

令和 2 年 4 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05760

研究課題名(和文) 多台参照追従モデルを用いた車両隊列の安全な協調行動シミュレーションに関する研究

研究課題名(英文) Study of Safe Cooperative Behavior Simulation of Vehicle Platoon Using Multi-leader Vehicle Following Model

研究代表者

北 栄輔 (Kita, Eisuke)

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：50234224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数のユースケースにおいて車両隊列走行に関する速度と行動の制御モデルを提案し、モデルのパラメータを数値シミュレーションにより決定した後、LEGOマインドストームを用いた実験によって妥当性を確認した。対象としたユースケースには、4台の隊列走行から1台が離れる場合、3台の隊列走行に1台が合流する場合、2台からなる2つの隊列が交差点で交叉する場合、隊列の間に一般車両が交ざっている場合がある。また、乗り心地を改善する隊列走行の速度制御等についても実施した。そして、これらの成果を2編の学術雑誌論文、11編の国際会議予稿集において発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

車両隊列走行は、交通渋滞緩和のために重要な技術である。研究の方向性は、様々なユースケースにおける効果的な隊列走行の実現に向かっている。そこで、本研究では、複数のユースケースにおける効果的な隊列走行の実現を目的とした。この中には、隊列走行を安定的に実現することや、隊列から車両が離れたりする場合のように、既に検討されているユースケースだけでなく、隊列と一般車両が混在する場合における隊列走行の実現を目的としたものもあり、今後の隊列走行の社会実現において非常に有意義な結果である。また、そのために用いた手法は、数値シミュレーションによる設計とロボット車両による実験であって、その学術的価値も高い。

研究成果の概要(英文)：In several use cases, a speed and behavior control model of the vehicles in vehicle platoon was proposed, and the model parameters were determined by numerical simulation. The following use cases are considered; one vehicle leaves platoon, one vehicle joins the platoon, traffic flow at intersection and the mixed traffic flow of platoon and the other vehicle. In addition, speed control of platooning to improve ride comfort was also implemented. These results were presented in the academic journal and international conference proceedings.

研究分野：情報学，機械工学

キーワード：隊列走行 車両追従モデル 数値シミュレーション マインドストーム 分流・合流 交差点 混在交通

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

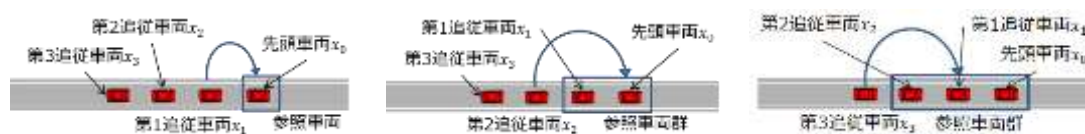
隊列走行とは車両が短い車間距離で列をなして走行することで、後続車両の空気抵抗の低減による省エネ走行と交通密度向上による交通容量増大を目的としている。平成 25 年に閣議決定された「世界最先端 IT 国家創造宣言」では、2020 年までに「世界一安全な道路交通社会」を構築する自動走行システムの開発・普及を図ることが明記されている。この中で、隊列走行は車車間における協調行動に関わる技術課題と考えられている。

これまでの研究では、車両群があらかじめ隊列走行状態にあり、車車間通信を用いて車列を安定的に維持する方法について研究している。今後は、隊列を構成していない一般車両と隊列する車両群の協調行動、異なる隊列行動車両群間での協調行動の実現が求められている。このためには、個々の車間の協調行動だけでなく、車両群と車両群との速度制御を含む協調行動を実現する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、複数の車両群が隊列走行状態にある場合に、車両群が合流して 1 つの大きな車両群となる場合や分流して 2 つの車両群となる場合等における車両の速度制御アルゴリズムを研究し、ロボット車両による自動隊列走行シミュレーション実験に適用することである。提案するモデルは、多台車両参照追従モデルに基づいている。多台車両参照追従モデルとは複数の前方車両の情報(速度、車間距離等)に基づいて自車両の速度を制御するので、直前方車両だけを参照する通常のモデルよりも、隊列走行する車両群の先頭に近い車両の挙動により早く反応できる。

研究代表者と研究分担者は、以前の研究において、4 台の車両があらかじめ隊列走行している状態において、先頭車両を除く後続車両が、同じ隊列に属するすべての前方車両を参照するような多台車両参照追従モデルに基づく速度制御アルゴリズムについて研究した。このとき、多台車両参照追従モデルにおいて参照する全車両に対する反応が最大となる場合においては、車両の速度制御のためには隊列の先頭車両と直前方車両の 2 台の車両の情報だけで必要で、他車両の情報は必要ないことを理論的に示し、実験により確認した。本研究では、この速度制御モデルに基づいて、1 つの隊列が分流する場合や 2 つの隊列が 1 つの隊列に合流する場合における車両の速度制御アルゴリズムを開発し、ロボット車両による隊列走行実験の速度制御に適用する。



(a) 第 1 追従車両

(b) 第 2 追従車両

(c) 第 3 追従車両

図 1 直前方参照追従モデルと多台参照追従モデル

3. 研究の方法

3. 1 制御アルゴリズム

文献[6]において 4 台のロボット車両による隊列走行において、前方車両との速度差に応じて自車両の加速度を制御する速度制御モデルについて研究した。車両が協調的に走行している場合、前方車両のうち先頭車両と直前方車両の 2 台の速度情報だけで制御可能であることがわかった。

図 1 において、時刻 t における各車両の位置座標を $x_0(t), x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ とすると、追従車両の加速度 $\ddot{x}_1(t), \ddot{x}_2(t), \ddot{x}_3(t)$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\dot{x}_1(t + \Delta t) = \alpha_{01}(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2(t + \Delta t) = \alpha_{12}(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) + \alpha_{02}(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_2(t)) \quad (2)$$

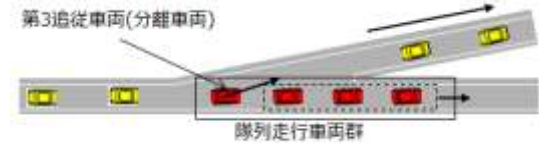
$$\dot{x}_3(t + \Delta t) = \alpha_{23}(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_3(t)) + \alpha_{03}(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_3(t)) \quad (3)$$

ここで、 \dot{x}_i は速度、 Δt は遅れ時間を示し、 α_{ij} は車両*j*から車両*i*への感度である。

3. 2 車両行動制御アルゴリズム

(1) 4 台の車両が隊列走行している状態から、車両が分離する場合 (図 2(a))

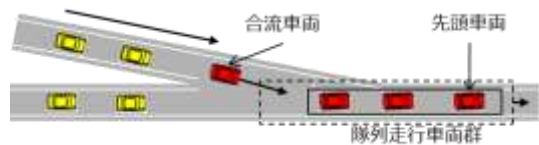
1. 第 3 追従車両 (分離車両) が、協調的な隊列走行から単独走行 (1 台の隊列走行) となる。
2. 第 3 追従車両が第 2 追従車両との車間距離を広げる。
3. 十分車間距離が広がったとき、第 3 追従尾車両の速度制御式を式(2)から(3)へ変更する。



(a) 最後尾車両が分離する場合

(2) 3 台の車両が隊列走行している状態に、車両が合流する場合 (図 2(b))

1. 1 台の合流車両が、単独走行から 3 台の隊列走行の最後尾車両となる。
2. 合流車両は式(1)に従って走行しながら、隊列走行車両群に近づく。
3. 隊列走行車両群と合流車両の車間距離が一定距離以内となったところで、合流車両の速度制御式を式(1)から(2)へ変更し、さらに近づいたところで式(2)から(3)へ変更する。



(b) 先頭車両が分離する場合

図 2 4 台隊列走行から分流する場合

(3) 交差点交通の場合 (図 3)

2 つの隊列車両群のうち、先に交差点に到達した隊列の車両を P1, P2, 後に交差点に到達した隊列の車両を U1, U2 とする。車両は、P1, U1, P2, U2 の順番で交差点を通過する。

1. P1 は一定速度で走行する。
2. P2 は P1 にしたがって速度制御する。
3. U1 は P1 にしたがって速度制御する。
4. U2 は P1, U1 にしたがって速度制御する。

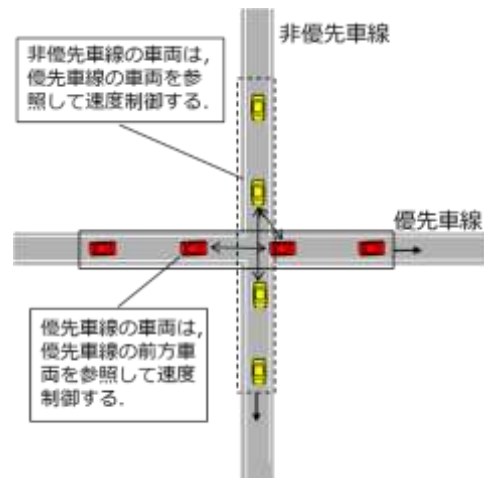


図 3 隊列走行車両群が交差する場合

4. 研究成果

4. 1 4 台隊列走行における結果

4 台の車両から成る隊列走行を考える。速度制御モデルとして、車両追従モデルのうちから、複数台参照する Chandler モデルを採用する。数値シミュレーションにおいて、自車両の直前方車両とその 1 台前の 2 台の車両を参照する場合と、自車両の直前方車両と隊列の先方車両の 2 台を参照する場合を比較した。結果より、後者のほうが隊列を構成する車両の追従が良いことが分かる。そこで、LEGO マインドストームを用いて実験を行い、その結果をシミュレーションと比較する。自車両の直前方車両だけを参照する場合と自車両の直前方車両と隊列の先方車両の 2 台を参照する場合における速度変動を図 4 と図 5 に示す。これらより、入れの場合においても、3

台の追従車両は、先頭車両の速度変化に伴って加減速を行っていることがわかる。その一方で、2つの速度変化図を比較すると、図5のほうがより速度の変動幅が小さいことがわかる。

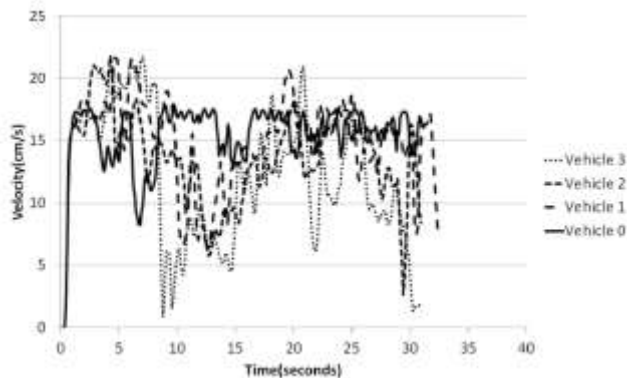


図4 車両の速度変化(自車両の直前方車両だけを参照する場合)

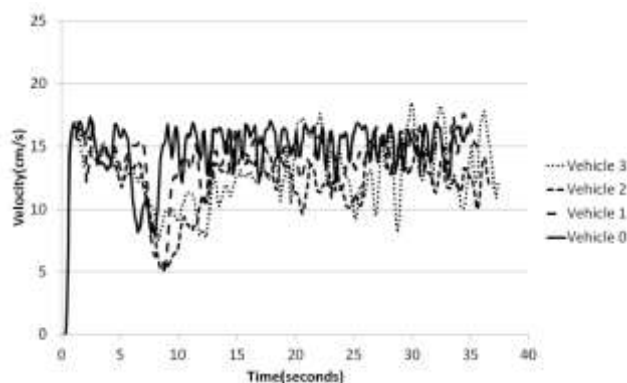


図5 車両の速度変化(自車両の直前方車両と隊列の前方車両の2台を参照する場合)

4. 2 隊列が合流する場合

2台の車両から成る2つの隊列車両群が走行している状態を考える。これらが合流して1つの車両隊列となる場合を考える。異なるモデルパラメータにおいてシミュレーションを行い、その結果をLEGO マインドストームによる実験結果と比較する。車両の座標位置について、数値シミュレーションによる結果を図6に、LEGO マインドストームによる実験結果を図7に示す。横軸に時間ステップ、縦軸に車両の座標位置を示す。図6と7を比較すると、両者の速度変動は比較的良く一致しているけれども、実験結果のほうが少し反応が遅れており、上下変動も起き位事が分かる。これらは、センサーの測定誤差、道路などからの摩擦抵抗などの影響を受けているためと想像される。

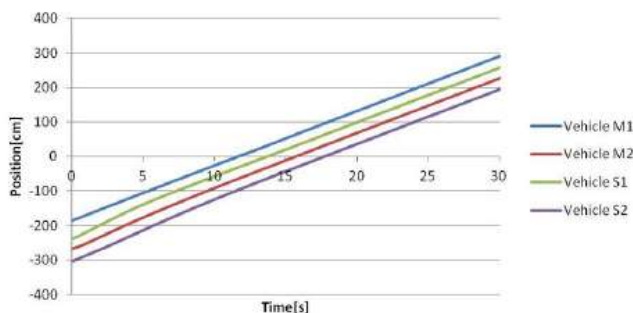


図6 車両の座標変動(数値シミュレーション結果)

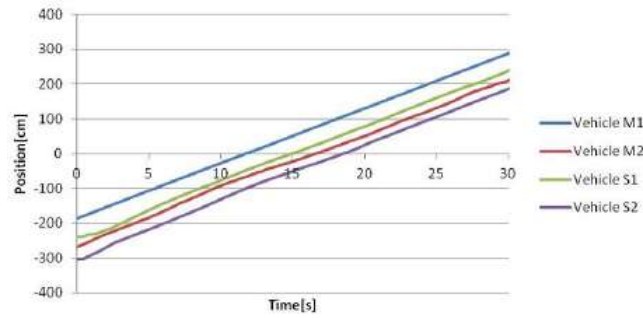


図 7 車両の座標変動(LEGO マインドストームによる実験結果)

4. 3 隊列走行車両軍が交差点で交差走行する場合

2 台の車両から成る 2 つの隊列車両群が、交差点で交差する場合について考える。車両の速度制御モデルは、複数台参照 Helly モデルによって定義する。交差点に最初に到着する車両は P1 で、続いて、U1, P2, U2 と交差点に到着する。その場合、車両 P1 は一定速度で走行する。U1 は P1 を、P2 は P1 を参照して速度制御する。U2 は P2 と U1 を参照して、多台参照モデルにしたがって速度制御する。数値シミュレーションの結果を図 8 に、LEGO マインドストームによる実験結果を図 9 に示す。横軸は時間ステップを、縦軸は車両の座標位置を示す。実験結果より、車両が衝突しないで走行できていることがわかる。数値シミュレーションと実験結果を比較すると、実験結果のほうが車間距離を大きくとっていることが分かる。これは、実験結果のほうが遅れ時間が大きく、加速のタイミングが遅れていると考えられる。

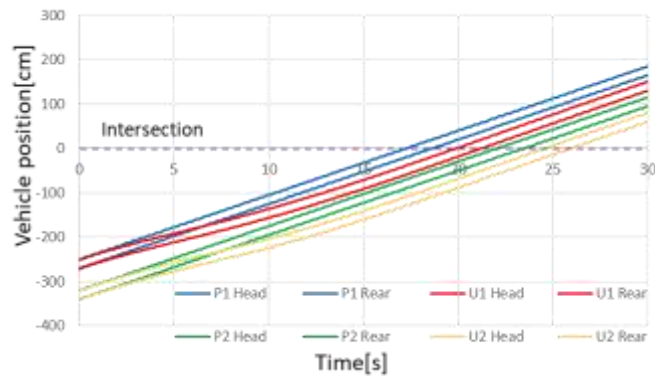


図 8 車両の座標変動(数値シミュレーション結果)

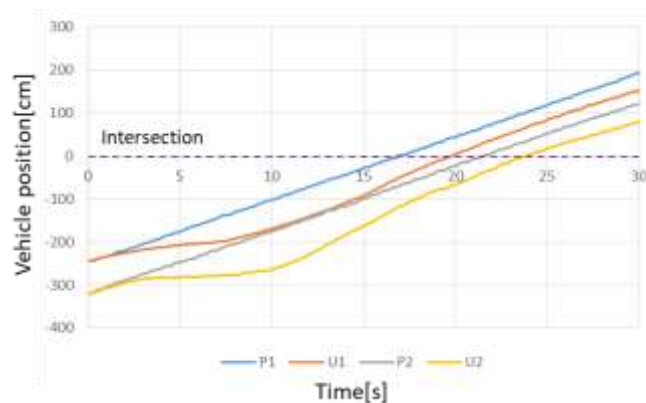


図 9 車両の座標変動(数値シミュレーション結果)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 E. Kita, M. Yamada	4. 巻 -
2. 論文標題 Vehicle Velocity Control in Case of Two Vehicle Platoon Merging into One Vehicle Platoon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Machine Learning and Computing	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 北 栄輔, 朝比奈鋼司, 牛田千智, 玉城龍洋, 村井 希	4. 巻 19
2. 論文標題 多台参照追従モデルによる隊列走行シミュレーションについて	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 79-84
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 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 0件／うち国際学会 10件）

1. 発表者名 E. Kita, S. Hayashi, T. Tamaki
2. 発表標題 Vehicle Control in Platoon around Intersection
3. 学会等名 5th International Conference on Engineering and Technology (ICET 2020), 20-22 March 2020, Melbourne. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nozomi Murai, Ryo Kazama, Eisuke Kita
2. 発表標題 Vehicle Velocity Control in Case of Vehicles Passing Through Intersection
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2020), March 8-11, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sota Ono, Hiroki Yoshida, Eisuke Kita
2. 発表標題 Vehicle Velocity Control in Case of Shunting and Joining of Platoons
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2020), March 8-11, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Eisuke Kita, Masashi Takahashi, Tatsuhiro Tamaki, Atsushi Uchiyama, Kana Idei
2. 発表標題 Velocity control of platoon vehicle in consideration of ride quality
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Computational Mechanics (APCOM2019), December 18-21, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eisuke Kita, Hiroki Sakamoto, Tatuhiro Tamaki
2. 発表標題 Overtaking Behavior Simulation of Vehicle Platoon in Face-to-Face Traffic Flow
3. 学会等名 4th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE 2019), November 22-24, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eisuke Kita, Miichiro Yamada
2. 発表標題 Vehicle Velocity Control in Case of Vehicle Platoon Merging
3. 学会等名 The 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE2019), Singapore, September 5-7, 2019, IEEE, DOI: 10.1109/ICITE.2019.8880209. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eisuke KITA, Masaki Takahashi, Tatsuhiro Tamaki
2. 発表標題 Vehicle Velocity Control in Vehicle Platoon
3. 学会等名 10th International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北 栄輔, 石澤大翼, 出射香菜
2. 発表標題 交通量と道路ネットワークの関係について
3. 学会等名 第24回計算工学講演会, 2019.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eisuke Kita, Hiroki Sakamoto
2. 発表標題 Mathematical Model and Simulation of Vehicle Platoon Overtaking other Vehicle
3. 学会等名 4th Australasia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference (ASEA-SEC-4)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Eisuke Kita, Ryoma Sato
2. 発表標題 Design of Robot Vehicle Control Program Using Grammatical Evolution
3. 学会等名 Tenth International Conference on Engineering Computational Technology (ECT2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北 栄輔, 高橋政伎, 玉城龍洋
2. 発表標題 乗り心地を考慮した隊列走行車両群の速度制御について
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北 栄輔, 坂本浩規
2. 発表標題 車両を追い越す車両隊列における車両速度制御について
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E. Kita, R. Sato, M. Yamada, T. Tamaki
2. 発表標題 Velocity Control of Vehicles Separating from Vehicle Platoon
3. 学会等名 The Ninth International Structural Engineering and Construction Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤凌馬, 風間 亮, 玉城龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 進化的計算を用いた車両ロボット制御アルゴリズムの生成について
3. 学会等名 日本機械学会計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋 政伎, 山田 巳一郎, 玉城 龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 隊列走行の分流シミュレーションにおける速度制御モデルの比較検討
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田 裕基, 坂本 浩樹, 玉城 龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 隊列車両の対面追い越しシミュレーションについて
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋政伎, 吉田裕基, 薩摩美友, 佐藤凌馬, 玉城龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 滑らかな追従挙動を目的とした隊列走行車両シミュレーション
3. 学会等名 日本計算工学会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋政伎, 吉田裕基, 薩摩美友, 佐藤凌馬, 玉城龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 実験誤差を考慮した隊列走行車両シミュレーション
3. 学会等名 日本計算工学会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 E. Kita, H. Takaue, M. Yamada, H. Sakamoto
2. 発表標題 Simulation of vehicle separated from vehicle platoon
3. 学会等名 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2016), August 20-26, 2016, Montreal, Quebec, Canada. (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eisuke Kita, Azusa Hara, Tatsuhiko Tamaki, Yukiko Wakita
2. 発表標題 Traffic Network Design Using Traffic flow Simulator
3. 学会等名 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2016), Seoul, Korea, 24-29 July 2016. (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高上寛斗, 薩摩美友, 脇田佑希子, 玉城龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 隊列走行車両群からの車両分流シミュレーションについて
3. 学会等名 日本機械学会計算力学講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 林 秀至, 脇田佑希子, 玉城 龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 車間通信を用いた車両の交差点での走行シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 坂本浩規, 佐藤凌馬, 玉城龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 隊列走行車両の追い越しシミュレーション
3. 学会等名 日本計算工学会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山田巳一廊, 薩摩美友, 村松雄馬, 北栄輔
2. 発表標題 隊列走行車両の合流シミュレーションについて
3. 学会等名 日本機械学会計算力学講演会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 坂本浩規, 佐藤凌馬, 玉城龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 隊列走行車両の追い越しシミュレーション
3. 学会等名 日本計算工学会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 林 秀至, 脇田佑希子, 玉城 龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 車間通信を用いた車両の交差点での走行シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高上寛斗, 薩摩美友, 脇田佑希子, 玉城龍洋, 北 栄輔
2. 発表標題 隊列走行車両群からの車両分流シミュレーションについて
3. 学会等名 日本機械学会計算力学講演会
4. 発表年 2016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	玉城 龍洋 (Tamaki Tatsuhiro) (60413837)	沖縄工業高等専門学校・メディア情報工学科・准教授 (58001)	