

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00938

研究課題名(和文) 慣性ロータ型倒立振子を用いた制御教育・出前授業支援システム

研究課題名(英文) Control Teaching Delivering Support System by Using the Inertia Rotor Type Inverted Pendulum

研究代表者

菅谷 純一 (Sugaya, Junichi)

仙台高等専門学校・総合工学科・教授

研究者番号：30154454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：まず、慣性ロータ倒立振子の安定化立位制御を実現するためにPID制御によるMATLABシミュレーションを行った。アドバンスとしてシーケンス制御を用いた倒立振子のPLCコントローラによる教材の製作を行った。慣性ロータ型倒立振子の制御は振子の振り上げ制御と慣性ロータによる立位制御の2重構造を持つ可変構造型制御である。シーケンス制御による疑似的なPID制御を作成し振り上げから立位制御への切り替えが可能になったものを国際学会ICICT2016等において発表した。最適レギュレータ制御シミュレーションとブランコ型実機モデルの振り上げから立位制御への切り替えが可能になったものも国際学会において発表した。

研究成果の概要(英文)：First a MATLAB simulation by PID control was performed to achieve stabilization standing upright control of an inertia rotor inverted pendulum. Teaching materials by a PLC controller of an inverted pendulum using sequential logic control(PLC) were manufactured as an advance. Control of the inertia rotor type inverted pendulum is variable structured control with the double structure of the swing up control of a pendulum and the standing upright control by revolution of the inertia rotor that is swing type pendulum. The one able to make nonlinear-PID control by sequential logic control and switch from swing up control to standing upright control was released in international conference ICICT2016. The one it become possible to also switch from standing upright control to swing up control for swing type inverted pendulum and the optimal regulator control simulation was also released in international conference ICITEE2017. Further we made the swing type inverted pendulum and experimented.

研究分野：複合教育

キーワード：慣性ロータ型振子 可変構造型制御 振り上げ制御 立位制御 非線形制御 PID制御 ブランコ型倒立振子 PICマイコン

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 制御工学や制御理論を学ぶ場合、適切な教材はその複雑な理論を直観的に学ぶ助けになることは言うまでもないが、特に倒立振子はその中でもポピュラーで大学や高専ではよく用いられている。また、これまで倒立振子に関しては理論面応用面共に多くの研究が為されている( )。ここで用いられる倒立振子はいわゆる支点移動型で台車の移動によって振子を立たせる方式のもので、台車を移動するスペースを取ることが難点である。

(2) 一方、倒立振子には慣性ロータ型と呼ばれる、力点に回転力を加えて生ずる反力によって振子全体を立位制御させるタイプの慣性ロータ型倒立振子がある。このタイプは慣性ロータにモータを取り付ける構造で重力に勝って反力を出すために電源としてのパワーを持たせるかモータのトルクを大きく出させるかを考慮して作らないと倒立振子を立位させることはできない。モータのギア比やトルクに注意してモータの選定を行えば十分実現できるし、そのようにしていくつかの実現例や最適制御を適用した場合などが研究されている。モータの駆動に関しては、マイコンによるPWM電圧駆動方式を用いている。慣性ロータ型倒立振子では実機の構造体が小さいので、実験室の机上で実験・実習を試せることが大きなメリットである。

(3) 本研究においては、この慣性ロータ型倒立振子を制御工学教育向けの実験用あるいは出前授業用として製作し、応用面への展開を図る。慣性ロータ型倒立振子制御に関して卒業研究や専攻研究ですでに安定性や慣性ロータの構成法またはPID制御など基本的な事項については遂行している。

### 2. 研究の目的

(1) 慣性ロータ(ロータの回転とは反対向きの慣性力が働く)を利用した各種制御機器を設計・製作し、慣性ロータを用いた倒立振子制御教育・出前支援システムとして本校の情報システム工学科の実験・授業に導入する。これによって難しい制御工学の内容をサポートする。さらに、この出前支援システムは国内・海外の出前授業で使用し、その効果を評価し検討する。

(2) 慣性ロータ型倒立振子を製作し、振子の振上げ制御と慣性ロータによる立位制御を実現する。・ブランコ型倒立振子を設計・開発する。・応用・実践として慣性ロータを用いた姿勢制御による一輪車制御をこの支援システムに追加し、制御の実際を意図した体系的な教育制御出前支援システムの開発とする。

### 3. 研究の方法

(1) まず、情報システム工学科の4年情報システム実験で、すでにある液面制御を用いた制御実験を試す。次に、ボールねじ盤上に乗っている液槽を倒立振子に置き換えて1回目の実験をする。ここでの制御はマイコン制御によるPID制御である。この倒立振子の制御を試みた後、慣性ロータ型倒立振子の立位制御を試してもらおう。しかし、この制御装置は $\pm 2^\circ$ 程度の立位制御しかできないので、5年卒業研究において立位制御範囲を考慮した慣性ロータ型倒立振子のフィードバック制御と題して、これを $\pm 15^\circ$ にできるようにモータや制御部のマイコンプログラムを修正・改善してもらおう。

その際慣性ロータ部を回転させるためのモータの制御は、マイコン内での制御プログラムを実行して、その送出される制御信号によってモータのスピードとトルクを制御させる。モータに関しては先にも述べたようにギア比を大きくし、大きいトルクを作り出す必要がある。ただし、トルクを出す際に注意すべきことはモータを駆動する電流制御も重要で倒立振子を中心位置から切り替える時にトルクが大きいほど駆動電流が異常に多く流れることも予想される。その対策はマイコンで制御が休止する時間を設けた駆動電流制御を試す必要がある。

なお、分担研究者の大場は大電流を避けるための対策を考慮した制御方法の検討とトルクを出せるモータ選択、駆動回路部の設計を担当する。分担研究者の上町は、慣性ロータ型倒立振子の小型化の設計と製作を担当する。

制御専用のPCは慣性ロータ型制御の計測データの蓄積と解析およびMATLABソフトによる慣性ロータ型倒立振子のさまざまな制御側によるシミュレーションおよび実機モデルによるシミュレーションを試みる。このMATLABによる最適制御則などを実機に直接適用して、不確かな要因を考慮した制御方式いわゆる安定状態維持のロバスト制御を検討する。

時間的余裕があれば、小型慣性ロータ型倒立振子に関する出前授業やデモンストレーションはタイやフィンランドの本校の提携校でも実施する予定である。

(2) 専攻研究ならびに卒業研究で、慣性ロータを用いたブランコ型倒立振子の設計およびその制御と題して慣性ロータ型のブランコ型倒立振子を製作させ、その制御の検討をする。卒業研究では慣性ロータ・ブランコ型倒立振子の実機製作と題して、ブランコ型倒立振子の実機製作を行い、慣性ロータによるブランコに関して専攻研究と卒業研究を並行して実施する。

試みる制御方式は、倒立振子の垂れ下がった状態からの振上げ制御と慣性ロータによる立位制御の可変構造型制御である。可変構造型制御をDDモータによる位置決めに応用し

ている事例もあるが、このブランコタイプの応用例はなく、試行錯誤で制御則の切り替えるタイミングを探索し、可変構造型制御を実現する。この実現のためには実機の数式モデルを構成し、MATLAB シミュレーションにより制御則の実現可能性をボード線図等から分析する。

制御則はできるだけ簡単な組み合わせで行くように PID 制御と線形制御則を用いる。理論的には振上げから立位制御の切り替え時は非線形性を考慮しないといけないが、その部分は分担研究者の大場に設計してもらう。

一方、実機はブランコ下部のロータ部分に慣性モータが搭載され、ロータの中心部には慣性ロータが取り付けられる構造となっている。この慣性ロータはブランコ型のため慣性モーメントを大きくするためにロータの円盤上の適当な位置に重りを付けて最大回転トルクが大きく出るように調整される。

この調整に関しては慣性ロータ部の適当なモデリングをすることで MATLAB シミュレーションによって適切な重りの位置とその重さを割り出す予定であり、分担研究者である上町に検討してもらう。さらに、モータのトルクを出せるギア比の検討も行う。

ブランコ全体を振り上げる際のモータについてもかなりの高トルクモータの検討を要する。さらには振り上げやすい回転軸とブランコの結合部分には機構部による負荷が制御に影響が少ないように、簡単に言えば回転しやすいように、ベアリング入りの回転シャフト等を採用する。実験上は簡単にしても、当然回転軸の材質もこだわる必要があると思われる。具体的な実機ブランコの設計に関しては分担研究者の上町が担当する予定である。

(3) 最終年度は「慣性ロータを用いた一輪車の製作と制御」と題して専攻研究および卒業研究で、一輪車の製作およびそれに取り付ける左右バランス制御のための慣性ロータの製作を行う。実機に関する 1 号機の設計・製作を分担研究者の上町に依頼し、一輪車を倒れなくするためのサポート治具としてアルミ角材による直方体上の枠組みを装着し、実験・研究を進める予定である。なお、この左右バランス制御に関してはセンサが重要である。ここでは左右の傾斜を検出する圧電振動ジャイロセンサを 2 個用いる。制御は慣性ロータ型倒立制御を応用した左右のバランス制御と一輪車を前進・後退や停止・発進・加速・減速させる前後の制御を同時に遂行する必要がある。この 2 つの制御系設計と同期等に関する考察等は分担研究者である大場の担当である。

#### 4. 研究成果

(1) 新しく制御工学を学ぶ学生の実証実験

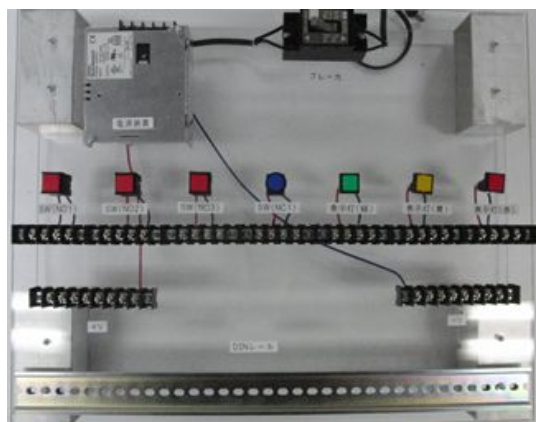


図.1. 教材の表面外観

や小中学生を対象とする公開授業などで用いることのできる分かりやすい実験用教材が必要となる。この点に注目して旧電子制御工学科ではあるが、創造性を活かしたシーケンス制御実験教材の製作と開発を行ってきた(図.1)。

これを発展させてシーケンス制御の応用を学習するために、倒立振子を題材としたステップアップ教材の製作を行った。この教材の制御目的は振り上げ制御後に立位状態を維持することである。PLC コントローラの区分的線形制御を用いて適当な立位角度範囲内で切り換え、倒立振子システムを設計した。その実験結果を報告する。

本実験では、製作した PLC を用いたシーケンス制御技術の初歩を志す初学者向け学習教材図.1 上に、PLC、サーボドライバと端子台を設置して、倒立振子を搭載した実験機材を制御対象とし倒立振子システムを構成した(図.2)。

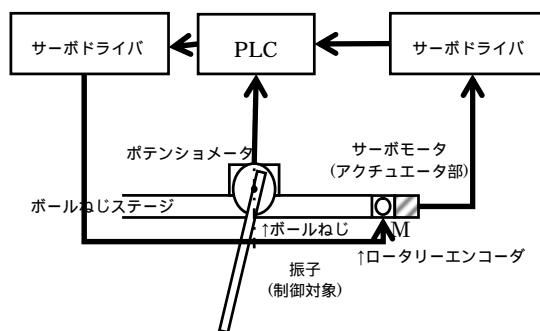


図.2. PLC による倒立振子システム

(2) 本装置では制御範囲を振り上げ制御部と立位制御部の 2 つの構成に分けて制御している。立位状態の角度を  $0^\circ$  としたときに  $\pm 10^\circ$  を立位制御範囲、それ以外を振り上げ制御範囲とした。

製作した倒立振子システムの制御範囲を図.3 に示す。下垂状態にある振子を振り上げ、立位制御させることが本システムの制御目標である。ここでは、振上げた後の区分的に線形な制御における制御範囲の区分について検討する。たとえば、立位制御範囲を  $\pm$

10°の場合、図.3右のように全3ブロックに分割した。サーボモータの回転速度を適宜変化させて実験を行った。

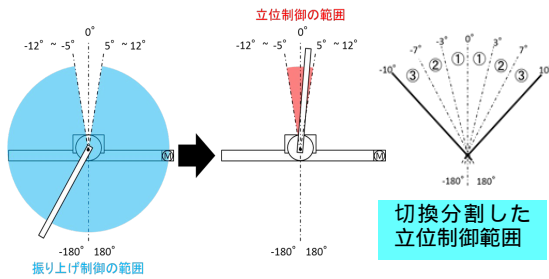


図.3. 振り上げおよび立位制御の制御範囲

ここでは振り上げ制御のフローチャートを図.4に示す。この振り上げ制御では角度のおおのの範囲からサーボモータの回転方向を決定している。振り上げ制御の範囲(-180° ~ -10°の間と 10° ~ 180°の間)にいるときに、振子の現在点(N点)と一時点前(N-1点)とを比較することで、振子が振り上がっている状態なのか下がっている状態なのかを判別している。

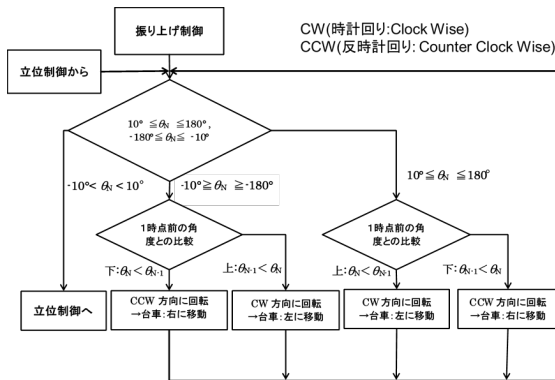


図.4. 立位制御フローチャート

(3) 立位制御範囲(立位判定の角度条件のことを指す)の境界を、-12° ~ -5°・5° ~ 12°として制御範囲を変えた場合の立位時間の変化について比較する。表1は立位制御時のサーボモータの回転速度は2000rpmで固定とし、立位制御範囲として振り角度の範囲をそれぞれ±5°、±7°、±10°、±12°と変化させたとき、最長となる立位時間を調べた。

制御範囲を変えた場合の立位時間の変化について比較するため、立位制御範囲(立位判定の角度条件のことを指す)の境界を、-10° ~ -5°および5° ~ 10°としている。

表1. 立位切換範囲に応じた立位制御継続時間

立位制御範囲	立位時刻(秒)	立位時間(秒)
-5° ~ 5°	12.3~13.5	1.3
-7° ~ 7°	16.6~21.8	5.2
-10° ~ 10°	34.7~43.4	8.7
-12° ~ 12°	20.2~20.7	0.5

(4) 立位制御時のサーボモータの回転速度を変化させつつ、立位制御範囲として振り角度の範囲をそれぞれ±5°から±12°までと変化させたとき、最長となる立位時間は±10°である場合に良好な制御結果となった。図.5の±10°時の振り角度とサーボモータ回転数の様子から、35.2秒付近(図中)では回転数が急上昇し、振子が倒立する制御の様子のわかる。

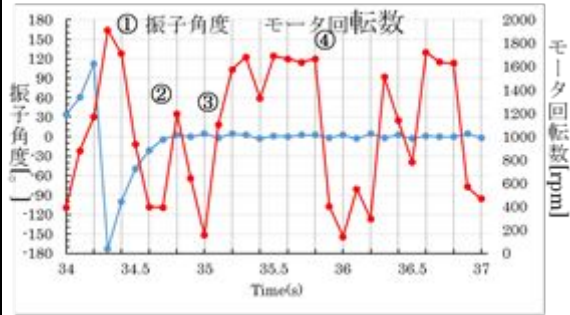


図.5. シーケンス制御による倒立振子の応答

(5) 倒立振り子には慣性ロータ型倒立振り子と呼ばれるものがある。力点に回転力を加えて生ずる反力によって振り全体を立位制御させるタイプの倒立振り子である。

本研究では、慣性ロータ型倒立振り子を用いた制御工学を学習することを前提の目的とした倒立振り子を製作した。安定化制御設計の手順として、はじめに、慣性ロータ型倒立振り子システムのモデル化をおこなうため、倒立振り子各部の物理パラメータを測定し、運動方程式、状態方程式を導出した。そして、振り子を鉛直状態に倒立させる制御方法として、デジタル制御システムにおけるPID制御、最適レギュレータ制御の二つを行った。それぞれの場合についての制御実験を行った。また、この慣性ロータ型を利用したプランコ型倒立振り子の設計および製作をして、その振り上げ制御から立位制御までを試行した。

慣性力の違いを見るために、ロータ円盤の直径  $D$ 、質量  $m_2$  について合わせて検証する。寸法を表2に示す。サンプル時間  $T_s=0.02[s]$  である。

表2. ロータ直径によるシミュレーションモデル寸法

	$D=0.1$	$D=0.15$	$D=0.2$
ロータ直径 $D$	0.1m	0.15m	0.2m
ロータ質量 $M$	0.119kg	0.267kg	0.475kg
慣性モーメント $I$	$1.49 \times 10^{-4}$ kgm <sup>2</sup>	$7.51 \times 10^{-4}$ kgm <sup>2</sup>	$2.38 \times 10^{-3}$ kgm <sup>2</sup>

PID制御のMATLABシミュレーションをしてみると、どのロータの寸法でも振り角度が立位状態である 0[rad]に収束し、倒立状態で安定していることがわかる。傾向としてはロータの直径が大きくなるにつれて整定時間が大きくなる(図.6)。



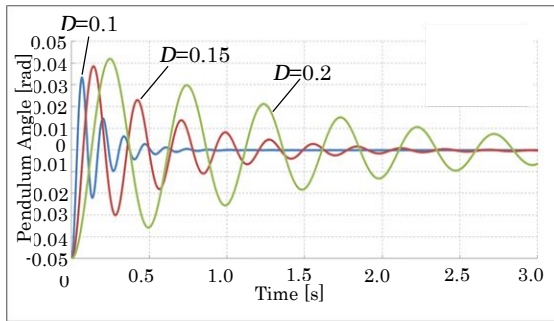
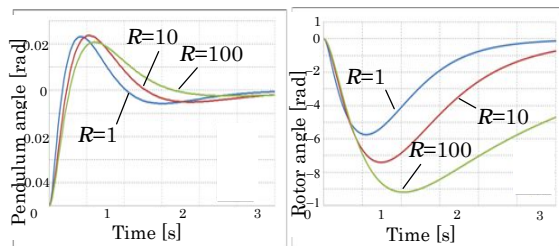


図6. PID 制御による振り角度

(6) ここでは、最適レギュレータによる安定化制御を検証する。最適制御における重み行列は  $Q = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4)$  で表され、 $q_1$  は振り角度、 $q_2$  は慣性ロータ角度、 $q_3$  は振り角速度、 $q_4$  は慣性ロータ角速度の重み係数である。ロータ直径  $D=150[\text{mm}]$ 、サンプル時間  $T_s=0.02[\text{s}]$  のとき設定した最適制御の重み関数  $Q, R$  (一段目)、フィードバックゲイン  $K$  (二段目) を表3に示す。

表3. 最適制御の重み関数とフィードバックゲイン

$Q(1,1,1,1), R1$	$Q(1,1,1,1), R10$	$Q(1,1,1,1), R100$
(532, 0.81, 116, 1.7)	(327, 0.28, 71, 1.1)	(275, 0.1, 60, 0.93)
$Q(10,1,1,1), R1$	$Q(1,10,1,1), R1$	$Q(1,1,10,1), R1$
(532, 0.81, 116, 1.7)	(706, 2.5, 154, 2.6)	(532, 0.81, 116, 1.7)
$Q(1,1,1,10), R1$		
(895, 0.6, 195, 2.6)		



(a) 振り角度 (b) 慣性ロータ角度  
図7. 重み関数  $R$  を変化させたときの振子の過渡応答

倒立振子を  $0.05[\text{rad}]$  傾けた状態からの倒立状態の安定化制御をおこなった。図7(a),(b)は  $Q = \text{diag}(1, 1, 1, 1)$  として、 $R$  を1~100に設定した場合におけるそれぞれ離散時間の振り角度、離散時間の慣性ロータ角度の制御応答である。

(7) ロータ型倒立振子の実機製作を応用した教材として、ブランコ型倒立振子の設計ならびに製作を行った。図8左に製作したブランコ型倒立振を示す。図8右はPICマイコンならびに駆動回路を通してPD制御を適用した場合における応答結果である。

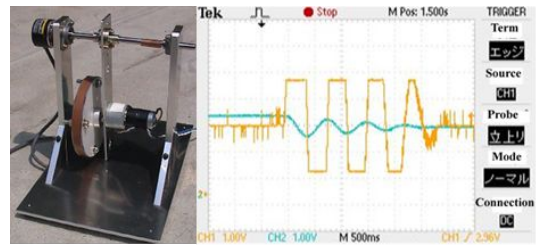


図8. ブランコ型倒立振子 PD 制御応答

PD 制御は電流指令による実験を行った。モータの電源を入れない非制御では振動が継続したが、モータの電源を入れて制御をかけると、応答結果のように振動が速やかに収束した。ここでは記載しないが、すでに下垂状態からの振り上げ制御の実現にも至っている。

まだ改善は必要だが、これを利用すれば制御工学を学習するための教材用倒立振子の開発に有効であると考えられる。

以上、ブランコ型の倒立振子とその動作の確認は終了したが、その海外出前への展開と評価には至らなかった。さらには当初計画であった、この応用としての一輪車製作には時間的なことも含めて達成には至っていない。今後はそれら含めて次回に譲らなければならない。

#### <引用文献>

- 長谷川 智洋、三谷 祐一郎、慣性ロータを用いた倒立振子実験教材の開発、沼津高専研究報告、47、2013、415-420
- 後藤 博哉、佐川 貢一、PID 制御則を有する1リンク倒立振り子モデルを利用した前方傾斜動作の立位姿勢制御特性評価、SICE、49-12、2013、1113-1120
- 藤木 信彰、神崎 一男、松田 隆一、慣性ロータを用いた振子の振り上げ動作と倒立制御、日本機械学会論文集、(C 編) 68 巻 667 号、2002、810-816
- Spong M, "The Swing up Control Problem for the Acrobot", IEEE control Systems Magazine, vol.15, No.1,1995,49-55
- 西條 豪、菅谷 純一、慣性ロータを用いた倒立振子の安定化立位制御設計、平成25年度電気関係学会北陸支部連合大会、2013、H-16(CD-R)
- 岡本 裕生、リレーとシーケンサ、(株)オーム社、2005
- Yuta IISHIBA, Junichi SUGAYA, Kuniaki YAJIMA : "The Development of Fundamental Teaching Materials And the Inverted Pendulum System as Advanced Sequence Control", Proc. of IEEE. the 7th ICITEE2015 Conference, CS,2015,156-161
- 森下 巖、上野 敏行、デジタル制御工学、(株)オーム社、1987
- 山本 重彦、加藤 尚武 著、PID 制御の基礎と応用、朝倉書店、1997、53-71

Junichi Sugaya, Kuniaki Yajima, Yuta Iishiba : Advanced Teaching Materials of Inverted-Pendulum System by the PLC Sequence Method, International Conference on ICT ICICT2016, 2016  
Junichi SUGAYA, Yuzuru OHBA, Toshiyuki KANMACHI : Simulation of Standing Upright Control of an Inverted Pendulum using Inertia Rotor and the Swing Type Inverted Pendulum for Engineering Education , ICITEE2017 Conference, CS 2017

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

— Junichi Sugaya, Kuniaki Yajima, Yuta Iishiba , Advanced Teaching Materials of Inverted Pendulum System by the PLC Sequence Method , Information and Communication Technology Proceedings of ICICT 2016, 2017, 151-160

〔学会発表〕(計 10 件)

Junichi SUGAYA, Yuzuru OHBA, Toshiyuki KANMACHI : Simulation of Standing Upright Control of an Inverted Pendulum using Inertia Rotor and the Swing Type Inverted Pendulum for Engineering Education , ICITEE2017 Conference, CS 2017

遠藤 優磨、大泉 哲哉、熊谷 和志、菅谷 純一、エコラン競技用電気自動車におけるエコドライブシステムの検討、平成 29 年度電気関係学会東北支部連合大会、2017、1A08

Junichi SUGAYA, Kuniaki YAJIMA, Yuta IISHIBA : Advanced Teaching Materials for the Inverted Pendulum System by PLC Sequence Control, ICBIR 2016 Conference Proceedings,01 AE, 2016 , 41-46

菅谷 純一、シーケンス制御による倒立振り子・発展型教材開発、平成 28 年度全国高専フォーラム教育研究活動発表 in 津山、2016、PD-1

遠藤 優磨、松本 恒一、大泉 哲哉、菅谷 純一、川崎浩司、エコラン競技用電気自動車における エコドライブシステム開発の試み、平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会、2016、2C03(CD-R)

菅谷 純一、矢島 邦昭、飯柴 佑太、シーケンス制御による倒立振子の立位制御への応用 、平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2016、H-17(CD-R)

Junichi Sugaya, Kuniaki Yajima, Yuta Iishiba : Advanced Teaching Materials of Inverted-Pendulum System by the PLC Sequence Method, International Conference on ICT ICICT2016, 2016

菅谷 純一、矢島 邦昭、飯柴 佑太、シーケンス制御による発展教材の開発-倒立

振子の立位制御への応用-、第 22 回高専シンポジウム in Mie、2017、J-7

Yuta IISHIBA, Junichi SUGAYA, Kuniaki YAJIMA : “The Development of Fundamental Teaching Materials And the Inverted Pendulum System as Advanced Sequence Control”, Proc. of IEEE. the 7th ICITEE2015 Conference, CS, 2015,156-161  
飯柴 佑太、菅谷 純一、矢島 邦昭、シーケンス制御による倒立振子の立位制御への応用、平成 27 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演会プログラム、2015、H-20(CD-R)

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

菅谷 純一 (SUGAYA Junichi)  
仙台高等専門学校・総合工学科・教授  
研究者番号 : 3 0 1 5 4 4 5 4

(2)研究分担者

大場 譲 (OHBA Yuzuru)  
仙台高等専門学校・総合工学科・准教授  
研究者番号 : 8 0 4 5 5 1 0 4

(3)研究分担者

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 : 5 0 2 8 0 3 3 4