

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500902

研究課題名（和文）

2自由度液面制御付加型体系的制御実験支援システムの開発

研究課題名（英文） Development of the experiment supporting system for systematic control using 2 DOF liquid-level-control systems

研究代表者

菅谷 純一（SUGAYA JUNICHI）

仙台高等専門学校・ICT先端開発センター・准教授

研究者番号：30154454

研究成果の概要（和文）：制御理論の授業にマッチングした実験項目を設計し、講義中心の授業をカバーする意味で、基本ボックスによる制御実験支援システムを開発するのを目的とする。企業から市販されている学習用PID制御器等はあるものの、高価なため学生の実験機器としての導入は困難である。ここでは、通常の制御理論等の数式の多いイメージのつかみ難い内容を実験が導入されることで、より学生の理解を増すことを狙いとする。また、アドバンストとしてX-Yステージ上での液面制御をこの支援システムに追加し、2自由度液面制御付加型の体系的制御実験支援システムの開発とする。この支援システムは授業や卒業研究等で実際に使用して、その効果を評価し検討する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop an experiment support system with basic boxes for the lecture-centered “Control Theory” class by designing experiment items matched with the theory class. Although there are educational PID controllers marketed by some companies, they are so expensive that it is difficult to use them as students test prototype machines. Here, we aim to improve students understanding by introducing an experiment with the difficult contents of control theory, which has a lot of mathematical formulas. We also add the liquid-level control on X-Y stage to this support system as advanced and consider it as a development of the experiment supporting system for systematic control using 2 DOF liquid-level-control systems. This support system is actually used in class, for graduation study, etc., and we evaluate and examine its effectiveness.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学

キーワード：教授学習支援システム

1. 研究開始当初の背景

(1) まず、個々には制御用のソフトウェア

およびハードウェアなどのツールは国内外をはじめ各種販売されている。ソフトウェア

は MATLAB からフリーソフトの Scilab まで、ハードウェアはキット化したシーケンス制御機器から教育用 PID 制御機器などまで十分なくらいある。しかし、これらはいわゆる専門に学ぶため用に製造されているものばかりであるので、PID 実験用としてすぐに 10 台程度を揃えようとしても高価である。授業等で導入できる価格帯ではない。

(2) 一方、仙台高専・電子制御工学科では、4 年の授業である制御理論でいわゆる古典制御理論の基礎を学び、5 年の前期授業である制御工学で制御系の設計理論を学んでいる。特に制御の設計面で PID 制御は重要であるので、5 年の制御工学では講義・実験という形を取って授業の中で PID 制御実験を実施している。これは平成元年以来本年度まで継続している。2 年前までこの PID 制御実験は同一基板上に制御対象と PID 制御器を回路構成し設計・製作していた。しかし、雑音や回路製作そのものに時間が掛かるなどの問題があった。制御対象は RC 回路の 3 段シリーズ回路(図 1) なので見た目でもわかるが、OP

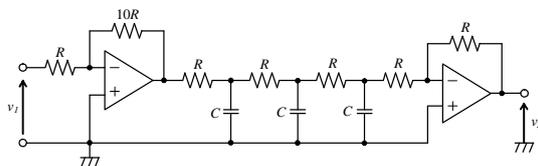


図 1 3 次の制御対象

(オペアンプ)構成であるため、同一基板上だと回路のどの部分が PID 要素なのかなどが見ただ目で分かりにくい点もあった。

(3) 他方、4 年の授業では講義中心の制御理論を行っているが、学生に多く囁かれ必ず出てくる言葉が「制御は難しい」である。そこで、制御に出てくる数式そのものを具体的な形にするのは無理があるが、制御対象を例えば電気回路などに限定して入出力関係のみで実験するのは比較的簡単である。また、電気回路は割合数式に忠実に再現できるし、説明も電気素子の知識さえあれば容易で現象的にも理解がスムーズである。

授業ばかりでなく卒業研究等でも、制御設計として倒立振り子と液面制御を MATLAB によって遂行しているし、そのマイコン化なども行っている。

2. 研究の目的

(1) 5 年で行う PID 実験は 4 年で講義している制御理論にマッチングした実験項目を設定し、講義中心の授業をカバーする意味で、また、数学的難しさに翻弄されないで「制御を知る」うえで重要であると考えられる。

そこでこの研究では、制御対象および制御装置を RC 回路や OP による反転増幅回路、積分回路、微分回路など簡単な電気回路に限定

した、基本ボックス型の回路をそれぞれ単体で製作する。それら基本ボックス回路を組み合わせることで PID 制御実験として実験化する試みを行い、この実験を機能的で視覚的に扱える PID 制御を中心とした制御実験支援システムとして一貫した実験機器を構築する。(2) それを製作し、昨年度・平成 24 年 5 年生に初学者向けとしてこの制御実験支援システムを用いた実験・実習を行う。また、この制御実験支援システムによる実験・実習の評価をアンケート方式によって行う。

また、アドバンストな実験として倒立振り子や液面制御などを加えてひとつの体系的制御実験支援システムを製作する。

3. 研究の方法

(1) 基本ボックス回路による制御授業支援型システムの製作と制御実験

制御の基本要素を構成する RC 回路による実験基板を製作し、その入出力関係を入力信号としてステップ信号、ランプ入力(三角波入力)および正弦波入力をマルチ・ファンクション・ジェネレータから印加してオシロスコープおよび周波数特性分析器で調べる。その後 RC の順序を入れ替えて同様の実験を行う。

RC 基本ボックスの中を見られるようにアクリルケースにする。さらに RC 基本ボックスの底からは別端子が出ていて、さらに大きな別ボックス(親ボックス)に装着できるようにコネクタをつける。さらに、図 2 に示す回路構成は RC 基本ボックス 3 段を接続することで、入出力関係などをチェックする。

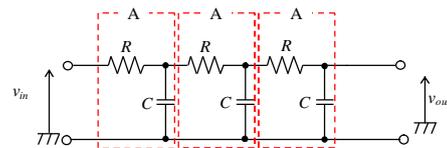


図 2 基本ボックス RC3 段回路

次はオペアンプ回路によって P 要素、I 要素、D 要素と 3 つのアクリルケース内に回路を RC 回路の場合と同様に作る。これらを基本ボックスと呼ぶことにする。PI 要素などは上記製作の基本ボックスを接続して親ボックスで組み合わせられるように構成する。PD 要素や PID 要素なども同様の構成と実験をする。図 3 に示す PID 回路もこれらの基本ボックスから接続して構成するものとする。

設計に関しては図 2 と図 3 に相当する基本ブロックによる構成が一体となって実現できるものとする。PID 制御器の調整用のパラメータは親ボックスにボリューム素子として追加しておく。これらを構成して一つの制御授業支援型システムとする。

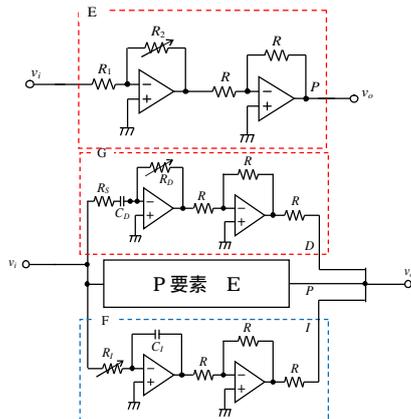


図3 PID回路(上部P要素E)

以上、これらを卒業研究「PID制御実験支援システムの開発」として、学生とともに製作および試行的に実験する。卒研でRC基本ボックスやP要素、I要素、D要素などの基本ボックスと親ボックスを製作し、仮実験をする。制御工学の授業で実際に使用して試作実験システムのアンケート評価を行う。基本ボックスによるPID制御に関しては前期5年制御工学においてある班を試行的に選出して実験を行う。

(2) X-Y ステージ上での制御システムの製作と制御

ボールねじ盤上の液槽の揺れを抑える液面制御としてすでに構成されている(1軸での制御方式)。これら液面制御に関するノウハウを活かし、2自由度制御方式による制御システムの構築をする。2自由度制御を実現するための具体的機器としてX-Yボールねじ盤を使用する。

まず、電源等も含めてACモータおよびACサーボアンプをX-Yボールねじ盤(X-Y軸と呼ぶ)と連結させる。なお、ACモータはX軸を動かすものとY軸を動かすものの2つが必要である。次にACモータに駆動指令電圧入力を入加して、これらX軸とY軸を別々に動かす実験をする。また、ACモータの定格等に注意しながら、制御用コンピュータをこのX-Y軸装置に接続する。この際、実際に市販されているX-Yステージ使用の制御機器等を参考とする。

その後X-Y軸を同時に動かすための協調動作に関して共同研究者の大場と相談し、X-Y軸制御に関するノウハウを勉強する。制御方式に関してはすでに1軸での制御方式で行った線形制御を、X軸で実験し、Y軸で実験する。その後X-Y軸の干渉係数を調整しながらX-Y軸制御方式の検討を行い、実験を行う。

制御系としてはX-Yで楕円軌道を描かせる協調動作について構成する。制御動作としてX軸およびY軸についてそれぞれの制御が

1次元として動作するのを確認する。その後、X-Y軸同時に動いた場合の動作をさせる。

のハードウェアおよび上記ソフトウェアはX-Yボールねじを用いた2自由度液面制御を実現する上で、すぐ搭載可能な構成となっている。また、制御ソフトウェアの部分を2つのPID制御器に置き換えることも可能な状態である。また、これによってPID制御による2自由度液面制御の体系的制御実験支援システム構築の基盤を構成する。

4. 研究成果

(1) 基本ブロック化を基にしたPID補償回路の構成に従って、各基本ブロック回路を実際に製作した。

まず、図4で示される基本ブロックRC回路を製作した。図4の写真のようにアクリルケースに入れ、電源供給および伝達信号を入出力コネクタで伝達させる構造である。

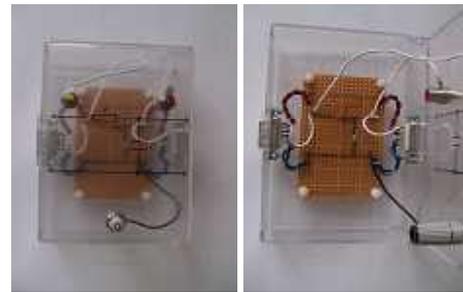


図4 RC回路ブロックの外観

このRC回路ブロックから、基本ブロック反転増幅回路による接続可能な図5の制御対象回路を構成・製作した

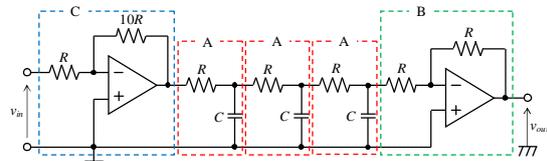


図5 ブロック化した制御対象回路

この制御対象図5を組み込んだゲイン調整回路(図6)を製作した。図6の基本ブロックは反転増幅回路ブロック、差動増幅回路ブロックそして制御対象ブロックである。

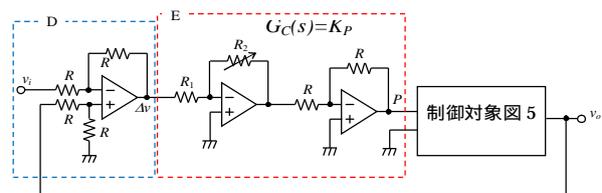


図6 図5を組み込んだゲイン調整回路

D 要素である基本ブロック微分回路を製作した。また、I 要素である基本ブロック積分回路も製作した。それら回路の動作確認も行った。

積分要素 (I 要素) および微分要素 (D 要素) ブロックを並列に接続することで、図 7 に示した PID 補償要素を用いた実験支援システムが構成される。

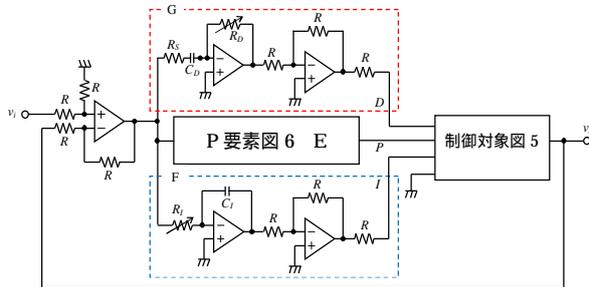


図 7 PID 補償を用いた実験支援システム

から の 9 個の基本ブロック (制御対象ブロック 5 個、比例ゲイン要素ブロック 1 個、積分ブロック 1 個、微分ブロック 1 個、差動増幅回路ブロック 1 個の合計 9 個) による PID 補償要素を用いた実験支援回路モデルを製作した (図 8)。



図 8 PID 補償実験支援回路

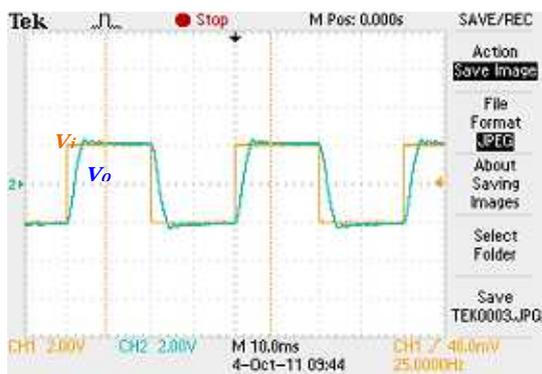


図 9 PID 制御実験の結果

図 9 は、振幅が 2 [V]、周波数が 25 [Hz] の

方形波信号を目標値 v_i として与えたときの、出力 v_o の応答波形を示している。この実験結果から、基本ブロック構成による製作した PID 実験支援システム装置でフィードバック制御実験ができることが確認された。

(2) PID 制御実験支援による実験

この PID 実験支援システムを用いて、現役の学生に実験をしてもらった。平成 24 年度電子制御工学科 5 年生の制御工学において PID 制御ボックス回路を製作させ、PID 制御実験を行った。実験時期や時間数および製作項目などは以下のとおりである。

- ・時期：平成 24 年前期 6 月 ~ 9 月 21 回 \times 2h = 42h 内訳 講義 10h、製作・実験 32h
- h：時間
- ・研究室ごとの班分け 10 班 (1 班 4 名 ~ 5 名)
- ・基本回路ブロック Box ケース (90 個) の製作 (一度にはできないので 1 回の授業で 10 ケース程度を製作した)
- ・制御対象：RC3 段回路製作
- ・制御対象の特性実験・持続振動の計測実験
- ・PID パラメータによる抵抗値計算
- ・OP 回路 (差動部、P 要素、PI 要素、PID 要素) 製作
- ・各要素による制御効果 (P 制御、PI 制御、PID 制御) の実験
- ・特性改善実験



図 10 PID 制御の実験風景 (H24)

図 10 は製作した PID 制御実験回路による PID 制御実験の測定風景である。

(3) アンケート評価

アンケート内容

ここでは、5 年制御工学に適用したこの実験支援システムのアンケートによる評価を行い、この実験支援システムの有用性等を検証する。平成 22 年度の電子制御工学科 5 年生 (在籍数 34 名回答者 32 名) に対して基板回路のみで実験を行った場合と、平成 24 年度の電子制御工学科 5 年生 (在籍数 41 名回答者 35 名) を対象として基本回路ボックスによる PID 実験支援ツールによる実験を行った場合のアンケート調査による比較・検討を行った。

アンケートの構成には設問 23 問、5 段階評価で一部 2 択、3 択や記入項目があり、感想・意見・希望などの自由記述欄も設けてある。

設問の概要項目は以下のとおりである。

・実習全体に関する質問・・・6 設問
 1．実習時間は適当だったですか
 2．PID 制御実験の実習内容を理解できたか・・・など

・個々の実験・実習に関する質問・17 設問
 ・講義関連の実習内容・・・5 設問

1．PID 制御とは何であるか理解できたか
 2．PD 制御の効果を理解できたか・・・など

・実験・実習に関して・・・10 設問
 1．制御系のゲイン特性および位相特性の測定は難しかったですか

2．ゲイン調整は理解できましたか・・・など

・レポートについて（作成時間など）2 設問

・自由記述
 アンケート結果

まず、アンケートの一部ではあるが、実習関連の講義内容に関して PID 実験支援ツールを使用した実験 (H24) とそうでない場合 (H22) の PD 制御の理解度の違いを検討した (図 11)。図 11 の内円部が平成 24 年度で、外円部が平成 22 年度のアンケート結果を示している。

PD 制御の効果についての設問に関しては、明らかに「よく理解できた」も「まあまあ理解できた」も、平成 24 年度のほうが増加している (図 11)。ゲイン調整を尋ねる実習についての設問に関しては平成 24 年度実施の方が「まあまあ理解できた」学生が急増したことが図 12 より読み取れ、PID 制御実験ツ

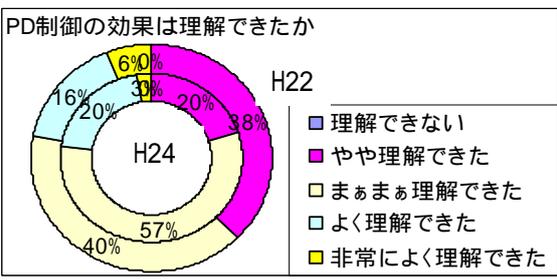


図 11 制御実験のアンケートの一部結果 1

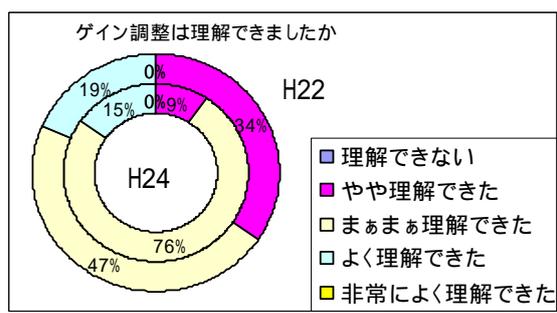


図 12 制御実験のアンケートの一部結果 2

ルによる実験効果が出ていると言える。また、制御の難しさや計測の難しさに関しても、表 1 の PI に関して変化はあまりないものの、PID の難しさについては平成 24 年度のほうが軽減されている。

表 1 アンケート一部結果

Category	質問17		質問18		質問20		質問21		Description
	1	2	1	2	1	2	1	2	
H24 易	1	2	1	2	1	2	1	2	17.PI 制御のパラメータ決定は簡単でしたか
	4	2	4	2	4	2	4	2	
	26	21	25	22	25	22	25	22	
	3	7	4	9	4	9	4	9	18.PI 制御による出力波形の計測は難しかったか
	0	1	1	0	1	0	1	0	
H22 易	34人	33人	35人	35人	35人	35人	35人	35人	20.PID 制御のパラメータ決定は難しかったか
	0	0	1	1	1	1	1	1	
	1	1	5	5	5	5	5	5	
	6	7	14	14	14	14	14	14	21.PID 制御による出力波形の計測は難しかったか
	17	16	10	10	10	10	10	10	
H22 難	8	6	0	0	0	0	0	0	
	32人	30人	30人	30人	30人	30人	30人	30人	

一方で、自由記述欄には「ボックス同士の接続が悪く波形観測が大変だった」という意見等もあり改良の余地は残ったが、この点は接続方法の工夫次第で改善できる。クリアケースへの穴開けも製作実習の一部で、意見の中には「回路を入れるクリアケースだが生徒が穴を開けるのは精度が悪い」というのもあった。

(4) ボールねじを用いた X-Y 軸制御器の協調動作による軌跡追従制御

AC モータ、サーボおよび X-Y ステージを連結しそれに制御用コンピュータを接続した X-Y 軸制御器を構成した。さらに各軸を制御するためのソフトウェアも作成し協調動作実験を行った。具体的には X、Y 各軸の位置制御系に軌跡補償器を導入することにより、協調動作を考慮した軌跡追従制御を行った。共同研究者の大場は直線軌跡、及び円軌跡追従制御に対して今回製作した X-Y 軸制御器での確認を行った。

さらに最終的に任意軌跡追従を目標とした楕円軌跡追従制御の検討を行った。構築した楕円軌跡追従制御の構成を図 13 に示す。

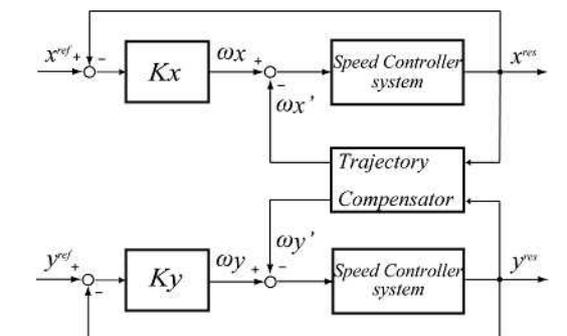


図 13 楕円軌跡追従制御システム
 本システム構成は、インナーループとして、

速度制御器、各軸の時間的指令位置 x_{ref} 、 y_{ref} に応じて各軸独立に位置制御を遂行する独立制御器 K_x 、 K_y と、2 軸の応答位置を同時入力として得る軌跡補償値 x_0 、 y_0 を出力する軌跡補償器から構成されている。本システムにおいては、軌跡補償器の出力を、独立制御器の出力に単純加算して制御をとっている。また、このシステムより軌跡補償器を取り除いた場合、同システムは、各軸独立のフィードバック位置制御系の形をとる。

図 14 に楕円軌跡追従システムのシミュレーション結果を示す。図は軌跡補償ゲイン K_{xy} :100、楕円軌跡の X 軸最大値:1、楕円軌跡の Y 軸最大値:1/2、周期:0.05[sec]でのシミュレーション結果である。

結果は軌跡補償器の有無による X - Y 空間での指令軌跡と応答軌跡の関係、及び単位角度ごとにおける指令値と応答値の偏差を示したものである。また、時間ごとにおける指令値と応答値の偏差(error)の平均値は、軌跡補償器なしでは 1.504[mm]、軌跡補償器ありでは 1.336[mm]となった。

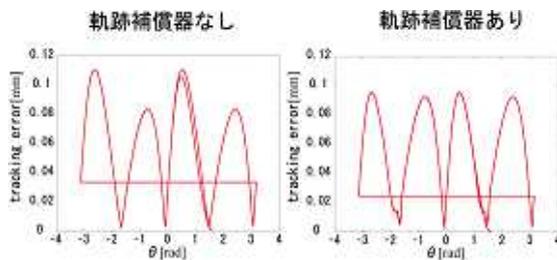


図 14 シミュレーション結果

(5) まとめ

本研究では、PID 制御実験支援システムを基本回路ボックスによって構成し、平成 24 年度 5 年生の授業において製作・実験実習を行った。それをアンケート方式によって評価し、これまで基板上に製作していた制御回路等を各ブロック単位で製作し組み合わせることで PID 制御実験に適用した。その効果は PID 制御の理解を前進させた。基本回路ボックスの製作に手間取るものの、すべての班が最後の特性改善のテーマに到達した。また、この実験をアンケートによって評価し、この制御工学への制御実験支援システムとしての有用性を確認した。

一方、AC モータおよび AC サーボアンプを X - Y ボールねじ盤 (X - Y 軸と呼ぶ) と連結させ、制御用コンピュータを接続させた。この X - Y 軸制御器を用いて各軸を制御するためのソフトウェアも作成した。これによって X - Y 軸制御器の楕円軌跡追従制御を実現させた。PID 制御による 2 自由度液面制御の体系的制御実験支援システム構築の基盤はできた。しかし、 X - Y ボールねじによる液面制御の実現および 2 自由度液面制御の実現には至ら

なかった。この点は今後に譲ることとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

菅谷純一、上町俊幸、武田知也、PID 制御ボックス回路による制御実験支援システムの構築、仙台大専研究紀要、査読なし、第 42 号、2012、pp.1-8

[学会発表](計 4 件)

菅谷純一、武田知也、上町俊幸、PID 制御実験支援システムと評価 第 18 回高専シンポジウム in 仙台、2013 年 1 月 26 日、仙台大専名取キャンパス

丹野陽規、菅谷純一、服部正行、液面制御システムにおける組合せ型大振幅用センサ (第 1 報)、平成 24 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2012 年 9 月 1 日~2 日、富山県立大学

菅谷純一、上町俊幸、PID 制御ボックス回路による制御実験支援 (第 1 報)、電気関係学会東北支部連合大会、2012 年 8 月 30 日~31 日、秋田県立大学

菅谷純一、上町俊幸、PID 制御ボックス回路による制御実験支援システムについて、第 17 回高専シンポジウム in 熊本 (招待講演)、2012 年 1 月 28 日、崇城大学市民ホール・熊本市国際交流会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅谷 純一 (SUGAYA JUNICHI)
仙台大専専門学校・ICT 先端開発センター・准教授
研究者番号: 30154454

(2) 研究分担者

大場 譲 (OOBA YUZURU)
仙台大専専門学校・知能エレクトロニクス工学科・助教
研究者番号: 80455104
上町 俊幸 (KANMACHI TOSHIYUKI)
石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授
研究者番号: 50280334