

令和元年6月20日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K20027

研究課題名（和文）自動協調運転における大局的危険回避行動のための通信・車両制御と攻撃対策の検討

研究課題名（英文）Study on communication, vehicle control and cybersecurity measures for macroscopic risk avoidance in autonomous cooperative driving

研究代表者

石原 進（Ishihara, Susumu）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：10313925

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：道路上で突発的に発生した落下物や事故車等の障害物に対して、車々間通信を利用した広域の通知と、それに応じた自動車線変更・受け入れ行動制御手法を設計した。通信エラーを含んだ交通流シミュレーションにより、同手法によって渋滞発生を回避して円滑に障害物の回避と合流が可能となることを確認した。

動的に変化する受信電波強度や送信出力制御に対応した汎用的に利用可能なLinux仮想無線LANインタフェースとそれをを用いた無線ネットワークエミュレーション環境の設計実装を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

車々間通信による広域の障害物発生通知と障害物からの距離に応じた簡単な行動ルールを用いることにより、突発的な道路環境変化がある場合にも円滑な交通流制御が可能であることをシミュレーションにより明らかにした。

汎用的に利用できる無線LANエミュレーション技術を開発した。本技術は車々間通信のみならず、公共環境、オフィス等の高密度無線LANにおける送信信号強度の変更、接続制御など高度な無線LAN制御システムの開発に適用可能であり、同分野のソフトウェア開発を加速する潜在力がある。

研究成果の概要（英文）：We designed a vehicle lane change control and lane change acceptance control scheme based on wide-area vehicle-to-vehicle communication for avoiding suddenly emerged obstacles on a road. Through vehicular traffic simulation supporting communication error events, we confirmed that the proposed scheme can avoid occurrence of congestion and enables smooth merging.

We designed and developed a Linux virtual wireless LAN network device for realizing general wireless LAN emulation supporting dynamic change of received signal and dynamic change of transmission power and a wireless LAN emulation environment based on the virtual device.

研究分野：情報通信工学

キーワード：車々間通信 高度交通システム 自動運転 障害物回避 交通流シミュレーション 無線LANエミュレーション SUMO

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

自動隊列走行はエネルギー消費減少と運転者の負担軽減、道路利用効率の面で有効な技術であり、既に公道実験も行われているものであるが、同一車線を走行する1本の隊列に関する研究は進められているものの、複数車線に渡って複数の隊列が存在するケースに関しては、殆ど検討がなされていなかった。将来大半の車両が自動運転車両となった場合、複数車線の道路を走る車両は皆、隊列のメンバーであると思なすことができ、これらの通信による協調動作が道路利用効率・エネルギー使用、事故回避の面から重要となると考えられる。協調しあう車両の数が増えるほど、大局的な視点で制御が可能となり、より効率的な車両制御が可能となる。その一方で車車間通信の妨害や、悪意のある車両の存在の影響が大きくなる。こうした状況に鑑み、通信と車両制御、セキュリティ対策を一体として扱い、障害に対して頑健な通信、車両制御手法を開発することが重要であるとの着想に至った。

### 2. 研究の目的

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、車両群はこれを回避する必要がある。このとき、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。具体的には障害物直近の車両だけでなく、遠方の車両にも通知し、移動先の車線を走る車両が車線変更車両を受け入れる余地を作るような加減速を行ったり、移動後に特定の車線が混雑しないように移動先の車線を選択するなどの処理が可能となる。しかし、このような大局的処理が可能となるのは、車両間の通信が滞りなく行われ、かつ各車両が適切なルールに基づいて振る舞う場合に限られる。現実的には、通信上の障害、意図的な攻撃、悪意のある車両、協力を行わない車両の存在による失敗のリスクが伴う。しかしセキュリティリスクを考慮した上で、複数車線にまたがる自動運転車両の危険回避行動に関する通信・車両制御の具体的手法は検討されてはいない。本研究では、大局的な協調動作を行う自動運転車両群の危険回避行動制御における無線通信要件、車両制御戦略・制御性能要件、ならびにセキュリティ対策を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

車車間通信と車両行動に関する大局的制御戦略を設計し、これらと攻撃（通信妨害と虚偽通信・通信非協力）に関するシミュレーションモデル、実動ソフトウェアを実装することとした。これらに基づくシミュレーションとエミュレーション評価を通じ、通信・車両制御に関する要件、攻撃への対策について明らかとする方針で研究を進めた。通信には今日車車間通信で想定されている IEEE802.11p（通常の無線 LAN の車車間通信向け仕様）による電波無線通信と、それを補うための指向性が高く、無差別の通信妨害攻撃に強い通信手段～可視光通信あるいはミリ波帯無線通信を併用することを想定した。

通信・車両行動の設計にあたっては、生物の群行動等を参考にすることとした。評価にあたっては、マクロなシミュレーションモデルによる予備的評価と実動ソフトウェアとエミュレーションによる詳細な検証をペアとした戦略により効率的に多くの手法について検討する方針とした。

研究の実施にあたっては、車両制御に関する知見からの助言を同分野の専門家（静岡大工学部 小林祐一准教授）、車車間ネットワーク技術に関する助言を米国 UCLA Prof. Mario Gerla、シミュレーションに関する助言を米 UCLA の高井峰生氏より頂くこととした。

### 4. 研究成果

#### (1) 突発的障害物回避戦略

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 [引用文献①] では、魚が注目する他の個体との距離に応じて、i) 回避、ii) 並進、iii) 接近、iv) 探索というルールに基づいて移動方向が決められる。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。本研究ではこのような単純なルールに基づいた行動により、突発的障害物に対する協調的回避行動を実現することを試みた。

本研究で検討した危険回避のアルゴリズムは以下の通りである。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ものは、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、後方の車両に関しては、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車両とがバランス良く合流することを目指している。

## (2) 提案戦略の効果検証 [学会発表 1, 2, 4, 7, 8]

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。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、本研究では、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たこととした。

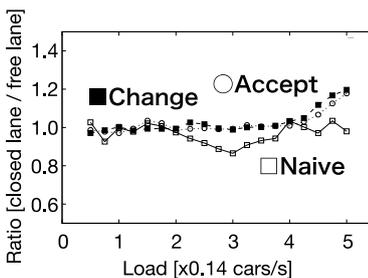
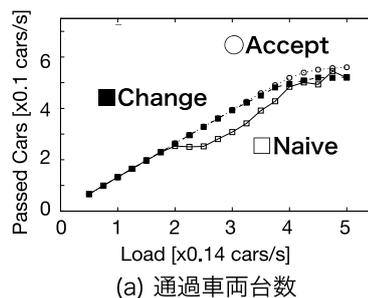
シミュレーションシナリオは以下の通りである。2車線の道路があり、一方が突然現れた障害物により、通行不能となっている。ドライバーは、この障害物の手前 100m 地点に到達したときに、この障害物を認知し、車線変更、並びに後続車両への通知を行う。このようなシナリオを sumo 上で模擬するため、2本の車線をもつ道路のうち、1本が途切れている道路地図を利用した。sumo 上では、車両は事前に経路を知っているものとして動作するようにモデル化されているので、標準的な設定であれば、このような車線の減少に対応できるように車線減少地点より数 100m 手前から車線変更を試みる。このため、sumo の標準の設定のままこの地図上でシミュレーションを行うと、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。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。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 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



図 1 突発的障害物回避戦略



(b) 障害物あり車線発の通過台数と障害物なし車線発の通過台数の比

図 2 シミュレーション結果

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。

図 2(a)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 0.28 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 2(b)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 0.28 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 0.42 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。

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 0.28 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代走は増加している。車両流入量が 0.52 台/秒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。メッセージ受信の失敗率の影響についても調査した。失敗率が 80%となっても、失敗率 0%の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。

### (3) 仮想無線 LAN エミュレーションデバイスの開発[雑誌論文 1, 学会発表 6, 9]

車々間通信を用いたアプリケーションや無線 LAN システム制御ソフトウェアの開発、テストを容易にするために、動的に変化する受信電波強度や送信出力制御に対応した汎用的に利用可能な Linux 仮想無線 LAN インタフェース(wtap80211)とそれを用いた無線ネットワークエミュレーション環境の設計・実装を行った。アプリケーションおよび無線 LAN 制御プログラムが使用する無線 LAN インタフェースの代わりに wtap80211 デバイスを指定することで、本物のネットワークアプリケーションおよび無線 LAN 制御プログラムを用いながらもシミュレートされた動的な変化を伴う仮想無線 LAN 環境を用いることが出来る。wtap80211 の動作環境は、実ハードウェア上で動作する Linux OS、仮想環境で動作する Linux OS いずれでも動作するため、様々な条件で利用可能である。本技術は車々間通信のみならず、公共環境、オフィス等の高密度無線 LAN における送信信号強度の変更、接続制御など高度な無線 LAN 制御システムの開発に適用可能であり、同分野のソフトウェア開発を加速する潜在力がある

### 引用文献

- 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).

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 加藤新良太, 高井峰生, 石原進: 無線ネットワーク TAP デバイスを用いた無線 LAN エミュレーションフレームワークの開発, 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 1, pp. 27-37 (2019). 査読あり

[学会発表] (計 10 件)

1. 石原進, 山下広仁: [依頼講演] 突発的障害物回避のための車々間通信による協調型車線変更制御, 電子情報通信学会無線通信システム研究会, RCS2019-8 (2019, 北海道登別市, 登別グランドホテル).

2. 山下広仁, 石原進: 車々間通信を用いた協調型路上障害物回避のための分散車両制御方法の検討, 第 81 回情報処理学会全国大会, 6Y-06 (2019, 福岡県福岡市, 福岡大学七隈キャンパス).
3. Arata Kato, Mineo Takai, and Susumu Ishihara: A System Design of Tight Physical Integration for Large-scale Vehicular Network Emulation, First International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular systems, in proc. of 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops) (2019, Kyoto, Japan, Kyoto International Conference Center,). 査読あり
4. 石原進: 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, 情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ研究会, 2018-ITS-75, (2018, 宮崎県宮崎市, 興亜宮崎ビル高千穂ホール).
5. 石原進, 濱崎福平, 陳ヒョンテ, 奥田裕之, 鈴木達也: [ポスター講演] 自動・手動運転の混合型隊列走行制御における通信妨害の影響, 創発システム・シンポジウム 2018 (2018, 長野県茅野市, 公立諏訪東京理科大学).
6. 加藤新良太, 高井峰生, 石原進: 無線ネットワーク TAP デバイスとネットワークシミュレータを連携した無線 LAN エミュレータの実現, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2018)シンポジウム (2018, 福井県あわら市, 福井県芦原温泉清風荘).
7. 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 (2018, 東京都足立区, 東京電機大学).
8. 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 (2017, 北海道北見市, 北海道温根湯温泉 大江本家).
9. Arata Kato, Mineo Takai, Susumu Ishihara: Design and Implementation of a Wireless Network Tap Device for IEEE 802.11 Wireless Network Emulation, in proc. of the tenth international conference on mobile computing and ubiquitous networking (ICMU2017) (2017, Toyama, Japan, Toyama International Conference Center,). 査読あり
10. Susumu Ishihara: Joy and safety on the road, 4th International Workshop on Smart Vehicles: Connectivity Technologies and ITS Applications (SmartVehicles 2017), (2017, Macao, China).

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: Mario Gerla

ローマ字氏名: Mario Gerla

研究協力者氏名: 高井 峰生

ローマ字氏名: Takai Mineo

研究協力者氏名: 加藤 新良太

ローマ字氏名: Kato Arata

研究協力者氏名: 山下 広仁

ローマ字氏名: Yamashita Hirohito

研究協力者氏名: 谷村 昌則

ローマ字氏名: Tanimura Masanori

研究協力者氏名: 濱崎 福平

ローマ字氏名: Hamazaki Fukuhei

※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。