

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03774

研究課題名(和文)次世代道路交通システムのためのグローバル交通流制御

研究課題名(英文)Glocal Traffic Control of Next Generation Transportation Systems

研究代表者

井村 順一 (Imura, Jun-ichi)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：50252474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,810,000円

研究成果の概要(和文)：近年、車間通信技術や自動運転技術など各種の制御技術が精力的に研究されている。しかしながら、個々の振る舞いから全体としての振る舞いまで道路交通システム全体を最適に設計する、体系だった理論はない。そこで本研究では、車両速度制御、信号機制御、経路選択制御の3種類の制御入力に着目し、これらをグローバル(グローバル/ローカル)な視点で体系的に設計するためのグローバル交通流制御手法を構築した。具体的には、グローバル制御のための交通流階層ネットワークモデルを導出し、それに基づくグローバル制御系の設計手法を構築した。またグローバル制御系設計のための道路交通流シミュレータのプラットフォームを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

個々の自動車の自動化だけでなく、自動運転車間の連携、人が運転する車両との協調、信号機との協調など、様々な連携・協調により、渋滞することなく短い移動時間でスマートな移動を可能とする制御系設計法の一構成法を示した。個々の通信技術の信頼性や予測の不確かさなどの実用化のための課題は多々あるが、特性や目的が異なる様々なシステムが連携するための枠組みを示し、シミュレーションによりその可能性を提示することで、この方向性の重要性を示唆することができた。

研究成果の概要(英文)：In recent years, various control technologies such as inter-vehicle communication and automatic driving technologies have been studied intensively. However, there is no systematic theory to optimally design the entire road traffic system from individual behavior to overall behavior. This study focuses on three types of control inputs (vehicle speed control, traffic signal control, and route selection control) and develops a glocal (global/local) traffic flow control method to systematically design these inputs from a glocal perspective. Specifically, we have derived a hierarchical traffic flow network model for glocal control and have developed a design method for glocal control systems based on this model. We also have developed a road traffic flow simulator platform for glocal control system design.

研究分野：制御理論と道路交通、電力、生体ネットワークへの応用

キーワード：交通流制御 信号機制御 速度制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車間通信 (V2V)、自動車と道路インフラ間通信 (V2I) などの高度通信技術の発展や深層学習などの新しい学習技術の登場により、次世代の高度道路交通システム (Intelligent Transportation System, ITS) へのパラダイムシフトに向けた研究が加速している。特に、自動運転技術を中心に、アダプティブクルーズ制御、プラトーンング、信号機制御、レーン制御、インセンティブ付ナビゲーションなど様々な制御技術展開がみられる。しかしながら、個々の制御技術の研究は数多くあるが、個々の振る舞いから全体としての振る舞いまで道路交通システム全体を最適に設計する、すなわち、グローバル (グローバル/ローカル) な視点での体系だった設計理論はない。

研究代表者は、これまで、大規模ネットワーク系の階層制御に関する研究の中でグローバル制御のための階層モデリングから分散制御に関する研究を行うとともに、その応用として、太陽光発電の大量導入における電力系統制御のためのシステム設計において、電力市場設計から個々のプロシューマの電力マネジメント、各レベルの電力制御などの研究を進めてきた。また、道路交通システムでは、信号機の協調制御、エコドライブ制御、インセンティブ付きナビゲーションなど個々の制御技術の開発にも取り組んできている。

2. 研究の目的

本研究では、車両速度制御、信号機制御、経路選択制御 (ナビゲーション) の3種類の制御入力に着目し、これらをグローバルな視点で体系的に設計するためのグローバル交通流制御理論を構築することを目的とした。具体的な研究課題は以下のとおりである。

課題 制御のための交通流階層ネットワークモデリング理論の構築

課題 グローバル交通流制御理論の構築

課題 制御系設計プラットフォームの開発

3. 研究の方法

各課題に対する研究方法についてまとめる。

(1) 制御のための交通流階層ネットワークモデリング理論の構築

これまで培ってきた大規模ネットワーク系の低次元化の手法に基づき、エリア区間の交通量をクラスタ低次元化することで、マクロスコピック基本図などの階層ネットワークモデルを導出する手法を開発する。

(2) グローバル交通流制御理論の構築

グローバル制御の基本として、信号機制御は個々の車両制御との連携に加えて、ナビゲーションとも連携するため、エリア層の全体目標と車両層の個々の車両の目標を同時に実現する調整役として信号機制御を捉え、中間層として位置づける。その枠組みの中で、エリア層の制御としてはインセンティブと信号機制御との間で、エリアの交通量制御の時間分解能に応じた協調とともに、中間層と車両層では、各信号機制御と車両速度制御の間で協調して制御する理論を構築する。

(3) 制御系設計プラットフォームの開発

商用の道路交通シミュレーションソフトウェア VISSIM を用いて任意の制御則を含む大規模道路交通流のミクロ挙動シミュレータを構築し、道路交通システムモデリングの妥当性や制御系設計の有効性を評価するためのプラットフォームを構築する。

4. 研究成果

各課題に対する研究成果についてまとめる。

(1) 制御のための交通流階層ネットワークモデリング理論の構築

階層ネットワークモデリングの基本は、エリアごとに低次元化した数理モデリングをいかに行うかにある。そこで、まずは交通流制御の基本である、一つの道路区間における基本図 (交通流量と車両密度) をエリア層に適用できるようにするために、マクロスコピック基本図の開発を行った。まず、これまでのマクロスコピック基本図はいわゆる一入力一出力の関係図であったが、エリアは多入力多出力であることを勘案し、入力となる要因を多次元化することで、これまであいまいとされてきた車両台数と車両速度との関係が超平面として表現できる多次元マクロスコピック基本図を提案した。さらに、エリア層でのマクロスコピック基本図の開発のために、下記の(3)で開発した制御系設計用プラットフォームを用いて、様々なケースでシミュレーションを実施し、内部の密度分布にも大きく依存することがわかった。その結果、(2)の制御での効果も勘案したところ、最終的に、確率型マクロスコピック基本図として定式化した。

(2) グローバル交通流制御理論の構築

グローバル交通流制御に向けて、まずは、様々な道路交通状況を想定し、個々の制御手法の連携を考慮した制御手法を開発してきた。まず、一交差点で、人が運転する車両と自動運転車両が混在する場合において、一交差点に関する信号機 - 車両間の最適制御の基礎理論を構築した。図 1 は、交差点付近の AV(自動運転車両)と HV(人が運転する車両)の車両台数の割合を変えて、提案手法の有効性を示したものである。AV と信号機の協調により、交差点での平均速度を大幅に向上できることを示した(M.A.S. Kamal, T. Hayakawa, J. Imura, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020)。

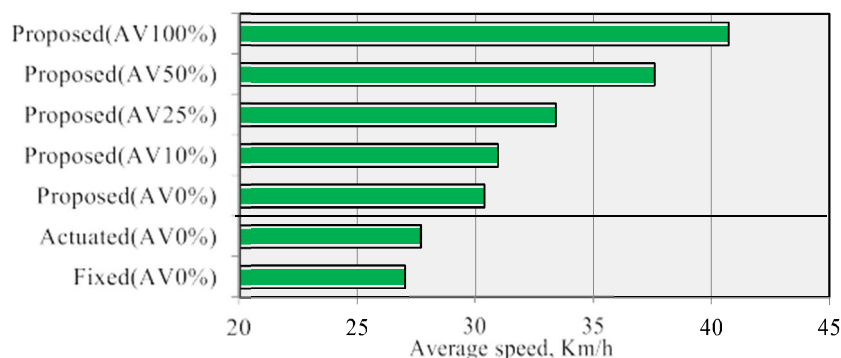


図 1 交差点の通過時の平均速度の比較

また、交差点としてラウンドアバウトに注目し、上位レベルでは、そこに進入する車両を交通量に応じてクラスタ化し、下位レベルではモデル予測制御を用いて車両の最適シーケンスとラウンドアバウト合流時間を算出する 2 階層統合手法を提案した。さらに、交通流の確率的変動に対するロバスト安定性・ロバスト安定化のための基礎理論として、mu 解析の確率版の構築を行った。

つぎに、グローバル交通流制御の枠組みの研究を進め、上位層の経路ナビゲーションにおいてインセンティブによる行動変容を促す仕組みに結び付く概念として「価値」が重要であることを見出し、道路交通システムに対してサイバー・フィジカル・バリューシステム (Cyber-Physical Value System, CPVS) という新しい概念を提案し、道路交通システム全体を設計する理論の枠組みを構築した。また、グローバル制御とローカル制御をグローバルアダプタを介して協調する設計手法を開発した。最後に、(1)で開発した確率型マクロスコピック基本図を用いて、エリア層-中間層-車両層から成る 3 階層を統合した階層制御系設計手法を提案した。

(3) 制御系設計プラットフォームの開発

道路シミュレーションソフトウェア VISSIM を用いて、東京都墨田区錦糸町近辺の 30 の交差点と実際の車線数や右折専用レーンを反映したモデルを組み込み、30 か所の信号機と様々な車両台数から成る大規模シミュレータを構築した。

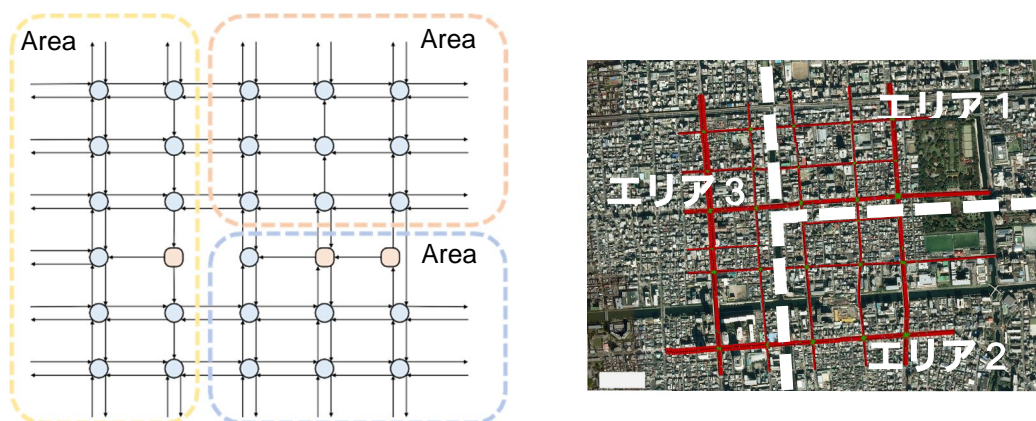
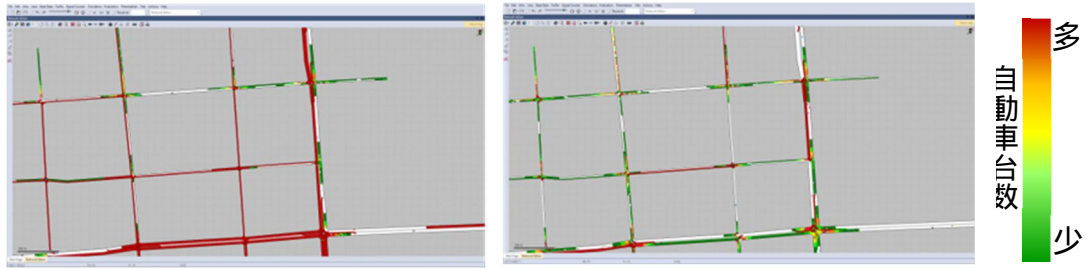


図 2 制御系設計プラットフォームの対象エリア (引用元 Google マップ)

この区域を 3 エリアに分けて、(2)で構築した階層制御の手法の有効性を検討した。そこで、まず、本シミュレータにより、様々な車両台数で数値シミュレーションを実施し、確率型マクロスコピック基本図を導出した。その上で、まったく制御しない場合、従来の信号機制御のみの場合、従来の階層制御、提案する階層制御の 4 つの場合に対して数値実験を行った結果、提案手法が最も効果が高く、従来の階層制御に比べても、エリア内の車両台数で最悪ケースで 1.5~2 倍程度の高い性能が得られた (図 3 と図 4)。



制御なし 提案制御
 図3 シミュレーションによる検討

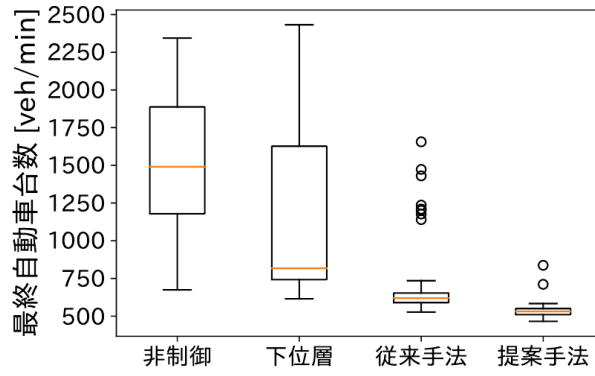


図4 全エリア内にある車両台数の箱ひげ図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 J. Chen, T. Qi, Y. Ding, H. Peng, J. Chen, and S. Hara | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Mean-Square Stabilizability Under Unstructured Stochastic Multiplicative Uncertainties: A Mean-Square Small-Gain Perspective | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The 2022 American Control Conference (ACC) | 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) なし | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 K. Itazuri and S Hara | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Glocal (Global/Local) Control for Urban Road Traffic Networks | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 10th IFAC Symposium on Robust Control Design ROCOND 2022 | 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) なし | 査読の有無 有 |
| 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 A. S. M. Bakibillah, Md Abdus Samad Kamal, Chee Pin Tan, Susilawati Susilawati, Tomohisa Hayakawa, Jun-ichi Imura | 4. 巻 21(19), 6533 |
| 2. 論文標題 Bi-Level Coordinated Merging of Connected and Automated Vehicles at Roundabouts | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Sensors | 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) 10.3390/s21196533 | 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 該当する |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Md Abdus Samad Kamal, Kotaro Hashikura, Tomohisa Hayakawa, Kou Yamada, Jun-ichi Imura | 4. 巻 12-2 |
| 2. 論文標題 Adaptive Cruise Control with Look-Ahead Anticipation for Driving on Freeways | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Applied Sciences | 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) 10.3390/app12020929 | 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 Md Abdus Samad Kamal, Kotaro Hashikura, Tomohisa Hayakawa, Kou Yamada, Jun-ichi Imura | 4. 巻 71-2 |
| 2. 論文標題 Look-Ahead Driving Schemes for Efficient Control of Automated Vehicles on Urban Roads | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology | 6. 最初と最後の頁 1280-1292 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2021.3132936 | 査読の有無 有 |
| 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 M.A.S. Kamal, K. Hashikura, T. Hayakawa, T. Ogitsu, K. Yamada, J. Imura | 4. 巻 53 |
| 2. 論文標題 A Look-ahead Car Following Scheme for Efficient Driving on Urban Roads | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine | 6. 最初と最後の頁 13836 ~ 13841 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2020.12.894 | 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 A.S.M. Bakibillah, M.A.S. Kamal, Chee Pin Tan, Tomohisa Hayakawa, Jun-ichi Imura | 4. 巻 99 |
| 2. 論文標題 Fuzzy-tuned model predictive control for dynamic eco-driving on hilly roads | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Soft Computing | 6. 最初と最後の頁 106875 ~ 106875 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asoc.2020.106875 | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Md Abdus Samad Kamal, Chee Pin Tan, Tomohisa Hayakawa, Shun-ichi Azuma, Jun-ichi Imura | 4. 巻 17-9 |
| 2. 論文標題 Control of Vehicular Traffic at an Intersection Using a Cyber-Physical Multi-Agent Framework | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Informatics | 6. 最初と最後の頁 6230-6240 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TII.2021.3051961 | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Toshiki Homma, Masaki Inoue, Jun-ichi Imura, Kengo Urata | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Safe-update of bi-layered controller and its application to power systems | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration | 6. 最初と最後の頁 90 ~ 96 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2021.1894899 | 査読の有無 有 |
| 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 Nicolas Martin, Paolo Frasca, Takayuki Ishizaki, Jun-Ichi Imura, Carlos Canudas-de-Wit | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 The price of connectedness in graph partitioning problems | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proc. of 2019 European Control Conference | 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) 10.23919/ECC.2019.8795723 | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 A. S. M. Bakibillah, Md. Abdus Samad Kamal, Chee Pin Tan, Tomohisa Hayakawa, Jun-ichi Imura | 4. 巻 68 |
| 2. 論文標題 Event-Driven Stochastic Eco-Driving Strategy at Signalized Intersections From Self-Driving Data | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology | 6. 最初と最後の頁 8557-8569 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2019.2931519 | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 M. A. S. Kamal, M. Oku, T. Hayakawa, J. Imura, and K. Aihara | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 Early Detection of a Traffic Flow Breakdown in the Freeway Based on Dynamical Network Markers | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Intelligent Transportation Systems Research | 6. 最初と最後の頁 422-435 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13177-019-00210-4 | 査読の有無 有 |
| 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 A. S. M. Bakibillah, M. Hasan, M. M. Rahman, and M. A. S. Kamal | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 Predictive car-following scheme for improving traffic flows on urban road networks | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Control Theory and Technology | 6. 最初と最後の頁 325-334 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11768-019-9144-z | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Md Abdus Samad Kamal, Tomohisa Hayakawa, Jun-ichi Imura | 4. 巻 67 |
| 2. 論文標題 Road-Speed Profile for Enhanced Perception of Traffic Conditions in a Partially Connected Vehicle Environment | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology | 6. 最初と最後の頁 6824 ~ 6837 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2018.2826067 | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 A.S.M. Bakibillah, M.A.S. Kamal, C.P. Tan, T. Hayakawa, J. Imura | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Eco-driving on Hilly Roads Using Model Predictive Control | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 2018 Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) and 2018 2nd International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR) | 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) 10.1109/ICIEV.2018.8640987 | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Md Abdus Samad Kamal, Tomohisa Hayakawa, Jun-ichi Imura | 4. 巻 21-2 |
| 2. 論文標題 Development and Evaluation of an Adaptive Traffic Signal Control Scheme Under a Mixed-Automated Traffic Scenario | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems | 6. 最初と最後の頁 590-620 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TITS.2019.2896943 | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 井村順一 |
| 2. 発表標題 大規模システムの階層制御 |
| 3. 学会等名 ミレニア・プログラム「気象制御可能性に関する調査研究」セミナー（招待講演）（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Toshiki Homma, Masaki Inoue, Jun-ichi Imura, and Kengo Urata |
| 2. 発表標題 Structured-learning of bi-layered controller with safety guarantee for large-scale social infrastructures |
| 3. 学会等名 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE AC)（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 井村順一 |
| 2. 発表標題 社会システム包括的設計論：価値をどのように扱うか？ |
| 3. 学会等名 自動制御連合講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 石原隆宏, 井村順一 |
| 2. 発表標題 確率的なマクロスコピック基本図を用いた交通制御の提案 |
| 3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Jun-ichi Imura |
| 2. 発表標題 Control of Large-Scale Network Systems for Societal System Design |
| 3. 学会等名 12th Asian Control Conference (Plenary講演) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Jun-ichi Imura |
| 2. 発表標題 Large-Scale Network Control for Societal System Design |
| 3. 学会等名 19th International Conference on Control, Automation, and Systems (ICCAS) (Plenary講演) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石原 隆宏, 石崎 孝幸, 井村 順一 |
| 2. 発表標題 不均一な交通状況での多次元マクロスコピック基本図の提案 |
| 3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 |
|---------------|--|---------------------------------------|----|
| 研究 分担 者 | 石崎 孝幸 (Ishizaki Takayuki) (10650335) | 東京工業大学・工学院・准教授 (12608) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 早川 朋久 (Hayakawa Tomohisa) (30432008) | 東京工業大学・工学院・准教授 (12608) | |
| 研究分担者 | K A M A L M D ・ A B D U S ・ S A M A D (Kamal Md Abdus Samad) (60844149) | 群馬大学・大学院理工学府・准教授 (12301) | |

| | 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 |
|-------|---|--|----|
| 研究協力者 | B a k i b i l l a h A . S . M . (Bakibillah A.S.M.) | | |
| 連携研究者 | 井上 正樹 (Inoue Masaki) (80725680) | 慶應義塾大学・理工学部・准教授 (32612) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | |
|---------|----------------------------|------|--|
| フランス | Univ. Grenoble Alpes | CNRS | |
| マレーシア | Monash University Malaysia | | |