

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏名	張 作庭	学籍番号	1931168
論文題目	車線数の動的変更と経路計画の組み合わせによる渋滞緩和方式の提案・評価		

要旨

都市道路網の混雑問題は日本だけではなく、世界中の都市が抱える問題である。さらに、世界の都市圏の人口割合は年々増加傾向にあり、例えば、首都圏には日本の総人口の約 3 割を占め、混雑問題が厳しくなる一方である。この問題を解消するために、日本政府は、道路網の安全性、快適性の向上などを目的に、人、自動車と道路を一体のシステムとして、最先端技術を用いて構築する、高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport System) を推進している。その中に、実用化に向けた自動運転技術が注目されている。日本政府は、2020 年に高速道路での条件付自動運転車の実用化、そして、2025 年を目途に高速道路での高度自動運転システムの実用化を目指して、全国各地で実証実験を進めている。

運転支援技術による安全かつ円滑な道路運転を実現するために、交通状態に基づく経路計画が多く検討されている。また、近年道路の両方向の交通量の違いに応じて車線数を動的に変更する研究も検討されている。経路計画は、渋滞が起きた道路を遠回りすることで避けるが、車線数変更は車線数の動的割り当てによって、道路の所望方向の容量を上げる。ただし、これらの方式はそれぞれ独立して検討されており、交通効率の向上効果は限られている。

本論文では、自動運転車両の移動効率をさらに向上するために、車線数の動的変更と経路計画の組み合わせによる渋滞の緩和を行う方式を提案する。長い周期で車線数変更を行って、一時的に道路の渋滞方向の容量を上げる。さらに短い周期で変更した道路容量に応じて、最適な経路を更新する。また、SUMO というシミュレータの上、移動効率に関する最適な閾値の確認した。提案方式の有効性を示すために、小規模のグリッド道路網と実環境に則した大規模な道路網をそれぞれ用意し、移動時間・移動距離・CO₂ 排出量・ガソリン消費量などの指標で性能評価を行った。車両の平均移動時間について、提案方式は基本方式 (制御無し)、車線数変更、経路計画と比べて、それぞれ 82%、70%と 66%削減できることを確認した。

車線数の動的変更と経路計画の組み合わせ
による渋滞緩和方式の提案・評価

学籍番号 1931168

氏名 張 作庭

指導教員 湯 素華

副指導教員 策力木格

電気通信大学 情報理工学研究科

情報・ネットワーク工学専攻

2021年 9月

車線数の動的変更と経路計画の組み合わせ による渋滞緩和方式の提案・評価

張 作庭

概要

都市道路網の混雑問題は日本だけではなく、世界中の都市が抱える問題である。さらに、世界の都市圏の人口割合は年々増加傾向にあり、例えば、首都圏には日本の総人口の約 3 割を占め、混雑問題が厳しくなる一方である。この問題を解消するために、日本政府は、道路網の安全性、快適性の向上などを目的に、人、自動車と道路を一体のシステムとして、最先端技術を用いて構築する、高度交通システム (ITS : Intelligent Transport System) を推進している。その中に、実用化に向けた自動運転技術が注目されている。日本政府は、2020 年に高速道路での条件付自動運転の実用化、そして、2025 年を目途に高速道路での高度自動運転システムの実用化を目指して、全国各地で実証実験を進めている。

運転支援技術による安全かつ円滑な道路運転を実現するために、交通状態に基づく経路計画が多く検討されている。また、近年道路の両方向の交通量の違いに応じて車線数を動的に変更する研究も検討されている。経路計画は、渋滞が起きた道路を遠回りすることで避けるが、車線数変更は車線数の動的割り当てによって、道路の所望方向の容量を上げる。ただし、これらの方式はそれぞれ独立して検討されており、交通効率の向上効果は限られている。

本論文では、自動運転車両の移動効率をさらに向上するために、車線数の動的変更と経路計画の組み合わせによる渋滞緩和を行う方式を提案する。長い周期で車線数変更を行って、一時的に道路の渋滞方向の容量を上げる。さらに短い周期で変更した道路容量に応じて、最適な経路を更新する。また、SUMO という道路交通シミュレータの上、移動効率に関する最適な閾値を確認した。提案方式の有効性を示すために、小規模のグリッド道路網と実環境に則した大規模な道路網をそれぞれ用意し、移動時間・移動距離・CO₂ 排出量・ガソリン消費量などの指標で性能評価を行った。車両の平均移動時間について、提案方式は基本方式 (制御無し)、車線数変更、経路計画と比べて、それぞれ 82%、70%と 66%削減できることを確認した。

目次

1.	序論	1
2.	研究の背景と目的	3
2.1	ITS	3
2.2	自動運転技術の発展	5
2.3	道路混雑問題と緩和対策	7
2.3.1	道路混雑問題	7
2.3.2	緩和対策	7
2.4	環境への影響	9
2.5	研究の目的	10
3.	関連研究と課題	11
3.1	経路計画	11
3.1.1	確定的な経路探索方法	11
3.1.2	確率的な経路探索方法	13
3.2	車線数変更	13
3.2.1	車線数変更に対する関連研究	14
3.3	課題	16
4.	提案方式	17
4.1	組み合わせる方式	17
4.1.1	概要	17
4.1.2	車線数変更	18
4.1.3	提案方式と既存方式の比較	18
4.2	車線数変更のアルゴリズム	19
4.3	最適化	21
4.3.1	閾値の最適化分析	22
4.3.2	制御周期の最適化	23
4.3.3	閾値の最適化	25
5.	提案方式の評価と考察	28
5.1	シミュレータの選択	28

5.2	評価項目	30
5.3	グリッドネットワークのシナリオ	31
5.3.1	シミュレーションパラメータ	31
5.3.2	シミュレーション結果と考察	33
5.3.3	移動時間と移動距離	34
5.3.4	CO ₂ の排出量とガソリン消費量	34
5.4	OSM シナリオ	35
5.4.1	シミュレーションパラメータ	37
5.4.2	シミュレーション結果	39
5.4.3	提案方式の考察	40
6.	結論	41
	参考文献	43

1. 序論

都市道路網の混雑問題は日本だけではなく、世界中の都市が抱える問題である。その問題に対して、新たな道路を建設し、道路容量を上げることで混雑を緩和できるが、道路交通網が新設されると、交通基盤の「口」に当たる大都市に経済活動が集中し、人口流入が大きくなる。これはストロー現象と呼ばれる。「ストロー現象」によって世界の都市圏の人口割合は年々増加傾向にあり、例として、2019年頃、日本の首都圏は日本総人口の約3割を占めており、道路混雑問題は悪化の一途をたどる[1]。混雑を緩和するため、政府は都市部の高度交通システム（ITS：Intelligent Transport System）を推進している。ITSは最先端技術を用いて道路網の安全性、快適性の向上などを目的に、人、自動車と道路を一体のシステムとして構築する新しい道路交通システムである。

近年、ITSの中心である車に関して、実用化に向けた自動運転技術が注目されている。日本政府は、2020年に高速道路での条件付自動運転自動車の実用化、そして、2025年を目途に高速道路での高度自動運転システムの実用化を目指して、全国各地で実証実験を進めている[2]（図1）。自動運転技術による安全かつ円滑な道路運転を実現するために、交通状態に基づく経路計画が多く検討されている。また、近年道路の両方向の交通量の違いに応じて車線数を動的に変更する研究も検討されている。ただし、[3]は簡単な4向交差点に対して、車線数の動的変更の有効性を示したが、より複雑な道路網の適用可能性については検討されていなかった。[5]は各道路を複数の均一セルに分けて、セル単位で車線数変更を行う方式を検討したが、2つの交差点につながる道路しか検証しておらず、複雑な道路網への効果は不明である。[6]はテロ発生時の避難計画を作成するために、ある出発地点から複数の避難所への最速経路を目指すのが、これは日常都市部の道路混雑状況と異なるため、直接に適用できない。また、これらの方式はそれぞれ独立して検討されており、交通量の向上効果は限られている。

本論文では、自動運転車両の移動効率をさらに向上するために、車線数の動的変更（以下DLRと呼ぶ）と経路計画（以下RPと呼ぶ）の組み合わせによる渋滞の緩和を行う方式を提案・評価する。この方式は、長いDLR周期で道路の混雑方向の容量を一時的に上げることと短いRP周期で変更後の道路網に応じて最適な経路を計算することを組み合わせる。これにより、車両の全体的な移動時間を大幅に減少することが可能となる。信号機制御方式、交通量レベル、DLRとRPの周期比などの因子をそれぞれ設定して、実験計画法（DOE：Design of Experiment）を用いて、シミュレーション計画を行い、結果を分析して最適なパラメータ値を決定する。また、提案方式の有効性を検証するため、SUMOというシミュレータを用いて小規模のグリッド道路網及び大規模のOSM道路網を

それぞれ構築し、既存方式との比較を行い、提案方式の有効性を確認する。

以降、第2章では研究の背景と目的、第3章では関連研究とその課題、第4章では提案方式による組み合わせ方式と閾値最適化について述べる。第5章では提案方式の評価と考察、最後に第6章では本論文全体を通じた考察と結論を述べる。

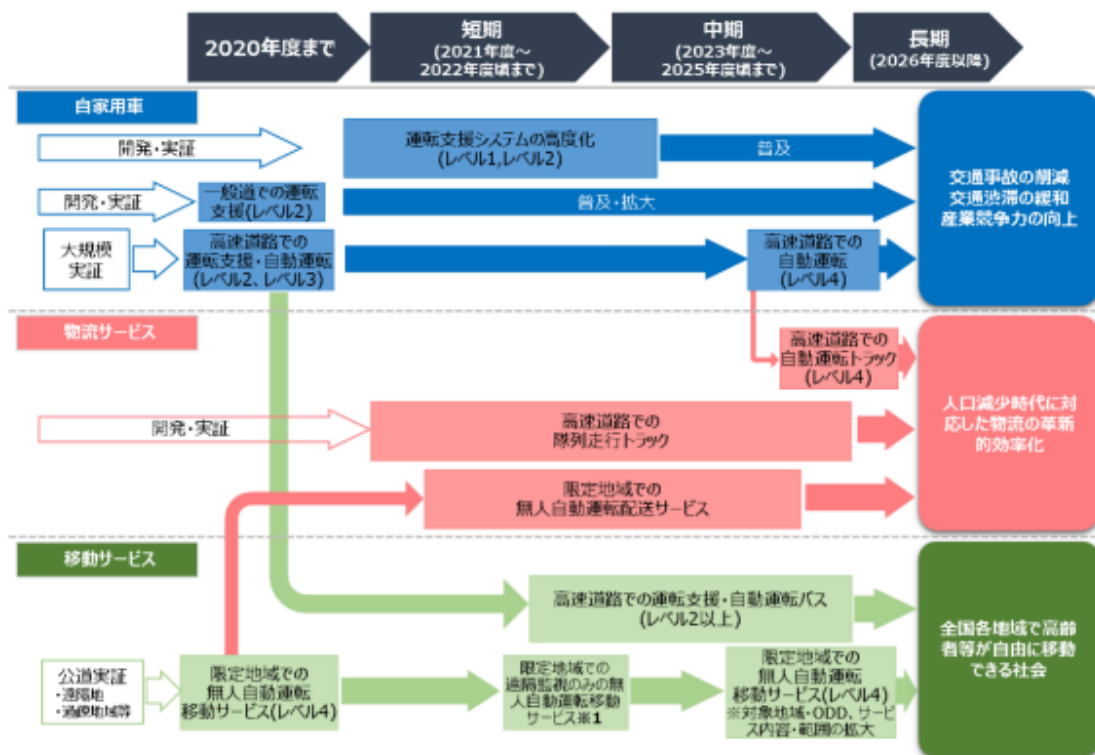


図 1 自動運転システムの市場化・サービス実現のシナリオ[2]

2. 研究の背景と目的

2.1 ITS

ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム)とは、最先端技術を用いて道路網の安全性、快適性の向上などを目的に、人、自動車と道路を一体のシステムとして構築する新しい道路交通システムである。

ITS は、以下 9 つの開発分野がある。

- ① ナビゲーションシステムの高度化
利便性向上を目指して出行計画の策定を支援するため、高速道路、一般道路などの渋滞情報と交通規制情報を提供し、経路、移動時間または交通流の分散などについて最適な行動選択が可能となる。
- ② 自動料金収受システム
キャッシュレス化による有料道路での料金所の渋滞解消とともに、ドライバーの利便性向上と管理コストの低減も実現できる。代表例となる ETC (Electronic Toll Collection System) は令和 3 年に、日本国内において、93%以上の高速道路に普及している[7]。
- ③ 安全運転の支援
車両が走行中に、路側機および車両に搭載されたセンサにより周辺状況をリアルタイムに把握して、その情報を用いて危険警告を行う。また、安全運転のため、自動ブレーキ、アクセル操作などを行う。
- ④ 交通管理の最適化
局所的な道路渋滞の区域だけでなく、道路網全体で最適な信号制御を実現する。また、交通管理のため走行中のドライバーへの経路誘導を行う。
- ⑤ 道路管理の効率化
道路の維持・補修などのため最適な作業時期の判断・作業配置の策定、車両への指示などを行う。また、特殊車両(「一般的制限値」と呼ばれる道路を通行する車両の最高限度を超えた車両)の管理や通行経路の把握などを行う。
- ⑥ 公共交通の支援
公共交通利用者のニーズに応じて移動手段、乗り換え、出発時間帯などの選択を支援する。例えば、受験生は乗換案内などのスマホアプリで住所から試験場までの複数電車経路を見ることで、好きな経路を選択することができる。
- ⑦ 商用車の効率化
高度化・自動化・システム化された物流センターの整備、共同配送・帰り荷情報等の提供等により物流の効率化を支援する。
- ⑧ 歩行者の支援

高齢者・障害者等の交通弱者をはじめ歩行者等が安心・快適に利用できる道路環境の形成を図るため、携帯端末機や磁気、音声等を用いた施設・経路案内や誘導等により歩行者等の支援を行う。

⑨ 緊急車両の運行支援

災害、事故等に伴う迅速かつ的確な復旧・救援活動の実現を図るため、車両等自らが自動的に緊急メッセージを関係機関へ通報し、災害、事故等の認知と地点等の特定までに要する時間を飛躍的に短縮する。

日本政府は、上記の9つの分野の発展を図るため、4つのフェーズを策定している（図2）。

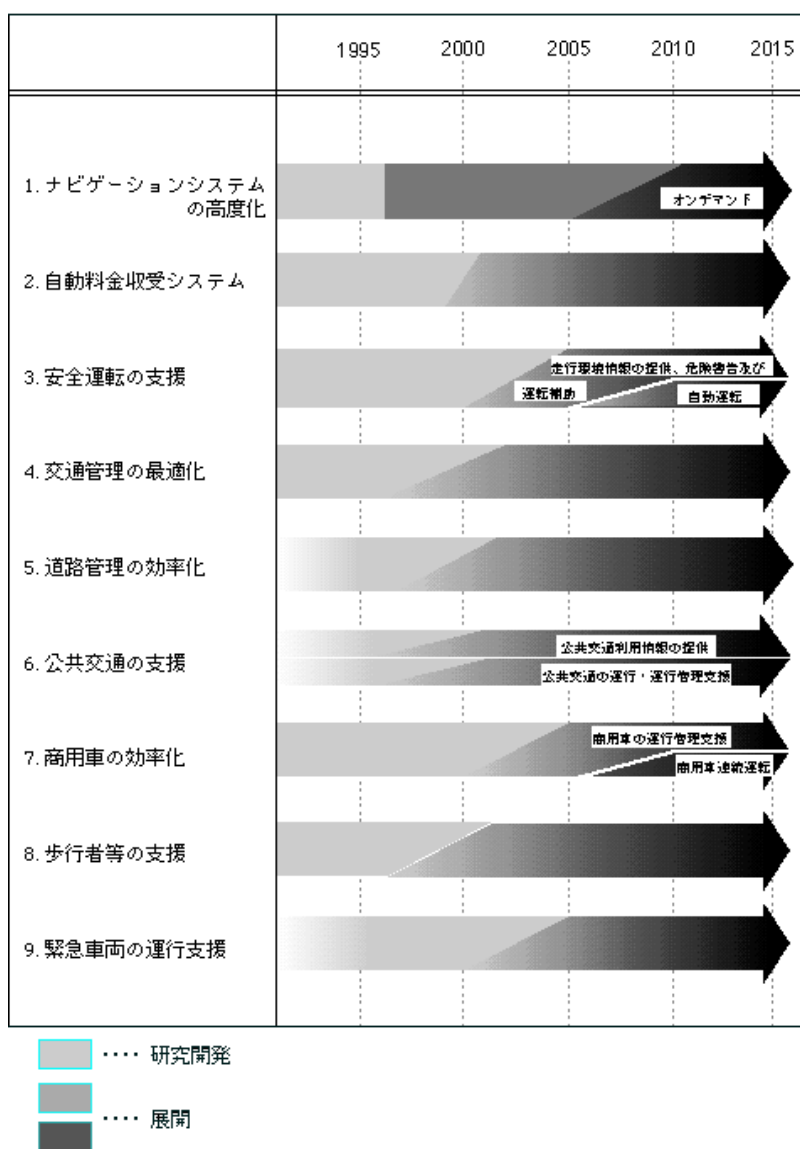


図2 ITS開発・展開計画[3]

第1フェーズは、2000年頃から、ナビゲーションシステムで交通関連情報を提供し、渋滞情報や最適な経路などを表示する。

第2フェーズは、2005年頃から、様々な利用者へのサービスを導入し、目的地に関するサービス情報や公共交通情報などを拡充し、利用者の利便性向上を行った。

第3フェーズは、2010年頃から、インフラの整備や車載機などの普及に加えて、自動運転が本格的にサービスを開始した。

第4フェーズでは、2010年以降、安全運転支援の利用者が増大しはじめ、一般的なシステムとして定着しはじめるなど、ITS に関しても成熟の時期を迎え、ITS は道路交通ならびに交通全体に係わる基本的なシステムとして広く国民に受入れられている。これにより、交通事故による死亡者数はモータリゼーション (motorization : 自動車化) の進展にも係わらず、現在よりも大幅に減少することが期待される。また、都市部をはじめとした道路等の渋滞は緩和され、快適で円滑な移動が可能となる。さらに、業務交通量の低減により沿道環境、地球環境との調和が図られる。

また、日本では、「世界一の ITS を構築・維持し、日本・世界に貢献する」という目標を目指し、2014年以降、毎年「官民 ITS 構想・ロードマップ」の策定と改定を実施している。さらに、ロードマップにより、ITS に関する様々な課題を解決するため、産学官で連携して取り組んでいる。

しかし、2020年4月から、日本国内は新型コロナウイルスの拡大を受け、これまで4度目の緊急事態宣言が発令され、不要不急の外出自粛などが要請された。政府は「Go To トラベル」「Go To イート」などの停止とともに、「3つの密」、休業要請あるいは時短営業など措置でコロナの感染を抑えるようにする。それに対して、企業側では、在宅勤務、テレワークなど新たな方式に調整した。国民では、マスク着用、手消毒など新しい生活様式に徐々に慣れている。このような社会ニーズの変更により、人が移動に代わりものやサービスが移動に応じることが求められている。ネットショッピング、宅食など要求を満たすため不可欠な物流の効率化は、より改善することが必要である。

人の移動とモノやサービスの移動どちらの状況に対しても、モビリティの効率化と快適性の重要度が高まっている。

2.2 自動運転技術の発展

自動運転車とは、ドライバの操作無しでも自動走行できる車両である。およそ30年前に自動運転の概念が提唱されたが、実用化階段に入ったのはここ10年間での出来事である。また、完全手動から完全自動までのレベルについて様々

な定義がある[8][9][10][11]が、日本においてよく採用するレベル定義は米国自動車技術者協会（SAE）の標準である[8].

自動運転の最終的な目標を段階的に実現するため、SAE が表 1 のように 0～5 まで運転自動化レベルを定義する.

表 1 自動運転のレベル

レベル	概要	操縦の主体
運転者が一部又は全ての動的運転タスクを実行		
レベル 0	運転者が全ての動的運転タスクを実行	運転者
レベル 1	システムが縦方向又は横方向のいずれかの車両運転制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
レベル 2	システムが縦方向及び横方向両方の車両運転制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
自動運転システムが（作動時は）全ての動的運転タスクを実行		
レベル 3	<ul style="list-style-type: none"> システムが全ての動的運転タスクを限定領域において実行 作動継続が困難な場合は、システムの介入要求等に適切に応答 	システム（作動継続が困難な場合は運転者）
レベル 4	システムが全ての動的運転タスク及び作動時継続が困難な場合への応答を限定領域において実行	システム
レベル 5	システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を無制限に（すなわち、限定領域内ではない）実行	システム

日本では、2020 年に高速道路で自動運転システムを搭載した自動運転車の市場化無人自動運転移動サービスの実現を図る。国内の車企業は、ホンダが 2021 年 3 月、自動運転レベル 3 の機能を搭載した車両を発売した。国外の車企業は、ドイツ車メーカー BMW が、レベル 3 車両の 2021 年量産開始を表明した。米国の車企業大手テスラ及び IT 大手企業 Google も、大規模な投資を続けて、自動運転技術の商用化を競争している。自動運転車の普及に加えて、交通事故を低減し、快適かつ円滑な運転環境を実現することが期待されている。

2.3 道路混雑問題と緩和対策

2.3.1 道路混雑問題

道路混雑問題は、長い間世界中で重要な課題となっており、完全な解決には至っていない。そのため、社会や経済などに膨大な影響が生じた。2017年版の首都圏白書[12]によれば、交通渋滞に費やされる時間は、物流産業、ひいては日本経済にとって大きな損失の原因となっている。道路移動時間の約4割は渋滞に費やされている状況であり、これは年間約280万人分の労働力に匹敵する。一日も早く渋滞の緩和をすることが必要である。

道路混雑に対して、以下のように具体的な原因の分析と対策を行うべきと考えている。

① 交通事故

交通事故が発生する際に、一部の道路は使用不可になる。事故程度の重さにより道路が回復する所要時間が異なる。また、付近の車両が障害物を避けるように車線変更や速度低減などが必要になる。さらに、速度が低下した車の後続車が連鎖的にブレーキを踏み渋滞が起きる。道路交通事故の原因として、酒酔い運転、居眠り運転やながら運転などがある。

② 料金所

車両が料金所に通行する際に、時速20km以下に減速する必要があるため、それにより一連の車両が低速移動して渋滞が生じる。

③ インターチェンジ合流部

合流部で車両が衝突を避けるように低速で移動する。また、合流部付近にバンプアップ区域の設置により道路の通行空間が狭くなるので、渋滞が発生しやすい。

④ 道路工事

道路は定期的な新設、改良及び維持・修繕工事があるので、連続的な時期に一部の道路を利用停止させることがある。それによって、道路の通行容量が不足になる。

⑤ ラッシュ時間帯

ラッシュ時間帯に、道路容量を超えた車両台数が短時間で道路上に移動するので、渋滞が発生する。

2.3.2 緩和対策

以上の道路混雑原因に対して、様々な技術や対策で道路混雑の解消と緩和をすることが可能である。一部の技術と対策は以下の様にまとめられる。

① 自動運転技術

自動運転技術は、多種多様なセンサが車両に搭載されているので、人間より早く車両周辺の情報を収集し、緊急状況に対応することができる。例として、ビューカメラは道路標識・白線などの認識、LiDAR は対象物の位置・距離の検知が可能である。

② ETC システム

ETC カードを搭載する車両は、料金所で停止せずスムーズに通行できる。日本では、2001 年から全国の高速度道路における ETC の一般利用が開始した。令和 3 年 3 月頃、93.1%の ETC 利用率を達成できた[7]。現時点では多くの料金所は 2 種類の車道レーンを併用しているが（図 3）、将来 100%の ETC 利用率を達成すれば、料金所での渋滞を緩和できる。

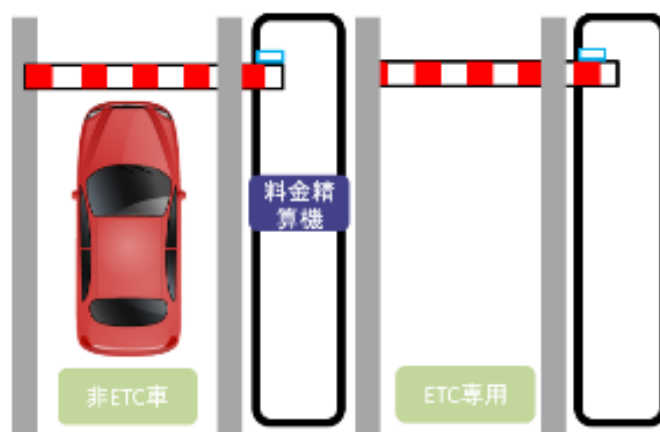


図 3 非 ETC 車道と ETC 車道

③ AI 信号機

交差点に設置する AI 信号機は、伝統的な「集中信号機制御」ではなく、「自律分散型信号機制御」である。各信号機に搭載している AI がカメラやセンサから交通量データを収集して、時間帯や曜日などによって変化する混雑状況に基づき、青、赤と待ち時間を随時変更する。これにより、広域の車両に対して、交差点の通過時間を大幅に削減できる（図 4）。

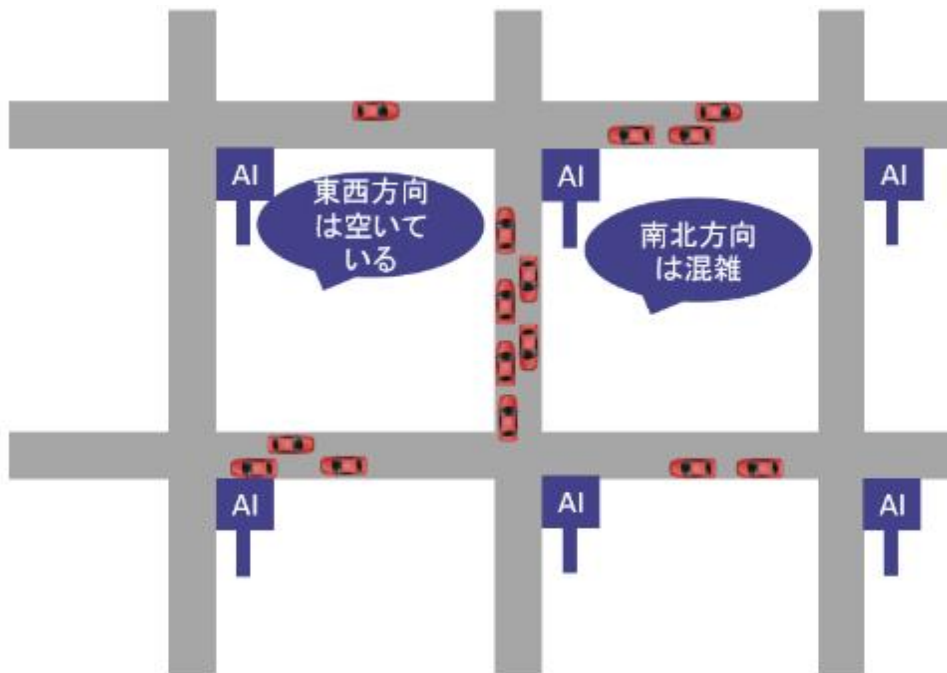


図 4 AI 信号機により車両の通過時間を削減

④ 経路計画

経路計画は、車両自体の状況及び車両周辺の情報と目的地を用いて、アルゴリズムの計算をすることでコストをできる限り小さくするように最適な経路を作成する。

⑤ 対向車線

道路上で渋滞が発生する際、常に両方向で渋滞が発生するとは限らない。例えば、朝のラッシュアワー時や連休終了時に、道路の上り方向は一時的に混雑が発生するが、下り方向は交通量が少ない。車線数の動的変更では、混雑していない方向の車線を減らし、混雑している方向の車線数を増やして混雑を緩和する。

2.4 環境への影響

人類の生産活動により自然環境へ大きな影響がある。現在の地球は過去 1400 年で最も暖かくなっている。日本の二酸化炭素総排出量のうち約 2 割が運輸部門からであり、そのうち約 9 割が自動車から排出されている[14]。車は化石燃料の燃焼で二酸化炭素などの温室効果ガスを排出し、郊外に比べ、都市部に近い程気温が高くなり、これはヒートアイランド現象と呼ばれる。地球温暖化の問題[13]は平均気温の上昇のみならず、異常な熱波や大雨・干ばつの増加などの様々な気候変化を伴う。例として、日本において、桜満開の時期は 3 月末頃で、伝統

的な卒業式と入学式の時期だが、地球温暖化の影響で、年々早まる傾向が続いている。

令和 2 年 10 月に、日本政府は 2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体で実質ゼロにすると宣言した。ちなわち、脱炭素社会を実現する。2019 年日本全国の温室効果ガス排出量は 12 億 1,200 万トンであり、2014 年以降連続で減少している[15]。脱炭素社会への挑戦が、産業構造や経済社会の発展につながり、環境と経済の好循環を生み出すという発想で取り組んでいく必要がある。それに伴い、車両が運転中に排出する CO₂ とガソリン消費量をさらに低減することが必要である。

2.5 研究の目的

本研究は、都市部において交通渋滞を緩和するため、車線数変更と経路計画を組み合わせる手法を提案し、実際の道路網に適用するためにシミュレーションで提案方式の有効性を示す。さらに、提案方式により自動運転車両が低い環境負荷で移動可能であることを確認する。

3. 関連研究と課題

3.1 経路計画

経路計画（図 5）は，車両が自ら周辺の状況を確認して，現在の位置から目的地までの道路網の交通量情報を基に，最適な経路を作成することである．ここで，最適な経路とは，衝突を避けることではなく，運転の快適性や環境負荷の低さなど複数の指標に適合する経路である．

経路計画を作成するために，様々な経路計画アルゴリズムが検討されている．大別すると，確定的な経路探索方法と確率的な経路探索方法がある．

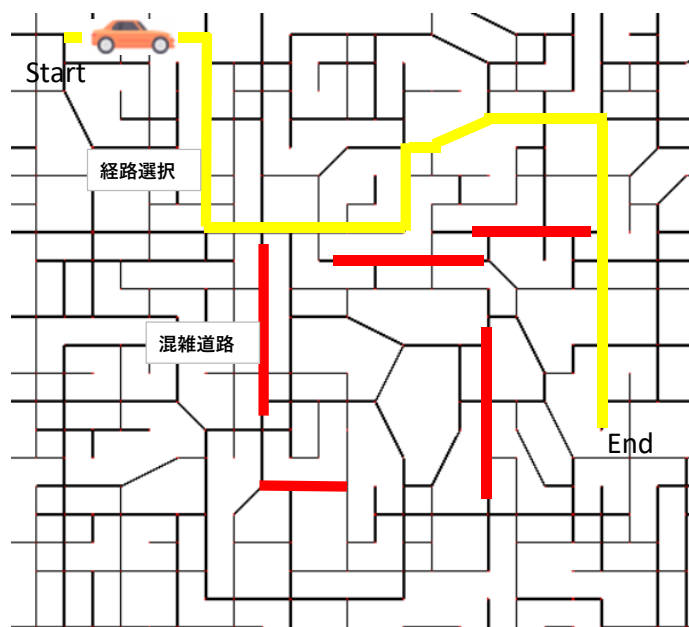


図 5 道路状況に応じて経路計画

3.1.1 確定的な経路探索方法

確定的な経路探索方法は，グラフ理論を利用して，道路網の交差点と道路はそれぞれグラフ理論の頂点（Node）と辺（Edge）で表す（図 6）．その中でグラフ理論のアルゴリズムを利用して，経路探索を実施する手法である．代表的なアルゴリズムは Dijkstra 法[17]，K 番目最短経路[18]，A*[19]である．

Dijkstra 法は，簡単に説明すると，車両が出発地から徐々に探索するノードを拡大させていきながら，各ノードにおける最小コストを更新している．目的地に到着するとき最小コストを実現する経路を選択する．例えば，隣接行列でノード {a,b,c,d,e,f,g,h,i} の相互距離を探ることが可能である（表 2）．ただし，Dijkstra 法は実際のナビゲーションシステムに簡単に応用できない．その原因の 1 つと

して、車両は完全な自律移動が困難な場合がある。例えば、交差点で車両が右折する際は対向車両との事故が発生しやすいため、その制限条件を考慮すると、最短経路では安全性を保証できない可能性がある。

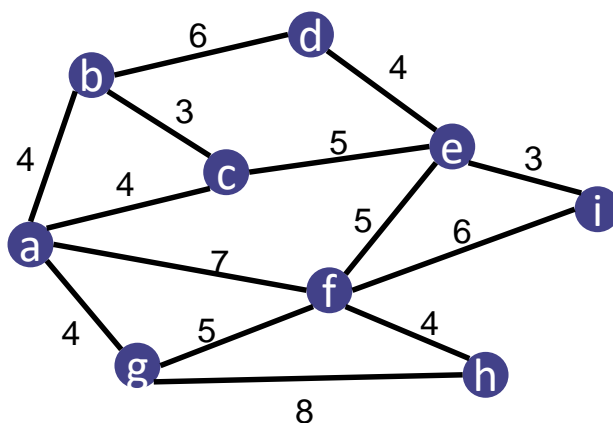


図 6 道路網をグラフで表す

表 2 隣接行列で最短経路を計算する

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	0	4	4	-	-	7	4	-	-
b	4	0	3	6	-	-	-	-	-
c	4	3	0	-	5	-	-	-	-
d	-	6	6	0	4	-	-	-	-
e	-	-	-	4	0	5	-	-	3
f	7	-	-	-	5	0	5	4	6
g	4	-	-	-	-	5	0	8	-
h	-	-	-	-	-	4	8	0	-
i	-	-	-	-	3	6	-	-	0

また、すべての車両が最短経路を選択する場合、最優の道路は逆に混雑となる可能性が高まる。これを踏まえて、交通量を分流して、一部の車両が K 番目最短経路に従う。これは K 番目最短経路探索アルゴリズムと呼ばれる。

A*は、Dijkstra 法の経路探索方法を改良したアルゴリズムである。式 $f(n) = g(n) + h(n)$ の関数の最小値を探索する。 $f(n)$ はある出発地から目的地までの距離であり、全経路の長さを表す。 $g(n)$ はすでに通過した経路の長さであり、出発地から現在地までの距離を表す。 $h(n)$ は現在地から目的地までの経路の予測値を表す。2次元の道路網はグラフに転換すると、A*は出発地と目的地間のノードのみ探索されており、Dijkstra 法より効率的な探索をすることができる。

3.1.2 確率的な経路探索方法

確率的な経路探索方法は、確率論を利用して、各道路に通過時間がある確率分布に従うことを仮定すると、ランダムサンプリング (Radon Sampling) を行って、経路を抽出する。代表的な方法として、シミュレーション法、ランダムウォーク (Random Walk) などがある。

シミュレーション法は、モンテカルロ法 (Monte Carlo method) [20]によって、確率的に経路を抽出し、経路選択する方法である。道路網の中に、各道路の移動コストが独立な確率分布に従うと仮定して、最小コストとなる経路の抽出を繰り返す方法である。ここで、確率分布の種類、分布のパラメータ、抽出回数は事前に決定する。一般的に、確率分布は正規分布と仮定する。

ランダムウォーク[21]は、車両が出発地から目的地までの各交差点に乱数発生により確率的に道路を選択する。経路は、迂回度を用いた重みによって抽出される。

3.2 車線数変更

道路上で渋滞が発生する際、常に両方向に渋滞が発生するとは限らない。例えば、朝のラッシュアワー時や連休終了時、道路の上り方向は一時的に混雑が発生するが、下り方向は交通量が少ない。車線数の動的変更では、混雑していない方向の車線を減らし、混雑している方向の車線数を増やして混雑を緩和する (図7)。

道路センサで道路の両方向の交通量をそれぞれ計測して、交通量の時間帯変化を基に、車線数変更が行われる。図7は車線数変更の効果を示したが、これだけでは渋滞を完全に解消しきれない場合もある。

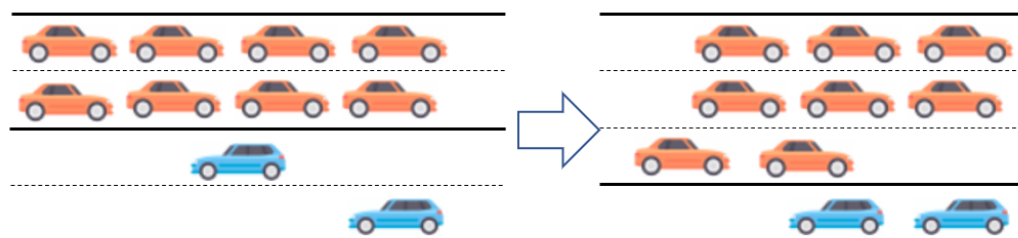


図7 車線数変更の様子

3.2.1 車線数変更に対する関連研究

車線数変更の関連研究について、[3]は、変更の条件は： $demand(r) \geq 1.5 \times demand(r')$ と提案した。 r は道路内の交通量であり、 r' は道路対面の交通量である。道路両方向の交通量の比が1.5を超えた場合は、車線数変更を行い、交通量の非対称性を解消する。ただし、この方式では図8のように簡単な4つの交差点がある道路網で検証され、より複雑な道路網への適応については不鮮明だと考えられる。また、この方式ではドライバーの意思により経路選択への影響があると仮定することもあるので、自動運転技術の普及に伴い、人間の直感による操作ミスを低減するため、ドライバーの主観的判断を無視したほうが良いと考えられる。

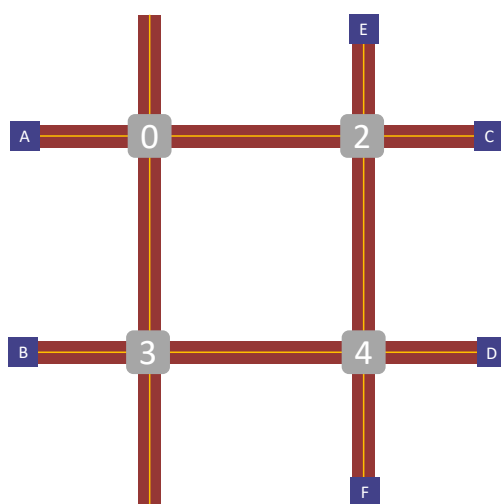


図8 4つ交差点道路網モデル

類似する方式が[5]でも見られる。各道路は小さいセルに分割されて、車線数変更はセルレベルで実施する(図9)。ただし、実際の道路網は十字交差点のほか、T字形やY字形などの交差点もあり、両方向の車線数は異なる場合もある。この論文では、複雑な道路網での有効性は検証されておらず、実際の道路網への応用効果は不明である。

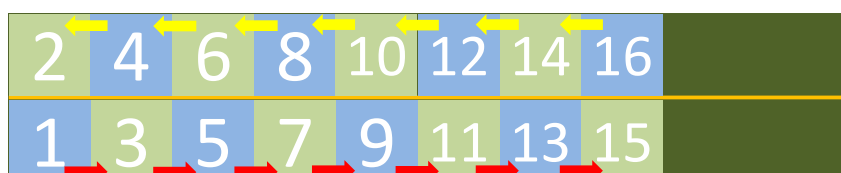


図9 道路をセルに分ける

[6]は交差点における車両の衝突に注目している。テロが発生した場合を仮定して、車で人々をテロ現場から付近に位置する複数の避難所へ誘導するため、最速かつ安全な経路計画を目指す(図 10)。このシナリオでは、車両の出発地は唯一であり、平時での交通量の移動パターンと異なるので、都市部の道路混雑の緩和に直接利用するのは難しい。

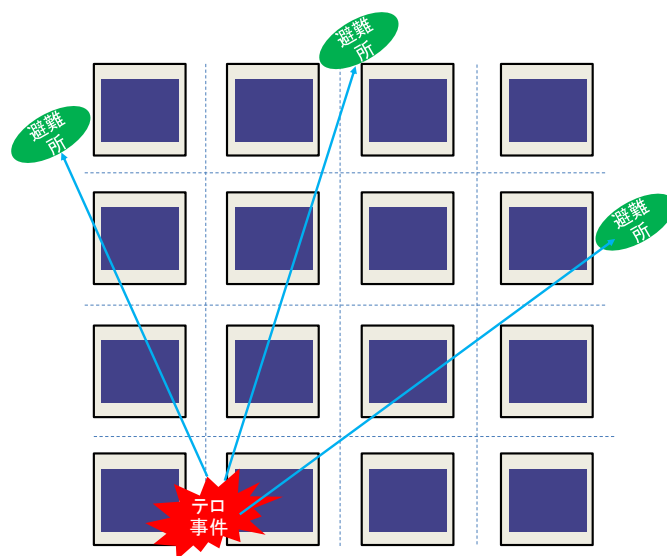


図 10 避難所への移動

[23]は現在の交通量管理方法をまとめており、[24]は十字交差点について、車両の制御を実現するためのモデル構築を詳しく説明している(図 11)。

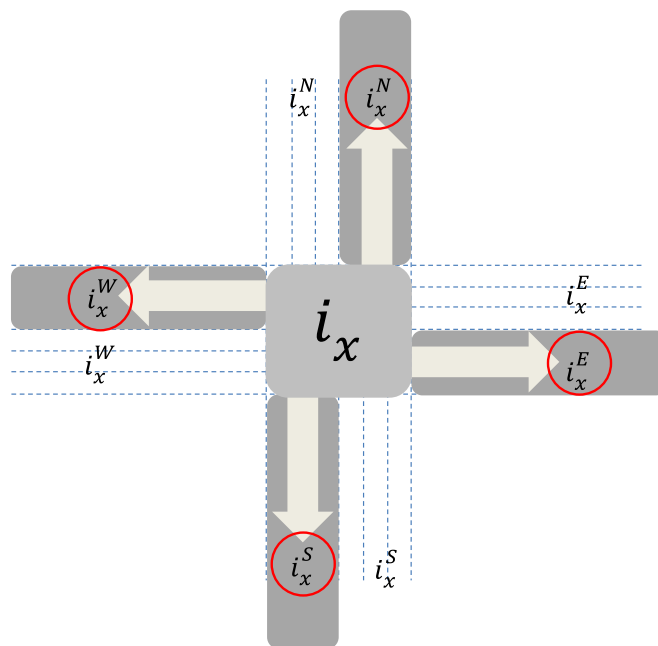


図 11 十字交差点の制御モデル

3.3 課題

本研究では、先行研究の不足を改善し、交通渋滞のさらなる緩和を図るために、車線数の動的変更と経路計画の併用を検討する。長い周期で、各道路の両方向の交通量の違いを基に、車線数の変更を行い、一時的に交通容量を増加させる。さらに、車線数変更では渋滞を完全に解消できない場合、各道路の交通量の変化に応じて経路変更を行う。提案方式の有効性を示すため、小規模かつ簡単な道路網での検証だけでなく、実際の交通量データを用いて複雑な道路状況の模擬も行う。

4. 提案方式

先の3章で述べた経路計画と車線数変更を組み合わせた方式を提案する。

4.1 組み合わせる方式

本論文は、DLR と RP という2つ方式を組み合わせる手法を検討した。

- ① 経路計画 (RP 方式)
- ② 車線数変更 (DLR 方式)

4.1.1 概要

基本的なモデルは、下記の図12で説明する。片側 k 車線 ($k \geq 2$) の道路網において、変更可能な車線数は $1 \sim k-1$ である。交差点に道路センサを設置し、道路の両方向の交通量と通過時間を計測する。また、各交差点に路側機 (RSU: Road Site Unit) を設置し、通過する車両の情報をまとめて、通過時間を予測する。

DLR と RP の周期は、長い方式と短い方式で組み合わせる。DLR は長い周期で既存道路の移動方向を変更し、一時的に混雑方向の道路容量を上げる。また、RP は短い周期で変更された道路に対して、最適な経路を計算する。RP は、3.1.1節に述べたように、A*アルゴリズムで経路計算を行う。

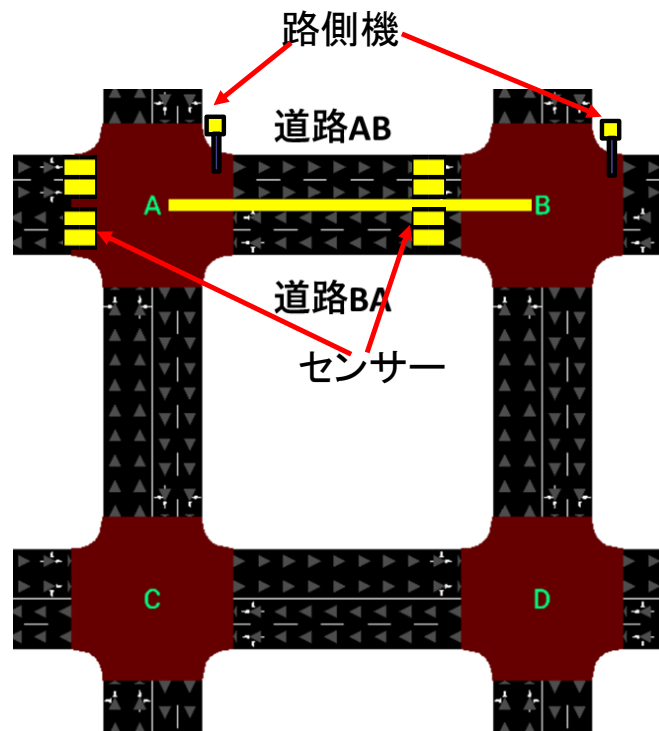


図12 車線数の動的変更における情報計測

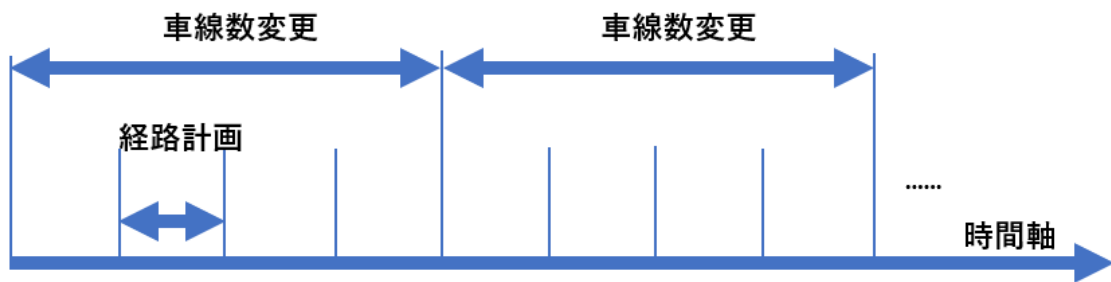


図 13 DLR と RP の周期

4.1.2 車線数変更

車線数変更の条件について、2つの閾値が考えられる。それぞれ α と β である。 α は道路において両方向の交通量の非対称度を示し、車両台数の比として計算する。また、 β は実際の車両通過時間とフリーウェイという理想的な状況における車両の通過時間との比で、時間の非対称度の意味である。

$$\alpha > \alpha_1 \quad \text{AND} \quad \beta > \beta_1 \quad (1)$$


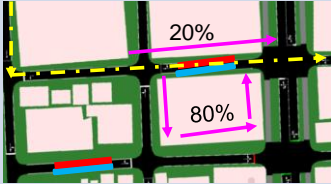

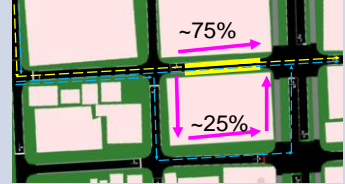
$$\alpha > \alpha_2 \quad \text{AND} \quad \beta > \beta_2 \quad (2)$$

路側機は式(1)と(2)のような条件を判定し、定期的にも実際の車線数と車線方向を決定する。式(1)を満たすときに、空いている対向車線の1本は方向を変更し、混雑方向の車両に対して利用可能にする。式(2)を満たすときに、空いている対向車線の2本は方向を変更して、混雑方向の車両に利用させる。また、各交差点にある路側機は自律的に変更車線数を判断するが、同じ道路が結ぶ両交差点の路側機の変更車線数が違う場合、路側機のIDが大きいものに従う。

4.1.3 提案方式と既存方式の比較

表 3 に提案方式と既存方式 (DLR と RP) の特性の比較をまとめる。

表 3 提案方式と既存方式の特性比較

	経路計画	車線数変更	提案方式
特徴	移動距離増 移動時間減	移動距離そのまま 移動時間減少幅小	移動距離微増 移動時間減少幅大
制御前			
制御後	<ul style="list-style-type: none"> 多数の車両が混雑道路を避けるように遠回りする 	<ul style="list-style-type: none"> 混雑度を緩和できる 車両の平均移動時間が増加する 	<ul style="list-style-type: none"> 多数の車両が車線数変更により遅延なく移動 少数の車両が遠回りする 

4.2 車線数変更のアルゴリズム

本論文は、Python 言語を用いて、交差点に設置する路側機で車線数変更を制御する。具体的なアルゴリズムは下記の図で示す。

A2 は 4 方向の交差点であり、8 つの道路とつながっている。それぞれ東入、東出、西入、西出、南入、南出、北入と北出である (図 14)。

SUMO は高いスケーラビリティを保证するために、様々な TraCI 関数を提供している。TraCI は Traffic Control Interface の略称であり、シミュレーションのためにコンソール機能を備える。4 方向の交差点のほか、実際の道路網には、T 形 (図 15)、Y 形交差点は頻繁に見られる。異なる交差点に対しても、同じ仕組みで車線数変更の適用を実現したいので、2 つの関数でそれぞれ交差点状態の表示と車線数変更を実装する。

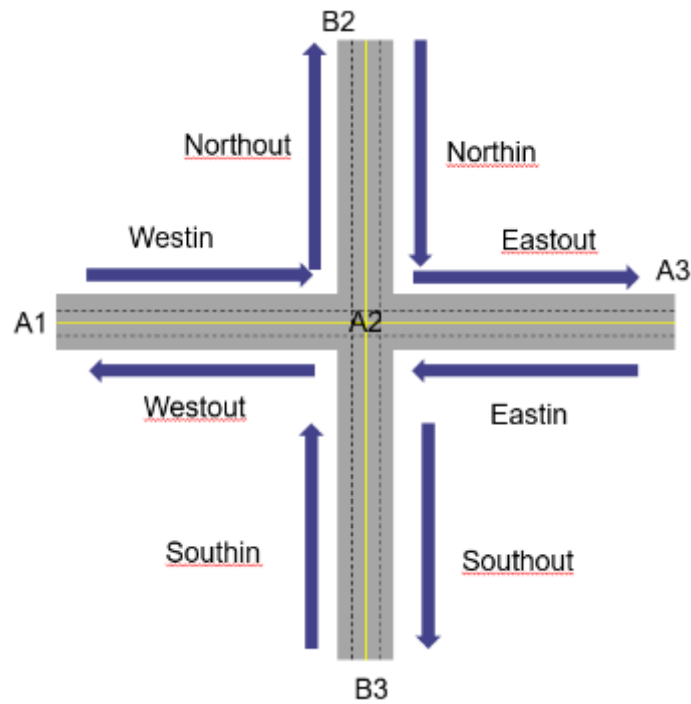


図 14 交差点で各道路の交通量表示

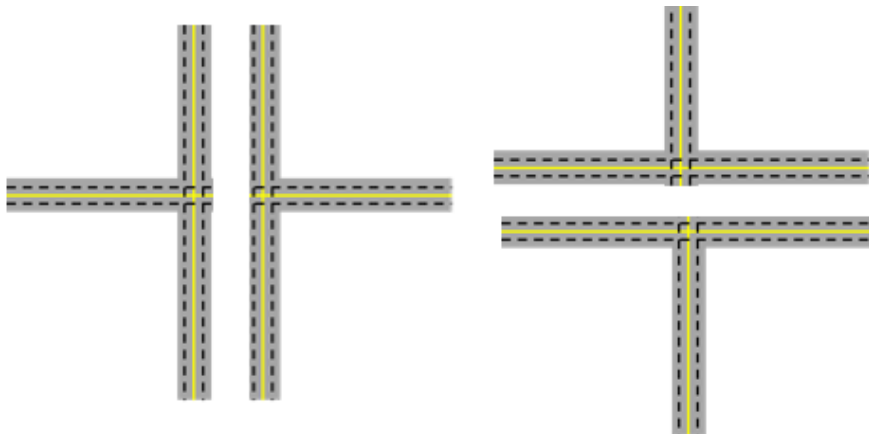


図 15 各種類の T 形交差点

交差点は 0~4 という 5 つの状態 で定義される。具体的には、状態 0 は車線数変更なし、状態 1 は東西方向道路において混雑方向を車線数増加し、空いている方向を車線数減少する。状態 2 は状態 1 の逆とする。状態 3 は南北方向道路において混雑方向を車線数増加し、空いている方向を車線数減少する。状態 4 は状態 3 の逆とする。交差点の状態変更に従って、車線数変更の方式も変更する。

また、車両の経路計画について、シミュレーションでは、全ての車両が経路計算機能付きのデバイスを搭載しているとする。デバイスのパラメータ設定により、ある周期で A*アルゴリズムを行い、最適な経路を計算することが可能となる。

4.3 最適化

車両移動の効率化に関するパラメータを検討し、さらにパラメータの最適化を行い、提案方式の有効性を示すことが必要である。また、パラメータを最適化するために、大規模な道路網及び最新の交通量を用いて検証した。日本道路交通情報センター (JARTIC) [39]は月単位で日本各都道府県の道路網の交通量を提供しており、本研究では2021年1月分の交通量データを使用している。

この交通量を基に、適切なシミュレーション区域を決定する。具体的には、皇居と東京駅を中心に、神田川と隅田川を囲む半径2~3キロメートルの区域である (図 16)。

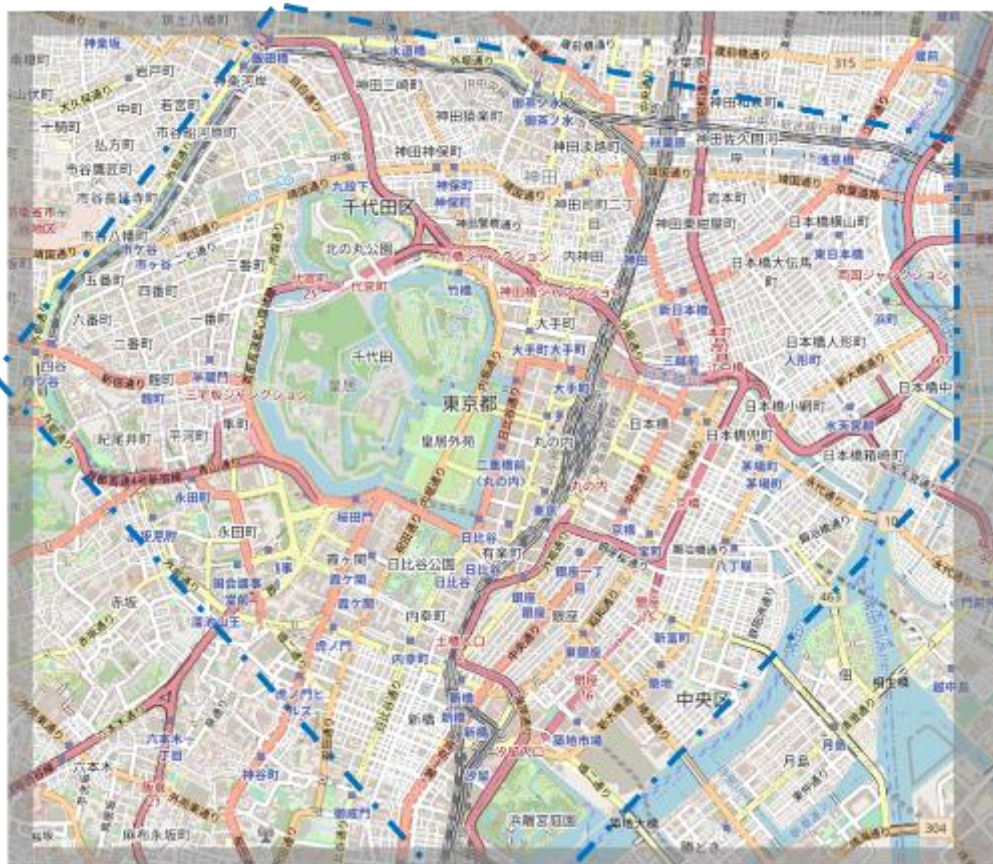


図 16 シミュレーションの区域



図 17 区域に対する OSM (Open Street Map) 地図

4.3.1 閾値の最適化分析

車線数変更により 2 つの閾値を最適化するため、実験計画法 (DOE) [40] を実施する。DOE は少ない実験回数 (シミュレーション回数) で、最適化結果に関する要因とその要因の効果を定量化する統計的実験手法である。具体的には、交通渋滞の緩和に関する因子とレベルを分析する上で、重複シミュレーションを行う。提案方式において 4 つの因子を考慮している。閾値 α, β 、信号機タイプと制御周期である。DOE における利便性を考慮し、2 段階に分ける。はじめに、RP と DLR 制御周期の比 λ の最適化を行う。以上より、最適な λ に基き、 α と β の最適化を行う。DOE は表 4 に従って実施する。

表 4 DOE 実施計画

因子	説明	記号	DOE 段階
交通量	混雑時間帯	A3	段階 1
	深夜時間帯	A2	
	ほか	A1	
RP 周期 : DLR 周期(λ)	1:2	B3	
	1:5	B2	
	1:10	B1	
重複回数		3	
信号機タイプ	固定サイクル	C1	段階 2
	動的サイクル	C2	
閾値 α	2.0	D5	
	1.8	D4	
	1.5	D3	
	1.4	D2	
	1.2	D1	
閾値 β	2.5	E7	
	2.2	E6	
	2.0	E5	
	1.8	E4	
	1.5	E3	
	1.4	E2	
	1.2	E1	

4.3.2 制御周期の最適化

経路計画 (RP) と車線数変更 (DLR) の周期設定は、3つのレベル 1:2, 1:5 と 1:10 で仮定する。また、都市部道路の自由走行速度[36]によると、DID (Densely Inhabited District 人口集中地区) は 30km/h であり、Non-DID は 45km/h である。実際の道路を考慮し、車両の平均速度は 15~20km/h と想定し、都市部の道路網の平均的な長さ (隣接交差点間の距離) を 500m と仮定して、ある車両が各道路を通過する時間を 1.5~2 分程度とする。この試算データによって、RP と DLR の周期比の最小値を 1:2 と設定する。

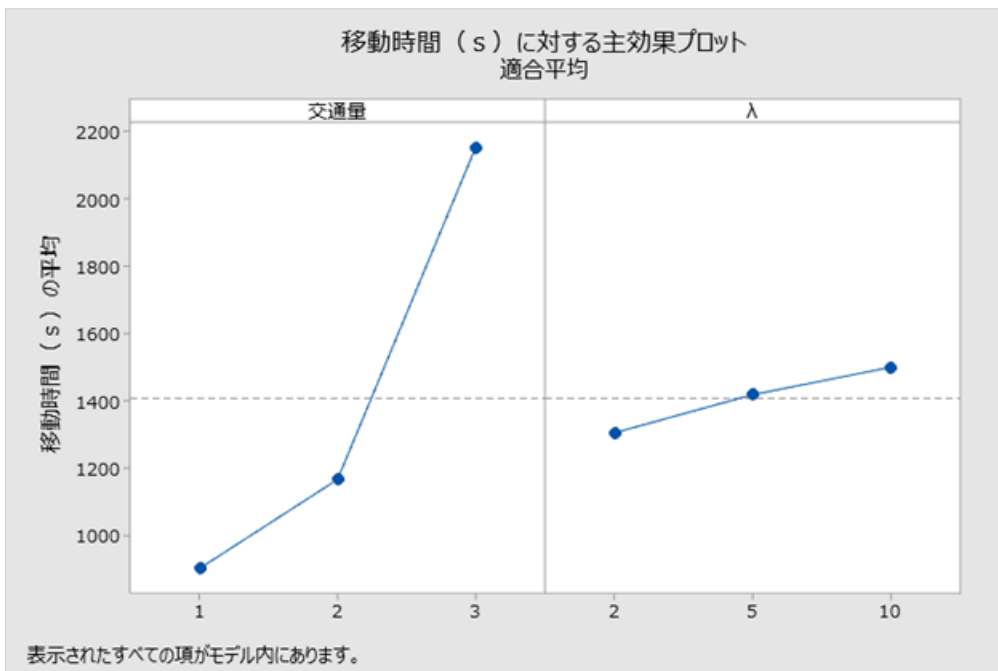


図 18 移動時間に対する主効果プロット

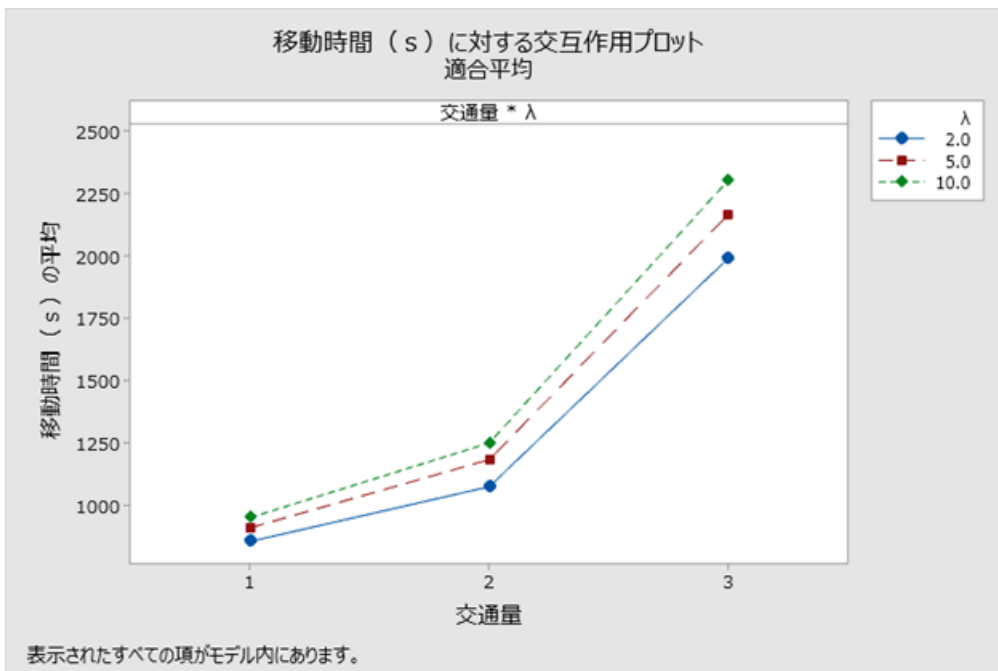


図 19 移動時間に対する交互作用プロット

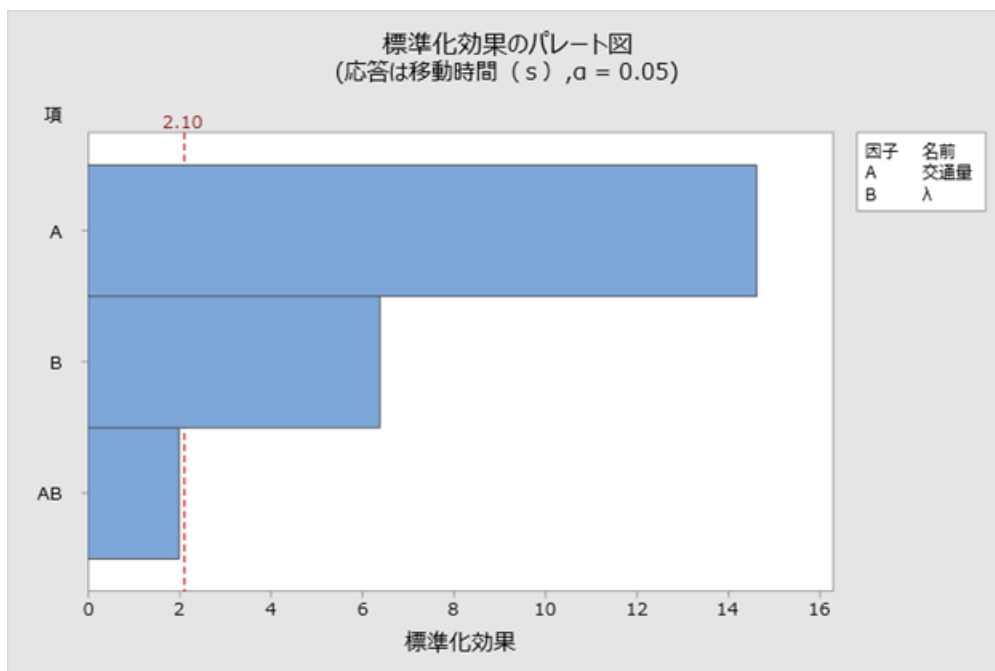


図 20 因子交通量と λ の標準化効果のパレート図

図 18, 図 19 と図 20 は DOE 段階 1 の結果を示し, それぞれ交通量と λ の主効果, 交互作用と標準化効果を表す. 図より, 車両の移動時間は交通量と正の相関性が見られる. 交通量が多くなると, 道路混雑により車両の平均時間時間が長くなる. 逆に, 交通量が少ない時は道路が空く傾向となり, 車両がスムーズに移動できるので, 移動時間が短くなる. また, 車両の移動時間は λ に対して負の相関性が見られる. λ が小さいほど, 車両の移動時間は短くなる. この結果より, λ の最適化値は 1:2 となることを確認できた.

4.3.3 閾値の最適化

閾値最適化のために, 各因子が移動時間に対して重要な役割を持つことを確認する必要がある. パレート図により, 因子の重要性を確認できた.

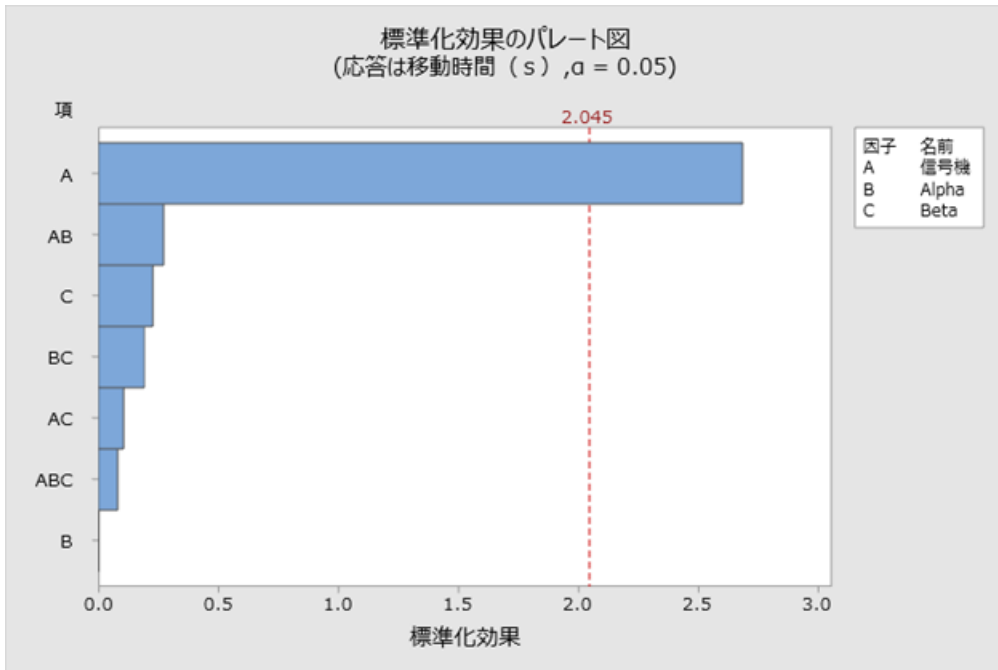


図 21 因子信号機, α と β の標準化効果のパレート図

図 21 の中に, 信号機のほか, 重要性の高い順で並べて, C (因子 β)と BC (因子 α と因子 β の交互作用)を考へる. 交互作用があるので, 両因子の最適な組合せを探ることが必要になる. そのため, まず β は[1.2,1.4,1.5,1.8,2.2,2.5]という複数のレベルでシミュレーションを実行する. 図 22 はシミュレーションの結果を示しており, 最適な β は 1.5 となることを確認できた.

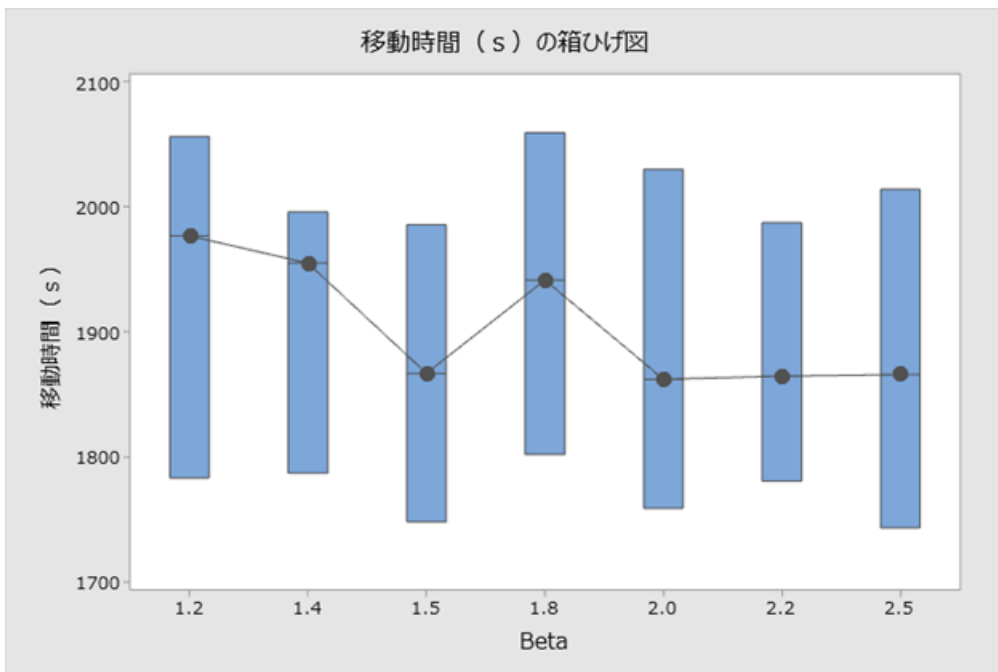


図 22 移動時間に対する因子 β の箱ひげ図

その後、 α は[1.2,1.4,1.5,1.8,2.0]という複数のレベルでシミュレーションを実行する。図 23 はシミュレーションの結果を示しており、最適な α は 1.5 となることを確認できた。

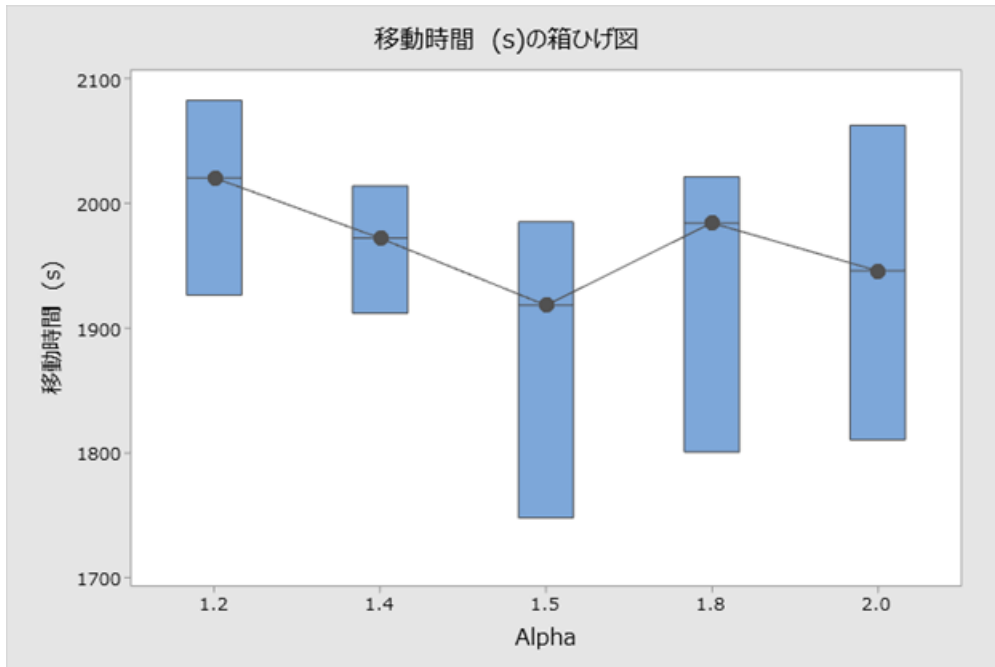


図 23 移動時間に対する因子 α の箱ひげ図

5. 提案方式の評価と考察

シミュレーションにより提案方式と既存方式の比較を行い、提案方式の有効性を評価する。

5.1 シミュレータの選択

都市部の交通状況を模擬するため、いくつかのシミュレータがある。シミュレータが模擬できる道路網の範囲及び疎密レベルにおいて、3つの種類がある。それぞれ微視的、中規模と広域シミュレーションである。また、交通事故の再現、道路網の設計、歩行者交通流の模擬など具体的なシミュレーションの目的及びプロジェクトのシナリオに応じて、最適なシミュレータを選択すべきである。下記表 5 で主要なシミュレータ及び特性をまとめている。

本研究はシミュレータを選択する際に、複数の要素を考慮している。まずは、学習の難易度と技術支援の優しさである。豊富な機能を持つシミュレータにおいて、シミュレーションシナリオを構築する際に、ガイドラインに従って、細かい部分を設定する必要がある。ガイドラインで詳細な説明が無い点に関しては、技術的なサポートが必要である。ユーザの問題に対して的確に対応できるシミュレータを優先的に選択したほうが良い。次に、ユーザの要求条件を満足する性能を持つことである。提案方式を検証するため、日本の道路網と交通量を模擬して、結果を出すことになるため、左側通行道路網に対応可能であることが重要である。

複数のシミュレータから検討した結果、本稿では、道路交通シミュレータ SUMO を利用する。SUMO[25]は Simulation of Urban Mobility の略称であり、主にドイツ航空宇宙局にある交通システム研究所の職員によって開発されている。SUMO は都市部の複雑な道路ネットワークを制御できるようにデザインされ、車両毎に道路交通流のシミュレーションを行う(図 24)。また、SUMO は GitHub とメールリストを併用して、使用者及び開発者からのフィードバックと要望を聞いて、迅速な機能更新を行う。2021 年 7 月時点で、最新版は 1.9.2 版である。さらに、SUMO は TraCI (Traffic Control Interface) 機能を提供し、使用者がシミュレーション実行中に、シミュレーションのパラメータやシナリオの中にある車両や路側機などを制御できる。また、TraCI は Python, Java 及び C++ のライブラリをサポートしており、使用者の快適な開発環境を用意している。以上の理由により、SUMO は他のシミュレータでは実現できない複数の優位性を持っているため、本論文で使用する。

表 5 各シミュレータの特性比較

シミュレーター	初め 発売年	分類		模擬規模			可視化		勉強難易度			機能利便性			拡張性
		有 料	無 料	市	地 方	国	2 D	3 D	容 易	普 通	困 難	十 分	制 限 あ り	少 な い	
VISSIM[26]	1992	√		√	√		√	√			√				内蔵 VAP 関数
AIMSUN[29]	1997	√			√	√	√	√				√			Python,C++
Paramics[28]	1997	√		√	√		√	√				√			内蔵 VA 言語,C,C++
CORSIM[27]	1998	√		√	√		√	√			√			√	C++
SUMO[31]	2001		√	√	√		√				√			√	Python,C++,Java
TransModeler[30]	2005	√			√	√	√	√			√			√	内蔵 GISDK ツール

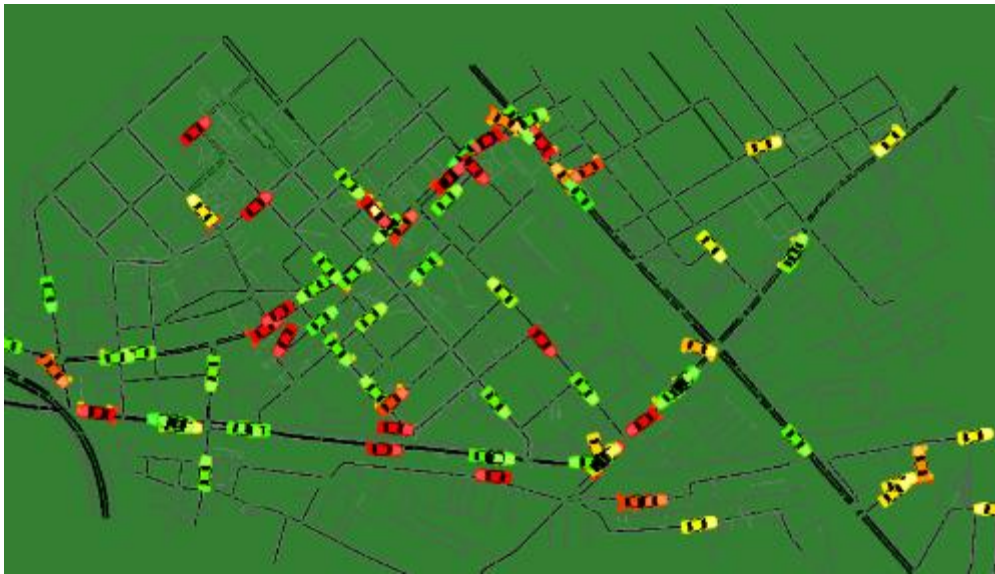


図 24 SUMO で都市部の道路網を模擬する様子

提案方式の評価は、SUMO でシミュレーションシナリオを構築し、2つの道路網の模擬により、結果を分析する。はじめに、小規模のグリッドネットワークで行い、次に大規模の OSM (Open Street Map) ネットワークである。

OSM は、実世界の地図を表現して、SUMO に導入できるフォーマットである。

5.2 評価項目

提案方式の有効性を確認するため、4つの方式で行う。それぞれ基本方式（制御なし）、経路計画（RP）、車線数変更（DLR）と提案方式である。

シミュレーション中に、各車両のガス排出量及びガソリン消費量データを取得するため、すべての車両が排出デバイスを搭載する。排出モデルは HBEFA v3[45]を使用する。

HBEFA は The Handbook Emission Factors for Road Transport の略称であり、ヨーロッパ諸国の道路で実証され、各種の車両に対して、車両のガス排出量またガソリン消費量と車両自体及び道路環境などの影響因子の関係をデータで示す。提案方式において、車両は自動運転車と想定するが、伝統的なガソリンを動力源にすると仮定する。

5.3 グリッドネットワークのシナリオ

今回使用するシナリオでは、グリッド道路網を想定している。隣接する交差点の距離は 500m である。車両移動時間、移動距離、CO₂ 排出量とガソリン消費量を指標として、基本方式（経路計画と車線数変更なし）、経路計画方式、車線数変更方式と提案方式を評価した。シミュレーションシナリオを図 25 に示す。

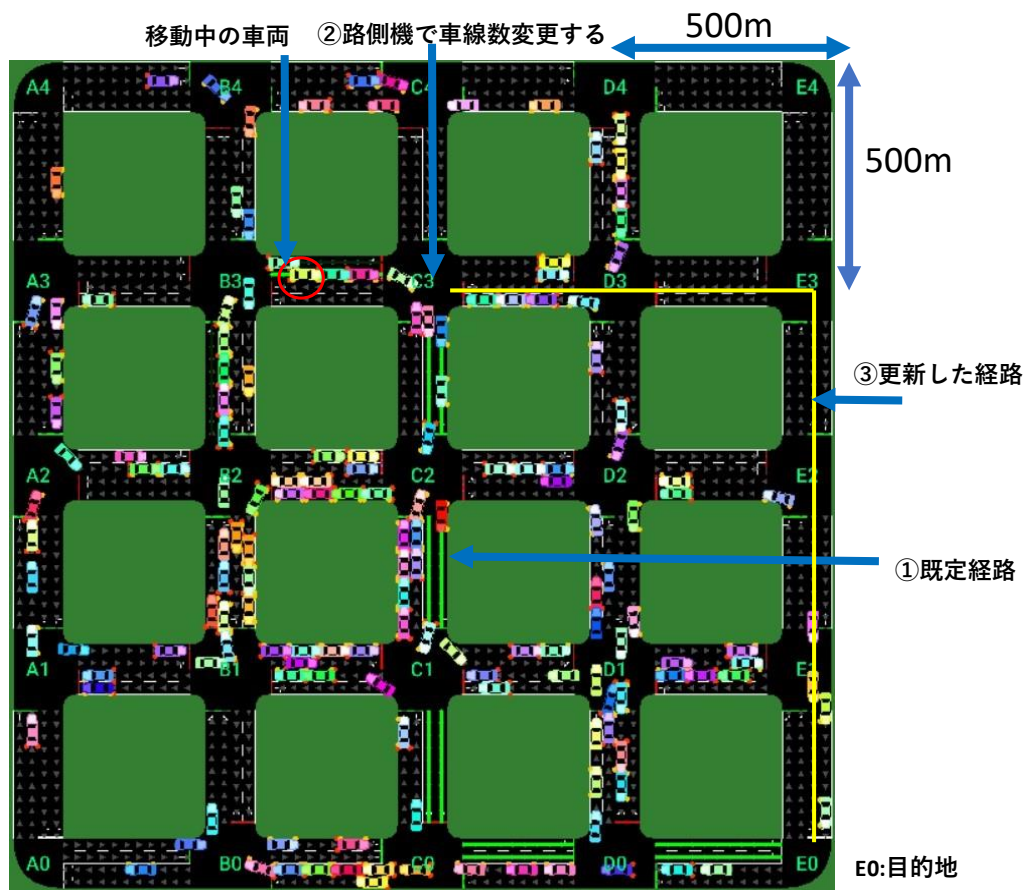


図 25 提案方式のシミュレーションエリア

5.3.1 シミュレーションパラメータ

以下の表 6 に今回使用したシミュレーションパラメータを示す。交通量測定用の道路センサは、ループ式車両検知器である。図 26 のように、各車線の道路内の地下に埋設された絶縁電線のインダクタンスループが車両の接近によって電気的な変化を検出する。

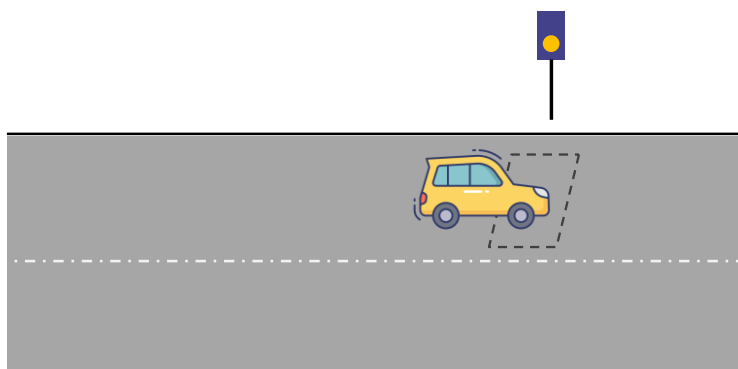


図 26 ループ式車両検知器

表 6 シミュレーション設定

項目	設定値
道路網規模	4*4
道路網タイプ	グリッド
道路長さ	500m
交通量測定	道路センサ
車両台数	6000
車両のガス排出モデル	HBEFA v3 [37]
車両の出発地・目的地	ランダム生成
信号機タイプ	自動的に交通量対応
経路計画の周期	1分/回
車線数変更の周期	2分/回
シミュレーション時間	1時間
シミュレーション回数	10回

シミュレーションには、6000台の車両とOD（出発地と目的地）をランダムに生成する。交差点に混雑を必ず発生させるために、各車両が通過する交差点は3つ以上、また、各道路の車両通過確率は不均一にする。さらに、統計的な結果を取得するため、各回の車両ODを変更して10回のシミュレーションを行う。結果は95%の信頼区間で計算する。

5.3.2 シミュレーション結果と考察

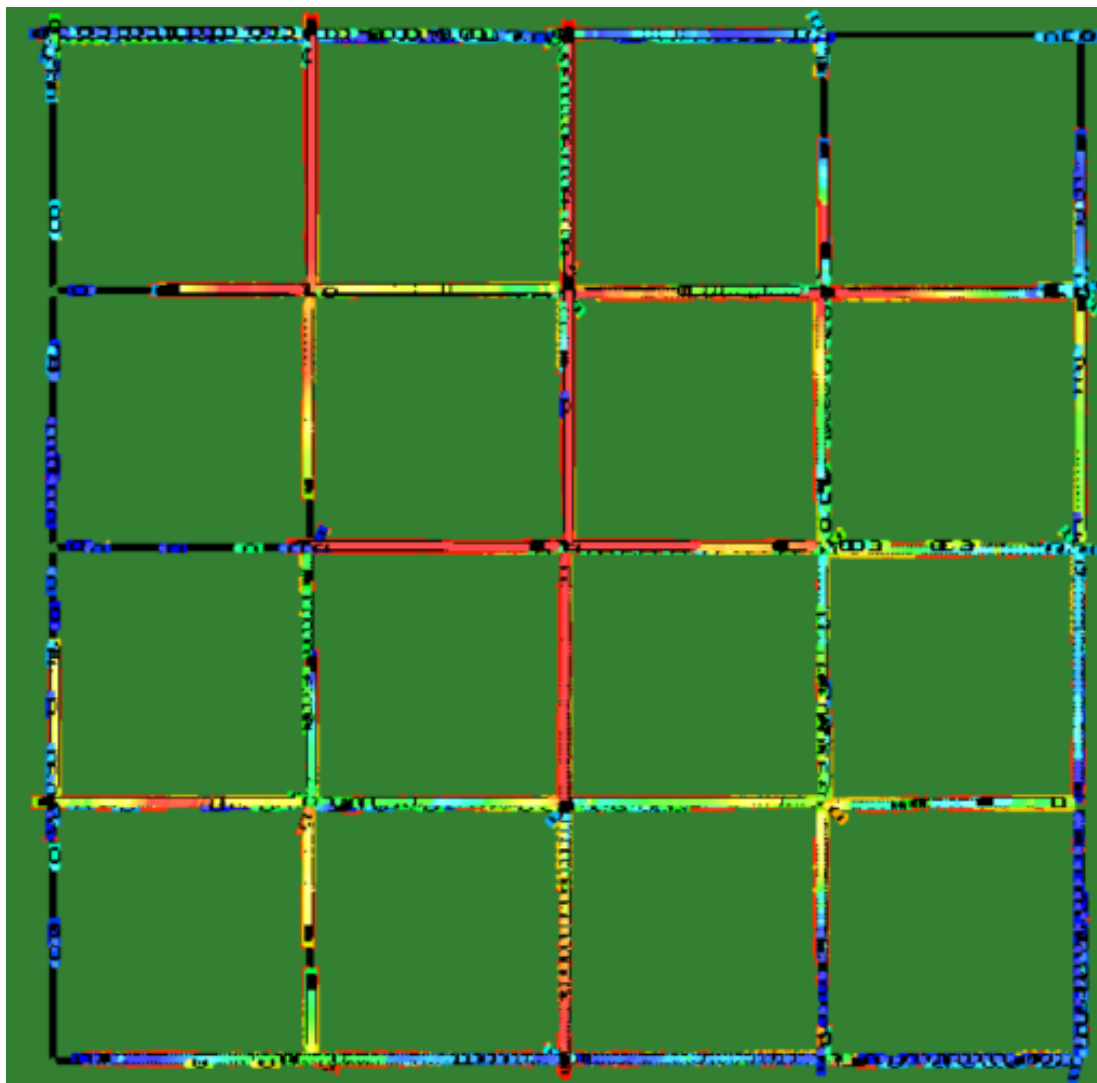


図 27 シミュレーション実行中の様子

SUMO でシミュレーションを実行し、可視化できるように色で道路の混雑状況（図 27）を表す。赤色道路は混雑であり、青色道路は空いている。また、黄色道路は普通の道路状態である。

5.3.3 移動時間と移動距離

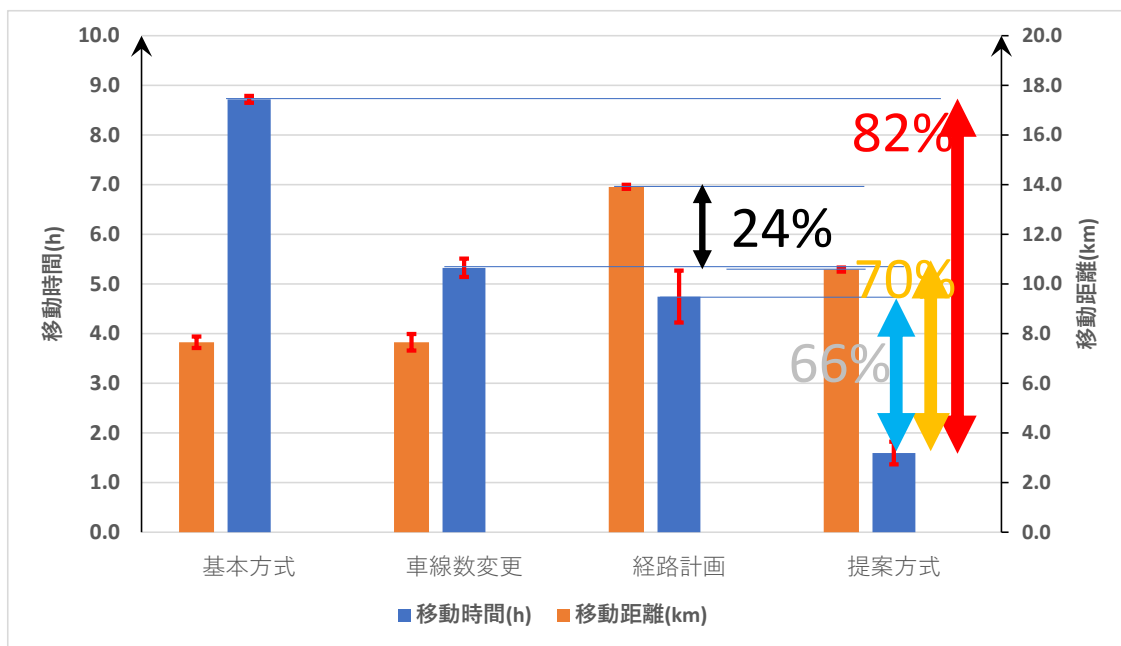


図 28 各方式の車両移動時間と移動距離

図 28 に各方式における移動時間・移動距離（と 95%信頼区間）を示す。移動時間について、提案方式では、すべての既存方式よりも優れており、車両が最も短い移動時間で目的地に到着することが確認できる。基本方式と比べて、移動距離は少し増加しているが、移動時間を 82%削減できた。

5.3.4 CO₂ の排出量とガソリン消費量

図 29 に各方式における CO₂ 排出量とガソリン消費量を示す。提案方式は、すべての既存方式よりも優れており、基本方式、車線数変更、経路計画と比べて、CO₂ 排出量をそれぞれ 80.8%、70.0%、63.6%削減し、ガソリン消費量も同程度に削減することを確認できる。その削減効果は、車が目的地までのアイドリング時間を短縮し、スムーズに交差点に通過するためである。

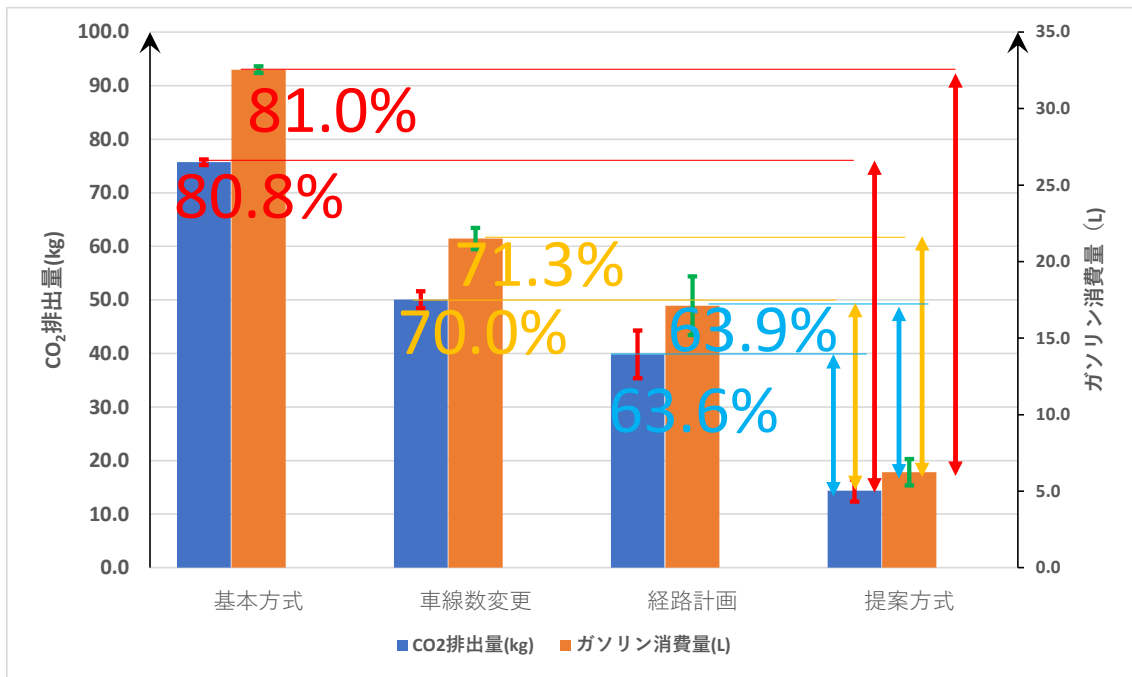


図 29 各方式の CO2 排出量とガソリン消費量

5.4 OSM シナリオ

本研究は、東京都の道路網を対象にして、交通量が多い区域を選択して、シミュレーションを行う。そのため、東京都の区市町村別昼夜間人口比率（当該地域の常住人口 100 人当たりの昼間人口の比率である。この数値が 100 を超えているときは流入超過、100 を下回っているときは流出超過を示す。）を調べた。令和 2 年 3 月時点で、東京都総務局統計部人口統計課の区市町村別昼夜間人口比率[35]により、トップ 3 は千代田区、中央区と港区である。シミュレーション区域の規模を抑えるため、本論文は東京駅、日本橋、銀座などを含めた千代田区と中央区を選択した。

表 7 東京都区別の昼夜間人口比率

地域名	2015 年	2020 年	2025 年
千代田区	1460.6	1295.7	1128.2
中央区	431.1	370.8	342.6
港区	386.7	365.2	335.4
新宿区	232.5	225.7	224.1
文京区	157.5	152.3	149.2
台東区	153.4	149.6	146.5
墨田区	108.9	107	106.5
江東区	122.2	122.1	121

図 30 と図 31 はそれぞれ選択した区域の Google Map と OSM 地図である。



図 30 選択した区域の Google Map



図 31 選択した区域の OSM 地図

5.4.1 シミュレーションパラメータ

以下の表 8 に今回使用したシミュレーションパラメータを示す。シミュレーションは UTD 19 の交通量データベースを使用する。UTD 19 データベースは、2017 年 7 月の東京都において、実際の交通量を提供する。次に、交通量データに基づき、シナリオ構築の流れを説明する（図 32）。

表 8 シミュレーションの設定

項目	設定値
道路網規模	図 30, 31
道路網タイプ	OSM
車線数	片側 2~5 車線
交通量測定	道路センサ
車両台数	15000~30000
車両のガス排出モデル	HEBFa v3[37]
車両の出発地・目的地	実際の交通量により決める
交通量データベース	UTD 19[38]
経路計画の周期	1 分
車線数変更の周期	2 分
シミュレーション時間	24 時間

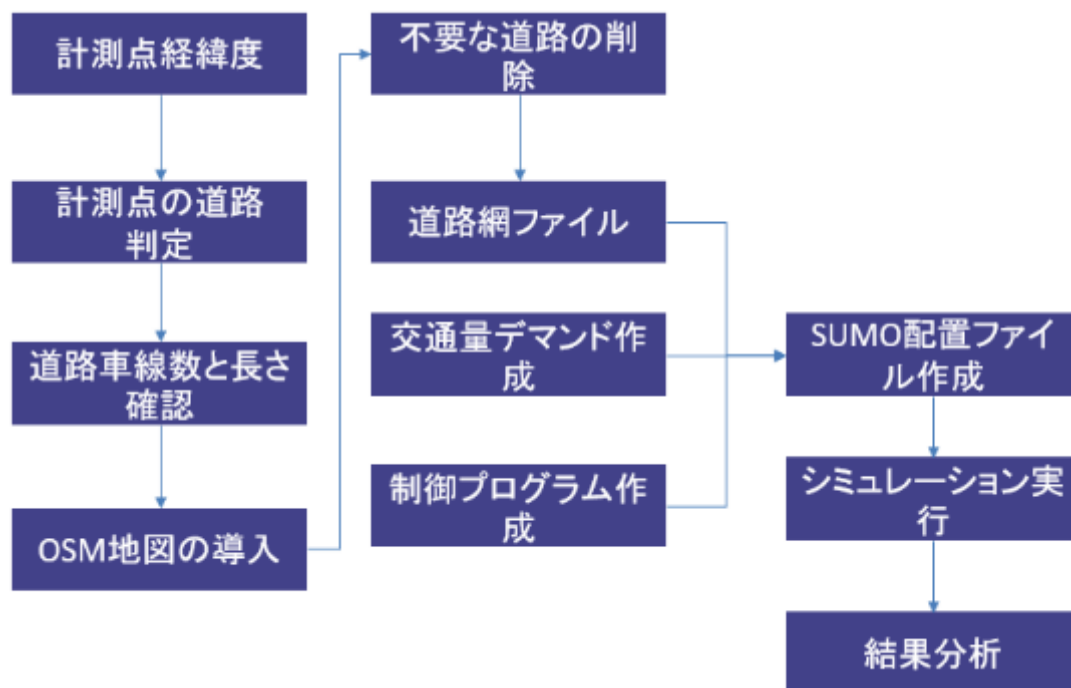


図 32 実際の交通量を用いたシミュレーションの流れ

- 1) まずは、交通量を計測する計測点の経緯度情報をもとに、計測点に対する道路の名称を確認する。Google Map の API を経由して、春日通りのような結果が取得できる。
- 2) 次は、Google Earth で各道路の車線数及び長さを確認し、OSM 地図を修正する。
- 3) ほかの道路は不要になるので、削除して (図 33)、SUMO に導入する道路網ファイルを作成する。
- 4) 交通量データは 5 分間隔であるが、車両台数を抑えるため、20 分間隔に変換して、模擬する交通量を 1 万台程度にする。

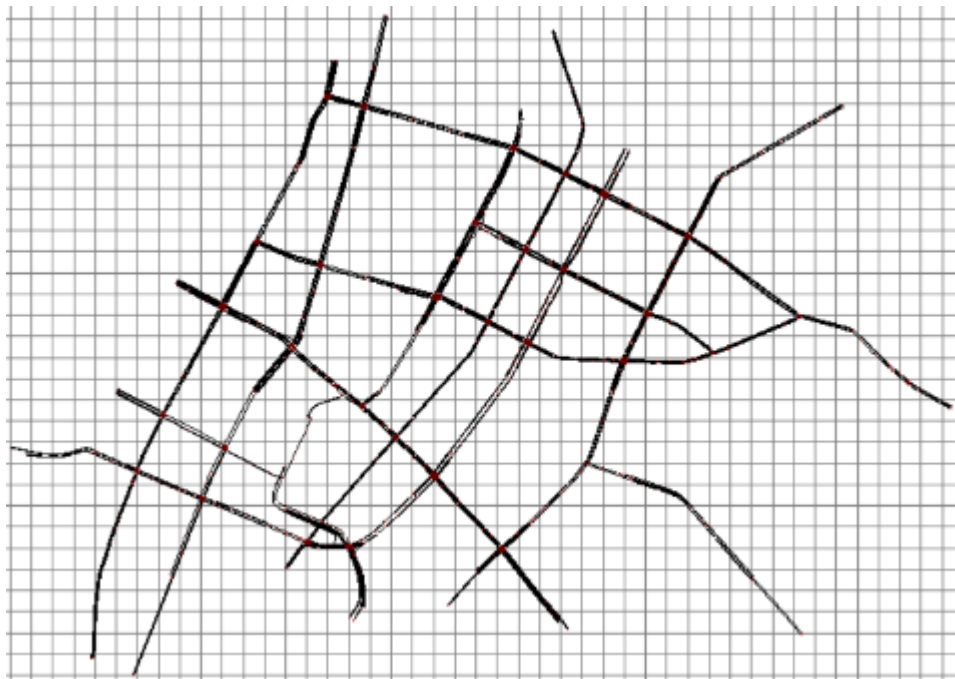


図 33 不要な道路を削除した後

5.4.2 シミュレーション結果

図 34 に、移動時間の結果を示す。基本方式は緑、車線数変更方式はオレンジ、経路計画は青、提案方式は赤で示す。各日の車両台数は黒で示す。シミュレーション結果より、提案方式は、すべての既存方式より優位性を示している。

基本方式、車線数変更、経路計画と比べて、提案方式では、それぞれ平均 84.4%、74.6%、81.1%削減した。また、平日に対してお盆期間では、東京都内の交通量が減少することにより、提案方式ではさらに移動時間の削減効果が高いことを確認した。

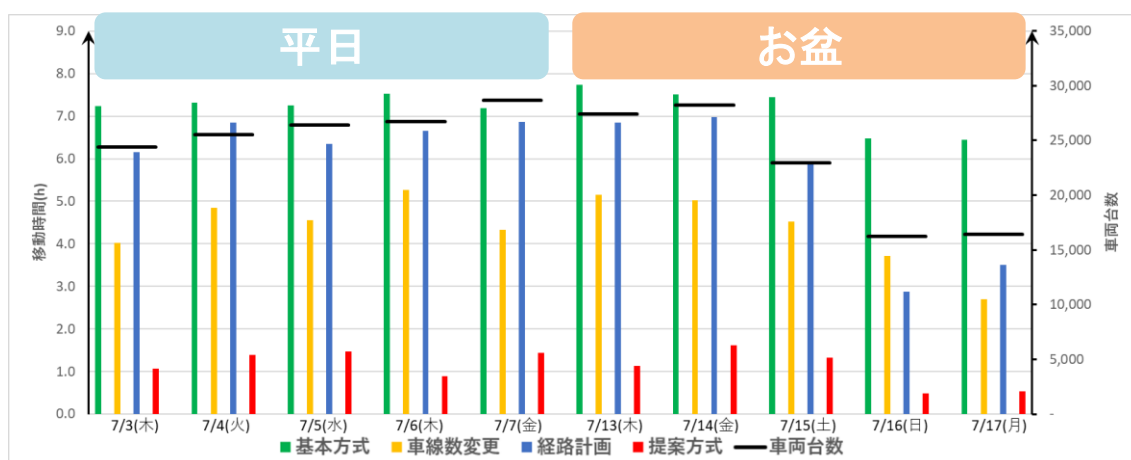


図 34 平日と連休で各方式の車両移動時間

次に、時間帯による移動時間の変化を説明する。0時から24時までの、2時間単位で各方式による車両の平均移動時間を比べると、提案方式では移動時間を大幅に削減できることを確認した。また、交通渋滞緩和により、移動時間の削減だけでなく、車両の平均CO₂排出量も大幅に削減できた。

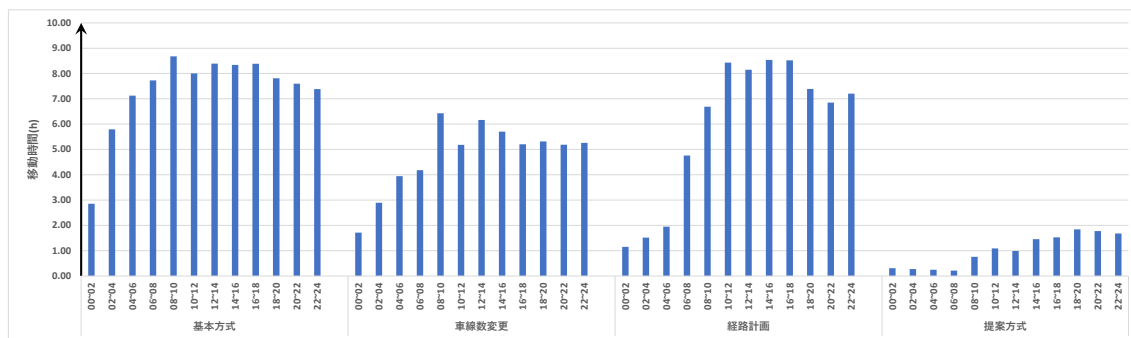


図 35 一日中の各方式の比較 (移動時間)

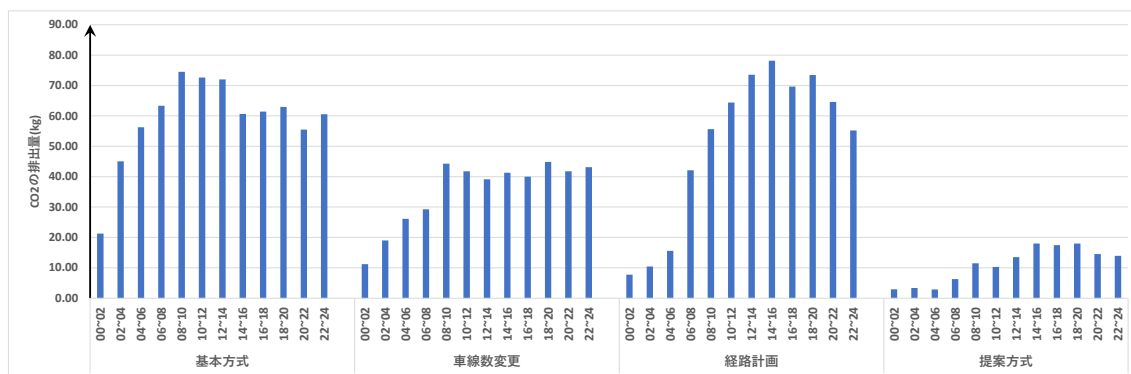


図 36 一日中の各方式の比較 (CO₂排出量)

5.4.3 提案方式の考察

提案方式は、DLR方式（車線数変更）とRP方式（経路計画）を組み合わせる手法である。提案方式の有効性を示すため、シミュレータSUMOを用いて、ランダムな交通量における小規模のグリッド道路網でシミュレーションを行った。また、実際の交通量における大規模なOSM道路網でのシミュレーションも行った。両道路網の結果により提案方式は大幅に車両の移動時間を削減でき、CO₂の排出量及びガソリン消費量も削減できた。提案手法により、渋滞緩和を行うことで都市部の温暖化問題の一助となることが可能である。

6. 結論

都市部の道路混雑を緩和するために、既存方式である車線数変更 (DLR) と経路計画 (RP) がそれぞれ提案されていたが、その効果は限定的である。道路混雑のさらなる低減を図るために、本論文では二つの方式を組み合わせる手法を提案した。提案方式では、長い周期で DLR を実施し混雑方向の道路容量を一時的に向上すると共に、短い周期で RP を実施し、道路の容量変化に応じて各車両の最適な経路を計算する。

提案方式において、渋滞の低減効果に関するパラメータを検討し、実験計画法を用いて2つの段階でシミュレーションを行って、最適な閾値を確認できた。さらに、提案方式の有効性を示すため、小規模のグリッド道路網及び大規模道路網と実際の交通量を用いて、シミュレーション評価を行った。その結果、提案方式では、車両の平均移動時間について、基本方式、車線数変更、経路計画と比べて、それぞれ82%、70%と66%削減できることが分かった。車両移動時間の削減とともに、CO₂の排出量はそれぞれ80.8%、70.0%と63.6%削減できることが分かった。ガソリン消費量も同程度に削減することを確認できた。これらの結果によって、提案方式は車両の環境負荷の低い移動が実現することを示した。

今後、シミュレーションのみならず、実際の都市部交通シナリオに応用するために、下記の課題を検討する。

- 1) 車線数変更による安全性への影響
- 2) 交通状況に応じた信号機同士の連携制御
- 3) 車両の移動軌跡情報を用いた交差点での衝突回避
- 4) 車線数変更・経路計画に必要な車車間通信の模擬と評価 (通信遅延, パケットロスなどの影響)

謝辞

本論文の研究を遂行するにあたり、大変多くの方からご協力、ご支援をいただき、ここに深く感謝の意を表します。

指導教員として、電気通信大学の博士前期課程の2年間を通じ、研究並びに修士論文執筆をはじめ、さまざまなご指導をいただきました電気通信大学 大学院情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻の湯素華准教授には、深く感謝申し上げます。

また、同専攻の策力木格准教授には、客観的な視点からご助言をいただきましたこと、深く感謝申し上げます。

研究室での生活で苦楽を共にし、充実した時間を共有することができた湯研究室の学生の皆様にも深く感謝いたします。

最後に、学生生活を送るにあたり、精神的・経済的に支えてくださった家族に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 日本総務省 令和 2 年版 情報通信白書
第一部第一節 「我が国が抱える課題と課題解決手段としての ICT」 “都市部への人口集中”
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd121120.html>
- [2] ITS 構想 ロードマップ 2020 総務省, ページ 33, 自動運転システムの市場化・サービス実現のシナリオ
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20200715/2020_roadmap.pdf
- [3] 国土交通省 ITS 全体構想 第 5 章 ITS 開発・展開計画
<https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/5Ministries/5.html#5-1>
- [4] Matthew Hausknecht, Tsz-Chiu Au, and Peter Stone, “Autonomous intersection management: Multi-intersection optimization,” in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4581-4586, 2011.
- [5] Melissa Duell, Michael W. Levin, Stephen D. Boyles, and S. Travis Waller, “System optimal dynamic lane reversal for autonomous vehicles,” 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 1825-1830, 2015.
- [6] Xing Zhao, Zhao-yan Feng, Yan Li, and Antoine Bernard, “Evacuation network optimization model with lane-based reversal and routing,” Mathematical Problems in Engineering, vol 2016, Article ID 1273508, 2016.
- [7] 国土交通省 ETC の利用状況
<https://www.mlit.go.jp/road/yuryo/etc/riyou/index.html>
- [8] SAE International, “Automated Driving Levels of Driving Automation are Defined in New SAE International Standard J3016”, 2015
- [9] SMART 64, “SMART 64 Definition of Necessary Vehicle and Infrastructure Systems for Automated Driving.”, 2015
- [10] T.B.Sheridan, Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control. MIT Press, 1992.
- [11] T.Inagaki, et al, “Trust, self-confidence and authority in human-machine systems,” Proc. IFAC HMS, 1998.
- [12] 平成 29 年度 首都圏白書国土交通省 (MLIT 2018 年 6 月)
- [13] 地球温暖化問題 https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p01.html
- [14] 国土交通省 運輸部門における二酸化炭素排出量 令和 3 年 4 月時点
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- [15] 環境省 温室効果ガス排出・吸収量等の算定と報告
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/>

- [16] 断面交通量,公益財団法人 日本道路交通情報センター (JARTIC)
<https://www.jartic.or.jp/service/opendata/#typeB>
- [17] Edsger W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische mathematik*, vol.1, pp.269-271, 1959.
- [18] Hershberger, J., Maxel, M., and Suri, S., “Finding the k Shortest Simple Paths: A New Algorithm and Its Implementation”, *ACM Transactions on Algorithms*, Vol. 3, No. 4, Article 45, pp.1-19, 2007.
- [19] Wei Zeng and Richard L. Church, “Finding shortest paths on real road networks: The case for A*,” *International journal of geographical information science*, vol. 23, no. 4, pp. 531-543, 2009.
- [20] モンテカルロ法 Wikipedia
<https://ja.wikipedia.org/wiki/モンテカルロ法>
- [21] ランダム・ウォーク理論 <https://ja.wikipedia.org/wiki/ランダム・ウォーク理論>
- [22] Hannah Bast, Daneil Delling, Andrew Goldberg, Matthias Müller-Hannemann, Thomas Pajor, Peter Sanders, Dorothea Wagner, and Renato F. Werneck, “Route planning in transportation networks,” In: L. Klieman, P. Sanders (eds), *Algorithm Engineering*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 9220, pp. 19-80, 2016.
- [23] Mohamed Younis, Sookyoung Lee, Wassila Lalouani, Dayuan Tan, and Sanket Gupte, “Dynamic Road Management in the Era of CAV,” in Book “Connected and autonomous vehicles in smart cities,” CRC Press, pp.133-172, 2020.
- [24] Lee Sookyoung, Younis Mohamed, Murali Aiswarya, and Lee Meejeong, “Dynamic local vehicular flow optimization using real-time traffic conditions at multiple road intersections,” *IEEE Access*, vol. 7, 28137-28157, 2019.
- [25] Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and Evamarie Wiessner, “Microscopic Traffic Simulation using SUMO,” *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2575-2582, 2018.
- [26] VISSIM <https://www.ptvgroup.com/ja/ソリューション製品/ptv-vissim/>
- [27] TSIS-CORSIM <https://mctrans.ce.ufl.edu/mct/index.php/tsis-corsim/>
- [28] Paramics <https://www.paramics.co.uk/en/>
- [29] AIMSUN <https://www.aimsun.com/>
- [30] TransModeler <https://www.caliper.com/transmodeler/default.htm>
- [31] SUMO <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>
- [32] Trafficware <https://www.trafficware.com/>

- [33] Cube Dynasim
<https://www.bentley.com/ja/products/product-line/mobility-simulation-and-analytics/cube-dynasim>
- [34] Anylogic <https://www.anylogic.jp/>
- [35] 東京都昼間人口の予測 令和2年3月時点,
<https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/tyosoku/ty-data.htm>
- [36] 自由旅行速度の設定 国土交通省道路局企画課道路経済調査室
<https://www.mlit.go.jp/common/000118573.pdf>
- [37] ガス排出モデル HBEFA v3 <https://www.hbefa.net/e/index.html>
- [38] 交通量データベース UTD 19
<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/437802>.
- [39] 交通量データベース JARTIC (日本道路交通情報センター)
<https://www.jartic.or.jp/service/opendata/#typeB>
- [40] Mathews, Paul G. Design of Experiments with MINITAB. Vol. 446. Milwaukee, WI, USA, ASQ Quality Press, 2005.

本研究に関する学会発表

以下に、学会発表における論文を掲載する。発表を行った学会、題目、および掲載ページなどは以下に示すとおりである。

- Zuoting Zhang and Suhua Tang, “Enhancing Urban Road Network by Combining Route Planning and Dynamic Lane Reversal,” accepted by IEEE ICMU2021.
- 張 作庭, 湯 素華: 車線数の動的変更と経路計画の組み合わせによる渋滞緩和方式の提案・評価, 情報処理学会第 83 回全国大会, 5T-1, 3-85 (2021.3)
(学生奨励賞)