

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06094

研究課題名(和文)自動走行システムのための予測値整形理論の確立

研究課題名(英文)Development of reference shaping theory for automatic driving control systems

研究代表者

南 裕樹 (Minami, Yuki)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00548076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,070,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、周囲の環境を認識しながら賢く動く自動車ロボットを実現するための技術を提案した。まず、環境予測が不確実である場合を想定し、予測誤差が自動走行に与える影響を小さくするための予測値整形機構「予測ガバナ」の設計論を構築した。そして、ミニチュアスケールの実験装置を用いてレーンキープ制御実験を行い、提案手法の有用性を確認した。さらに、環境予測で利用されるニューラルネットの軽量化手法や予測する環境自体を制御して自動車に作用させる手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動走行システムの開発においては、主として、周辺環境の予測技術と自動車の走行制御技術が別々に考えられていることが多い。これに対して本研究のアプローチは、予測ガバナを導入し、予測技術と制御技術を結びつけるものである。本研究では、設計論の構築と検証を行っており、この成果は、予測と制御の調和という課題に対する重要な知見を与えているといえる。また、環境と自動車の相互作用に注目し、環境を制御して自動車を操るといふ今後重要となる新しい問題を検討している。これは、理論面と応用面で今後の発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on technology to realize an automotive robot that moves intelligently while recognizing the surrounding environment. There are three contributions. First, a design method of a signal shaping mechanism, called prediction governor, was developed. The prediction governor shapes predicted reference signals to reduce the influence of prediction errors on automatic driving. In this study, the prediction governor's usefulness was confirmed through lane-keeping control experiments with a miniature scale experimental apparatus. Then, a data compaction method of deep neural networks, which are used in environmental prediction, was proposed. Finally, a method to control the surrounding lighting environment itself and make it work on automotive robots was presented.

研究分野：制御工学

キーワード：自動走行システム 予測値整形 予測ガバナ 経路追従制御 ニューラルネット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、自動走行システムを対象とする。たとえば、自動車が市街地を自動走行する状況では、前方の車との車間距離や進路上の障害物の位置などの周辺環境の情報をセンサ情報から予測することで、加減速・操舵の目標値を決定する。そのため、環境の予測に誤差が生じると、望ましい目標値が決定できず自動走行の性能に悪影響を与える。

環境予測の精度を向上させる研究は、大学や企業で盛んに行なわれているが、天候や交通の流れといった不確定な要素を含む複雑な環境下において、高精度かつ実時間の予測の実現には限界がある。そして実際、完全に予測誤差をゼロにすることは不可能である。この限界を越えるためには、予測値を直接、走行制御に使うという従来のアプローチとは別の視点が必要になると考えられる。具体的に、「環境情報の予測」と「自動車の走行制御」の要素技術を有機的につなぎ、予測誤差の存在を認めつつ、走行制御の性能を改善する新技術の構築が鍵である。

一方、申請者は、上記の課題に関連する基礎技術として、予測値整形機構「予測ガバナ」を提案している。これは、従来技術で得られた予測誤差を含む予測値を、過去の実績情報（過去の真の値）と対象システムのモデル情報を用いて整形するものである。予測誤差が生じる場合でも、予測ガバナをシステムに組み込むだけで、対象システムの制御性能を改善できることが、このアプローチの魅力である。予測ガバナの自動走行システムへの適用例を図1に示しているが、簡易なシミュレーションではその効果が確認できている。しかしながら、この手法は理論構築の初期段階であり、その自動走行システムへの応用可能性については十分議論されていない。予測ガバナの応用可能性を示すことができ、予測と制御の要素技術の高度化のみでは得られない革新的な結果が得られれば、自動走行システムの早期実現が期待できる。

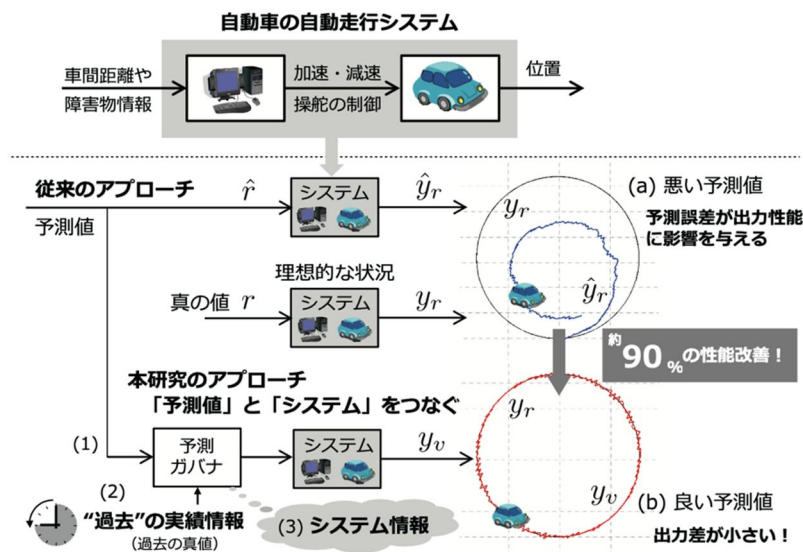


図1 本研究のアプローチ

2. 研究の目的

本研究では、予測技術と制御技術を有機的につなぐ技術として、予測値整形機構「予測ガバナ」を導入する。そして、予測ガバナを組み込むことにより、自動走行システムの性能が向上することを研究室レベルの実験を通して確認する。ただし、これまでの研究において得られている結果を、実際の自動走行システムに直接的に利用することは難しい。たとえば、自動車の制御に現れる非線形性や入力制約などは、直接扱うことができない。また、これまでに議論していなかった予測ガバナの安定性の解析などの議論も必須である。

そこで本研究では、まず、上記の課題を解決し、予測ガバナの最適設計論を自動走行システムに応用できるまで発展させる。そして、それを自動走行システムに応用し、予測ガバナの有用性をミニチュアスケールの実験を通して確認する。

3. 研究の方法

申請当初の課題はつぎの二つであった。

(1) 予測ガバナの最適設計論を確立するため、実システムにおいて考えなければならない、安定性を考慮した設計や非線形性・入力制約を考慮した設計に取り組む。

(2) 予測ガバナを自動車の自動走行システムに応用する。自動走行では、周辺環境を予測した後、その情報を用いて、加速・制動・操舵を制御する。本研究では、加速・制動が自動化されたシステム（車間距離制御）や加速・制動および操舵が自動化されたシステム（障害物回避制御）を対象とし、環境予測の精度が悪い場合でも、予測ガバナを用いることで自動走行の性能が改善できることを実験を通して確認する。

実際の研究では、上記の課題に加えて、以下の課題にも取り組むことにした。本研究課題では、与えられた予測値を整形する問題を対象としている。その一方、自動走行システムを高度化するためには、予測値そのものの精度も重要になる。そこで、予測値を生成する部分に対して新たな

アプローチを試みる。

(3) 自動車をとりまく環境を積極的に変化させることで、精度の高い予測値を生成する問題を検討する。具体的に、環境の光分布を変化させて、シンプルなコントローラが実装された自動車を操るという問題を定式化し、その解を与える。また、路面の凹凸形状を変化させて、加速度センサを介して振動情報として自動車に与えることで、自動車を操る方法を検討する。

(4) 環境予測では、ニューラルネットが用いられることがある。大規模なニューラルネットを用いることで高性能な予測を実現できる可能性が高くなるが、その一方で、メモリ容量が少ない組み込みデバイスへの大規模ニューラルネットの実装が困難になる。そこで、学習済みニューラルネットを軽量化する手法を提案する。

4. 研究成果

本研究課題によって得られた成果は以下のとおりである。

(1) 予測ガバナの設計論の構築: まず、線形システムに対する予測ガバナの設計論を構築した。先行研究で提案していた予測ガバナはやや限定的な表現であったため、より一般的な表現のもとで最適設計問題を定式化した。そして、それに対する最適解を解析的に導出した。

つぎに、安定性を考慮した予測ガバナの設計手法を提案した。対象システムが非最小位相系の場合には、最適な予測ガバナを構築すると予測ガバナが不安定になることが明らかになった。そこで、その不安定化の問題を解決するために、システムの直列分解に基づく設計手法を提案した。

さらに、安定性と入力制約を考慮した設計手法を提案した。予測ガバナの入出力ゲインを導入し、安定性とゲイン制約を考慮した問題を定式化した。そして、線形計画法と特異値分解に基づく予測ガバナの設計手法を提案した。

最後に、非線形システムに対する予測ガバナの設計論を検討した。入力アフィンなシステムに対する非線形予測ガバナの設計問題を定式化した。そして、その問題の最適解を解析的に導出した。ただし、最適解は、システムの入出力の次元が同じでなければならない、最適な予測ガバナが不安定になる場合がある、入力制約を考慮できない、といった実システムに予測ガバナを適用する際に生じる問題点があった。そこで、それを解決するために、システムの疑似線形表現と線形行列不等式を用いた数値最適化に基づく設計手法を提案した。

(2) ミニチュアスケールの実験装置を用いた検証: まず、1/10 スケールの自動車ロボットから構成される実験環境を整備した。そして、それを用いて図2のようなレーンキープ制御実験を行った。この実験では、自動車に搭載されたカメラで自動車前方の路面情報を取得し、画像処理によって白線検出を行うことで、レーンキープを実現する。ただし、画像処理がシンプルであれば、リアルタイムに処理が可能であるが、白線検出の精度が悪くなる(図2の画像処理1に対応)。これに対して、画像処理の精度を向上させると、処理に時間がかかり時間遅れが生じる(図2の画像処理2に対応)。図2のグラフに示すように、画像処理1と画像処理2のどちらもレーンキープが失敗している。しかし、予測ガバナを用いることで、レーンキープが成功した。これより、提案手法(予測ガバナ)の有用性を確認できた。

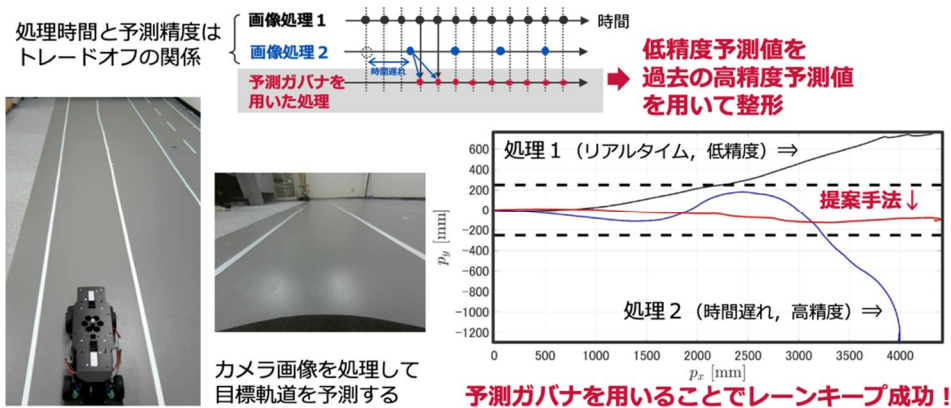


図2 予測ガバナを用いた自動走行システムのレーンキープ制御

(3) 環境刺激による自動車ロボットの制御: 自動車をとりまく環境を積極的に変化させることで、精度の高い予測値を生成する問題を考えた。とくにそのひとつとして、図3に示すような、光センサを搭載した自動車ロボットを、外部に設置したプロジェクタの光で制御する問題を定式化した。これは、光があたると右旋回をし、光があたらないと左旋回をするという超単純な制御則が実装された自動車ロボットをプロジェクタから投影される光分布を用いて制御するものである。ロボットは現在位置での0-1情報を取得するだけであるので、精度よく確実に環境からの情報を受け取ることができる。この問題に対して、経路追従を達成する方法を提案した。図3では、ロボットが直線に追従するような白黒画像(ハーフトーン画像)を生成している。

また、加速度センサを搭載したロボットの経路追従制御を実現するために、路面の凹凸形状を適切に設計するという問題を検討し、第一段階の成果を得た。

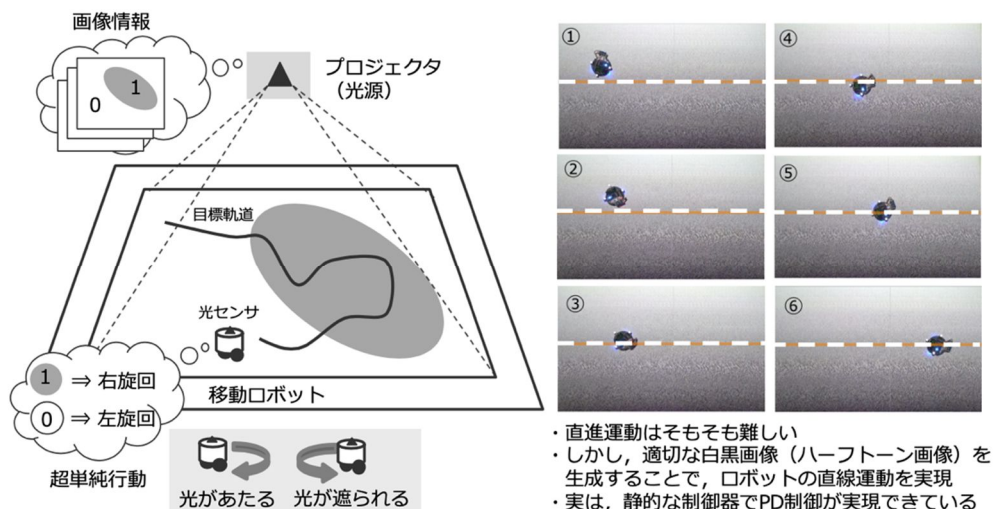


図3 自動車ロボットの時空間光制御

(4)ニューラルネットの軽量化: 予測値の生成には、ニューラルネットが用いられることが多いが、ネットワークが大規模になると、FPGA などの省資源のデバイスに実装することが困難になる。この問題に対応するために、ニューラルネットの軽量化に取り組んだ。具体的に、ユニット間の結合重み係数を量子化し、低ビット数の離散値に変換することを検討した。そして、結合重み係数を量子化するためのノイズシェーピング量子化器を提案した。さらに、ノイズシェーピング量子化器の性能を決定づける誤差拡散フィルタの設計問題を定式化し、その設計問題を巡回セールスマン問題に帰着させて系統的に解く手法を構築した。

最後に本研究課題の成果について以下の点を強調しておく。

まず、本研究では、予測ガバナの設計論を実システムに適用することを目標として発展させた。基本的な問題に対しては解析解を導出し、予測ガバナの最適構造や性能限界を明らかにしている。そして、安定性や入力制約などを考慮した発展問題においては、効率的に設計するための数値最適化手法を提案している。また、研究室レベルではあるが、実験装置を構築し、提案手法の有用性を確認している。この一連の成果は、予測誤差を含む予測値を用いた制御において、予測と制御の融合という視点の重要性を示すものである。さらに、そのような問題に対して、予測ガバナがひとつの強力なツールとなることが期待できる。

つぎに、環境の光分布を制御することで自動車ロボットを誘導するという新しい問題を検討した。これまでの研究では、自動車に搭載するコントローラを高性能化することに注力していたが、このアプローチは自動車コントローラはシンプルなものに固定し、その代わりに、環境を智能化して制御するというものである。このような取り組みは、自動車と交通インフラの相互作用という観点からも重要なものであり、理論面でも応用面でも今後の発展が期待できる。

上記のことから、本研究課題を通して、自動走行システムの開発に対する重要な知見が得られたと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 J. E. Rodriguez Ramirez and Y. Minami	4. 巻 8
2. 論文標題 Design of neural network quantizers for networked control systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 318, 318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics8030318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 南裕樹, 池田智裕, 石川将人	4. 巻 32
2. 論文標題 誤差拡散型量子化によるニューラルネットワークの軽量化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 133, 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.32.133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 J. E. Rodriguez Ramirez, Y. Minami, and K. Sugimoto	4. 巻 109
2. 論文標題 Synthesis of event-triggered dynamic quantizers for networked control systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Expert Systems with Applications	6. 最初と最後の頁 188, 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eswa.2018.05.020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 J. E. Rodriguez Ramirez, Y. Minami, and K. Sugimoto	4. 巻 21
2. 論文標題 Event-triggered quantizers for network traffic reduction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics	6. 最初と最後の頁 1111, 1113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.20965/jaciii.2017.p1111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Minami and Y. Iwai	4. 巻 7
2. 論文標題 Prediction governors for input-affine nonlinear systems and application to automatic driving control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Robotics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.3390/robotics7020016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 南裕樹	4. 巻 61
2. 論文標題 信号品質を保つデジタル化技術: ノイズシェーピング量子化V 誤差拡散法	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 36, 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.61.10_428	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 南裕樹	4. 巻 61
2. 論文標題 信号品質を保つデジタル化技術: ノイズシェーピング量子化 I 量子化とノイズシェーピングの基礎	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 76, 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.61.2_76	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡島寛, 南裕樹	4. 巻 61
2. 論文標題 信号品質を保つデジタル化技術: ノイズシェーピング量子化 II 変調器	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 34, 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.61.4_158	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 南裕樹	4. 巻 61
2. 論文標題 信号品質を保つデジタル化技術：ノイズシェーピング量子化 III 制御のための動的量子化器(1)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 241, 246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.61.6_241	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計25件(うち招待講演 0件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 J. E. Rodriguez Ramirez, Y. Minami, and K. Sugimoto
2. 発表標題 Design of quantizers with neural networks: classification based approach
3. 学会等名 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南裕樹, 池田智裕, 石川将人
2. 発表標題 ニューラルネットの軽量化のためのノイズシェーピング量子化: 学習データの特徴を利用したフィルタ設計
3. 学会等名 第6回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥田貴裕, 南裕樹, 石川将人
2. 発表標題 時空間光ナビゲーションによる移動ロボットの軌道追従制御
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南裕樹, 岩井雄大
2. 発表標題 疑似線形表現に基づく予測ガバナの設計と自動走行システムへの応用
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田智裕, 南裕樹, 石川将人
2. 発表標題 ニューラルネットワークの動的量子化に関する一考察
3. 学会等名 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南裕樹
2. 発表標題 制御のためのノイズシェーピング技術とその応用
3. 学会等名 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. E. Rodriguez Ramirez, Y. Minami, and K. Sugimoto
2. 発表標題 Event-triggered dynamic quantizers for networked control systems
3. 学会等名 20th IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Iwai, Y. Minami, and K. Sugimoto
2 . 発表標題 Prediction governor for nonlinear affine systems and its application to automatic cruise control
3 . 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. E. Rodriguez Ramirez, Y. Minami, and K. Sugimoto
2 . 発表標題 Neural network quantizers for discrete-valued input control
3 . 学会等名 The 2017 Asian Control Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Minami
2 . 発表標題 Design of prediction governors for linear systems with input saturation
3 . 学会等名 The 2017 Asian Control Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Takamoto, Y. Minami, and K. Sugimoto
2 . 発表標題 Development and control of distributed lighting control system
3 . 学会等名 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 岩井雄大, 南裕樹, 杉本謙二
2. 発表標題 予測ガバナを用いた自動運転制御
3. 学会等名 平成29年度SICE関西支部・ISCIE 若手研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Tachibana, Y. Minami, and K. Sugimoto
2. 発表標題 Tracking control of ball and beam systems by prediction governors
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 W. Fukumi, Y. Minami, T. Matsubara, and K. Sugimoto
2. 発表標題 Reinforcement-learning-based quantizer design for discrete-valued input control
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岩井雄大, 南裕樹, 杉本謙二
2. 発表標題 予測ガバナによる自動走行制御の性能改善
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第92期定時総会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩井雄大, 南裕樹, 杉本謙二
2. 発表標題 予測ガバナを用いた自動走行制御の検討
3. 学会等名 第 33 回センシングフォーラム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福見渉, 南裕樹, 松原崇充, 杉本謙二
2. 発表標題 強化学習を用いた量子化器設計
3. 学会等名 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岩井雄大, 南裕樹, 杉本謙二
2. 発表標題 非線形システムに対する予測ガバナの設計と自動走行制御への応用
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Kageyama, Y. Minami, and M. Ishikawa
2. 発表標題 Modeling and control of dynamical systems with neural ordinary differential equations
3. 学会等名 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Okuda, Y. Minami and M. Ishikawa
2. 発表標題 Tracking control of mobile robots by spatiotemporal light navigation
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kusui, Y. Minami, and M. Ishikawa
2. 発表標題 Stable dynamic quantizer design for MIMO non-minimum phase systems based on serial system decomposition
3. 学会等名 2019 18th European Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 影山将也, 南裕樹, 石川将人
2. 発表標題 Neural Ordinary Differential Equations を用いた動的システムのモデリングと制御
3. 学会等名 第 62 回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北岡知大, 南裕樹, 石川将人
2. 発表標題 路面形状制御による移動ロボットの軌道追従制御
3. 学会等名 第 62 回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南裕樹, 池田智裕, 石川将人
2. 発表標題 深層学習モデルの圧縮のためのノイズシェーピング量子化器の多段階設計
3. 学会等名 第 63 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楠井大気, 南裕樹, 石川将人
2. 発表標題 多入力多出力非最小位相系に対する動的量子化器の一設計法
3. 学会等名 第 63 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ https://y373.sakura.ne.jp/minami/
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考