

車々間通信による協調型危険回避における通信信頼性の影響 評価

石原 進¹

概要：道路上の突発的な事故や落下物によって車線変更の必要性が生じた場合、車々間通信によって広範囲の車両に車線変更の必要性を伝え、障害物のある車線上の車両のみならず、車線変更受け入れ側の車両に対して適切な制御をさせることで円滑な車線変更が可能になると考えられる。本稿では、交通流シミュレータ SUMO を用い、このような協調型危険回避戦略に関して、通信障害の影響を含めた評価を行った。シミュレーションの結果、提案方式を適用することで、障害物のある車線の通行が大幅に向上することが確認できた。また、通信の信頼性が低くとも、実用的な範囲では少ないことが確認できた。

1. はじめに

自動運転車両が十分に普及した場合、道路を走る大半の車両が自動運転車となり、これらの車両の車車間・路車間通信に基づく協調的な動作によって、道路交通は、より高密度かつ円滑に行えるようになることが期待される。高密度で自動運転車両群が走行しているとき、事故や落下物等によって道路上に突然障害物が生じた場合、車両群は速やかにこれを回避する必要がある。適切な無線通信機能が提供されているならば、障害物を発見した車線先頭車両が同じ車線、並びに周辺車線上の広い範囲の後続車両にこれを通知し、適切な回避行動を指示することで、減速を最小限とした円滑な車線変更を伴う危険回避が可能となると見込まれる。

筆者らは、出来る限り単純なルールに基づく分散型の処理を行うことで、通信障害、ならびに意図的な妨害攻撃が行われた場合においても、円滑な危険回避行動を可能とする通信、車両制御手法の開発と最低限必要となるセキュリティ要件を明らかにすることをめざして研究を進めている [2][3]。

魚、鳥、バクテリアなどの動物の群では、群を統率する特別な個体がおらずとも単純な知能を持つ個体が集まることで、全体として秩序だった行動が行われる。こうした現象を群知能 (Swarm Intelligence) といい、近年盛んに研究が進められている。例えば、Aoki の魚群の行動モデルでは [1]、魚が注目する他の個体との距離 r に応じて、i) 回避 ($r < r_1$)、ii) 並進 ($r_1 \leq r < r_2$)、iii) 接近 ($r_2 \leq r < r_3$)、

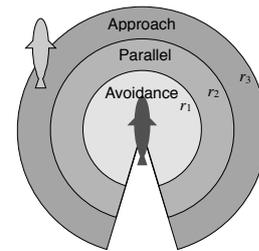


図 1 魚の行動モデル

iv) 探索 ($r_3 < r$) というルールに基づいて移動方向が決められる (図 1(a)) [1]。また、注目する個体の選択確率は、その個体との距離が近いほど高くなる。

本研究では、こうした単純なモデルに着想を得て、障害物を発見した車両からの通知を元に障害物からの距離に応じて車線変更に対する積極性を調整して多数の車両が協調的に車線変更を行う方式を提案し、交通流シミュレータ Sumo を用いたシミュレーションによって評価する。なお、本提案のように危険発生情報を通信に依存して拡散する場合、通信障害、通信妨害、ならびに虚偽情報の意図的混入によって制御に乱れが生じるリスクが考えられる。道路上には車々間通信が可能な車両以外も存在する。本稿では、このうち障害発生メッセージ通知障害に関して取り上げ、その影響について評価する。

車々間通信を用いた協調的な自動車走行は技術に関しては、追従走行、隊列走行制といった比較的近い場所に集まった車両間での制御技術が既に実用化されているほか、無線通信路における妨害攻撃や成りすまし、虚偽の情報の送信による妨害の影響評価が盛んに行われている [4][5][6][7]。また、周辺車両のセンサ情報を収集してより広い範囲での周

¹ 静岡大学大学院工学領域

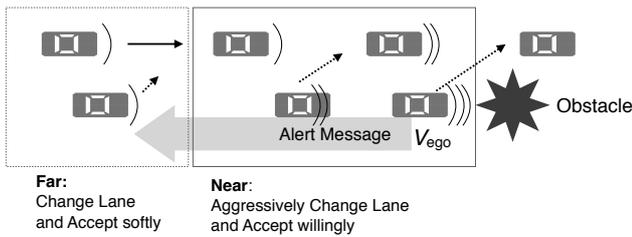


図 2 危険回避戦略

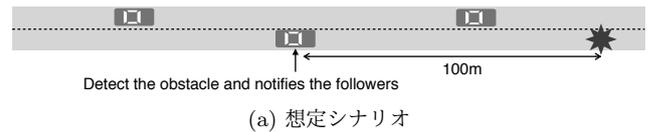
辺状況を把握し自動運転に役立つ Collective Perception に関しても盛んに取り組みがなされている [8][9][10]。一方、本稿ではより広域の不特定多数の車両間での車々間通信を用いた協調的車両制御をできるだけ単純な処理で行う事に焦点を当てている。

以下、2章で本稿で提案する突発的な障害物に対する回避戦略について説明する。次に3章で提案方式評価のためのシミュレーション方法について説明し、4章で評価結果について議論する。最後に5章で本稿をまとめる。

2. 危険回避戦略

本論文で検討する危険回避のアルゴリズムは以下の通りである。図 2 に示すように、車両は車線をふさぐ障害物を人間による目視、あるいはカメラやミリ波レーダなどで自動で検出すると、そのことを後方の車両にブロードキャストによって通知する。また、自身は塞がれていない車線に車線変更を試みる。後方の車両は、前方の車両の存在によって障害物を直接検知することはできないが、ブロードキャストされた通知によって、その位置を把握し、車線変更を試みる。ただし、障害物により近い車両はより積極的に車線変更を試みることとし、障害物からの距離が中程度の場合は、低い積極性で車線変更を試みる。障害物からさらに離れた車両は通知を受け取ったとしても、行動を変更しないものとする。障害物でふさがれていない方の車両も、障害物を検知した車両からの通知を受け取るが、こちらの車両は他の車線から車線変更してくる車両に対してより積極的に受け入れるように振る舞う。これらは障害物からの距離がより近いほど、より積極的に車線変更を受け入れ、障害物からの距離が中程度では、低い積極性で車線変更を受け入れる。障害物からの距離が遠い場合は、通知を受け取っても行動を変更しない。

後方の全ての車両が積極的に車線変更をさせないのは、一度に多くの車両が車線変更を試みることによって、障害物のない車線の車両の通行が阻害されることを防ぐ意図がある。つまり、より緊急性の高い前方の車両に対していち早く車線変更を可能とする一方で、後方の車両は、障害物側の車線とその他の車線をもともと走行していたバランス良く合流することを目指している。



(a) 想定シナリオ



(b) Sumo 上での地図

図 3 シミュレーションシナリオ

3. シミュレーション評価方法

3.1 基本構成

交通流シミュレータ Sumo 1.0.1 を用いて提案方式の基礎的な評価を行った。本方式の効果を検証するためには、車線変更に対する車両の振舞いをシミュレーション中の状況の変化に対して動的に変更する必要がある。そこで、Sumo に整備されている外部プログラムとの通信機能 TraCI を用いることにした。Sumo の TraCI 機能は Python, C++, Java などの言語を用いて、シミュレーション中の任意のタイミングで sumo 内部のシミュレーション変数値を取得したり、値を変更することが可能である。この機能を用いて Veins[12] などのように無線通信ネットワークシミュレータと Sumo を連携させたシミュレーションフレームワークが開発されている。本シミュレーションでは、Python で記述した外部プログラムから Sumo を起動し、TraCI 経由で Sumo の内部状態を得て、状況に応じて Sumo が用いる車線変更モデルのパラメータを動的に変更することにした。なお、障害物を検知した車両が後続の車両にそれを通知する部分では、無線通信を使うため、理想的には無線通信シミュレーションを含めた形で評価する必要がある。ただし、本稿では、特に無線ネットワークの詳細な挙動のシミュレーションは行わず、確率的にメッセージの受信の成否を制御することで、通信信頼性の基本的な影響を調べることにした。

シミュレーションシナリオは以下の通りである。図 3 (a) に示すように、2車線の道路があり、一方が突然現れた障害物により、通行不能となっている。ドライバーは、この障害物の手前 100m 地点に到達したときに、この障害物を認知し、車線変更、並びに後続車両への通知を行う。

このようなシナリオを sumo 上で模擬するため、sumo では同図 (b) に示すように、2本の車線をもつ道路のうち、1本が途切れている道路地図を利用した。sumo 上では、車両は事前に経路を知っているものとして動作するようにモデル化されているので、標準的な設定であれば、このような車線の減少に対応できるように車線減少地点より数 100m 手前から車線変更を試みる。このため、sumo の標準の設定のままこの地図上でシミュレーションを行うと、

表 1 LC2013 モデルの車線変更パラメータ設定

パラメータ	意味	モード	値		
			Base	Strg	SG
clStrategic	目的地に移動するための車線変更の積極性 (標準 1.0 [0-inf])	通常	0.0	1.0	0.0
		近距離	1.0	1.0	1.0
		遠距離	0.7	1.0	0.7
clCooperative	協調的車線変更への積極性 (標準 1.0 [0-1])	通常	0.6	0.6	0.6
		近距離	1.0	1.0	1.0
		遠距離	0.8	0.8	0.8
clSpeedGain	速度を稼ぐために行う車線変更の積極性 (標準 1.0 [0-1])	通常	0.0	0.0	1.0
		近距離	0.0	0.0	1.0
		遠距離	0.0	0.0	1.0
clLookAheadLeft	目的地移動のために左車線に移動するための先読み距離を制御 (標準 2, [0-inf])	通常	0.0	0.0	0.0
		近距離	2.0	2.0	2.0
		遠距離	1.0	1.0	1.0

過度に交通量が多くない限り、車線変更地点での渋滞は発生しない。

そこで、本シミュレーションでは、車両が目的の経路を走行するために行う車線変更にあたって行う「先読みの距離」に関するパラメータを通常時は0にしておくこととした。そして、車両が車線減少地点の手前 100m に達するか、あるいは前方の車両からの通知を受信できたときのみ先読みを有効にすることによって、障害物の存在およびその情報の通知による車線変更を試みるように設定した。

3.2 車線変更のモデル

車線変更のシミュレーションモデルは数多く提案されており、Sumo にも複数種類の車線変更モデルが実装されているが、以下のシミュレーションで用いたのは sumo のデフォルトの車線変更モデル CL2013[13] である。同モデルでは表 1 に示すようなパラメータが用意されている。これらを障害物の発見、車両の障害物への距離に応じて、通常モード、近距離モード、遠距離モードの値に切り替えるようにした。通常モードでは、車線減少に伴う車線変更を行わないようにしている。近距離モードでは、積極的に車線変更および車線変更に対する受け入れ行動を行うようにしている。遠距離モードでは、車線変更および車線変更に対する受け入れ処理を行うが、近距離モードよりもその度は低くなるようにしている。なお、各車線変更パラメータの影響を調べるため、値の設定組み合わせが異なる複数の設定 (Base, Strg, SG) を設けた。Base は基本となる設定である。通常モードの車線変更の積極性が低く設定されている。Strg と SG はそれぞれ lcStrategic と lcSpeedGain が通常モードの状態でも sumo のデフォルト値と同じになるようにしてある。表 2 にこの他のシミュレーション諸元を示す。

表 2 シミュレーション諸元

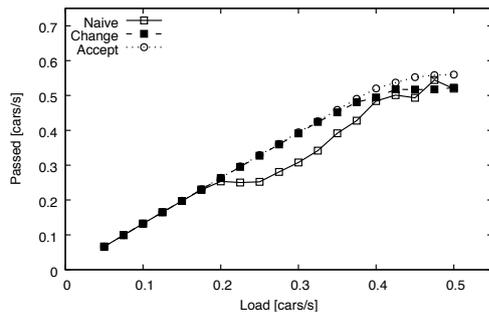
項目	値
車両長	4.47m
車両最大加速度	2.6m/s ²
車両最大減速度	4.5m/s ²
最短車間距離	4.5m
最大速度	37.5m/s
追従モデル	Krauss (sumo のデフォルト) $\sigma = 0.5$ $\tau = 1.0$
車線標準速度	17.7m/s
車両流入速度	標準速度に対する比が $\mu = 1.0$, $\sigma = 0.1$ の正規分布 比の最小 0.2、最大 2
車線変更モデル	LC2013

3.3 通信モデル

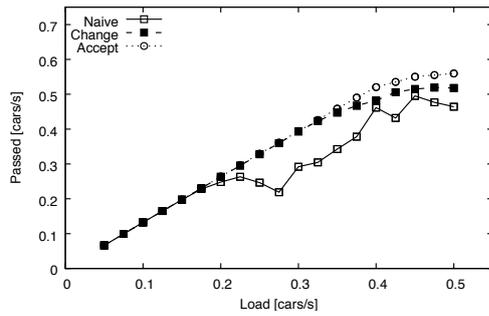
障害物検出車両からのメッセージの信頼性を調べるため、簡易的なメッセージ伝達とその失敗のモデルを用いた。前述したとおり、本シミュレーションでは、0.25 秒ごとに車両は状況に応じて速度調整、車線変更の判断を行うが、障害物検出時の他車両への通知もこのタイミングで行うものとした。車両は障害物のある車線走行中に障害物の手前 100m に達すると、車線変更モードを通常モードから、(障害物にたいする) 近距離モードに切り替え、表 1 に従って車線変更パラメータを変更する。このとき後続車両は自身が障害物から 300m 以内であれば、近距離モードに切り替え、300~500m の地点であれば、遠距離モードに切り替える。ただし、与えられた確率に従ってメッセージの受信が失敗するものとし、たとえ障害物を検出した車両があったとしても、後続車両はモードの変更をしないことがある。なお、メッセージ受信の成否は車両ごとに独立に判定するものとした。

3.4 比較対象モデル

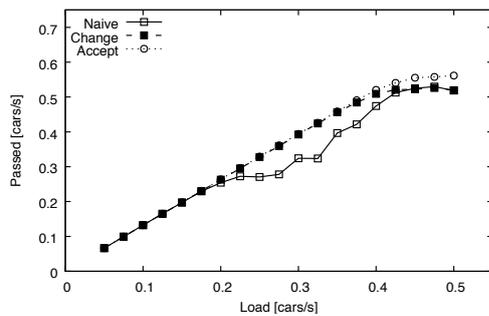
比較対象として、提案方式を含めて次の 3 つを用意した。**Naive** 障害物存在車線を先頭で走行し、障害物の手前



(a) Base

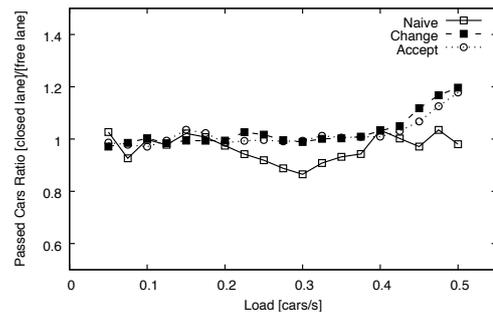


(b) Strg

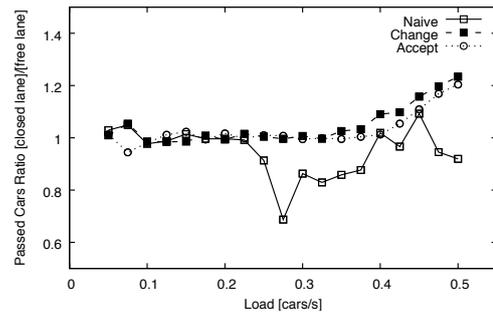


(c) SG

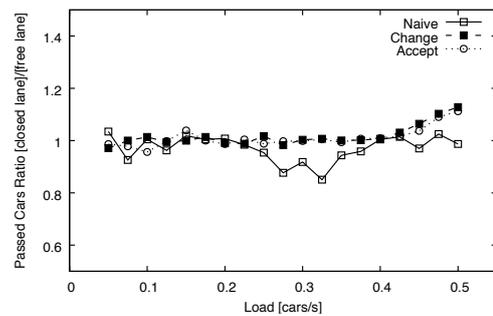
図 4 車両流入量と通過車両台数の関係



(a) Base



(b) Strg



(c) SG

図 5 発進元車線に対する通過車両台数の比

100m に達した車両だけが車線変更モードを近接モードに切り替え、他の車両は通常モードのままとする。

Change 障害物存在車線を先頭で走行し、障害物の手前 100m に達した車両は車線変更処理を近接モードに切り替える。このような車両があった場合、障害物存在車両にいる車両は自身の位置とメッセージの受信成否確率に応じて、車線変更処理を近接モードあるいは遠距離モードに切り替える。障害物のない車線にいる車両は通常モードのまま走行する。

Accept (提案方式) Change の方式に加えて、障害物のない車線の車両も自身の位置とメッセージの受信成否確率に応じて、車線変更処理を近接モードあるいは遠距離モードに切り替える。これによって、障害物のない車線への車線変更を受け入れやすくする。

4. シミュレーション結果と考察

以下、図 4~6 にシミュレーション結果を示す。これらは 20 秒ごとのシミュレーションを 20 回実施して得た平均

値である。図 4 は道路への車両流入頻度に対する通過車両数の関係を示している。車両流入台数が少ない場合には、方式間、パラメータ組み合わせの違いは見られないが、車両流入台数が 0.2 台/秒を超えた付近から Naive 方式での車両通過台数が減少に転じる。これは、障害物上のある車線を走行していた車両が障害物付近まで車線変更を試みないために、車線変更を行うのに十分な車両間隔を見いだせなくなって、車線変更が滞り、その結果、障害物のある車線上の車両の通行が妨げられるからである。

図 5 は発進元の車線ごとの通過車両台数の比 (障害物あり車線発の通過台数/障害物なし車線発の通過台数) を示している。数値が小さいほど、障害物ありの車線の通行が妨げられていることを意味する。各図を見ると、いずれも車両流入量が 0.2 台/秒を超えた付近から障害物あり車線発の通過の割合が減少し、車両流入量が 0.3 付近まで、減少を続ける。それ以降は、再び比率 1 程度まで回復する。これは、道路全体が混雑することによって障害物地点での車線数減少の影響が相対的に低くなったためと考えられる。

Base、Strg、SG の車線変更パラメータの異なる組み合わせによる違いは顕著には見られなかった。

提案方式である Accept、およびその簡易版で受け入れ側積極性を増加させていない Change では、車両流入量 0.2 付近からの車両通過台数の落ち込みは見られず、車両流入量の増加とともに車両通過台数は増加している。車両流入量が 0.4 を超えると車両通過台数増加が鈍化するが、その影響は Change の方が目立ち、Accept の方がより高い車両流入量においても通過台数増加を続けている。このときの発進元車線に対する車両通過台数の比を見ると、障害物がある側の車線からの通過量が障害物がない方の車線からの通過量を大きく上回っていることがわかる。混雑度が非常に高い場合に、車線変更を積極的に行うようにすることで、車線変更を行う側の通行が優先されていると考えられる。ただし、この領域では、車両流入量に対する通過台数が飽和しており、車両の平均通過速度が非常に低くなっている。

図 6 はメッセージ受信の失敗率が 0.8 の場合の、障害物検知メッセージの道路への車両流入頻度に対する通過車両数の関係を示している。図 4 に示した受信失敗が全くない場合と結果はほとんど変わらなかった。本シミュレーションでは各車両は 0.25 秒ごとに車線変更の判断とメッセージ送信の機会をもつこととしたので、失敗率が 0.8 あったとしても、平均的には 1.25 秒に一度メッセージを受け取ることになる。障害物検知の頻度がさらに低くなったとしても、顕著なメッセージ受信の失敗や偽情報の配信が行われなければ、制御への影響はほとんどないと考えられる。

5. まとめ

落下物等の突発的な道路障害に対して、車々間通信を用いて広域に車線変更の必要性を伝え、車線変更への受け入れ行動を促す交通流円滑化のための手法について、交通流シミュレータ Sumo を用いたシミュレーションにより、その効果を検証した。車線上の障害物検知車両から広域に通知を行うことによって障害物が存在する車線からの車線変更を早期に行う事を可能にすることによって、障害物が存在する車両の通過量の減少を防ぎ、突然障害物が現れたとしても、車両流入量の増加に対して車両通過台数の減少を招くことがないことが確かめられた。また、メッセージ受信率の影響についても調べたが、その影響は小さく、長期間まったく通信できない状態が続くのではない限り、制御への影響は小さいものと考えられる。

なお、今回のシミュレーション結果は、あくまで sumo におけるあるシミュレーションパラメータの組み合わせにおける試験的なものである。今後今回用いたパラメータの妥当性について、車両制御の条件（手動運転時の支援なのか、自動運転なのか）も考慮しつつ慎重に検証していく必要がある。また、今回のシミュレーションではメッセージの受信失敗は想定されているものの、誤ったメッセージの

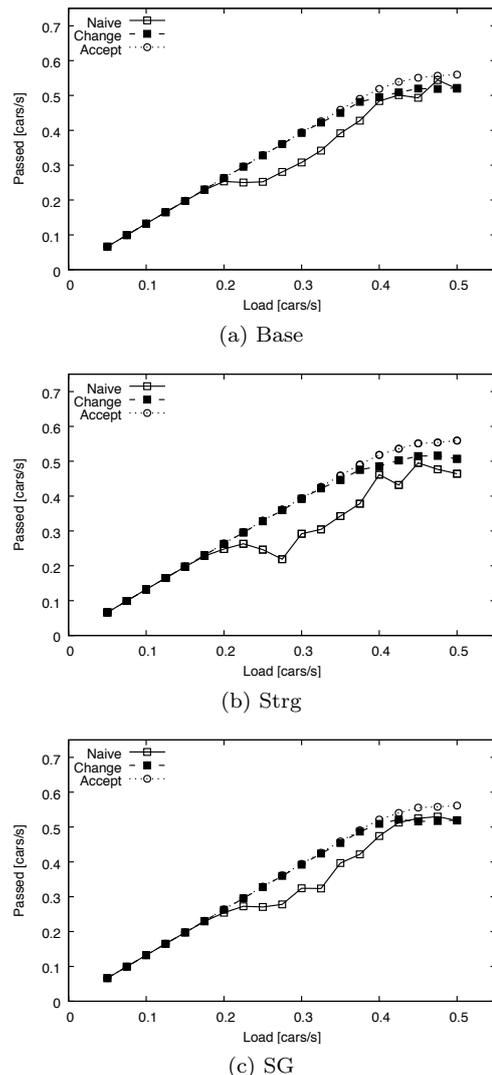


図 6 メッセージ受信失敗率 0.8 の場合の通過車両台数

通知はないものとしていた。今後、メッセージの改ざんや偽のメッセージの影響について、車両がメッセージ以外の条件から判断する制御方針との相互の影響を考慮しながら調べていくことにしたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 17K20027 の助成の下で実施されたものである。また、本論文に示したシミュレーションの実施にあたっては、筆者の指導学生であった谷村昌則君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Aoki, I.: A Simulation Study on the Schooling Mechanism in Fish, Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, vol.48, no.8, pp.1081–1088 (1982).
- [2] 石原進: 自動協調運転における大局的危険回避行動のための生物群行動に基づく通信・車両制御と攻撃対策の検討, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, p.221 (2017).
- [3] 谷村昌則, 石原進: 自動協調運転における大局的危険回避行動のための生物群行動に基づく通信・車両制御の提案, 2018 年電子情報通信学会総合大会, A-14-13, pp.123 (2018).

- [4] M. Segata, S. Joerer, B. Bloessl, C. Sommer, F. Dressler and R.L. Cigno: Plexe: A platooning extension for Veins, Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2014), pp. 53–60, Dec. 2014.
- [5] M. Segata, B. Bloessl, S. Joerer, C. Sommer, M. Gerla, R.L. Cigno, F. Dressler: “Towards inter-vehicle communication strategies for platooning support,” Proc. 2014 7th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars-Fall), pp. 1–6, 2014.
- [6] Ishihara, S., Rabsatt, R., Gerla, M.: ‘Improving reliability of platooning control messages using radio and visible light hybrid communication,’ in Proc. of 2015 IEEE Vehicular Network Conference (VNC), pp. 96–103, Dec. 2015.
- [7] R. van der Heijden, T. Lukaseder and F. Kargl, “Analyzing Attacks on Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC),” in Proc. of 2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), pp. 45–52, 2017.
- [8] Furukawa, K., Takai, M., Ishihara, S.: Controlling Sensing Information Dissemination for Collective Perception in VANET, Proc. The 16th Intelligent Transport Systems Asia-Pacific Forum (2018).
- [9] H.J. Gunther, O. Trauer, B. Mennenga, and L. Wolf: Realizing collective perception in a vehicle, Proc. 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (2016).
- [10] H.J. Gunther, R. Riebl, L. Wolf and C. Facchi: Collective Perception and Decentralized Congestion Control in Vehicular Ad-hoc Networks, Proc. 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (2016).
- [11] “SUMO — Simulation of Urban MObility, <http://www.sumo-sim.org/> (2018年10月23日アクセス)
- [12] Sommer, C., German, R., and Dressler, F.: Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis, IEEE Trans. Mobile Computing, vol. 10, no. 1, pp. 3–15 (2011).
- [13] Erdmann, J.: Lane-Changing Model in SUMO. Proc. SUMO2014 Modeling Mobility with Open Data, pp.77–88 (2014).