

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：53401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560106

研究課題名(和文) 飛行ロボットの制御に関する研究とその情報工学教育や公開講座への導入

研究課題名(英文) Design of Indoor Robotic Plane to learn elementary technology for the university education

研究代表者

高久 有一 (Takaku, Yuichi)

福井工業高等専門学校・電子情報工学科・准教授

研究者番号：50328689

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)： 飛行ロボットの多くは、これまで低レイノルズ数と考えていた人力飛行機や模型飛行機より1桁も小さい超低レイノルズ数の領域での飛行となるため、今までとは異なった空力設計が必要である。本研究では、初心者でも比較的簡単に飛ばせ、自動制御のためのワンチップマイコンを搭載可能な室内飛行ロボットとして、レイノルズ数が $10^{-4}$ での固定翼機の設計を行った。

この模型飛行機を使い公開講座を計画し、「インドア模型飛行機の製作と飛行練習」という名称で、本校にて行った。また、機体に飛行制御用のワンチップマイコンと10軸センサーを搭載し、インドア飛行機の自動制御に関する学生実験を実施した。

研究成果の概要(英文)： Recently unmanned aerial vehicles (UVAs), called Drones and unmanned ground vehicles (UGAs) have been developing rapidly. Acquiring knowledge of these vehicles will be very important for students of a technical college. We have designed an indoor robotic plane for the university education of information engineering departments.

Considering safety, an airplane with a 1.3 m span and a 160 g flight weight that can fly within the confines of the general gymnasium was made of soft materials such as expanded polypropylene (EPP). This plane can fly slowly (under 3.0m/sec), and the turning radius is 3.2m. The payload is over 160g sufficient to accommodate a control microcomputer. It would be possible to learn elementary technology based on UVA.

研究分野：飛行ロボット

キーワード：飛行ロボット 組み込みシステム 飛行制御 インドア飛行機

### 1. 研究開始当初の背景

多くの家電製品、自動車、玩具等に組み込まれているコンピュータシステムは、組み込みシステムと呼ばれ、特定の機能を実現するために用いられている。情報工学の分野では、パソコン、PAD、スマホ等のアプリ開発が注目されがちであるが、組み込みシステムについて学ぶことも同様に重要である。そのため本学科では、レゴマインドストーム(1年)、ワンチップマイコンを用いた電子サイコロ・ライトレースカー(3年)、歩行ロボットの制御(4年)等の実験・演習を行っている。

次段階として、割り込み、PWM制御、フィードバック制御、データ処理、リアルタイム処理、通信等をキーワードとしたより高度な実用性のあるシステムについて、学生が興味を持って学べる場を提供したい。その題材として、飛行ロボットの自動制御を提案し準備を進めている。

### 2. 研究の目的

組み込みシステムの開発では、単に制御用のプログラムを書くだけではなく、対象となる機器の物理的、電気的性質を把握するとともに、システムに応じた情報処理アルゴリズムに関する知識も必要である。本学科でも、上記した背景のように基礎的な実験・演習を行っているが、まだ実践的なレベルには程遠い。一方で、学生向けに様々なロボットコンテスト、プログラミングコンテスト等が開催されていて、本高専からも一部の学生が参加しているが、勝つことは難しい。

このような中で、我々が注目しているのが、日本航空宇宙学会が主催している「全日本学生室内飛行ロボットコンテスト」である。今年で9回目のこの大会は、全国の大学、大学院、高専から60チーム以上がエントリーし、述べ300名以上が参加、活気に溢れていた。このコンテストでは、一般的な体育館程度の広さの室内で、飛行ロボットによるお手玉落とし、自動制御360度旋回などの各種課題が与えられている。以前、本学科からも1チーム(4年生3名)出場し、自動制御にて360度旋回と8の字飛行を成功させ予選で上位に入り決勝戦に進出したが7位に終わった。

そこで、上記コンテストにて、今までに積み重ねてきた経験と技術を生かし、高学年向けに「ワンチップマイコンによる飛行ロボットの自動制御」に関する学生実験を行うため、準備を進めてきた。空間を飛ぶ飛行ロボットの制御は、自由度が高い上、外乱により再現性も低く難しい。また、失敗した場合には墜落し修理となるため、予め段階を踏んだ試験飛行の計画を立て、慎重かつ確実に進行が必要がある。基礎的なことを学び終えた高学年の学生には、飛行ロボットの制御は、実践的な組み込みシステムを学ぶ場となり、ものづくりの良い経験となると考えている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 機体の設計

本研究で設計する室内飛行機に求める条件は、以下の3つにまとめられる。

1. 一般的な体育館の広さで飛行可能であること
2. 初心者でも比較的簡単に短時間で飛ばせるようになること
3. 制御のためのマイコンを積んでも飛ばせること

一般的な体育館の大きさは、広さ20m×40m程度、高さ8m程度である。この広さで初心者が飛ばすことを考え、機速5m/sec程度、旋回半径5m程度の飛行機を目標とする。これであれば、ミスがあってもあわてずに、余裕を持って飛ばすことができるであろう。また、運動性能は重要でないためエルロンがないラダー機とするが、これは、軽量かつシンプルになる上、エルロンの操作が省かれ都合が良い。飛行可能時間は、一般的な室内模型飛行機と同様の5分程度を想定する。

表1に示す航空機のレイノルズ数の比較を見れば分かるように、室内模型飛行機のレイノルズ数は、低いと思われる人力飛行機や模型飛行機のそれに比べてもさらに低く、揚力確保することがとても難しい。そこで、できるだけレイノルズ数を大きくするため、翼弦長を一般的な室内模型飛行機の2倍程度の0.30mにする。主翼の平面形は、翼端でのレイノルズ数低下を防ぎ、製作も容易かつ正確となる矩形翼とする。翼幅は1.3m程度と大き目にする事で、十分な翼面積を確保できる。

表1. 航空機のレイノルズ数の比較

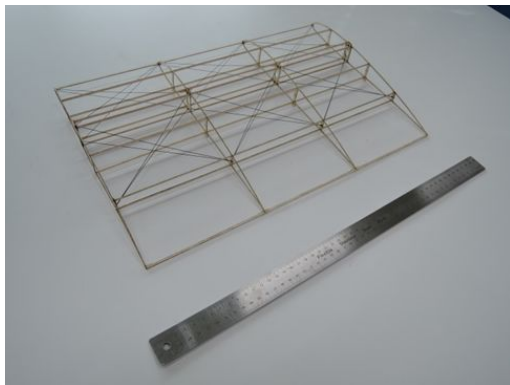
航空機の種類	機速[m/s]	翼弦長[m]	レイノルズ数
軽飛行機	50	1.5	$5.0 \times 10^6$
人力飛行機	7.5	1.0	$5.0 \times 10^5$
模型飛行機	20	0.30	$4.0 \times 10^5$
室内模型飛行機	5.0	0.15	$5.0 \times 10^4$

動粘性係数は、 $=1.5 \times 10^{-5}$  (1気圧20の空気)とした

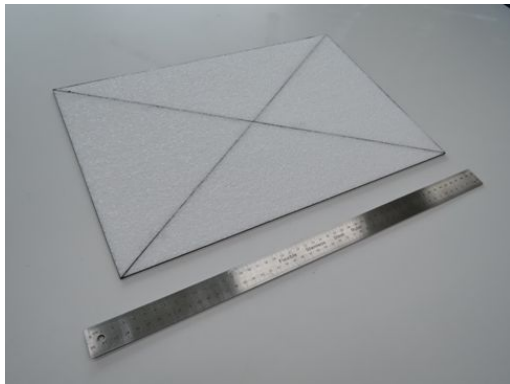
翼型は、クラークYであれば、下面の後縁側がフラットのため作りやすく、 $5.0 \times 10^4$ 程度の超低レイノルズ数領域でも迎角5度ほどで揚力係数が $CL=0.90$ 程度になり、空力的にも良いと思われる。実際に、図1(a)に示すように、バルサ材で翼型をつくり、軽量化のため肉抜きし、ねじれ強度を上げるため内側をカーボンで補強した結果、翼幅0.45m分で、重さ8g程度となった。強度や軽さは十分であり、補強をいれても主翼全体で35g程と、とても軽い。材料費だけで1万円もかかる上、衝突に脆く修理が困難であることから、板翼に変更した。必要馬力を下げ、滑空性能の上げる必要がある場合は、クラークY等の翼型を考慮するべきであろう。

板翼の場合、空力的には劣るものの、構造が簡単なので短時間で作ることができ、発泡材の1つであるEPP(expanded polypropylene)を、図1(b)に示すようにカーボンで補強することで強度を確保できる。修理は簡単で、主翼の材料費も3000円程度で済む。但し、一般的にはこれでも十分軽いのであるが、翼幅0.45m分の主翼だけで重さが13gほどとなり、主翼全体では補強も入れると、50g程度となる。板翼では、空気は前縁で剥離しているため、抗力は大きいものの失速特性は穏やかになり、操縦はしやすいと思われる。機速5.0m/sec、翼面積 $0.30 \times 1.3 = 0.39\text{m}^2$ 、 $CL=0.50$ として揚力を計算すると300gf程度となり、機体重量が200gになっても、ペイロードが100g確保できることになる。なお、20g以下の小型モーターでもパワフルで推力が十分得られることから、抗力が大きいことは問題にならない。但し、空力モーメントが大きいため、翼端のねじれ強度の確保と、水平および垂直尾翼の面積を大きめにし、安定性を上げなければならない。よって、尾翼の静ポリウムは、一般的な室内模型飛行機に比べ1.2倍程度とした。これらの見積もりをもとに設計した飛行ロボットを図2に示す。ロール方向の安定性と、ラダーを用いた旋回が容易になるように、水平な中央翼から、左翼と右翼は26度と大きい上半角をつけている。

以上より、本研究で目標とする飛行ロボットの諸元は、表2のようになった。



(a) 翼型はクラーク Y、翼弦長 30cm、翼幅 45cm 分で 8g 程度



(b) 板翼、翼弦長 30cm、翼幅 45cm 分で 13g 程度

図 1. 主翼の一部の試作

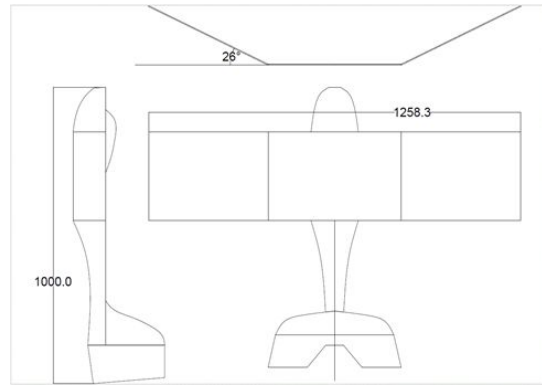


図 2. 飛行ロボットの図面

表 2. 目標となる飛行ロボットの諸元

翼幅	1.3m
翼面積	0.39m <sup>2</sup>
機長	1.0m
重量	200g(バッテリー含)
ペイロード	100g
定常飛行速度	5.0m/sec
定常旋回半径	5.0m

## (2) 機体の製作

機体は、図3に示すようテーブル上で、機体の下面から製作することで正確に作ることが出来る。主翼と機首部分は、弾力性の高い3mm厚45倍発砲のEPPを用い、それ以外は、剛性の高い3mm厚デブロンを用いる。これにより、機首からの衝突時のショックを吸収でき、修理も容易になる。補強は、主に太さ1mmのカーボンロッドをトラス状に組むことで行い、十分な強度と剛性が得られている。カーボンロッド以外の材料は、レーザーカッターを用いて切断しているため製作は容易で、1人が1日4時間の作業を5日間ほど、つまり20人・時間ほどで1機製作できる。各工程で接着剤を完全に硬化させるのに一晩置く必要があり、最低でも4日間はかかってしまう。

この機体に載せる電子部品類とその特徴を、表3に示す。初心者の操作で壊しやすいことを考え、必要な性能を満たした上で、現在入手可能なもので最も安価なものを選んだ。なお、安価でも信頼性のないものは使用していない。

表 3. 飛行ロボットに載せる電子部品類とその特徴

モーター	E-MAX GT2203/33 1560KV 17g ¥1,850
モーター コントローラー	HiModel ESC PROFESSIONAL-10A 9.5g ¥1,350
エレベータ サーボ	EMAX ES9251 0.08sec/60° 0.27kg/cm 3.3g ¥580
ラダーサーボ	同上

完成した機体は、図4に示すもので、バッテリーを含まない機体重量は143gであり、軽量な2セル(7.4V)300mAhのリチウムポリマーバッテリーが17gなので、総重量は160gとなる。制御用のワンチップマイコン一式を載せても200g以下にできるため、軽量に仕上がった。

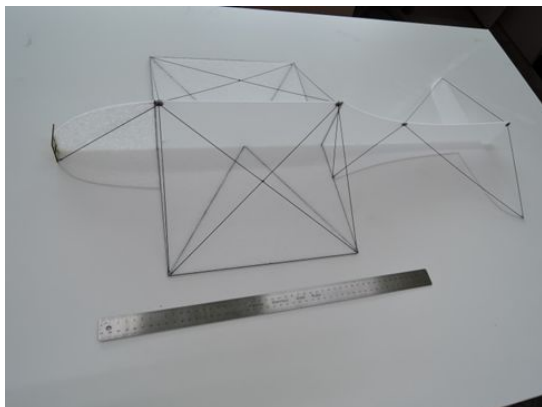


図3. 飛行ロボットの製作過程

下面を先に製作することで、簡単に強度と精度を上げることができる



図4. 製作した機体

翼幅1.3m、機長1.0m、重量143g(バッテリーは含まない)

#### 4. 研究成果

##### (1) 試験飛行の結果

重心位置は、主翼前縁から翼弦長の30%の位置とするが、軽量なバッテリーだと重心位置を合わせることができなかつた。そこで、飛行制御用マイコンとセンサーが30g程度と見積もられるため、その代わりに重いバッテリーを搭載し、試験飛行を行った。2セル800mAhで45gほどであるので、総重量は、約190gとなる。この場合の飛行時間は、20分以上であった。

操縦性は、マイルドで容易であった。自立安定性が非常に高く、送信機のスティックをニュートラルにすれば、ロール方向はすぐに水平になる。ラダーでの旋回も容易で、舵を打っている間だけ旋回し、離せば直線飛行になる。ピッチング方向は、常にエレベータを

操作しなければならないが、敏感でないため難しくない。モーターの取り付け角をダウンスラスト2度にしたところ、パワーをかけても頭上げがなくなり、水平のまま飛行するようになった。サイドスラストは0度のままで癖はなかつた。コントロールに少し慣れれば、離陸に必要な距離は2m程度、着陸には0.5m程度で十分であることが、飛行動画から分かった。

使用したプロペラは7x3.5で、初心者がむやみにパワーをかけても安全のように本来より小さいものであり、モーターの出力を30Wに抑えているが、150gf程度の必要十分な推力であった。パワー不足の場合は、プロペラを8x4.3に替えるだけで出力が50W以上となり、250gf程度まで推力を上げることができる。

飛行調整などを一通り終えた後、定常水平飛行速度と、旋回半径の計測を行った。パイロンを10m離して設置し、その間を定常水平飛行したときにかかる時間を測定することで、その速さを計算した。何度も計測を繰り返していくと、きれいな定常水平飛行機をしたときの結果にはばらつきが少なく、それらを平均したところ、定常水平飛行速度は、2.9m/secとなった。また、旋回半径は、定常水平飛行速度程度で、高度と速さを維持し無理なく360度旋回を連続で続けているとき、円の大きさに合わせパイロンを置き、その距離から算出した。その結果、旋回半径は、3.2mであった。どちらも有効数字2ケタ程度の精度となる。これらの計測の様子は、すべて動画で記録した。この動画から、水平飛行時の迎角を見積もると、図5より約6度、旋回のバンク角は、図6より約15度であることが分かる。



図5. 定常水平飛行時の迎角  
機速2.9m/sec, 迎角約6°



図6. 定常水平360度旋回  
ほぼ定常水平飛行の速さで旋回 旋回半径3.2m バンク角約15°

## (2)公開講座

地域貢献を目的とし、この模型飛行機を使い公開講座を計画し、「インドア模型飛行機の製作と飛行練習」という名称で、本校にて実施した。受講対象者は一般の方、但し小学生以上の子供との参加も可能とした。カーボンやプロペラなど危険なものもあるため、基本的には保護者主体で、作業を行ってもらったこととした。

前記したように、製作には、慣れた人で1機あたり20時間ほどかかってしまうため、事前に半完成状態にしておき、参加者には、モーター、サーボなどの部品搭載と、エレベータとラダーのリンクージュだけを行ってもらうことにした。このような事前準備の都合上、参加者は3組までとした。募集を始めると、小学生の子供とその保護者から多数申し込みがあり、定員を超えてしまったため、キャンセル待ちになった方々がいた。

この講座は、平成27年9月5日(土)と9月12日(土)の2日間、13:00~17:00に行った。

初日は、模型飛行機の仕組みとコントロール方法を説明し、機体の製作を行う。指導は、教員1名とインドア飛行機の経験のある学生2名の3名で行い、1組の親子にサポート1名が付いた。初日の4時間で飛行機が完成する予定であったが、一部未完成のところもあり、残りはサポートの学生に制作してもらい完成させた。なお、トラブルを避けるため、完成した飛行機は、事前に試験飛行を行い、飛ぶことを確認しておいた。

次週の2日目は、体育館にて以下の手順で飛行練習を行った。

1. 滑走練習
2. ジャンプ飛行
3. 180度旋回飛行

1.の滑走練習にて、体育館の左端から右端まで飛行可能なほどの速さで直線滑走ができるようになるのに最も時間がかかった。多くはオーバーコントロールとモーターのパワーを上げるときに他の舵も打ってしまうため、思うように走らせることができない。

それでも、2~3時間練習すると、大体の方が出来るようになり、直線滑走中にエレベータを少しだけ引くことで、2.のジャンプ飛行を行えるようになる。飛行の高さは30cm程度までとし、敏感なエレベータ操作を経験してもらった。この操作に慣れて、3.の180度旋回ができるようになったのは、半数の3名程だった。練習中は、何度も墜落させ、サポートの学生はその修理で忙しかった。参加者は、自分で組み立てた機体ということもあり、熱心に練習を続けていた。17:00に閉会式を行ったものの、まだ飛ばしたいとのことで、その後も1時間以上練習した。結局、6名中3名ほどが、短時間で少し飛ばせるようになった。

アンケートでは、全員が「とても満足した」

と回答していただき、模型飛行機を飛ばす難しさを体験し、それを取り巻く技術を知る良い機会となったようだ。もっと飛ばしたかったという意見もあった。飛行練習をする時には、安全のため、体育館を占有してしまい、部活での利用が出来なくなるが、可能であれば次回からは、あと半日も飛行練習の日を入れたい。

なお、飛行機はそのまま持ち帰ってもらい、後日、送信機、受信機などは外して、郵送にて返却していただいた。

## (3)学生実験への導入

前年度に使っていたインドア飛行ロボットの自動制御システム一式を、新たに設計した機体に搭載し、本校電子情報工学科4年の学生実験に用いた。この学生実験は、卒業研究を意識させる目的で4年後期に行っている。2コマ×4週間と、通常の実験に比べ倍の長期間となり、自由度も高いのが特徴である。

自動制御システム一式を搭載すると、機体の全備重量は、バッテリーを含め230g程度なり、20分以上の長時間飛行が可能となった。これにより、水平飛行速度は、約4.0m/sec、この速度での旋回半径は、4.5m程度であり、バスケットコート1面程度の広さの体育館でも、安全に飛行可能であった。プロペラも8x4.3に替え、パワーをかければ機首を上にしたまま静止(ホバーリング)し続けられるほどとなった。安定性が高いため、この状態でも機体が暴れることもなかった。

学生実験は3人1組で行ってもらい、第1クールは6名(2組)、第2、第3クールは3名(1組)の計12名が受講し、以下のスケジュールで実験を行った。

- ・ 1 週目
  - 1 コマ目 インドア模型飛行機の説明、飛行練習 1
  - 2 コマ目 模型飛行機の制御システムの説明本実験の内容
  - 1. 直線飛行
  - 2. 旋回飛行
- ・ 2 週目
  - 1 コマ目 飛行練習 2
  - 2 コマ目 プログラムの説明
    - 1. サーボ信号の測定、出力
    - 2. ジャイロセンサ値取得 向きの確認
- ・ 3 週目
  - 制御プログラミング
  - PID制御とは
  - PD制御のプログラミング
- ・ 4 週目
  - 1 コマ目 試験飛行
  - 2 コマ目 データ整理、レポートの書き方の説明、まとめ

1 週目は、最初に飛行機の仕組みとコントロール方法を簡単に説明し、飛ばすことが非常に難しいことを伝えた。その後、体育館にて飛行練習を行ってもらい、その難しさを体験してもらった。この練習は、コントローラ

ーを2台使いトレーナーモードで行った。これにより、何かあればすぐにスイッチにて指導側がコントロールできるようになる。この練習飛行での学生の感想は、「こんなに難しいとは思わなかった」、「とても微妙なコントロールをしなければならないことに驚いた」、「何がどう難しいのが分かった」、「飛ばせるようになる気がしない」のようなものであった。参加学生全員が、飛行機の遠隔操作が非常に難しく、すぐに出来るようにならないことを実感できたようだ。なお、この飛行練習は、前述の公開講座のときと同じ方法で行い、初日では、約半数がジャンプ飛行に成功した。その後、実験室に戻り、本実験で使用する飛行制御システムの説明と、本実験で行うのが、2つの飛行

- ・自動直線飛行
- ・自動旋回飛行(できるだけ多く)

であることを説明した。

2週目も最初に飛行練習から行い、約半数の学生が旋回飛行を出来るようになり、3人に1人はある程度自由に飛行を続けられるようになった。一般的なラジコン飛行機の場合、ほとんどの人が飛ばせるようにならないことを考えると、本実験で用いた機体の安定性の高さでコントロールのしやすさを分かっていたかと思う。その後、目的である2つの自動飛行を念頭に、どのようにコントロールすればよいかを考えながら飛ばしたり、他の人の練習飛行を見てもらったりした。ある程度慣れたところで、実験室に戻り、コントロール信号の受信、サーボのコントロール、ジャイロセンサからの値の取得方法などを、サンプルコードを元に動作確認しながら学んでもらった。また、1秒間に60回ほど飛行機を制御していることも、オシロスコープで測定した。

3週目には、PID制御について講義した後、自動飛行させるプログラムの作成に取り掛かった。実際には、P制御のみを実装させ、それにD制御を少し加えることとした。1,2週目での飛行練習を思い出しながら、どの程度の舵を切ればよいかを想像し、それらの調整は、試験飛行時に容易に行えるようにしてもらった。なお、安全のため手動飛行と自動飛行は、コントローラーのスイッチにて切り替えることができるようになっている。4週目に実験開始までに、実験室にてプロペラを外した状態で、簡単な動作確認までをもらった。

4週目には、学生が作ったプログラムにより、指導教員が試験飛行を行った。飛行機の挙動を見ながら、安定して飛行するように各パラメータを変更してもらった結果、4組は以下のように自動飛行を成功させた。

- A組 水平飛行、旋回飛行(1周)
- B組 水平飛行のみ
- C組 水平飛行、旋回飛行(3周)
- D組 水平飛行、旋回飛行(5周)

参加した学生から、この実験を通して、「PID

制御について理解が深まった」、「飛ぶものの制御の難しさを実感できた」、「自分では飛ばせなかったが、コンピュータで飛ばすことができた」などの感想が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

1. 室内飛行ロボットの設計  
高久有一、西仁司  
福井高専 研究紀要  
第49号 pp.71-76 (2016年3月)

〔学会発表〕(計 5件)

1. 模型飛行機の自動制御  
廣島健亮、高久有二  
平成27年度北陸地区学生による研究発表会  
講演論文集 p36 (2016.3.8) 石川高専
2. マイコンによる室内模型飛行機の制御  
小林貴人、高久有二  
平成26年度北陸地区学生による研究発表会  
2015年3月 富山高専
3. ロボット制御用システムの開発  
濱田慎亮、高久有二  
平成26年度北陸地区学生による研究発表会  
2015年3月 富山高専
4. 組み込みシステムの基礎と応用の理解  
に向けたロボット教育  
西仁司、清水幹郎、下條雅史、  
小松貴大、高久有一、斉藤徹  
第30回ファジィシステムシンポジウム  
講演論文集 TE1-2(2014.9.1-3) 高知城ホール
5. 歩行ロボットを用いた  
組み込みシステム  
の基礎と応用の教育  
西仁司、斉藤徹、野村保之、下條雅史、  
高久有一、小松貴大、清水幹郎  
平成26年度全国高専教育フォーラム  
講演概要集 AK22\_1\_1、(2014.8.26-28) 金沢大学

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
高久 有一 (Takaku Yuichi)  
福井高専・電子情報工学科・准教授  
研究者番号：50328689
- (2) 研究分担者  
西仁司 (NISHI Hitoshi)  
福井高専・電子情報工学科・准教授  
研究者番号：70413771