

ダイナミックマップの時空間グリッド予約を利用した 自動バレー駐車制御方式の提案

山本 浩太郎¹ 藤 睿¹ 佐藤 健哉¹

概要: 近年、自動運転技術により搭乗者の乗降場所から駐車場内の駐車スペースに車両を自動で駐車し、また、必要なときに駐車スペースから乗降場所まで自動で車両を呼び出すことができる自動バレー駐車 (AVP) システムの研究・開発が行われている。複数の車両が駐車場内を効率よく移動する際には、各車両間で走行を調停する必要がある。Way Point (WP) と呼ばれるノードの通過時刻を車両に指示することで走行を制御する WP 時間制御型方式が提案されているが、車両が WP 以外の地点を占有する時間が明確に分からないことで、非効率的な AVP となる場合がある。本研究では、協調型自動運転システムに向けた情報通信プラットフォームであるダイナミックマップにおいて時空間グリッド予約の仕組みを利用することで、車両が占有する時間と場所を明確化し、効率的に自動バレー駐車が可能となる走行制御方式を提案する。駐車をリクエストした車両が駐車スペースに移動するまでに駐車中の全ての車両が出庫をリクエストするシナリオにおいて、車両が駐車のリクエストを開始してから駐車が完了するまでの時間を評価し、WP 時間制御型の方式と比較して提案方式では効率的な AVP が可能であることを示した。

A Proposal of Automated Valet Parking Control Method Using Time-Space Grid Reservation Based on Dynamic Map

1. はじめに

近年、自動バレー駐車 (以下、AVP という) システムの研究・開発が行われている。AVP システムとは、搭乗者の鍵を預かり駐車場側が人手を使って駐車や出庫を行うサービスを、自動運転の技術を使って無人で実現するものである。AVP システムでは、自動運転技術により搭乗者の乗降場所から駐車場内の駐車スペースに車両を自動で駐車し、また、必要なときに駐車スペースから乗降場所まで自動で車両を呼び出すことができることが想定されている。複数の車両が駐車場内を効率よく移動する際には、各車両間で走行を調停する必要がある。車両の走行調停については、車両側のセンシングや制御機能に依存する方式、車両のセンシング機能に頼らず駐車場に備えるカメラなどを使って車両を遠隔操作するようなインフラに依存する方式、両者の中間をとって機能分担する方式が考えられている [1]。

また、車両の走行調停手法として時空間グリッド予約システムがある。時間と道路上の空間をグリッドに分割し、ダイナミックマップと呼ばれる車両情報や道路情報を情報

の更新頻度によって階層化してシステム上で管理し、各車両が事前に特定の時刻に通過予定の地点を予約し、予約情報に基づいた走行調停・走行を行うものである。先行研究ではこの基礎となるシステムを単一交差点を想定して構築し、旅行時間や計算量において考察が行われ、他の走行調停手法に比べて有用である可能性を示した [2]。

本研究では、時空間グリッド予約システムを利用することで、効率的に AVP が可能となる走行制御方式を提案する。

2. 関連研究

2.1 WP 時間制御型の AVP

AVP の走行制御方式として WP (Way Point) 時間制御型の方式が提案されている。この方式は、WP と呼ばれるノードの通過時刻を車両に指示する方式で、時間指定通りに車両が移動できれば計画的な運行が管理しやすい [3][4]。しかし、WP 以外の地点の通過時刻を車両に指示しないため、車両が占有する場所と時間が明確に分からない。車両が占有する場所と時間が明確に分からなければ、出庫する車両やその周辺の車両の運行計画が複雑になり、非効的な

¹ 同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

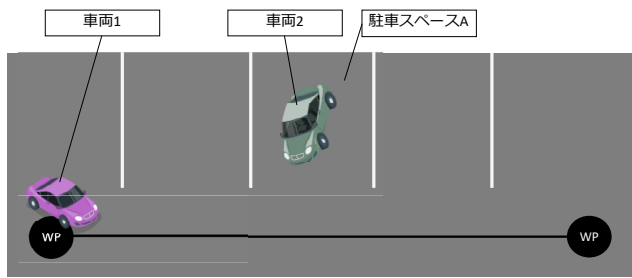


図 1 非効率的な AVP となる例

AVP となる。

非効率的な AVP となる例を図 1 に示す。駐車スペース A の前を横切るように WP を与えられた車両 1 が存在し、駐車スペース A から車両 2 が出庫するとき、駐車スペース A から出庫する車両 2 は、駐車スペース A の前を横切る車両 1 がいつ駐車スペース A の前を通過するか分からない。この場合、車両 2 が車両 1 の通過を待つか、車両 1 と車両 2 の位置情報や速度情報などを基に走行調停を行う必要がある。車両 2 が車両 1 の通過を待つ場合は、車両 1 から車両 2 までの距離が大きくなるほどに車両 2 の待ち時間も大きくなるため、車両 2 の旅行時間が大きくなってしまふ。位置情報や速度情報などを基に走行調停を行う場合は、車両数が大きくなると、走行調停回数の増加により旅行時間の増加に繋がる。したがって、WP 時間制御型の方式では非効率的な AVP となることがあるため、車両が占有する場所と時間が明確に分かる方式が必要である。

2.2 時空間グリッド予約システム

このシステムは車両およびダイナミックマップサーバと予約データベースで構成される。ダイナミックマップサーバでは、マップ上の道路空間が予め定められた大きさのセルに区切られており、時刻と各セルの集合体を時空間グリッドと定義し、データベース上で管理する。

システムのシーケンス図を図 2 に示す。車両は、走行する予定時刻の一定時間前に自身に振り分けられた車両 ID を含む車両情報と走行開始希望時刻、走行したい区間をダイナミックマップサーバに送信する。その情報を基にダイナミックマップサーバは時空間グリッドの予約データベースに対し、走行のために占有したいグリッドの空きを問い合わせる予約を行う。最後にダイナミックマップサーバは車両に予約の結果を走行計画（各時刻での走行位置）として送信する。車両は、取得できた走行計画に基づいて走行する。

システムの走行調停手法を、車両が等速で直進する場合における直線道路での時空間グリッド予約の例（図 3）を用いて示す。図 3 における赤い矢印は車両の走行経路、黄色のセルは車両の予約をしているセル、オレンジ色のセルは他車両にすでに予約をされているセルを示している。車

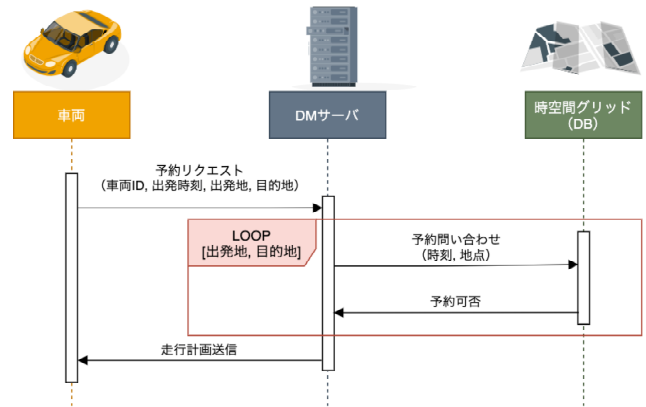


図 2 時空間グリッド予約システムのシーケンス図

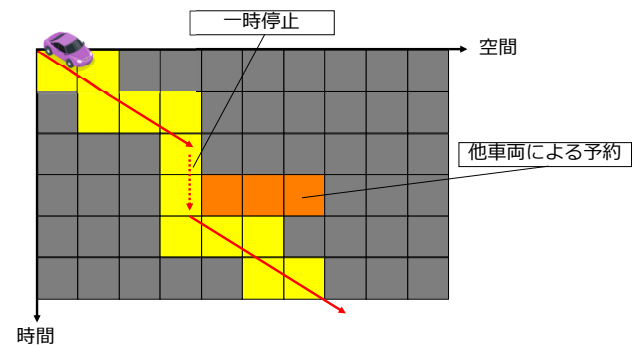


図 3 時空間グリッド予約システムの調停手法

両は等速で直線道路を進むと他車両と衝突することが事前に認識できるため、衝突を回避するために、一時停止する。衝突の恐れがなくなった時点で走行を再開するような形で予約を実行する。この一連の流れを全車両が実行することで、走行調停を行う。

3. 提案方式

3.1 概要

本研究では、ダイナミックマップにおいて時空間グリッド予約の仕組み利用することで、効率的に AVP が可能となる走行制御方式を提案する。時空間グリッド予約により車両が占有する場所と時間を明確にすることで、効率的に走行調停を行い、旅行時間を小さくする。

3.2 前提条件

- 各車両はダイナミックマップサーバと通信可能とする
- 各車両はダイナミックマップから受信した予約経路を元に走行可能とする
- 各車両は後退駐車を行うものとする
- 全車両が提案方式に従うものとする

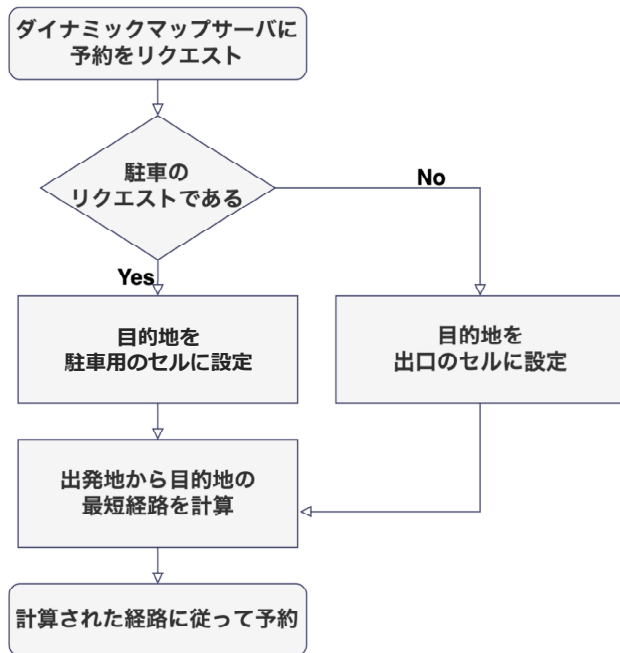


図 4 提案方式の予約アルゴリズム

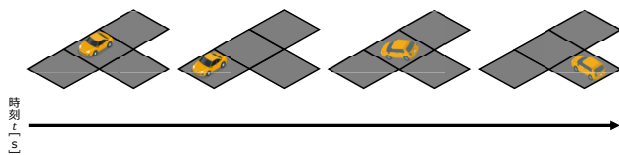


図 5 後退駐車を考慮した時空間グリッド予約に基づく走行イメージ

3.3 予約アルゴリズム

ダイナミックマップサーバが行うグリッドを予約するアルゴリズムを図 4 に示す。

車両から車両 ID、出発地、駐車もしくは出庫の情報を含む予約リクエストを受信したダイナミックマップサーバは、出発地から目的地までの最短経路を計算する。駐車のリクエストを受信した場合は駐車スペースのセルをランダムに選択し、予約データベースに問い合わせ、車両 ID を登録することで他の車両が予約をできないようにする。車両 ID の登録が完了した時点で、目的地をそのセルに設定する。出庫のリクエストを受信した場合は、目的地を出口のセルに設定する。

ダイナミックマップサーバが計算した最短経路に従い、対象のセルを占有する時間分だけ予約できるかをデータベースに問い合わせ予約を試みる。

3.4 後退駐車を考慮した時空間グリッド予約

本研究では、車両は後退駐車を行うため、図 5 に示すように、駐車スペース前の 2 つのセルを駐車に必要な時間の分だけ予約を行う。

3.5 セルを占有する時間の決定方法

車両の加速度の変化によって、セルを占有する時間を変化させる必要がある。例えば加速度が小さくなる場合は、1 つのセルを占有する時間が大きくなる。したがって、等速で走行するセルに加え、発車を含むセル、停車を含むセル、後退駐車をを行うセルにおいて占有する時間を定義する。

発車を含むセルを占有する時間 t_{start} 、等速で占有する時間 t_{drive} 、停車を含むセルを占有する時間 t_{stop} を、車両が等速で走行する際の速度 V (m/s)、セルの長さ L (m)、車両の加速時の加速度 a_{start} 、車両の減速時の加速度 a_{stop} を用いて、式 1、式 2、式 3 で表す。

$$t_{start} = \frac{L - \frac{V^2}{2a_{start}}}{V} + \frac{V}{a_{start}} \quad (1)$$

$$t_{drive} = \frac{L}{V} \quad (2)$$

$$t_{stop} = \frac{L + \frac{V^2}{2a_{stop}}}{V} - \frac{V}{a_{stop}} \quad (3)$$

本研究では、中型車両の全長が約 5m であることを考慮し、セルの長さ $L = 5$ 、車両は駐車場内では徐行して走行することを考慮し、等速で走行する際の速度 $V = 2.5$ とする。また、5~15km/h における加速時の加速度と減速時の加速度が得られている研究がある [6]。これを参考に車両の加速時の加速度 $a = 2$ 、減速時の加速度 $b = 3$ とする。

また、直角駐車かつ後退駐車である場合に駐車スペースから 3m 離れた位置から駐車するまでの時間が 30 秒程度であることが得られている研究がある [5]。これを参考にし、後退駐車をを行うセル（駐車スペースの前の 2 つのセル）の占有時間をそれぞれ 10 秒とする。

4. 評価

本研究の目的が AVP の効率化であることから、評価項目は車両が駐車のリクエストを開始してから駐車完了までの時間とする。評価対象は 2.1 節で示した WP 時間制御型の AVP を参考にした方式と提案方式とする。

4.1 WP 時間制御型方式

評価で用いる WP 時間制御型方式について説明する。この方式における AVP の構成要素は車両と車両の走行計画を管理する管制センタである。管制センタには静的な地図情報や WP と通過時刻を決定する機能を持ったサーバと各車両の WP と通過時刻を管理するデータベースがある。

車両から車両 ID、出発地点、駐車もしくは出庫の情報を含む予約リクエストを受信したサーバは、出発地点から目的地までの最短経路を計算する。駐車のリクエストを受信した場合は駐車スペースをランダムに選択し、データベースに問い合わせ、対象の駐車スペースに車両 ID を登録することで他の車両が予約をできないようにする。車両

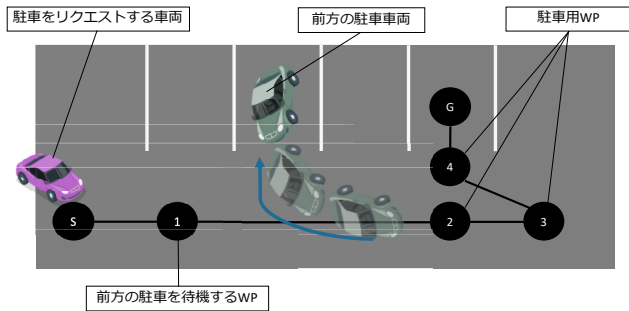


図 6 WP 時間制御型方式の駐車リクエスト時の WP

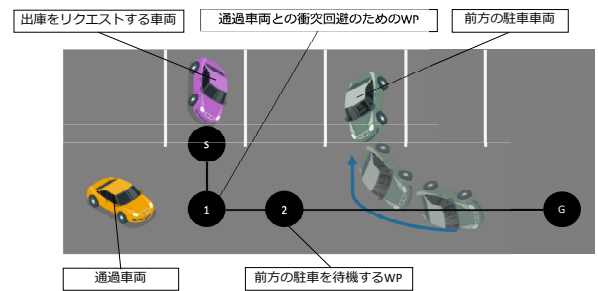


図 7 WP 時間制御型方式の出庫リクエスト時の WP

ID の登録が完了した時点で、目的地点をその駐車スペースの位置座標に設定する。出庫のリクエストを受信した場合は、目的地点を出口の位置座標に設定する。

サーバは計算した最短経路に従い、WP と通過時刻を計算する。2.1 節で紹介した WP 時間制御型の AVP を参考に、WP は出発地点、停車する必要がある地点、目的地点とする。従って、駐車のリクエストを受信した場合は出発地点、前方車両の駐車による停車地点、後退駐車による停車点、目的地点を WP とし（図 6）、出庫のリクエストを受信した場合は出発地点、駐車スペースの前方 2.5m の地点、前方車両の駐車による停車地点、目的地点を WP とする（図 7）。WP の通過時刻は、データベース上の他車両の WP と通過時刻を参照し、計算した最短経路上に他車両の WP が存在する場合はその WP と通過時刻を元に衝突が起こらないように決定する。サーバは得られた WP と通過時刻を車両に送信し、車両はそれらを元に走行を開始する。

また、車両が WP 間を移動中に、駐車している車両が出庫リクエストを送信した場合、車両同士の衝突を回避するために、全車両を停止させる。全車両の停止を確認した後、サーバは全車両に対して WP と通過時刻を再計算する。この時、駐車スペースの前方の地点を新たな WP として追加する（図 8, 9）。サーバは得られた新たな WP と通過時刻を車両に送信し、車両はそれらを元に走行を開始する。

また、提案方式と対等な条件にするために、等速で走行する際の速度は 2.5m/s 、車両の加速時の加速度は 2m/s^2 、減速時の加速度は 3m/s^2 とし、駐車スペースの手前 2.5m から駐車が完了するまでに 30 秒かかるものとする。

4.2 評価環境

評価に用いる駐車場環境は図 10 に示す 10 台の車両を駐車可能な環境とする。駐車場環境のパラメータを表 1 に示す。

また、先行研究 [2] では経路予約を申請した際の応答時間（車両がリクエストの送信を開始した時点からレスポンスを受信するまでの時間）の最大値が $129\text{ms} \sim 193\text{ms}$ 程度であったことを参考に、提案方式における経路予約を申請した際の応答時間と WP 時間制御型方式における WP

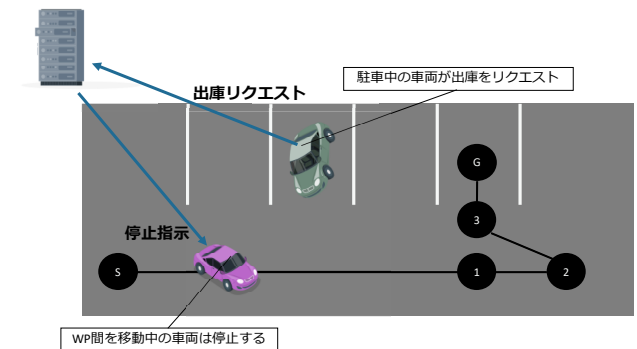


図 8 WP 間を移動中に駐車リクエストがあった場合

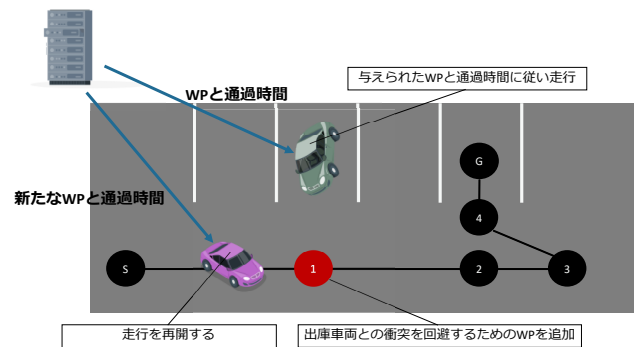


図 9 WP 間を移動中に駐車リクエストがあった場合の WP と通過時刻の送信

と通過時刻の申請した際の応答時間を 200ms と仮定する。また、WP 時間制御型方式において、出庫リクエストを開始した時点から全車両がサーバから停止指示を受信するまでの時間においても 200ms と仮定する。

表 1 駐車場環境のパラメータ

道路幅	5m
駐車スペースの大きさ	5m × 5m
駐車可能台数	10 台

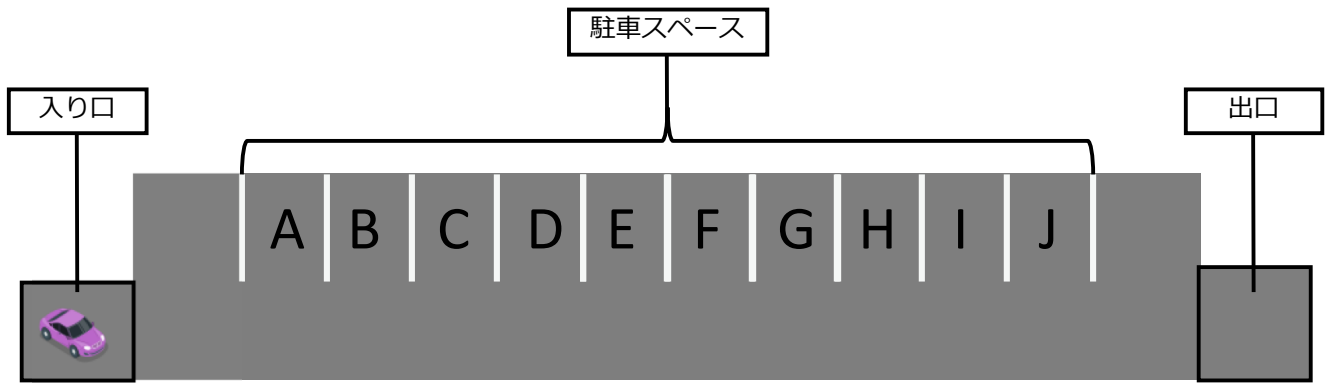


図 10 評価に用いる駐車場環境

4.3 評価シナリオ

駐車をリクエストした車両 1 台が図 10 の J のスペースに駐車する場合を想定する。また、駐車をリクエストした車両が駐車スペースに移動するまでに駐車中の全ての車両が出庫をリクエストする。駐車中の車両の 2.5m 手前を駐車をリクエストした車両が通過した時点で、駐車中の車両は出庫をリクエストする。また、出庫をリクエストする車両は駐車スペースのアルファベットの A から昇順に詰めて駐車しているものとする。

4.4 評価結果と考察

出庫をリクエストする車両台数を変化させた時の評価結果を図 11 に示す。WP 時間制御型方式では出庫をリクエストする車両台数が増加するごとに、車両が駐車のリクエストを開始してから駐車が完了するまでの時間が大きくなったのに対し、提案方式では出庫をリクエストする車両台数にかかわらず、車両が駐車のリクエストを開始してから駐車が完了するまでの時間は一定となった。

WP 時間制御型方式において、出庫をリクエストする車両台数が増加するごとに車両が駐車のリクエストを開始してから駐車が完了するまでの時間が大きくなった原因として、出庫をリクエストするごとに車両同士の衝突を回避するために、車両を停止させた回数が大きくなったことが想定される。また、提案方式において、出庫をリクエストする車両台数にかかわらず、車両が駐車のリクエストを開始してから駐車が完了するまでの時間は一定となった原因として、予め通過する全てのセルと占有する時間を確保することで、その後に出庫のリクエストによる予約を行う車両台数に関係なく、計画通りに走行したからだと想定される。したがって、出庫のリクエストによる走行調停のような車両同士の衝突を回避するための走行調停を行う車両台数が大きい環境を想定すると、WP 時間制御型方式と比較して提案方式は効率的である。例えば大型施設のような駐車可能台数が数百台から数千台に及ぶ場合や立体駐車場のような合流が存在する場合において、走行調停が頻発する環境

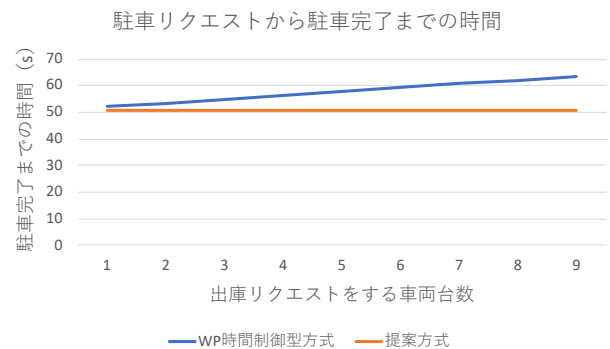


図 11 車両が駐車のリクエストを開始してから駐車が完了するまでの時間

を想定すると、WP 時間制御型方式と比較して提案方式は有効である。

5. まとめと今後の課題

近年、AVP システムの研究・開発が行われている。AVP において、WP とその通過時刻を車両に送信することで走行を制御する WP 時間制御型方式が提案されているが、車両が WP 以外の地点を占有する時間が明確に分からないことで、非効率的な AVP となる場合がある。そこで本研究では、ダイナミックマップの時空間グリッド予約を利用した AVP 方式を提案した。駐車をリクエストした車両が駐車スペースに移動するまでに駐車中の全ての車両が出庫をリクエストするシナリオにおいて、車両が駐車のリクエストを開始してから駐車が完了するまでの時間を評価し、WP 時間制御型と比較して提案方式では効率的な AVP が可能であることを示した。

今後の課題としては、実際に AVP のための時空間グリッド予約システムを実装することが挙げられる。本研究では応答時間や駐車時間を予め仮定して計算を行ったが、実装をすることでより正確な評価結果を得る必要がある。また、実際にシステムを導入することに向けて、様々な規模や形状の駐車場環境を想定した検証を行う必要がある。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP20H00589 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 野村徹也, 谷川浩: 自動バレーパーキングの開発と実証実験について, JARI Research Journal (Web) (JARI Research Journal (Web)) (2019).
- [2] 木村健太, 佐藤健哉: 協調型自動運転に向けた時空間グリッド予約に基づく走行調停手法の検討, ITS シンポジウム 2019, 2019-1-A-05 (2019).
- [3] 山崎晃央, 泉佑樹, 山根弥, 野村徹也, 清家康: 自動バレーパーキング管制制御技術の開発, Denso Ten technical review = デンソーテンテクニカルレビュー 3, 18-23 (2019).
- [4] 経済産業省: 平成 30 年度高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業 (自動バレーパーキングの実証及び高度な自動走行システムの実現に必要な研究開発) 成果報告書 (online), 入手先 (https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000350.pdf) (2021.07.22).
- [5] 平沢隆之, 亀井潤也, 安藝雅彦, 古賀誉章, 須田義大: 駐車場 ITS における機能的な駐車場スペース設計の基礎的検討, 生産研究 64 (2), 161-166 (2012)
- [6] 森健二, 矢野伸裕, 横関俊也, 牧下寛: エコドライブ実施時の車両挙動, 土木計画学研究・論文集 第 29 巻 (2012)