

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11856

研究課題名（和文）多種モビリティデバイスの共働に向けた安全で効率的な移動経路配信手法の研究

研究課題名（英文）Safe and efficient routing method for coaction of various mobility devices

研究代表者

徳永 雄一（Tokunaga, Yuichi）

金沢工業大学・情報フロンティア学部・教授

研究者番号：40852249

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：各モビリティデバイス特性やサービス要求を考慮したインフラ協調型モビリティ移動支援技術の確立に向け、3つの技術を開発した。1つ目は、フィールド全体の近未来の移動衝突リスクを統計的に予測する技術として、モビリティデバイスの移動経路と周辺環境情報からリスクを導出する適応型経路モデル化手法を開発した。2つ目は、複数デバイスが密に共働する環境のデバイス経路を導出する技術として、Pareto-DQNを採用した不均衡収束アルゴリズムを定式化した。3つ目は、ゾーン分散サービス間でのシームレスなデバイス移動を可能とする技術として、オーバーラップ量を適正化する制御権限移譲プロトコルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物流ドライバー、建築現場など、人材不足が社会インフラに影響を与えている状況はすでに始まっており、自動運転技術、ロボティクス技術が問題解決手段として、急速に普及していくことは明らかである。これまで経験のない自律システムと人間がオープン環境で共存する時代はすぐそこに来ている一方、これまでの人間主体の道路交通システムでは対応できず、統制のない自律移動システムが人命の驚異をもたらしかねない。本成果は、自律型モビリティデバイスに対する移動安全性を担保する情報支援を実現する技術であり、自律走行中の衝突危険に対し管制による統一した安全誘導を実現することでこの脅威に対応することができる。

研究成果の概要（英文）：We have developed three technologies to establish infrastructure-coordinated mobility support technologies that take into account the characteristics of each mobility device and service requirements for the coexistence of a wide variety of mobility services. First, as a technique for statistically predicting near-future mobility crash risk for the entire field, we developed an adaptive path modeling method that derives risk from mobility device travel paths and surrounding environmental information. Second, we formulated an imbalance convergence algorithm employing Pareto-DQN as a technique for deriving device paths in an environment with multiple devices working closely together. Third, a control authority transfer protocol that optimizes the amount of overlap was developed as a technology to enable seamless device movement between zoned distributed services.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：Risk Potential Map Free Space Path Planning Imbalance Convergence Pareto Optimization Authority Transition

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

低遅延大容量通信を備えた 5G を契機に、自動車やトラックの自動走行、台車や建機の自動もしくは遠隔操業、さらには移動型ロボットの自律走行の実用化に期待が高まっている。2030 年には、世界の自動車販売台数の 4 割以上がレベル 3 以上の自動運転機能を備え、ドライバー判断を必要としないレベル 4 以上がレベル 3 を上回る。建築分野では、100 万人の現場人材不足を補うため、建機の自動・遠隔操業が普及する。ロボット農業は 2018 年比で 50 倍以上に市場成長が見込まれており、サービス分野へのロボット導入は製造・ロボテック・農林水産の合計を上回る。これらモビリティデバイスを活用したスマートシティを具現化する実証も各地で始まっており、サービスに合わせたさまざまな特性や形状のモビリティデバイスが街中で混在し稼働する世界が見えてきている。

一方、現在の技術開発においては、自動車、建機、ロボットの分野別で進化を続けており、それぞれの独自進化した判断制御が混在環境下でうまく作用するのかが見えていない。例えば、障害回避行動において、自動車は路上停止が危険であることを前提に、操舵回避制御が進められているが、ロボットは非常時には停止することを基本としている。こうした特性の異なるモビリティデバイスどうしの回避行動は、衝突こそ回避できるものの、最適移動行動の阻害となり、サービスの質を落とす原因となり得る。

申請者は、これまで自動車における搭乗者の移動目的に加え、多種多様なサービスからの車両行動への要求が混在する状況を想定し、多種要求の調停により、車両の移動経路を同定するクラウドエッジ協調モデルを提案することで、搭乗者が求める目的地への早期到着と交通管制が要求する渋滞緩和が両立できることを示している。本移動経路の同定において、各モビリティデバイスの特性の考慮を拡張し、異種モビリティデバイス・サービス混在環境での最適移動制御を実現することで、フィールドにも分野にもよらず、多種モビリティデバイスがシームレスに共働し、安全かつ効率的にサービスを継続できる環境が実現すると期待する。さらにこの成果は、公共の場における移動行政に繋がる。法規ルールを各ユーザが理解し運用するこれまでの人中心の行政から、管制による行政へのデジタルトランスフォーメーションの基盤になると期待する。

## 2. 研究の目的

クラウドやエッジで経路や制御量の最適値を計算しモビリティデバイスをアシストする研究は、ITS 分野で議論され、潤沢な情報量と処理量を用いた最適制御の可能性が示されている。一方、実現を妨げる大きな課題は制御遅延である。5G-MEC や仮想化による低遅延保証技術が期待できるが、センサ情報収集による現状把握から最適経路を同定するまでの処理時間を考えると必ず有限の遅延が存在する。制御分野ではネットワーク化制御として、予測制御情報を先んじて送ることで伝送遅延やパケットロスでの制御停止を防ぐ方法が提案されているが、これらは現時点での状況情報に基づく予測であり、想定を超えた障害物の出現や接近が遅延時間内に発生した場合には予測情報による制御を中断し、組み込まれた回避行動を自律的に実施することとなる。これがモビリティデバイスの混在環境下で発生すると、統制のない自主判断により周辺デバイスへの混乱を引き起こす。

本課題を解決する方法として、リスクポテンシャルマップに基づく経路指示を提案する。リスクポテンシャルマップは、自動運転の自律航法目的で研究されており、リスクを等高線図のように表した 3D マップとして表し、できるだけリスクの低い経路を走行する経路を選択する。リスクの高い経路を通らざるを得ない場合には高さに応じて速度を落とすことで、リスクが顕在化したときの回避行動の安全を担保することができる。本技術は、現時点のリスクを図化しており、時間とともに変化する状況をリアルタイムに反映する。したがって、図化および経路修正に大きな演算処理リソースが必要とされ、デバイス上の制御装置のコストアップに繋がる課題をもつ。そこで我々は、計算をデバイス外のサーバに移譲するとともに、デバイスの到達時点でのリスクをマップに表すモデルを提案する。現時点での状況情報に基づく予想であるため、デバイスから遠い箇所ほどリスクの正解確率は低下するが、近隣モビリティデバイスと合わせた経路計画により管理外のデバイスだけが存在する環境においては将来においても高確率にリスクを予想できる。また人や管理外のデバイスが混在する環境においても、デバイスに近い、すなわち近未来のマップは現時点の状況を踏まえた急な方向転換や飛出しの可能性を考慮した信頼性の高いリスクを設定するため、リスクの発生に対しの確かな安全経路を取ることができる。

評価目標として、第一に、現在の自律自動運転に必要なデバイス上処理量 1/1000 を目指す。これは、多種多様なモビリティデバイスへの実装障壁を無くすためである。一般的な組込みマイコンと通信環境で自動制御を可能とする。第二に、時速 40km/h までの移動速度における混在環境下での安全制御を目指す。自動化が最も難しいデバイスや歩行者が混在する商店街等の一般道での自動化を想定したものである。第三に、道路と建築現場などの複数の業態の異なるフィールド境界における第二の目標実現を目指す。モビリティデバイスの自由な移動を実現するためである。以上三点をモビリティデバイスの共働実現の条件値として評価する。

### 3. 研究の方法

本研究では、リスクポテンシャルマップに予測と最適化を適用し、想定外のリスクが発生した場合にも安全かつ周囲デバイスへの混乱のない回避行動をとれる新たな経路指示モデルを提案し、モビリティデバイスの共働実現を評価する。以下に各課題の研究方法を説明する。

#### (ア) 適応型経路モデルの定式化

提案する新たなリスクポテンシャルマップを適応型経路モデルと称し、最適移動制御の出力として定義し、サーバにおける生成・管理方法、ネットワーク経由での伝達方法、モビリティデバイスにおける制御活用方法を定式化する。初年度は、経路モデルとして、経路計画アルゴリズムとリスク評価法の融合についての調査検討を行うとともにデバイスへの伝達表現方法を提案し、第一の評価目標であるデバイス制御の処理負荷軽減について評価する。次年度は、モデル更新と配信方法を考慮したモデルの改良を行い、(イ) (ウ) と連携して第二、第三の目標評価を行う。

#### (イ) 不均衡収束アルゴリズムの開発

複数デバイスが相互影響を及ぼす制御環境で発生する予測修正の連鎖を、クラウド内で収束させるためのアルゴリズムを開発する。初年度は、サービス視点で全体移動計画を遂行するサービスモデルと、各デバイスの制御判断を行う個別予測モデルの要件定義と基本アルゴリズムを開発する。次年度は、アルゴリズムを拡張し(ア)と連携した評価を行う。

#### (ウ) 制御権限移譲プロトコルの開発

ゾーンを移動するデバイスが途切れることなく制御を継続するためのプロトコルを開発する。初年度は、管理すべきデバイスの制御モデルや属性情報の明確化と定義方法を調査し、時間空白のないシームレスな制御権限移譲に向けた課題抽出を行う。次年度は、選定および考案したシーケンスに基づき通信プロトコルを定義し、(ア)と連携した評価を行う。

#### (エ) 異種モビリティ共働実証環境

各技術検証のための実評に加え、教育教材への活用も考慮した環境整備を行う。初年度は、提案者が構築し研究に用いているモビリティデバイス遠隔制御システムへ、適応型経路モデルの配信方法に準じたネットワークプロトコルの改造を行い、(ア)の成果を走行実証する。次年度以降も、順次(ア)から(ウ)の成果をシステムに反映し、積極的に実証を行うとともに、地域創生を目指すプロジェクトデザイン実践教材に利用し、その効果を検証する。

### 4. 研究成果

#### (ア) 適応型経路モデルの定式化

多種多様なモビリティデバイスへ共通な安全情報として配布するためのリスク評価モデルの開発を行った。モデルの基本である、任意の地理空間に対しそこを通過したデバイスがどの空間に移動するのかがデータ収集し、移動確率をリスク評価値として示す方式に対し、その空間と信号との距離、横断歩道の有無、駐車車両の有無など、周辺環境情報と通過デバイスの移動先との関係を因果関係として新たに加え、ベイジアンネットワークにより周辺環境情報に対応したリスク評価モデルを生成する手法を導出した。これにより、例えば駐車車両の存在によってデバイスの移動経路が変わると、それに呼応しリスク分布が変わるといった適応型のモデルを生成することができる。

本モデルを、歩行者の乱横断リスクマップとして、適用検討を行った。歩行者はそれぞれ意図を持ち移動していることから、特性の異なる多様なモビリティデバイスとして捉えることができる。ここでの課題は、数ある周辺環境情報のなかから移動変化を促す情報を抽出する必要がある。そこで、影響の高い環境情報を効率的に抽出するフレームワークを開発し(図1)、抽出した情報に基づくリスクマップの生成を確認することができた(図2)。

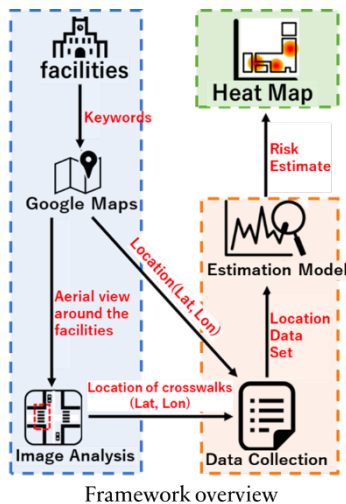


図1 フレームワーク



図2 生成したリスクマップ

### (イ) 不均衡収束アルゴリズムの開発

複数のモビリティデバイスが密に共働する環境での安全かつ効率的な各デバイス経路を導出するために、全体最適化と個別最適化を両立させる不均衡収束アルゴリズムの定式化に取り組んだ。具体的には、マルチエージェント多目的強化学習を用いたシミュレーションにより、モビリティデバイスの緊急性と安全性についてのパレートフロントを得るアルゴリズムの有効性を確認した。また、このアルゴリズムを大規模システムに適用する際の計算量を削減するために、ニューラルネットワークを導入してパレートフロントを学習・推測する Pareto-DQN を採用した不均衡収束アルゴリズムの実装した (図 3)。さらに、(ア) 適応型経路モデルのリスクポテンシャルマップと連携し、最適経路の導出精度を向上させることができた (図 4)。

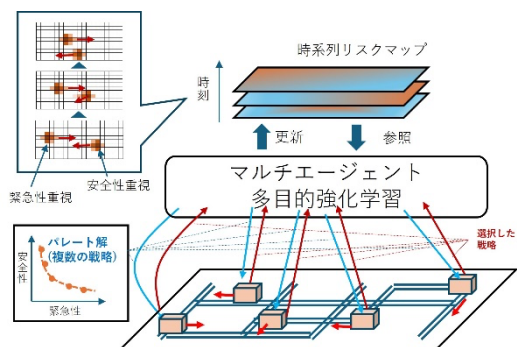


図 3 不均衡収束アルゴリズム

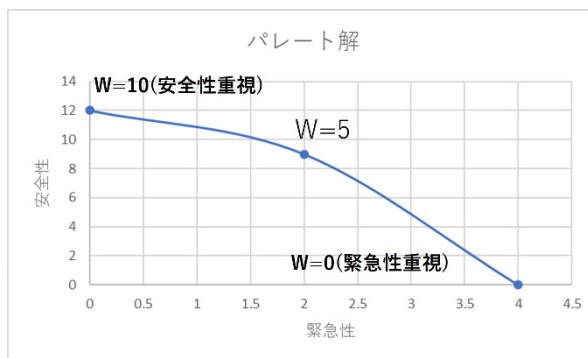


図 4 アルゴリズムの評価結果

### (ウ) 制御権限移譲プロトコルの開発

モバイルデバイスの移動に関する制約事項にもとづき、オーバーラップしたエッジ群を定義、オーバーラップ部分で危険度の計算を引き継ぐためにクラウド経由での情報共有のための通信量を計測するためのシミュレータの開発完了。オーバーラップの度合いにより、通信量と情報共有完了までの遅延がどのように変化するかを分析した。通信量・遅延の変動が、モバイルデバイスの移動経路に強く依存している結果となり、オーバーラップ領域の適正化まで至っていない。また、研究項目(ア)の成果との連携についても未達成である。類似課題として、移動体ではなく、変動するエネルギーの入出力値に応じて、供給量を最適に送受するシミュレータを用いた評価においては近似最適となる制御アルゴリズムの研究開発を行った。複数家庭よりなる複数集落において電力融通の例を図 5 に示し、共有による消費率向上を表 1 に示す。これは制御権限移譲による効果を示している。

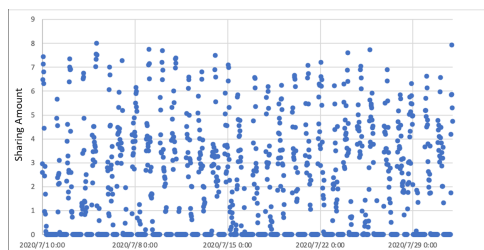


図 5 複数集落による電力共有量

表 1 共有による消費率向上

	1 軒	複数集落
PV 電力消費割合 (%)	37.3	54.0
購入電力(kWh)	3523	2484

### (エ) 異種モビリティ共働実証環境

(ア) から (ウ) までの技術を組み合わせた総合実証は未達成だが、容易にコストをかけずに実証を行うための模型を使った実証環境の構築について完了。自律移動が可能な模型サイズのモバイルデバイスは教育教材として流通し安価に入手できる一方、位置情報を正確に取得できる小型装置は入手できないため、模型に搭載でき、かつセンチメートル級の高精度測位が可能な RTK ロケータを開発した。図 6 はデバイスに装着した高精度ロケータで、50x50x15mm の本体、Φ20x60mm のアンテナで構成される。2.4GHz 無線通信でホスト PC に衛星からの受信情報を伝送し、測位計算はホスト PC にて行なう。Fix 時には誤差 0.4cm 以内で位置を同定することができた。

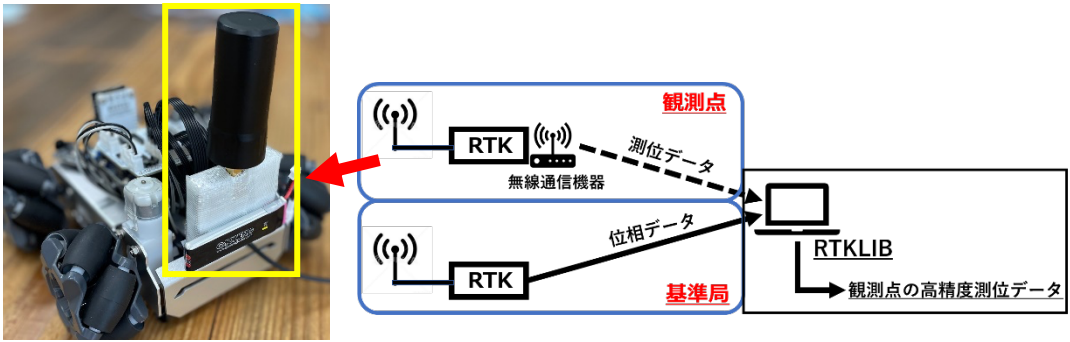


図6 模型サイズ(20cmx20cm)のモバイルデバイスに取り付けた高精度ロケータ

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4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 Yuichi Tokunaga, Atsushi Yamamoto, and Masashi Saito	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of a Framework for Jaywalking Risk Map to Reduce Pedestrian-to-Vehicle Accidents	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of International Workshop on Informatics	6. 最初と最後の頁 65-70
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 Masashi Saito, Tomoki Nomura, and Yuichi Tokunaga	4. 巻 1
2. 論文標題 A Study on a Power Interchange Method for Realizing Net-Zero Energy for Multiple Small Communities	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of International Workshop on Informatics	6. 最初と最後の頁 3-10
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 Masashi Saito, Tomoki Nomura, and Yuichi Tokunaga	4. 巻 16
2. 論文標題 An Evaluation on a Power Interchange Method for Realizing Net-Zero Energy for Multiple Small Communities	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Informatics Society	6. 最初と最後の頁 to be appeared
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 Yuichi Tokunaga, Atsushi Yamamoto, and Masashi Saito	4. 巻 16
2. 論文標題 Identifying Risk Factors for Jaywalking Using a Risk Mapping Framework	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Informatics Society	6. 最初と最後の頁 to be appeared
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 赤嶺伶於, 竹之上典昭, 徳永雄一	4. 巻 2022-ITS-91, 3
2. 論文標題 ドローン遠隔操縦の安全操作に向けた三人称視点の実現	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS)	6. 最初と最後の頁 1 - 2
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 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 山岸功治, 徳永雄一	4. 巻 2022-ITS-91, 4
2. 論文標題 MMSとドローンを組み合わせた電柱遠隔点検の効率化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS)	6. 最初と最後の頁 1 - 2
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 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 野村朋生, 福田瑛次, 宮島誠治, 齋藤正史	4. 巻 2022-ITS-89, 24
2. 論文標題 複数家庭に向けたZEH実現のための電力融通手法の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS)	6. 最初と最後の頁 1 - 6
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 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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yuichi Tokunaga, Atsushi Yamamoto, and Masashi Saito
2. 発表標題 Development of a Framework for Jaywalking Risk Map to Reduce Pedestrian-to-Vehicle Accidents
3. 学会等名 17th International Workshop on Informatics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masashi Saito, Tomoki Nomura, and Yuichi Tokunaga
2. 発表標題 A Study on a Power Interchange Method for Realizing Net-Zero Energy for Multiple Small Communities
3. 学会等名 17th International Workshop on Informatics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤嶺伶於, 竹之上典昭, 徳永雄一
2. 発表標題 ドローン遠隔操縦の安全操作に向けて三人称視点の実現
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山岸功治, 徳永雄一
2. 発表標題 ドローンによる不連続空撮映像を用いた電柱遠隔点検の効率化
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武安政明, 山内尚久, 徳永雄一
2. 発表標題 モビリティ遠隔運転の緊急回避を実現する動的リスクポテンシャルマップの提案
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 北上真二
2. 発表標題 雨水資源化と内水氾濫緩和を両立させるクラウド型雨水タンク管理システム
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会合同発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笠井利浩, 北上真二, 近藤晶, 三寺潤
2. 発表標題 雨水活用による街の災害レジリエンスの向上
3. 学会等名 地域活性学会東日本震災後10年特別大会
4. 発表年 2021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	齋藤 正史  (Saito Masashi)  (00759425)	金沢工業大学・情報フロンティア学部・教授   (33302)	
研究 分担者	北上 真二  (Kitagami Shinji)  (10585871)	福井工業大学・環境情報学部・教授   (33401)	

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
---------	---------