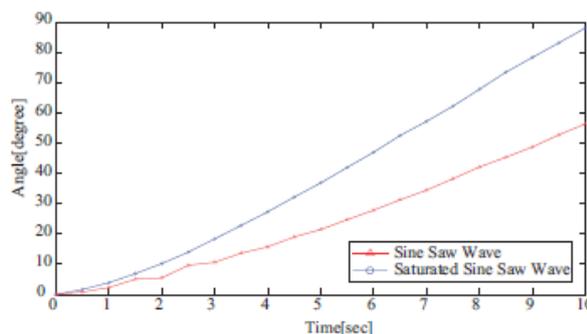


図 13 各入力における時間と旋回角度の関係

旋回性能ロボットの開発

ここまで実験で用いてきた従来機は、動作設計の規範とした驚愕反応を行う魚とは体形状が大きく異なる。そこで驚愕反応を行うキタカワカマスを模倣したロボットを設計し、更なる旋回性能の向上を目指す。

シミュレーションを用いた検証の結果、キタカワカマスの体長体高比と驚愕反応の実時間を両立するような設計が困難であることがわかった。

そこで、体長体高比と驚愕反応の実時間、それぞれを実現するようなロボットを設計し、それぞれをロボット 1、ロボット 2 とした。実際に作成した機体の写真を図 14、15 に示す。



図 14 ロボット 1



図 15 ロボット 2

作成した機体に対し、目指す姿勢遷移の時間割合を満たすように周波数およびデューティ比を再設定した飽和正弦ノコギリ波を入力して実験を行った。得られた結果を図 16 にまとめる。

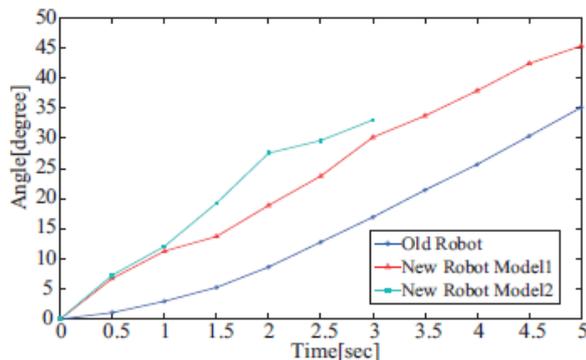


図 16 新規設計ロボット及び従来型ロボットの旋回角度と時間の関係

表 3 各モデルの旋回速度

	平均旋回速度 [degree/sec]	1 周期毎の平均旋回角度 [degree]
胴体屈曲推進型ロボット	7.03	0.89
ロボット 1	9.07	1.89
ロボット 2	10.83	1.22

結果から旋回速度および旋回効率を計算すると表 1 に示すような結果となった。この結果からより支配的な設計パラメータが体長体高比であることが分かった。また従来型ロボットと比較して 2.1 倍の旋回効率向上が確認できた。

まとめ

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旋回動作を、魚類の急旋回動作を規範とし設計することで、従来手法を大きく上回る旋回速度・効率を持つ旋回動作を設計することに成功した。さらに、生物の体形状および動作パラメータを目標値とし、シミュレーションを用いて他の設計パラメータを決定する機体設計の手法を提案し、提案した動作がより効果的に行えるようなロボットを設計することで、高い旋回性能を持つロボットの開発に成功した。

3.2.2 ウミヘビ型水中ロボット

本研究では、身体全体で進行波を後方に送り蛇行運動を行うウナギ型遊泳を模倣し、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開発を行い、遊泳効率の良いソフト水中ロボットの実現を目指す。

水中ロボットの設計

ウナギ型遊泳等が行う蛇行推進は以下の 3 つの条件を満たすことで推進を行っている。

1. 振幅が尾に向かって増大する
2. 身体に発生する進行波の速度が前進速度よりも速く後方に向かって進む
3. 後方に向かい体高が増大する

ウミヘビは体高の変化が少なく、一定であるとみなせることから本研究では条件 1, 2 についてのみ考慮する。

水中ロボットの試作

ウナギ型遊泳の条件を満たすロボットを、シミュレーションを利用して設計を行った。シミュレーションで得られた結果を基に作成したこのモデルを元に試作した実機が図 17 である。



図 17 ウミヘビ型水中ロボットの实機

このロボットは全長 370mm,重量 8.3g で一枚の弾性体を 2 枚の MFC で挟み込むバイモルフ・アクチュエータにより駆動する. このロボットがウナギ型遊泳を行っているかどうか, 遊泳形状・推進速度・遊泳効率の 3 点について確認する.

遊泳形状の評価

実際のウミヘビの駆動周波数である 1.7Hzsin 波をロボットに印加し, 遊泳が安定した状態の画像を元に評価を行う. 遊泳開始から 3 周期後の遊泳安定時の画像をグラフ化したものを利用し, 振幅の増大について確認する. 図 18 にそのグラフを示す.

このグラフ上には同一象限内に一組の振動の腹が確認できる. この振動の腹同士の振幅増大比を求めることで評価を行う. 実際の生物にも同様にして振幅増大比を計算すると, 実際の生物の振幅増大比は 9.73, ウミヘビ型水中ロボットのものは 5.92 であった. これより, 実際の生物には劣るものの, ウミヘビ型水中ロボットは振幅の増大を行っていることがわかる.

また, 遊泳時の画像から, ウミヘビ型水中ロボットの作る進行波について確認を行う.

図 19 は遊泳時のロボットの遊泳形状の時間経過による推移である. この画像から, ロボットの作る進行波は後方に向かっていることがわかる. また, 速度の計算を行うと, 進行波の速度は 0.293m/s, 前進速度は 0.0345m/s であることがわかった.

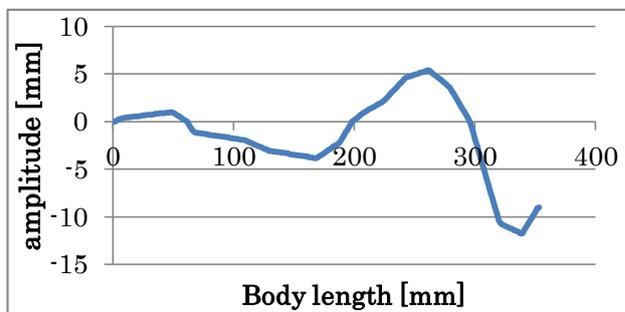


図 18 ロボット 1.7Hz 駆動安定時の遊泳形状

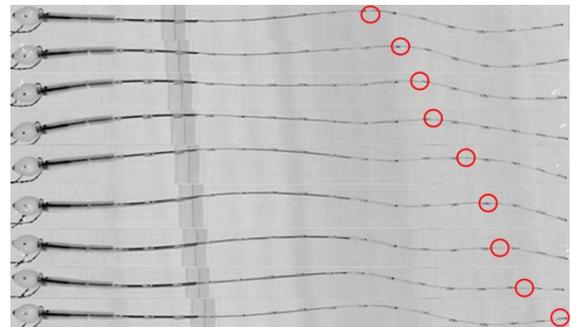


図 19 ロボット 1.7Hz 駆動時の遊泳形状

推進速度

駆動周波数を 0.25Hz から 20Hz まで変化させ, 波形を矩形波と sin 波の 2 つ印加し, 各周波数での推進速度について確認を行った. 結果を図 20 にまとめた. 実際のウミヘビの駆動周波数である 1.7Hz で比較をおこなうと, 矩形波・sin 波ともに劣った結果であることが確認できる.

また, 矩形波の最高推進速度は 0.41m/s, sin 波の最高推進速度は 0.28m/s であった.

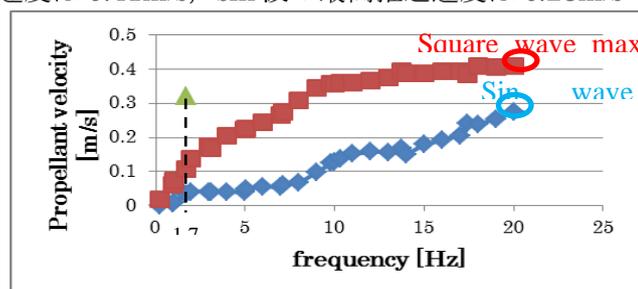


図 20 ロボットの周波数ごとの推進速度

遊泳効率

遊泳効率は、式 1 により求められる単位距離当たりの仕事[J/m]を用いて評価を行う。

$$\text{単位距離当たりの仕事[J/m]} = \frac{\text{仕事率[J/s]}}{\text{推進速度[m/s]}} \quad (1)$$

この値を、駆動周波数を揃えた場合、矩形波では生物の半分程度、sin 波では生物と同等の遊泳効率であった。推進速度を揃えた場合、矩形波では生物と同等の、sin 波では生物の半分程度の遊泳効率であった。

以上よりウミヘビ型水中ロボットの遊泳効率は生物と同等であることが確認出来た。

まとめ

今回試作を行ったウミヘビ型水中ロボットは蛇行推進を行う条件である、進行波の速度が前進速度よりも速く、身体後方に向かって進む、が尾に向かって増大している。という、蛇行推進の条件を実現していることを確認した。

また、単位距離当たりの仕事を計算することで、ウミヘビ型水中ロボットの遊泳効率が生物に近いものであることを確認した。

3.2.3 リン青銅板マス型水中ロボット

本研究では、マス型と規範とし、ロボット躯体材料にリン青銅(C5191)を用いたリン青銅板マス型ロボットを試作した。リン青銅板マス型ロボットは、CFRP 板マス型と比較して材料減衰比が小さいため共振時に尾鰭の振幅が拡大し、距離当たりの消費電力の低減および推進速度の増加を実現した。

リン青銅板マス型水中ロボットの試作

試作機は、先行研究の平板マス型水中ロボットを参考に図 21 に示すように、リン青銅板の表裏に 2 枚の MFC を貼り付けた構造を持つ。圧電繊維複合材料に電圧を印加することで、本体から尾鰭にかけて屈曲運動を行い、準アジ型推進を実現する。その外観と仕様を図 22 と表 4 に示す。また、比較対象となる CFRP 板マス型の外観と仕様を図 23 と表 5 に示す。

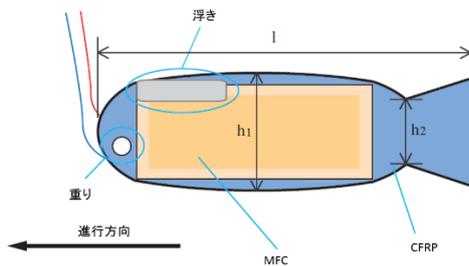


図 21 平板マス型の構造



図 22 リン青銅板マス型



図 23 CFRP 板マス型

表 4 リン青銅板マス型ロボットの仕様

体長 l	167mm
--------	-------

最大幅 h_1	55mm
最小幅 h_2	30mm
重量	20.8g
MFC	M8528P1 d33×2
MFC 外形	103mm×35mm
MFC 駆動部	85mm×28mm
躯体材料	0.126mm リン青銅板
接着方法	DP-460 エポキシ系接着剤

体長 l	167mm
最大幅 h_1	55mm
最小幅 h_2	30mm
重量	12.6g
MFC	M8528P1 d33×2
MFC 外形	103mm×35mm
MFC 駆動部	85mm×28mm
躯体材料	0.2mmCFRP 板
接着方法	DP-460 エポキシ系接着剤

表 5 CFRP 板マス型ロボットの仕様

尾鰭の振幅の評価

ロボット躯体の材料減衰比を低減したことによる流体中での共振時の変位拡大を確認するため、マス型ロボットの頭部先端から 15mm を固定した状態で、実験環境である絶縁流体フロリナート中において尾鰭の振幅を測定した。CFRP 板マス型ロボットとリン青銅板マス型ロボットの共振時の尾鰭の振幅の比較した結果を表 6 に示す。

表 3 より、流体中においても材料減衰比の小さいリン青銅の方が CFRP よりも共振時の尾鰭の振幅が約 3.7%拡大していることがわかる。

表 6 共振周波数と尾鰭の振幅

躯体材料	共振周波数 [Hz]	尾鰭の振幅 [mm]
CFRP	6	21.7
リン青銅	7	22.5

推進速度の評価

図 22 に示したリン青銅板マス型と図 23 に示した CFRP 板マス型の推進速度を測定した。入力電圧範囲を+1500~-500V とした矩形波を用いた。その上で駆動周波数を 1~25Hz まで 1Hz 刻みに変化させて、ハイスピードカメラを用いて、その時の推進速度を測定した。結果を図 24 に示す。リン青銅板マス型の最大推進速度は 23Hz の時に約 0.71m/s であった。CFRP の場合は、20Hz の時に約 0.62m/s であったため、最大推進速度においてリン青銅板マス型の推進速度のほうが約 14%の推進速度の増加していることがわかる。この推進速度の増加の要因としては、材料減衰比を低減したことによって尾鰭の振幅が拡大したことが考えられる。

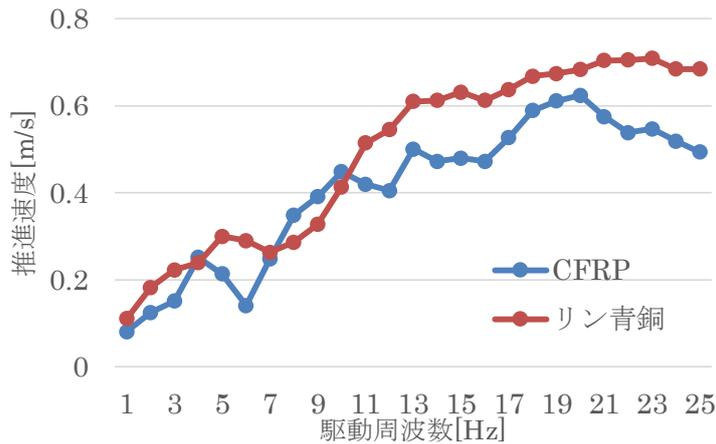


図 24 ロボット躯体の材料の違いによる推進速度の比較

距離当たりの消費電力の評価

ロボットの推進効率を評価するにあたり、式(2)を用いて距離当たりの消費電力を求めた結果を図 25 に示す。

$$H = \frac{W}{V} \quad (2)$$

ここで、 H の単位は $[J/m]$ である。消費電力 W は先行研究で、本実験と同じ型番の MFC2 枚の消費電力の測定結果の値を、推進速度 V は図 24 で示した試作機における測定結果の値を用いた。図 25 より駆動周波数 3Hz 以下の低周波数においてはリン青銅のほうが CFRP より距離当たりの消費電力を平均して約 30%低減していることがわかる。

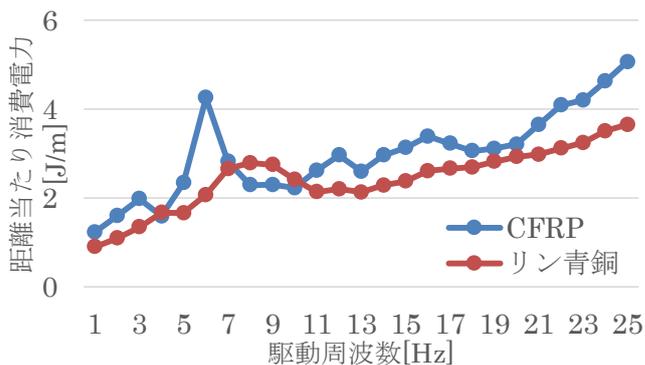


図 25 ロボット躯体の材料の違いによる距離当たりの消費電力の比較

泳動数の評価

実際の魚類の遊泳能力を評価する際に用いられる泳動数を求めた。測定したデータを元に計算した各機体の泳動数を図 26 に示す。泳動数 S_w は、尾鰭一振りあたり何体長進むかを表す指標であり、遊泳動作の効率を評価することができる。多くの魚類の泳動数は種類によらず 0.6 付近に集中することが知られており、推進速度 V 、遊泳周波数 f 、体長 L を用いて式(3)で表される。

$$S_w = \frac{V}{fL} \quad (3)$$

図 26 より，駆動周波数 3Hz 以下において，リン青銅のほうが CFRP より平均して約 1.4 倍効率のいい遊泳を行っていることがわかる．

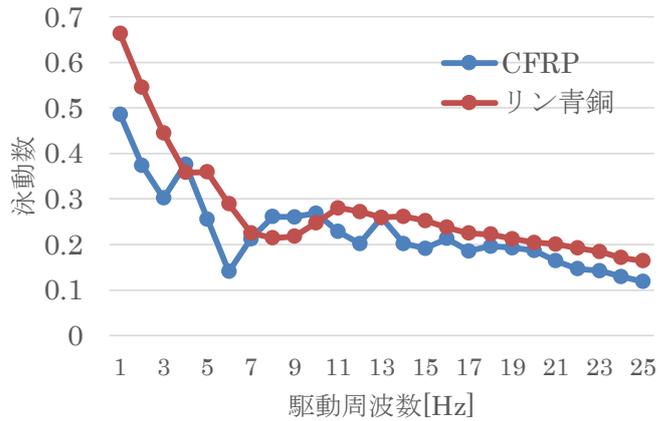


図 26 ロボット躯体の材料の違いによる泳動数の比較

まとめ

マス型ロボットの頭部を固定し，尾鰭の振幅を測定した結果から明らかなように，ロボット躯体の材料減衰比を低減することで，流体中において共振時の変位拡大を確認できた．また，尾部の振幅が拡大したことにより，1Hz から 3Hz という低周波数において平均約 1.4 倍効率よく遊泳を行うと同時に，最大推進速度において約 14%の増加も確認できた．そして，最大 30%の距離当たりの消費電力の低減を実現した．

5. ショートトレーニング

5.1 Global Leadership Training

背景

世界を見渡してみると、資源や物資に乏しく、水や医療、農耕具といった最低限の生活必需品を入手・利用することが困難な国や地域があり、多くの人々が貧困に苦しんでいるという現実がある。このような、いわゆる“開発途上国”と呼ばれる国においては、先進国において培われてきた最先端技術が必ずしも有用というわけではなく、資源や資本、設備、労働力の観点からはむしろ無用の長物となり得る。つまり、開発途上国においては、その国の環境、文化、習慣、社会的・経済的背景などを考慮して適正な機能や価格帯で設計・提供される、いわゆる“適正技術”によって生み出されるモノやサービスが望まれる。そのため、国際協力においては、農業や工業、医療、物流といった様々な分野で適正技術の開発と普及活動が行われている。また、資源を浪費せずに低コストで維持するという適正技術の概念は、地球に優しい技術として地球保護の観点からも再評価されている。本ショートトレーニングでは、“適正技術”という概念を通し、多角的に世界の状況を捉えることができる国際性豊かな人材の育成を目指す。

実施概要

2013年12月7日(土)の9時00分～17時30分まで東4号館の802AV会議室にてSONYコンピューターサイエンス研究所(Sony Computer Science Laboratory: CSL)のアソシエイトリサーチャーである遠藤謙氏を講師として招き、『開発途上国のための適正技術(Appropriate Technology)』と題したワークショップを開催した。ワークショップの前半では、遠藤氏がマサチューセッツ工科大学(Massachusetts Institute Technology: MIT)留学時代から続けている義足の研究や適正技術に関する取り組みについて講演して頂いた。後半では、参加者をグループに分け、途上国におけるフィールドワークのための準備として、遠藤氏の話題提供を元にしたグループワークを行った。当日は、学外協力者も含めて17名が参加し、盛況裏に幕を閉じた。

講演およびワークグループの概要

前半部では、遠藤氏の研究や適正技術に関する取り組みについて講演して頂いた。講演では、まず、遠藤氏がMIT留学時代から取り組んでいる研究として、小型でありながらモーターやセンサ、バッテリーを搭載し、コンピュータ制御により人間の足首の動きを再現できる世界最先端の義足について紹介された。また、同じ研究室の友人がインドから持ち帰ってきた安価で粗悪な義足に大きな衝撃を受け、MITのD-Lab^(*)という授業に参加したことが適正技術に興味を持つきっかけになったと語られた。このD-Labは、途上国の課題を適正技術によって解決する事をテーマとした授業で、農業廃棄物から炭を作る技術などがそこから生まれていると紹介された。そして遠藤氏は、D-Labの中でインドのNGO団体で

ある Jaipur foot^{(*)2}と共に安価でありながら機能性に優れた義足（“最高の”ではなく“最適な”義足）の開発に取り組むようになったと語った。また、D-Labにおける適正技術とは、以下の6つの条件を満たす技術を意味していると説明された。

- ・ コミュニティーの多くの人が必要としている
- ・ 持続可能性を考慮した原材料、資本、労働力を用いる
- ・ コミュニティーの中で所有、制御、稼働、持続が可能である
- ・ 人々のスキルや威厳を向上させることができる
- ・ 人々と環境に非暴力的である
- ・ 社会的、経済的、環境的に持続可能である

さらに遠藤氏は、日本で See-D^{(*)2}という適正技術の開発および普及に関するビジネスコンテストを立ち上げており、その成果物として、ヤシからお酒を作るための造酒キット、荷車や台車の回転運動を電気に変える小型発電ユニット、スマートフォンを用いた物流管理システムなどが紹介された。また、See-D コンテストに参加している本学の量子・物質工学科4年の鈴木智也君のチームが See-D 内での活動についてプレゼンを行い、東ティモールでのフィールドワークの様子を説明した。そして、フィールドワークを通して道端にたくさんビニール袋が捨てられている事に気づき、ビニール袋を簡単な加工（アイロンによる熱加工）でレインコートに再利用するアイデアなどを紹介した。

後半では、参加者をグループに分け、途上国におけるものづくりのための準備として、フィールドワークの方法について学んだ。遠藤氏の話によると、途上国におけるものづくりでは様々な媒体から多くの情報を集める必要があるが、隠れたニーズを見つけ出すためには、現地に入ってフィールドワーク（現地調査）を行うのが有効とのことであった。一方、フィールドワークにおける観察や感想には少なからず個人のバイアスが掛かるため、以下の3点を意識する必要があると説明された。

- ・ フラットな目で見る（自分に先入観があるという認識を持つ）
- ・ バイアスを意識する（一つの物事を多角的な視点で観察する）
- ・ 完全な真実は見えないという姿勢を持つ（思い込みを無くし、新しい情報に常にオープンでいる）

この個人のバイアスを意識するためのエクササイズとして、途上国のいくつかの場面を写した写真を観察し、写されている事実（Fact）とそこから読み取れる事や各自の解釈（Finding）を書き出し、どのような考えや価値観からそのような解釈（Finding）が導き出されたのかをグループ毎に議論しあった。その後、グループ毎に一枚の写真を選び、その状況についての事実（Fact）や解釈（Finding）についてまとめると共に、どのような問題が隠されているかを議論した。そして、その議論した問題を解決するための技術やサービスについてアイデアを出しあった。最後に、グループ毎に発表会を行い、選んだ写真についてグループ毎にまとめた事実（Fact）や解釈（Finding）、そこから想起された問題、その問題を解決するためのアイデア、そのアイデアによってどのような効果が得られ

るのかを寸劇 (skit) を交えて発表しあった。

まとめ

本ショートトレーニングでは、普段の大学院の講義ではあまり取り上げられない話題として、“適正技術”を取り上げ、専門家を招いて講演とグループワークを実施した。通常であれば数週間～数ヶ月単位で実施されるような内容を 1 日に凝縮して行ったため、非常に濃密な内容となったが、参加者した学生らは積極的に課題に取り組み、活発な議論が行われていた。また、普段の授業とは違う実学ベースでの講義であったため、学生にとっては新鮮な体験だったと思われる。本ショートトレーニング通じ、ものづくりに長けた本学の学生が、自分の持っている技術やアイデアでも十分に世界に貢献出来るのだという気概を持てるようになるのではないかと期待できる。



適正技術について説明する講師の遠藤氏と聴講する参加者



See-D コンテストに参加している本学の量子・物質工学科 4 年の鈴木智也君のチームによる適正技術の発表



グループワークおよび適正技術に関するアイデアの発表の様子



適正技術について話す遠藤氏と梶谷学長



参加者による記念撮影

*¹D-Lab : D-Lab の “D” には “Development through Dialog, Design, and Dissemination” の意味がある (<https://d-lab.mit.edu/>)

*²Jaipur foot : インド発の NGO 団体で、安価な義足を製作して無償で提供するという活動を行っている (<http://jaipurfoot.org/>)

*³See-D : See-D の “See” は世界のニーズを見極める力 “See” を意味しており, “D” には “Developing Country”, “Debatable point”, “Design & Dissemination” の 4 つの意味がある (<http://see-d.jp/>)

5.2.機械加工トレーニングと安全管理教育・免許制度について

5.2.1 実施背景と目標

カデット教育における技術分野は、1) 機械設計・工作・加工技術分野、2) 電子回路設計・製作技術分野、3) プログラミング技術、の3つに大別される。

カデット教育では各技術分野および技術の内容に沿った講習会と免許制度を企画・運営する。講習会とは、上級者が持っている知識や技術を講義、演習、実験形式で未修得者に教育するシステムである。また、免許制度とは、学生の能力に応じた責任と権限を与える制度である。希望者に講習会を受講させ、審査の後に免許を与える。免許取得者に対して設備の使用権、実施権等を与える。2006年度は、講習会と免許制度を企画運営するための枠組みと手順を決定し、各担当教員に向けて立ち上げの準備を依頼した。講習会の企画から免許付与までの流れを下記に示す。

① 講習会の企画提案（必ず安全講習・倫理講習を入れる）

② 技術免許・師範免許・主任免許の審査基準の検討

③ 講習会開催の具体案策定（募集期間、実施期間）

④ 技術免許・師範免許の付与（主任免許は次年度以降でもよい）

また、主催者は学生に対して師範免許の取得を推奨し、次年度以降の講習会実施の補助者を養成することとした。

2007年度には2006年度に企画された機械加工トレーニングについて講習会を開催し、表5.2.1の免許制度仕様書に基づいて審査し免許を交付した。2008年度、2009年度、2010年度、2011年度、2012年度も引き続き機械加工トレーニングを実施した。

表 5.2.1 カデット教育機械加工免許制度仕様書

名称：一般工作機械による加工技術免許

■レベル1：技術免許（アシスタント）

講習目的：所定の技術レベルを習得し、単独で作業できるものを養成する。

審査対象：講習を受講した初心者

審査基準：

安全面：安全確保（服装ほか）、環境整備（工具・用具の準備、清掃、メンテナンス）

技術面：技術習得、機械操作技術、加工技術

教育面：文書作成、図面作成（寸法、公差、仕上げ、指定）

技術免許：設備の使用権を与える。ただし夜間、休日の時間外使用は禁止する。

■レベル2：師範免許（インストラクター）

講習目的：講習会において受講者を指導することができるものを養成する。

審査対象：技術免許保持者または同等の技術レベルを持つ認定されたもの
免許取得後，一定期間後。

免許取得後に製作したものが一定の技術レベルにあるもの

審査基準：

安全面：安全監視が行えること。適切な指示が出せること。

技術面：課題に取り組み審査に合格したもの。製作物を提出し，審査に合格したもの。

教育面：指導方法についての審査に合格したもの。

師範免許：講習会において受講者を指導することができる。装置の保守管理を担当できる。
時間外でも単独で作業できる

■ レベル3：主任免許（チーフ）

講習目的：保守管理から技術伝承の主力となるもの

取得技術の内容：未設定

審査基準：未設定

5.2.2 実施内容

(1) 安全管理教育

機械加工上の注意事項として、実習を通して次の事項について指導を行った。

① 安全作業心得（安全第一）

A 共通事項

- ・ 実習開始5分前までに所定の場所に集合待機すること
- ・ 作業衣は長袖を着用し、袖口のボタンはしっかりかけること
- ・ 履物は、サンダル、スリッパ等で作業してはならない
- ・ 機械加工中、一切手袋は着用しないこと
- ・ 工作物及び工具の着脱または測定する時は、回転を止め主電源を切って行うこと
- ・ 決して回転体には、手を近づけないこと
- ・ 切り粉は直接手で取り除いてはいけない、手箒か切り粉かき棒等を使用することまた、工作物あるいは工具が回転中に切り粉を取り除いてはいけない
- ・ 切り粉が大量に飛散する場合は、保護メガネを着用すること
- ・ 切削油を刷毛等をつける場合は、巻き込まれない様注意すること
- ・ 加工時に発生するカエリ、バリ及び機械の遊び（ガタ）バックラッシュ等を認識することによって、製品精度の向上はもちろん安全作業に努めること

B 旋盤作業の場合

- ・ 加工物及びバイトの取付けは確実にいき、危険なので必要以上に長く突き出さないこ

と

- ・ チャック回転中は、チャックの円周方向位置に体を置いてはならない
- ・ チャックを手で押さえて回転を止めてはならない

C フライス盤作業の場合

- ・ 加工物は、切削中飛ばないように確実に取り付けること
- ・ 加工仕上げ面の段差等を指先の感触で見るときは、必ず回転を止めてから触れること
 - ・ エンドミルの側面で加工する場合、工作物の送り方向は、安全を考慮してアップカット削り（上向き削り）とする

② 機械の保守および整理整頓

- ・ 作業後は機械、工具等の清掃、手入れ、点検を十分に行い、工具は定められた場所に整頓すること
 - ・ 切削により発生した切り粉は、材質別に分別して片付けること
 - ・ 使用した機械周辺床面の清掃を行うこと

(2) 機械加工基礎実習（初級）（講師：武井）

実施期間 平成25年10月15日～10月17日

時間回数 120分×2回（1名）

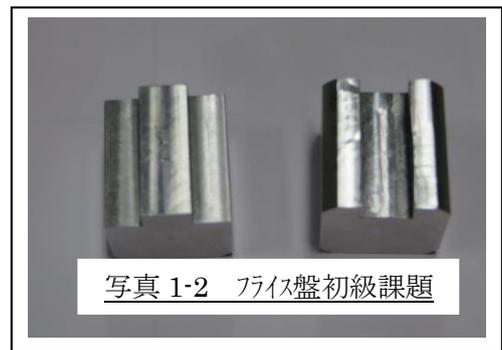
参加者 真辺 淑江（学部のロボメカ工房で同実習実施済の実習免除者なし）

目的目標 安全作業を通して、小型工作機械の操作、測定器の使い方及び図面の読み方など、機械加工の基礎について習得する。

実施内容 写真1-1及び写真1-2の製作を行った。卓上旋盤、卓上立フライス盤による基礎的切削加工を通して、工作機械の安全で効率的な操作法を習得することを目的として指導した。また、その中で図面の読み方、ノギス、マイクロメーター、ダイヤルゲージなど測定器の使い方についても指導を行った。ただし、学部生向けの特色GP教育において、すでに履修している者については免除した。

付与免許 技術免許（アシスタント）

使用機械等 ロボメカ工房の工作機械を使用



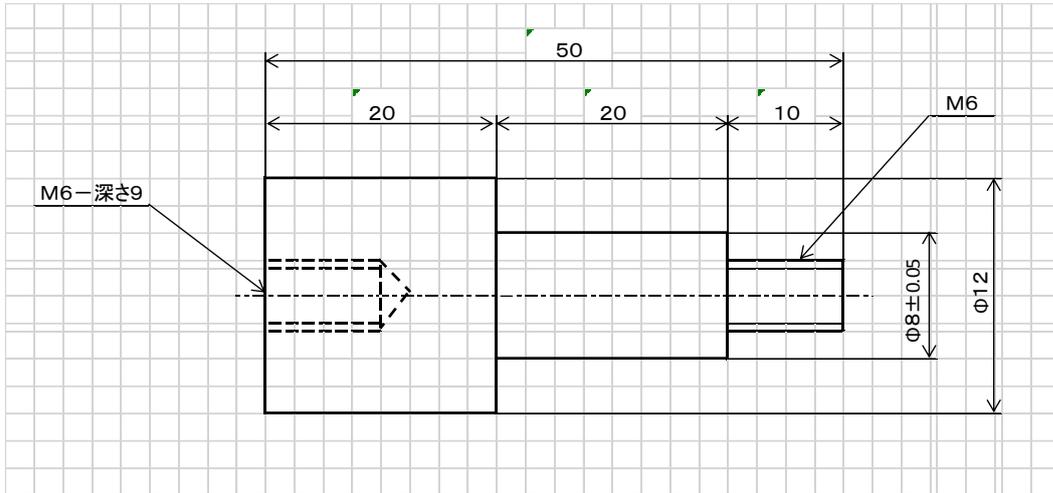


図 1-1 旋盤初級課題の図面

使用刃物

旋盤：・片刃バイト ・剣バイト（面取り用） ・M6 ダイス ・M6 タップ
 フライス盤：・2枚刃エンドミルカッター ・フライングカッター（平面加工）

使用測定器

- ・アナログノギス
- ・デジタルノギス
- ・アウトサイドマイクロメーター（0～25）
- ・インサイドマイクロメーター（5～25）
- ・デップスマイクロメータ（0～25）
- ・スケール（150mm）

実施結果

測定のスPEEDにやや難が有るが、取り組み・課題の出来映えからみて「優」とする。

（以上武井の評価）

（3）機械加工応用実習（中級）（講師：武井）

実施期間 平成25年11月12日(火)～平成26年3月14(木)の3日間13:00～16:00

実習 : 自主製作課題とする。

時間回数 実習 240分×1回（2名）

参加者 金 彰海

有田 輝

目的目標 技術免許(アシスタント)取得者で、更に高度な知識と技術・技能を修得する

ことによって、初級者を指導できること。

実習1 初級者に指導できるレベルまでの技術・技能と安全作業をマスターすることを目的に、ミニ旋盤を使用、幾何公差を含む精密部品の製作を自主制作課題として製品を加工した。

使用機械等 ロボメカ工房の工作機械を使用

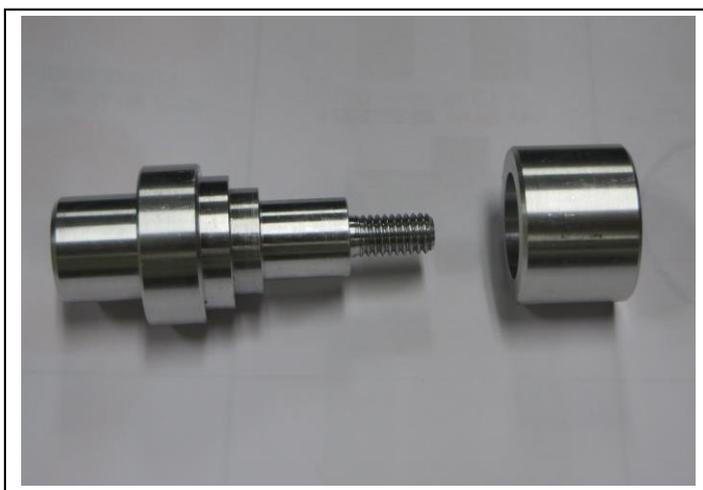


写真 2-1 旋盤中級課題

使用刃物

- ・片刃バイト（左右勝手各1）
- ・剣バイト（面取り用）
- ・穴グリ用片刃バイト（2種類）
- ・突っ切りバイト

使用測定器

- ・アナログノギス
- ・デジタルノギス
- ・アウトサイドマイクロメーター（0～25、0～50デジタルマイクロ）
- ・インサイドマイクロメーター（5～25）
- ・デップスマイクロメータ（0～25）
- ・スケール（150mm）

実施結果

金 彰海・有田 輝の両名共に、スピード感ある作業・優秀な出来映えから「優」とする。

（以上武井の評価）

5.2.3 効果と評価

講習会終了後、製作物および提出されたレポートを審査し、下記の免許証を交付した。

免許名 技術免許(アシスタント)

交付年月日 平成26年3月14日

免許授与者 博士前期課程1年生 真辺 淑江

免許名 師範免許(インストラクタ)

交付年月日 平成25年3月14日

免許授与者 博士前期課程2年生 金 彰海、有田 輝

5.2.4 今後の課題および提案

(1) 免許制度について(明)

今後も参加教員への協力要請を行い、機械技術分野の充実と共に、それ以外の分野についても、講習会と免許制度の拡充に努めたい。

(2) 機械加工トレーニングについて(武井)

今回の実習では、下記の能力を中心に行ってきた。

- ① 図面を解読し、使用する刃物・測定器の選定が出来る
- ② 工作機の保守点検、及び操作と機能の有効活用が出来る。(機械目盛など)
- ③ 自主製作ができる。
- ④ 最適な測定器を選定し、正しく使えること。

(3) 反省(武井)

今年度は、ロボメカ工場の初心者実習受講希望者が予定より多く、カデット教育の日程設定に

苦慮した。次年度は双方のスケジュールを明確に設定し学生諸君に提示し、円滑な対応ができるようにしたいと考える。

6. カデット講演会

6.1 時間と周波数の同時解析を可能にするウェーブレット変換

豊橋技術科学大学の戸田 浩先生をお招きして、時間-周波数解析を可能にするウェーブレット変換の基礎からその応用に関する興味深いお話をいただいた。

日 時： 2013年9月19日(木曜日) 15時00分-16時30分

会 場： 東4号館8階802AV会議室

参加人数：

講 師： 戸田浩博士

豊橋技術科学大学機械工学系 計測システム研究室 研究員

講演題目：時間と周波数の同時解析を可能にするウェーブレット変換

講演概要：時間と周波数の同時解析が可能なウェーブレット変換は、1980年代、フランスの石油探査技師モルレー（Morlet）により考案された。本講演では、最初にウェーブレット変換とはどのようなものか、お話する。そして短時間フーリエ変換など、時間と周波数の同時解析が可能な他の手法とも比較しながら、ウェーブレット変換の特徴を述べる。

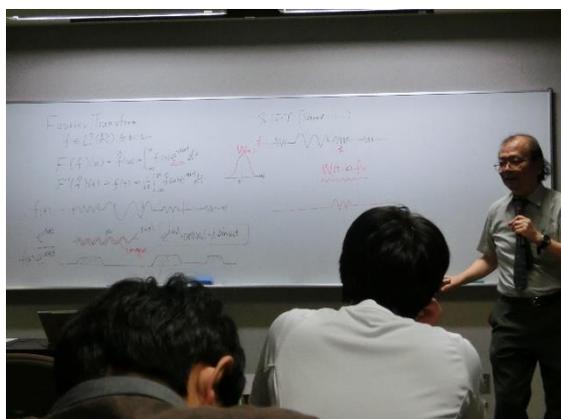
続いてウェーブレット変換の応用について説明する。例えば信号の中のノイズを除去したり、あるいはパルス成分といった特徴のある信号成分のみを抽出／除去するといった信号処理には、離散ウェーブレット変換と呼ばれる手法が用いられる。講演者らは、安定した動作が得られる、複素数離散ウェーブレット変換（複素数関数値を持つウェーブレットによる離散ウェーブレット変換）や、さまざまな信号処理、信号解析に適合させてカスタマイズ可能な複素数離散ウェーブレット変換等の研究を続けてきた。これらを、実際の信号処理の実例と共に紹介する。

なお当日は、工学的な信号処理、信号解析にとどまらず、音楽の信号処理、信号解析も紹介し、実際にその音をお聴かせする。例えば音楽信号において、音程を変えずに時間を引き伸ばすタイムストレッチや、時間を変えずに音程を変化させるピッチシフトは、非常に難しい処理として知られているが、講演者らが開発した複素数離散ウェーブレット変換を用いて、これらにチャレンジした音をお聴かせする。

ウェーブレット変換は、周波数解析に用いられるフーリエ変換とは異なり信号の時間情報を失うことのない周波数解析、すなわち時間-周波数解析を行う事ができる信号処理手法である。離散化された信号に対して行う離散ウェーブレット変換には、同じ信号でも信号のシフト数によってウェーブレット変換結果が異なってしまう「シフト不変性の欠如」という問題が存在するが、戸田先生ら豊橋技術科学大学の研究グループは、複素数ウェーブ

レット変換という手法を開発し、世界で初めてウェーブレット変換における「完全シフト不変性」を実現した。戸田先生は複素数ウェーブレット変換を用いた信号処理手法の研究をされており、オリジナルウェーブレットの設計や信号のオクターブを任意の数に分離することができる可変密度のウェーブレット変換を開発された。戸田先生らの複素数ウェーブレット変換を用いた信号処理アルゴリズムは、処理の複雑化などの理由で、自動体外式除細動器(Automated External Defibrillator : AED)などのリアルタイム性が求められる機器への実装が難しくなってしまうのではないかと質問があったが、戸田先生らの手法を用いて信号を解析した場合、解析にかかる時間は現在一般に用いられているガボールウェーブレット変換(Gabor Wavelet Transformation : GWT)と比較して大いに短縮されており、リアルタイム性が求められる機器にも対応することができるとのことであった。

本講演により、学生に対してウェーブレット変換の基礎から応用までの重要な講演をいただき、多くの感銘を与えた。



6.2 電力系統の安定運用のために ―空気のような電気を支える電力・エネルギー技術―

一般財団法人 電力中央研究所システム技術研究所の吉村健司先生をお招きし、電気エネルギーを取り巻く環境や問題および電力ネットワークの特性に関連する興味深いお話をいただいた。

日時： 2013年10月31日(木曜日) 14時40分～16時10分 (質疑応答含む)

会場： 東4号館8階802AV会議室

参加人数：50名

講師：吉村健司先生

一般財団法人 電力中央研究所 システム技術研究所

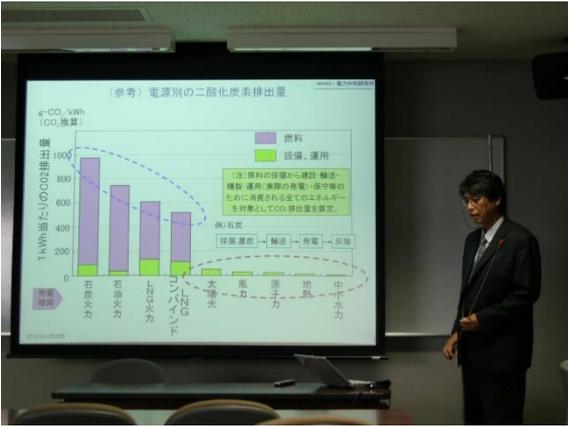
電力システム領域 領域リーダー 上席研究員 博士(工学)

講演題目：電力系統の安定運用のために ―空気のような電気を支える電力・エネルギー技術―

講演概要：エネルギー問題は環境や生活と深く関わっている。特に、電気は普段の生活の中で空気のような存在として使われているが、一旦途切れてしまうとその影響の大きさ・大きさに気付かされる。現在、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーが電力ネットワークに導入されるなど、電気を取り巻く環境は大きな変化の時期にさしかかっている。これらは低炭素社会の実現に向けて効果的である反面、その発電量が自然任せといった問題もあり、上手に付き合う必要がある。そのためには、電力ネットワークの特性を良く知っておくことが重要である。本講演では、電力ネットワークを安定に運用するための重要なポイントについて判りやすく説明する。

環境問題（CO₂問題）の主な要因は温室効果ガス（CO₂など）の増加が原因と考えられている。産業革命以降、人類は膨大な化石燃料を燃やしてきたため、近年は大気中の二酸化炭素（CO₂）濃度が急上昇している。現在、主なCO₂排出源は火力発電であるため、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーを利用した再生可能エネルギー電源がCO₂低減のための電源として着目されており、電力ネットワークに導入されている。しかし、電力ネットワークにおいて停電の無い（少ない）信頼性の高い電気社会を維持することが大事であるため、安定運用の実現には電力ネットワークの特性と再生可能エネルギー電源の導入による影響を考慮する必要がある。

本講演では慣れていない学生にも理解しやすい説明をしていただき、学生に対して電力系統の基礎知識や安定運用が抱える課題について多くの感銘を与えた。



6.3 リーダ追従型隊列誘導と私 –これまでとこれから–

函館工業高等専門学校 特命助教の鈴木 学先生をお招きして、フォーメーション制御手法の1つであるリーダー追従型隊列誘導についてその応用に関する興味深いお話を頂いた。

日 時： 2013年11月22日(木曜日) 14時40分-16時10分

会 場： 東4号館8階802AV会議室

参加人数： 50名

講 師：鈴木 学 先生

函館工業高等専門学校 特命助教

講演題目：リーダー追従型隊列誘導と私 –これまでとこれから–

講演概要：近年、複数の移動ロボットによる協調制御、特にフォーメーション(隊列)制御に多くの関心が集まっている。複数台の協調ロボット群は1台のみの場合と比較してシステムの作業効率や柔軟性、耐故障性の向上が期待できるためであり、中でも隊列制御はロボット群の配置や移動という基本的な協調動作を行わせるものである。

本講演では近年研究されている複数移動ロボットの隊列制御手法と、鈴木先生が研究を行っているリーダー追従型隊列誘導についてお話を伺った。この手法は各フォロアロボットが適当な時間遅れたリーダーロボットと同様の動きでリーダー軌道を追従することで列型隊列を形成、リーダーを追従するように移動を行う。これまで鈴木先生は、本手法を実機に適用した場合に発生するさまざまな問題を解決する手法について研究を行い、本手法の実用性の向上を図ってきた。本講演では、まずリーダー追従型隊列誘導について、どのようにロボット群を誘導しているか、その理論的背景を解説し、その制御手法の有用性および問題点について伺った。続いてリーダー追従型隊列誘導を実機に適用した場合に生じる問題に対し、鈴木先生が解決した手法(即ち学生時代の研究内容)を紹介して頂いた。

リーダー追従型隊列誘導の問題点として、リーダーの位置や速度に関する事前情報がない場合適用が出来ないというものがある。これに対して、開始時刻以前のリーダー情報を設計し、それをフォロアの目標位置・速度とすることで問題の解決を実現し、この手法を実機に適用した動画をお見せ頂き、リーダー追従型隊列誘導の実用性を実感した。

また別の問題として、リーダーがカーブなどで減速した場合、そのままリーダーの速度でフォロアが移動してしまうと前のロボットと衝突の可能性が生じる。そこでポテンシャル関数の斥力を用いて衝突回避を行うと、今度は目標間隔の維持が達成できなくなってしまう。つまり、衝突回避と目標間隔はトレードオフの関係であり、両者を同時に達成することはできないことが示されている。そこで鈴木先生は、双方をできるだけ満足させるためにパラメータ調整則に関する評価関数を設計し、**minmax** 問題を解くことでこの問題の解決を図った。本講演ではこの手法を実機に適用した動画をお見せ頂いた。

リーダー追従型隊列誘導を実機に適用する場合、リーダーの情報はリーダーの初期位置からの移動距離をエンコーダによりデッドレコニングすることで表現する。このとき、リーダーが長距離移動を行った場合、移動距離に誤差が生じ、正しい情報が取得できないという問題が生じる。そこでグローバル情報を用いるのではなく、相対情報を基にした弧長で表現することでリーダー情報の誤差累積を防ぐことを考える。しかし、相対距離をレーザレンジファインダで取得する場合、レーザレンジファインダのサンプリング周期がロボットの制御周期より遅いため、制御周期ごとに相対座標を取得することはできないという新たな問題が生じる。そこで鈴木先生は、相対情報を用いた制御器にマルチレートサンプリング制御を適用することで制御周期に差がある問題を克服した。講演ではこの手法のシミュレーション動画お見せ頂いた。

また、研究についてだけでなく鈴木先生の電気通信大学での研究生活や修了後の進路なども交えて講演を行い、学生の研究意欲の向上とキャリアデザインに繋がる大変貴重なお話を頂き、多くの感銘を与えた。



7. 地域貢献

7.1 オープンキャンパス

● 創立 95 周年記念平成 25 年度第一回大学院オープンラボ

■ 開催日 平成 25 年 6 月 5 日 (水)

■ 開催時間 11:30~16:30

■ 開催プログラム 【継続プログラム】

- ・ 大学院説明会
- ・ 情報理工学研究科説明会
- ・ 情報システム学研究科説明会
- ・ 研究室公開
- ・ 研究室プレゼンテーション

【新規プログラム】

- ・ UEC 版グローバル化教育推進事業キックオフイベント (仮題)
- ・ 女性教員の研究案内
- ・ 電気通信大学技術の実用化事例の紹介 (最先端医療技術は、理工学で創られる)
- ・ 先進理工学専攻教員による模擬講義

我々がネット教育プログラムは知能機械工学専攻の研究室紹介の一部にスペースを割いていただいて活動内容の広報活動を行った。

● 創立 95 周年記念平成 25 年度第二回大学院オープンラボ

■ 開催日 平成 25 年 11 月 22 日 (土)

■ 開催時間 13:00~16:00

■ 開催内容 調布祭に合わせあわせて開催される大学院研研究室公開の中で田中 (一)・田中 (基) 研の一部のスペースで活動内容の広報活動を行った。



7.2 電子工作ボランティア 「電子工作でゲームを作って遊ぼう」

- 開催日 平成25年12月1日(日)・12月8日(日) (同一の内容を2日間開催)
- 開催時間 13:00 ~ 16:00
- 対象 1日に25名(小学4年生~6年生)
- 場所 80周年記念会館3階

カデット教育プログラム取得学生らが地域貢献活動として2日間にわたって、小学生対象の工作教室の講師を務めた。本年度のテーマはパズルゲーム「テトリス」をつくることで、基盤をあらかじめ大学院生が作成し、小学生達にははんだ付けを経験してもらった。はんだづけが初めての参加者が多く、指導には工夫が必要であったが、のべ2日間で合計48名の参加者に指導をおこない、終了後のアンケートも高評価であった。



8. RoboCup サッカー

8.1 RoboCup Japan Open 2013 参加報告

2013年5月4～6日に東京都町田市にある玉川大学 玉川キャンパスにて RoboCup Japan Open 2013 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、9 チームのエントリーがあった。Japan Open では大会初日および 2 日目に予選リーグが行われ、リーグ内で総当たり戦が行われ、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た。



図 1 予選の様子 1(青色が我々)



図 2 予選の様子 2(青色が我々)

昨年の Japan Open 2012 では、ボールを認識するためのセンサやキック機構の駆動回路、機構全体のメンテナンス性の悪さなどが問題となっていた。そのため、今年度は機構系全般の見直しと、センサとキック機構の駆動回路の再設計を行って、試合中に問題が発生しないロボットを作ることを第一の目標とした。具体的な修正方法については 8.2 に記す。戦略システムは昨年度まで使用していた戦略システムの修正を行って大会に出場した。

今年度は、小型ロボットリーグの世界チャンピオンである SKUBA が昨年同様に参加しており、昨年度の大会以上に高度な試合攻防が多く見受けられた。具体的には、ロボット単体のスキルの向上が強く感じられ、それに合わせた味方ロボット同士の協調動作もより複雑な動きが増えた。たとえばスローインやゴールキックなどで、ボールに強いバックスピンをかけたまま蹴り上げ、着地点に停止する動作や、キッカーがボールを蹴る際にボールの周囲を回って敵ディフェンダーをかく乱するといった動作が挙げられる。そして試合内容の複雑化が進んだ結果、我々は他チームの AI の性能向上に追いつけず、予選リーグでは 1 勝 2 負 1 分という結果になった。

一方で、昨年度と比べロボットの信頼性が向上したため、試合直前のメンテナンス時間を大幅に減らすことができた。これにより試合直前にソフトウェアの調整を行う余裕が生まれた。その結果、チームとして初となる自力でのコールド勝ちを達成することができた。

特に今年度の大会では試合中に機構や回路の故障が全く発生しなかったため、長年の課題であったハードウェアの性能不足と信頼性の低さに関しては、ほぼ克服できたといえる。来年度に向けた開発としては、主にソフトウェアの改良が必要になることを痛感することとなった。特に、ここ 2 年程度の著しいロボットの性能向上により、今までは問題とならなかったシステムの不具合や、計算機やロボットの性能により解決が困難であった問題の解決が可能になった。具体的にはサッカーロボットの AI はもちろんのこと、目標地点まで移動するための経路計画や、ロボットの位置検出からロボットの制御入力決定までの間に発生する通信遅延の補償などを行う必要が出てきた。

8.2 ロボットの改良

8.1 でも述べたように今年度は **Japan Open 2012** で問題となった不具合の解決を行った。具体的には機構系全般の見直しと、ボールを認識するためのセンサ回路とキック機構の駆動回路の再設計を行った。

2012 年型ロボットは性能をそれまで以上に向上させることを目的として機構設計を行っていた。その際に 2011 年型の部品構成を基としたためパーツ数も多く、複雑な部品も多かった。その結果、ロボットが故障した時にロボットの分解、組み立てで問題となることが多かった。これらの反省点から 2013 年型ロボットは部品点数を減らした、誰でも組み立てができるようにロボットの組み立て図も準備した。



図 3 2012 年型ロボット

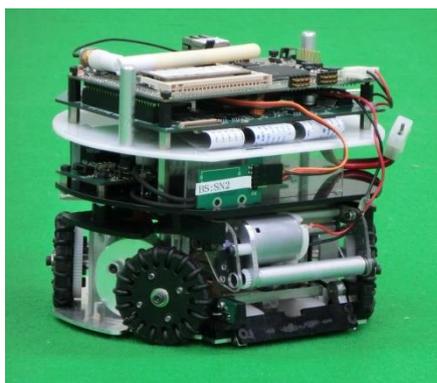


図 4 2013 年型ロボット

次に回路の不具合を解決することとした。ボールを認識するためのセンサはロボット全部にある LED と受光センサによって構成されるセンサである。Japan Open 2012 で認識がうまくいかなかった理由としては、LED の光量が不足していることと、受光センサの特性が良くなったことが原因であった。そこで、ボールセンサは LED の出力を強化し、受光センサも変更した。これにより常に安定してボールを認識できるようになった。

我々のロボットに搭載されているキック機構はソレノイドに高圧電流を流すことでボールを強く蹴りだす機構である。そのため駆動回路はカメラのフラッシュと同じように電池

化できたことを 2013 年大会から確認できた。しかし、プログラムに不具合があり、修正する必要が出てきた。そこで今年度は修士の研究内容として **RoboCup** のための経路計画法、学部生の卒研として遅延補償のためのフィルタリングに関する研究を行なった。

経路計画は **RoboCup** では必須のプログラムである。しかし今まで使用していた経路計画法では試合中に望ましくない経路での移動や、目標地点まで到達できないこともあった。そこで来年度からは **StRRT(Spatio-temporal Rapidly-exploring Random Tree)** と呼ばれる経路計画法を使用できるかの検討を行った。その結果、十分に使用可能であることが確認できた。今後、実際のロボットに **StRRT** を適用してより高度なロボットの動作を実現する。

遅延補償はロボットの性能向上とともに必要となってきたプログラムである。**RoboCup** 小型リーグはここ 5, 6 年でロボットの移動速度が急速に上昇した。そのため、ロボットの位置を認識してからロボットに指令を送信するまでの通信遅延によってロボットの動作が不安定になることが問題となってきた。遅延時間はおよそ 0.1 秒なのだが、その間にロボットは 10cm も移動するため、ボールのキャッチが困難になっているのである。そこで卒業研究では通信遅延が発生していても問題ないように様々なアプローチによる遅延補償法に関して比較を行い、**RoboCup** で使用できそうな手法を探った。研究の結果、**UKF** と呼ばれる手法を使用すれば実機でのリアルタイム性を確保可能でかつ、十分な性能を持ち合わせていることが確認できた。今後、実機に対して **UKF** などの遅延補償を行うプログラムを適用し、安定した動きでサッカーが可能のように調整する必要がある。

9. 大学院生による研究成果発表

【受賞】

1. 中島 慧、中野 和司、桜間 一徳
勾配を有する路面におけるアクロボックスの転がり移動の安定解析について
電気学会 産業応用部門優秀論文発表賞 受賞 (2013. 3)
2. 廣瀬 勝弘、中野 和司、大屋 英稔、田中 航介、山口 芳裕、宮内 洋、岡井 貴之
“ウェーブレット変換を用いた状態遷移を含む心電図波形の識別”
電気学会 産業応用部門 優秀論文発表賞 受賞 (2014. 1)
3. 小倉大介、鄭穎仁 (Ying-Jen Chen)、田中基康、田中一男
A Practical Design Approach to Automatic Model Construction and Controller Design for F16 Aircraft
2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY2013) at Taipei, Taiwan
4. 鄭穎仁 (Ying-Jen Chen)、田中基康、田中一男、Hua O. Wang
Piecewise Polynomial Lyapunov Functions Based on Stability Analysis for Polynomial Fuzzy Systems
5. Aiguo Ming, Kazuya Ogura and Makoto Shimojo
Performance Improvement for Posture Estimation using a 3D Range Camera for Standing-Up Motion Assist Robot
2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2013) において、Best Paper Award を受賞(2013.12)
IEEE ICIA & ICAL 2013 Best Conference Paper of ICAL 2013)
6. 鈴木健治、鈴木陽介、長谷川浩章、明愛国、石川正俊、下条誠
“ロボットハンド指先に付与したネット状近接覚センサ情報に基づく把持姿勢の決定”
財団法人 FA 財団より平成 24・25 年度「論文賞」を受賞 (2013. 12)
7. Keisuke Koyama
IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award を受賞(2013.11)
8. 宮本一郎
“ネット状近接覚センサを用いたヒューマンインタフェースに関する基礎的検討”
日本機械学会若手優秀講演フェロー賞を受賞(2013. 05)
9. 勅使河原誠一
“高速・高感度なすべり覚センサの研究開発およびその応用に関する研究”
平成 24 年度日本機械学会奨励賞受賞 (2013. 04)

【学術論文】

1. Wataru Inujima, Kazushi Nakano, Shu Hosokawa

Multi-Robot Coordination Using Switching of Methods for Deriving Equilibrium in Game Theory, The ECTI Transactions on Computer and Information Technology (in press)

2. T.Ito, H. Mochizuki, T. Watanabe, T. Kubota, T. Furukawa, T. Koike, S. Kakehata: Safety of Ultrasonic Bone Curette in Ear Surgery by Measuring Skull Bone Vibrations, Otology & Neurotology, in press (2014).
3. Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Hua O. Wang, Discrete Polynomial Fuzzy Systems Control, IET Control Theory & Applications, Vol.8, No.2, pp.288-296, Feb. 2014.

【ジャーナル論文】

1. Ichiro Miyamoto, Yosuke Suzuki, Aiguo Ming, Masatoshi Ishikawa, Makoto Shimojo: Basic Study of Touchless Human Interface Using Net Structure Proximity Sensors, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.25,no.3,pp.1-6,2013

【国際会議発表】

1. Katsumichi Sameshima, Kazushi Nakano, Tetsuro Funato, and Shu Hosokawa StRRT Based Path Planning with PSO-tuned Parameters for RoboCup Soccer Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 19th), Beppu, Japan (2014.1)
2. Naoaki Niizuma, Kazushi Nakano, and Kohji Higuchi On group motion control of multi-agent systems with obstacle avoidance Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 19th), Beppu, Japan (2014.1)
3. Eduardo Rivera Jaramillo, Katsuhiro Hirose, Yoshihiro Ogino, Kazushi Nakano, Tetsuro Funato, and Hidetoshi Oya A Wavelet Approach to Identification of Ventricular Fibrillation Including State Transition Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 19th), Beppu, Japan (2014.1)
4. Wataru Inujima, Kazushi Nakano, and Shu Hosokawa Multi-Robot Coordination Using Switching of Methods for Deriving Equilibrium in Game Theory ECTI-CON 2013, Krabi, Thailand (2013.5)
5. R. Kobayashi, M. Suzuki, and K. Nakano Leader-following formation navigation with virtual trajectories for dynamic multi-agents The 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (IFAC-AAC 2013), Tokyo, Japan (2013.9)

6. Yoshihiro Ogino, Tomohiro Uchikado, Kazushi Nakano, Yasuyuki Nakamura, Tomohisa Ogawa, and Takashi Matsuyama
Denoising and Detection of Reflected Waves from Buried Pipes with Ground-penetrating Radar Data
2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR 2013), Tsukuba, Japan (2013.9)
7. M. Kobayashi and K. Nakano
Two problems of wavelet transform, 11th Int. Conf. on Information Technology: New Generation (ITNG 2013), Las Vegas, USA (2013.5)
8. S. Shintaku and K. Nakano
On inhibition of premature convergence in Genetic Algorithms for mobile robot control, Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 18th), Daejeon, Korea (2013.1)
9. Tsukasa Ito, Hideyuki Mochizuki, Tomoo Watanabe, Toshinori Kubota, Takatoshi Furukawa, Takuji Koike, Seiji Kakehata, Intraoperative Measurement of Skull Bone Vibration during Mastoidectomy Using an Ultrasonic Bone Curette, 146th Annual Meeting AMERICAN OTOLOGICAL SOCIETY, Orlando, FL, USA, April 12-14, 2013
10. Motoyasu Tanaka, Hiroshi Kawai, Kazuo Tanaka, Hua O. Wang, Development of an Autonomous Flying Robot and Its Verification Via Flight Control Experiment, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4424-4429, Karlsruhe, Germany, May, 2013
11. Willem Daniël Esterhuizen, Hua O. Wang, Kazuo Tanaka, Stability and Stabilization Conditions for Takagi-Sugeno Fuzzy Model via Polyhedral Lyapunov Functions, 2013 American Control Conference, pp.5637-5642, Washington DC, June 2013
12. Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka and Hua O. Wang, "Piecewise polynomial Lyapunov functions based stability analysis for polynomial fuzzy systems," in proceedings of the IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, pp.34-39, Penang, Malaysia, Nov. 29- Dec.1, 2013.
13. Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka and Hua O. Wang, Nonconvex Stabilization Criterion for Polynomial Fuzzy Systems, 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy, pp.7415-7419 Dec. 2013.
14. Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka and Hua O. Wang, "Stability region analysis for polynomial fuzzy systems by polynomial Lyapunov functions" in proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Beijing, China, July 6-11, 2014. (Accepted)
15. Radian Furqon, Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka and Hua O. Wang, Stabilization Analysis of Single-Input Polynomial Fuzzy Systems using Control

- Lyapunov Functions, in proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Beijing, China, July 6-11, 2014. (Accepted)
16. Aiguo Ming, Kazuya Ogura and Makoto Shimojo: Performance Improvement for Posture Estimation using a 3D Range Camera for Standing-Up Motion Assist Robot, Proceedings of IEEE ICIA(International Conference on Information and Automation) & ICAL(International Conference on Automation and Logistics) 2013, Yinchuan, China pp.350-355(2013.8).
 17. Aiguo Ming, Kazunori Hashimoto, Wenjing Zhao, Makoto Shimojo: Fundamental Analysis for Design and Control of Soft Fish Robots using Piezoelectric Fiber Composite, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, pp. 219-224(2013.08).
 18. Ryuki Sato, Hiroaki Matsuda, Motoyuki Fujieda, Hajime Hata and Aiguo Ming: Design and Implementation of Common Platform for Small Humanoid Robots, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, pp. 855-860(2013.08).
 19. Aiguo Ming, Syunpei Nozawa, Ryuki Satou, Zhangguo Yu, and Makoto Shimojo: Development of Leg Mechanism Using a Knee Joint with Variable Reduction Ratio Adaptive to Load, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2013), Shengzhen, China pp.1574-1579(2013.12).
 20. Yosuke Suzuki, Seiichi Teshigawara, Mitsuhiro Chiba, Takumi Shimada, Aiguo Ming, and Makoto Shimojo, Experimental Discussion of Occurrence of High-Frequency Component on Slip Sensor Output Using Pressure Conductive Rubber, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.2, pp. 316-323, 2013

【口頭発表】

1. 犬嶋 互, 中野 和司, 船戸 徹郎
PSOによる Nash 均衡解探索法を用いたマルチロボット協調制御
第 56 回自動制御連合講演会 (2013.11)
2. 犬嶋 互, 中野 和司, 船戸 徹郎
マルチロボット協調制御における Nash 均衡解の探索法
第 19 回創発システムシンポジウム (2013.8)
3. 鮫島 功路, 中野 和司, 船戸 徹郎
RoboCup ロボットの経路生成のための RRT の自動調整
第 19 回創発システムシンポジウム (2013.8)
4. 岡安真偉雅, 小池卓二: コウモリのエコロケーションを模倣した物体接近検知システムの開発, 日本機械学会 2013 年度年次大会(2013.9.9-11)

5. 佐野拓真, 小池卓二, 新鍋晶浩: 鼓室換気能評価装置の開発, 日本機械学会 2013 年度年次大会(2013.9.9-11)
6. 大瀧直也, 小池卓二, 松岡理奈, 池田勝久: 胎児の聴覚検査を目指した圧電素子による音刺激システム開発のための基礎研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会(2013.9.9-11)
7. 田中絵里, 田地良輔, 小池卓二, 神崎晶, 羽藤直人: 埋め込み型骨導補聴器用経皮信号伝送方法の検討, 日本機械学会 2013 年度年次大会(2013.9.9-11)
8. 大瀧直也, 小池卓二, 松岡理奈, 池田勝久: 胎児の聴覚検査システムの開発, 日本機械学会 第 24 回バイオフロンティア講演会(2013.11.1-2)
9. 佐野拓真, 小池卓二, 新鍋晶浩: 中耳換気能評価装置を用いた臨床計測, 日本機械学会 第 24 回バイオフロンティア講演会(2013.11.1-2)
10. 望月秀行, 小池卓二: 外有毛細胞の activity による蝸牛増幅機構の数値シミュレーション, 第 26 回バイオエンジニアリング講演会(2014.1.11-12)
11. 佐野拓真, 小池卓二, 新鍋晶浩: 中耳腔容積と耳管挙動特性に関する多角的同時計測, 第 26 回バイオエンジニアリング講演会(2014.1.11-12)
12. 菅谷章洋, 高梨琢磨, 小池卓二: PVDF フィルムを用いた樹木の振動計測, 第 26 回バイオエンジニアリング講演会(2014.1.11-12)
13. 關 靖史, 河合 大志, 倉持 信行, 田中 基康, 大竹 博, 田中 一男, 飛行ロボット制御用 HILS システムの開発とその制御系設計への適用, ロボットメカトロニクス講演会 2013, 1A2-F07, Tsukuba, May, 2013
14. 佐藤 順亮, 田中 基康, 田中 一男, 松野 文俊, 冗長多リンクロボットを用いたマッサージシステムの開発と制御, ロボットメカトロニクス講演会 2013, 2P1-J06, Tsukuba, May, 2013
15. 佐藤順亮, 田中基康, 田中一男, 松野文俊, 田中悠也, 冗長多リンクロボットを用いたマッサージシステムの力制御, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 3F1-03, 東京, Sept. 2013.
16. 鄭 穎仁, 田中 基康, 田中 一男, Stability Analysis for Polynomial Fuzzy Systems by Piecewise Polynomial Lyapunov Functions, 第 29 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 588-593, 大阪, Sept. 2013
17. 遠藤 隆宏, 鄭 穎仁, 田中 基康, 田中 一男, モデルパラメータに不確かさを含む非線形システムの SOS ロバスト制御, 第 29 回ファジィシステムシンポジウム, pp.

996-1001, 大阪, Sept. 2013

18. 田中基康, 中島瑞, 田中一男, 接地情報を用いたヘビ型ロボットの段差昇降制御, 第14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, 2H1-3, Kobe, Dec. 2013.

19) 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-中空構造のマス型水中ロボットの試作-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2A2-M07, (2013.5)

20) 篠崎瑞生, 明愛国, 下条誠: 移動マニピュレータによるホームサービスに関する研究-Kinectによる立ち上がり動作の姿勢推定-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2P1-B11, (2013.5)

21) 植木公威, 明愛国, 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-変減速交差リンク機構を用いた膝関節の開発-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2P1-A06, (2013.5)

【大会出場】

RoboCup Japan Open 2013 出場 (5月4日~5月6日)

サッカー小型ロボットリーグ出場 予選Aリーグ4位 (1勝3敗)

担当学生: 犬嶋 互 (M2), 鮫島 功路(M2)

【その他】

1. キング モンクット工科大学トンブリ 校 (タイ) との 夏期短期交換研修プログラムへの対応

(6月1日~7月5日)

(研修内容: 群ロボット隊列制御)

担当学生: 小林 伶 (M1)

2. キング モンクット工科大学トンブリ 校 (タイ) との 夏期短期交換研修プログラムによる留学

(8月26日~9月29日)

(研修内容: Flocking for multi-agent systems with obstacle avoidance)

該当学生: 新妻 直堯 (M1)

3. 高校生の大学見学対応 (10月23日)

埼玉県 私立 西武文理中学・高校 (高校生 15名+引率教員 2名)

担当学生: 犬嶋 互 (M2), 鮫島 功路 (M2), 小林 伶 (M1), 新妻 直堯 (M1), 荻野 義大 (M1)

【予定】

1. 小林 伶, 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(2014.3 予定)

【特許・登録】

発明の名称：「マイクロホン装置」

発明者(4名)：Rajkishore Prasad, 小池 卓二, 高橋 紀成, 松野 文俊

登録番号：特許第 5391374 号 (登録日 2013/10/25)

出願人：国立大学法人電気通信大学

発明の名称：「埋込み型骨導補聴器」

発明者(3名)：小池 卓二, 山本 顕生, 羽藤 直人

登録番号：特許第 5219037 号 (登録日 2013/03/15)

出願人(2名)(持分)：電気通信大学(67%), 愛媛大学(33%)

出願国：PCT 経由アメリカ

発明の名称：「埋込み型骨導補聴器」

発明者(敬称略)：小池 卓二, 山本 顕生, 羽藤 直人

登録番号：米国特許 8,520,867 号 (登録日 2013/08/27)

出願人：電気通信大学, 愛媛大学

=====他大との共同研究=====

田中絵里, 林直輝(B4), 「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

佐野拓真, 「耳管機能および鼓室腔体積計測装置の開発」

自治医科大学埼玉医療センター

望月秀行, 「骨削開装置の安全性評価」

山形大学医学部耳鼻咽喉科

10. まとめ

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「創造的ものづくりカデット」を育成することを目的としており、今年度の活動を通して、本教育プログラムの目指す人材育成を通して、本学の大学院教育に少なからず貢献できたと考えている。平成 26 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。

最後に、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。