

# 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シミュレーション評価

山本 浩太郎<sup>1</sup> 滕 睿<sup>2</sup> 佐藤 健哉<sup>1</sup>

**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。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効率的に AVP が可能となる走行制御方式である「自動バレー駐車制御方式」が提案されているが、実装によるシミュレーション評価は行われていない。また、駐車場を想定した車両挙動が十分に考慮されていないという問題点がある。そこで本研究では、駐車場を想定した調停に適したアルゴリズムを実装し、自動バレー駐車制御方式のシミュレーション評価を行った。シミュレーション実験では、全車両が後進して駐車を行うシナリオと全車両が前進して駐車を行うシナリオにおいて、駐車を完了する時間を評価し、提案したアルゴリズムを適用した自動バレー駐車制御方式は自律型自動運転のモデルと比較して、効率的に AVP が可能であることを示した。

## Simulation Evaluation of Automated Valet Parking Control Method Using Spatio-Temporal Grid Reservation Based on Dynamic Map

YAMAMOTO KOTARO<sup>1</sup> TENG RUI<sup>2</sup> SATO KENYA<sup>1</sup>

**Abstract:** In recent years, research and development have been conducted on automated valet parking (AVP) systems that can automatically park a vehicle from the passenger's drop-off and pick-up location to a parking space in a parking lot. AVP employs automated driving technology, and automatically calls the vehicle from the parking space to the passenger's drop-off and pick-up location when necessary. Automated valet parking control method that enables efficient AVP by using the mechanism of spatio-temporal grid reservation has been proposed in the dynamic map, which is an information and communication platform for a cooperative automated driving system. However, the method has not sufficiently considered the vehicle behavior in case a parking lot exists. In this study, we implemented an algorithm suitable for mediation assuming a parking lot, and we conducted a simulation evaluation of the automated valet parking control method. In the evaluation, the time to complete parking was examined in the scenarios where all vehicles park backward and all vehicles park forward. The results show that the proposed automated valet parking control method is more efficient than the autonomous automated driving model.

### 1. はじめに

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 [1]。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 [2]。

車両の走行調停手法として、時空間グリッド予約が先行

<sup>1</sup> 同志社大学大学院 理工学研究科

<sup>2</sup> 同志社大学モビリティ研究センター

研究で検討されている [3]。また、先行研究で構築された時空間グリッド予約の仕組みを利用することで、効率的に AVP が可能となる走行制御方式である「自動バレー駐車制御方式」が提案されている [4]。しかし、駐車場を想定した車両挙動が十分に考慮されていないという問題点がある。また、自動バレー駐車制御方式について、実装によるシミュレーション評価は行われていない。そこで本研究では、駐車場を想定した調停に適したアルゴリズムを実装し、自動バレー駐車制御方式のシミュレーション評価を行う。

## 2. 時空間グリッド予約

本章では、先行研究で構築された時空間グリッド予約の概要を説明し、その仕組みを自動バレー駐車制御方式に利用する上での問題点について述べる。

### 2.1 概要

時空間グリッド予約は、車両が情報を共有する仕組みの 1 つであるダイナミックマップによる走行調停手法である。ダイナミックマップは、高精度道路地図上にセンサなどから得た情報を重畳できるようにした情報通信プラットフォームで、自動運転等の高度な交通サービスを支える上で必要な情報基盤と考えられている [5]。

ダイナミックマップ上の道路空間があらかじめ定められた大きさの「セル」に区切られており、各時刻と各セルの集合体を「時空間グリッド」と定義し、ダイナミックマップのデータベース上で管理されている。時空間グリッド予約の流れを図 1 に示す。車両は前方数百メートルの区間について走行し始める予定時刻の直前に、自身の車両 ID と走行開始時刻、走行したい区間（始点と終点）の情報をダイナミックマップに送信し予約をリクエストする。ダイナミックマップはリクエストされた情報を基に各時刻での車両の走行地点を計算し、データベースにグリッドの空きを問い合わせ、他車両の先約と衝突が生じないように予約する。取得できた予約に基づきパスプランニングが行われ、車両はそれに従って走行する。このように、車両が走行しながら前方の区間の予約のリクエストを送り、得られたパスプランに従って走行することを繰り返す。

先行研究では、この基礎となる仕組みを単一交差点を想定して構築し、通信における計算量について考察が行われ、他の通信を用いる走行調停手法に比した優位性を示した。

### 2.2 自動バレー駐車制御方式に利用する上での問題点

先行研究で構築された時空間グリッド予約の仕組みを利用することで、効率的に AVP が可能となる走行制御方式である自動バレー駐車制御方式が提案されている。しかし、先行研究を基にしたアルゴリズムでは、走行中の車間距離が小さくなり、車両同士が衝突する可能性があるという問題点がある。先行研究のアルゴリズムでは、1 台の車両は

各時刻に対して 1 つのセルを予約した。この場合、図 2 に示すように、パスプランに従って次のセルへ移動する際に、2 台の車両が同じセル上を走行し、1 台の車両がセルを占有して走行することができない可能性がある。車両がセルを占有することができない場合、セルの大きさが小さくなると、走行中の車間距離が小さくなるため、車両同士の衝突に繋がる。一方、車間距離を大きくすると複数の車両が駐車場内を効率よく移動することが難しくなる。よって、複数の車両が駐車場内を安全に、効率よく移動するためには、予約するセルの大きさが小さい場合に対応したアルゴリズムが必要である。

もう一つの問題点は、車両の後進が考慮されていないことである。車両の駐車時の操作の一つとして、車両を後進させて駐車を行うバック駐車がある。先行研究のアルゴリズムでは、図 3 に示すように、セルの予約に衝突が生じない場合、そのセルを予約することができるが、そのように得られたパスプランに従って車両が走行すると、バック駐車を行う車両と駐車場内を走行する車両が衝突する。よって、車両同士の衝突を防ぎながらバック駐車を行うように、セルを予約するアルゴリズムが必要がある。

## 3. 自動バレー駐車制御方式のための時空間グリッド予約

2.2 節では、先行研究における時空間グリッド予約を、自動バレー駐車制御方式に利用する上での問題点について述べた。本章では、それらの問題点を解決するアルゴリズムを提案する。

### 3.1 基本動作

車両が予約をリクエストする際は、駐車場の入口を出発する時刻の情報を送信する。ダイナミックマップサーバはこの情報を踏まえて、駐車スペース、走行経路及びパスプランを決定する。

### 3.2 駐車スペースの決定

駐車スペースの決定には、駐車スペースのデータを格納しているデータベース（以下、駐車スペース DB とする）を用いる。駐車スペース DB は、駐車スペースごとに固有の ID 及び利用状況（利用可能もしくは利用不可）のデータを格納している。車両から予約のリクエストを受けたダイナミックマップサーバは、駐車スペース DB を参照し、利用可能である駐車スペースを選択することで、駐車スペースを決定する。決定された駐車スペースの利用状況は、利用不可となるように駐車スペース DB を更新する。

### 3.3 走行経路の決定

走行経路は、駐車スペースまでの最短距離となる経路に決定する。また、駐車時の操作をバック駐車とする場合は、

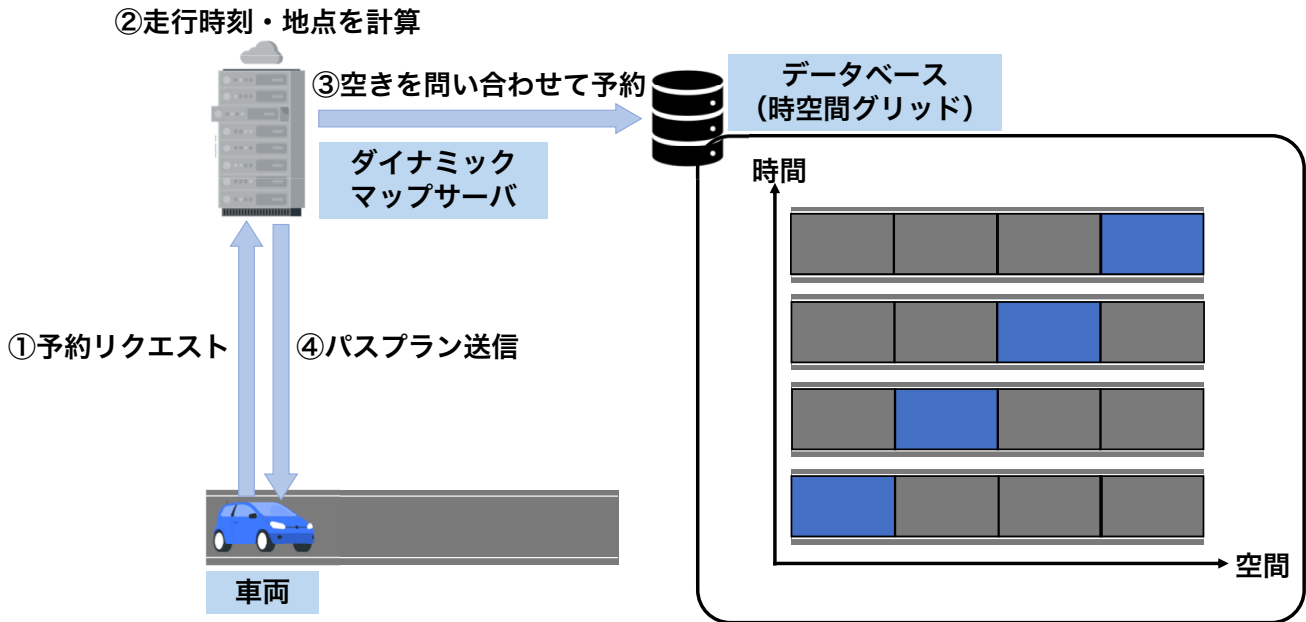


図 1 時空間グリッド予約の流れ  
Fig. 1 Spacio-Temporal Grid Reservation Process

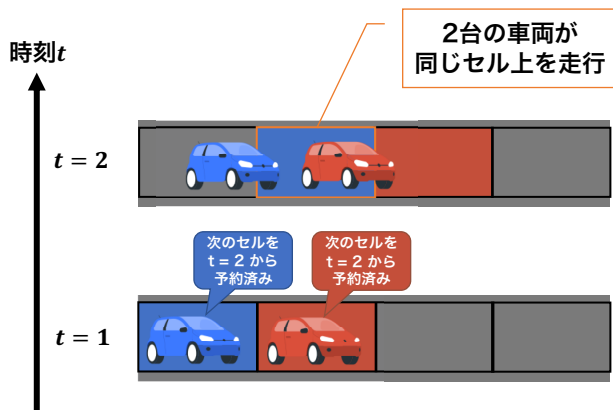


図 2 1台の車両がセルを占有して走行することができない例  
Fig. 2 Example of one vehicle not being able to occupy one cell

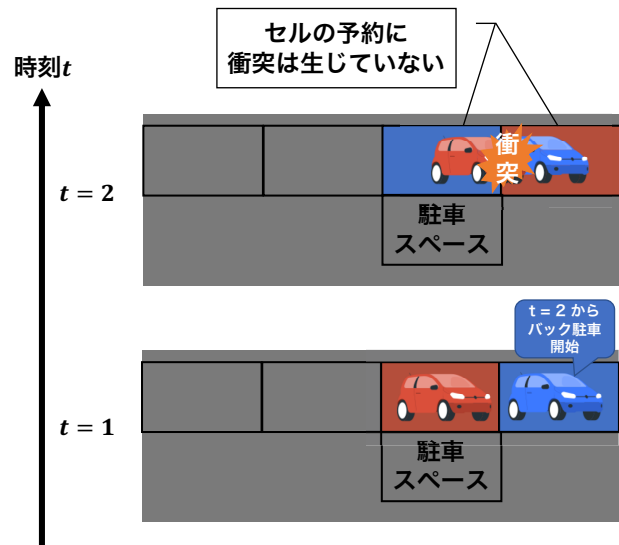


図 3 バック駐車を行う車両と駐車場内を走行する車両が衝突する例  
Fig. 3 Example of a collision between a vehicle parking in reverse and a vehicle driving in a parking lot

図 4 に示すように、バック駐車に必要なセルを走行経路に含むようにする。

### 3.4 パスプランの決定

パスプランの決定には、セルのデータを格納しているデータベース（以下、時空間グリッド DB とする）を用いる。時空間グリッド DB は、セルごとに固有の ID、占有が開始される時刻及び占有が終了される時刻を格納している。取得できた走行経路を基に、時空間グリッド DB を参照し、セルの予約を試みる。取得できた予約に基づきパスプランを決定する。

#### 3.4.1 セルの予約の基本動作

取得できた走行経路に基づくと、 $i$  番目 ( $i$  は自然数と

する) に走行するセルを  $C_i$ 、 $C_i$  の占有を開始したい時刻を  $T_{request_i}$  [s]、 $C_i$  の占有を開始する時刻を  $T_{start_i}$  [s]、 $C_i$  の占有を終了する時刻を  $T_{finish_i}$  [s]、車両の全長を  $L_{vehicle}$  [m]、セルの大きさを  $S_{cell}$  [m]、車両の最大速度を  $V_{vehicle}$  [m/s] として、セルの予約の基本動作を 1~6 に示す。また、車両が  $C_i$  から  $C_{i+1}$  まで停止することなく走行した場合の  $T_{start_{i+1}}$  の計算には、式 1 を用いる。また、車両は等加速度で走行し、速度が  $V_{vehicle}$  [m/s] に達した時点で、等速で走行するように予約する。

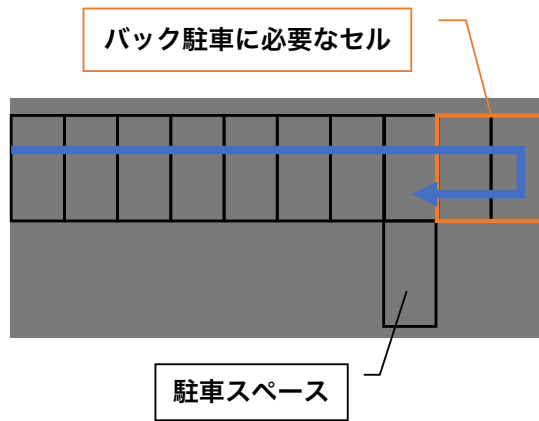


図 4 バック駐車に必要なセルをを走行経路に含む例

Fig. 4 Example of including the cell required for parking in reverse in the driving path

$$Tstart_{i+1} = Tstart_i + \frac{S_{cell}}{V_{vehicle}} \quad (1)$$

- (1) 時空間グリッド DB を参照し、 $C_i$  を  $Trequest_i$  から占有することができる場合、 $Tstart_i$  を  $Trequest_i$  に設定する。占有することができない場合、 $Tstart_i$  を  $C_i$  の占有が終了される時刻に設定する。
- (2)  $Tstart_{i+1}$  を式 1 に従って設定する。
- (3)  $Trequest_{i+1}$  を  $Tstart_{i+1}$  に設定する。
- (4)  $C_{i-\lfloor \frac{L_{vehicle}}{S_{cell}} \rfloor}$  が存在する場合、 $Tfinish_{i-\lfloor \frac{L_{vehicle}}{S_{cell}} \rfloor}$  を  $Tstart_{i+1}$  に設定する。
- (5) 車両が  $C_{i-\lfloor \frac{L_{vehicle}}{S_{cell}} \rfloor}$  から  $C_i$  まで走行する際に、停車または発車が必要である場合、そのために要する時間を  $Tfinish_{i-\lfloor \frac{L_{vehicle}}{S_{cell}} \rfloor}$  に加算する。
- (6) 時空間グリッド DB を参照し、 $C_{i+1}$  を  $Trequest_{i+1}$  から占有することができない場合、 $Tstart_{i+1}$  を  $C_{i+1}$  の占有が終了される時刻に再設定する。

### 3.4.2 バック駐車を考慮したセルの予約

バック駐車に必要なセルは、後進する時間を考慮して予約する必要がある。よって、バック駐車に必要なセルを予約する場合、セルの占有を開始する時刻を 3.4.1 項で述べたセルの予約の基本動作に従って設定し、セルの占有を終了する時刻を、駐車を完了する時刻に設定する。駐車を完了する時刻は、バック駐車のために車両が一時停止した時刻に、バック駐車に必要な時間を加算した時刻とする。

## 4. シミュレーション実験

本章では、提案したアルゴリズムを適用した自動バレー駐車制御方式を検証するためのシミュレーション環境の実装方法と、シミュレーション評価の評価項目及び評価環境について述べる。

### 4.1 実装

先行研究で実装に利用していた Web ベースダイナミッ

表 1 実装に用いた環境

Table 1 Implementation environment

実行環境	Node.js
フレームワーク	Express
データベース	MongoDB

クマップ [6] を参考に、車両情報をダイナミックマップサーバに送信する動作、集約したデータを管理する機能及び提案したアルゴリズムを実装した。実装に用いた環境を表 1 に示す。

### 4.2 評価項目

本研究の目的は、効率的に AVP が可能となる自動バレー駐車制御方式のシミュレーション評価を行うことである。よって、車両の移動の効率化の観点から評価項目は、全車両が駐車を完了する時間とした。全車両が駐車を完了する時間とは、1 台目の車両が駐車場の入口を出発してから全ての車両が駐車を完了するまでの時間のことである。

この評価項目について、自車両のセンサのみで判断して走行する従来の自律型自動運転のモデルとの比較を行った。なお、自律型自動運転のモデルは車両マイクロシミュレータ Vissim [7] の走行モデルに基づいて実装した。

### 4.3 評価環境

評価を行うにあたり、図 5 に示すような駐車場を想定した環境を構築した。普通乗用車の駐車スペースは長さ 6.0 m 以上、幅 2.5 m 以上とすることを原則とする [8] ことから、駐車スペースの長さは 6.0 m、幅は 2.5 m とした。駐車スペースの数は 2 台、4 台、6 台、8 台、10 台とした。車両に関して設定したパラメータを表 2 に示す。車両は駐車場内では、徐行して走行することを考慮し、最高速度は 10 km/h とした。車両の全長は、Vissim が用意している車両のモデルである Volkswagen Golf の全長に統一し、4.211 m とした。車両台数は駐車スペースの数に合わせて変化させた。また、提案したアルゴリズムにおいて、セルの大きさは駐車スペース幅と同じ 2.5 m とした。5~15 km/h における加速時及び減速時の加速度が得られている研究 [9] を参考に、加速時の加速度は  $2 \text{ m/s}^2$ 、減速時の減速度は  $-3 \text{ m/s}^2$  とした。バック駐車に必要な時間は、自律型自動運転のモデルに統一し、3.8 s とした。

バック駐車を行なった際の自動バレー駐車制御方式の効果と、車両を前進させて駐車をを行う前向き駐車をを行なった際の自動バレー駐車制御方式の効果を検証するため、全車両がバック駐車をを行うシナリオと全車両が前向き駐車をを行うシナリオでシミュレーション評価を行った。これらのシナリオでは、車両は利用可能な駐車スペースを無作為に選択するものとした。また、バック駐車をを行うシナリオにおいて、車両同士が衝突しないようにするために、自律型自

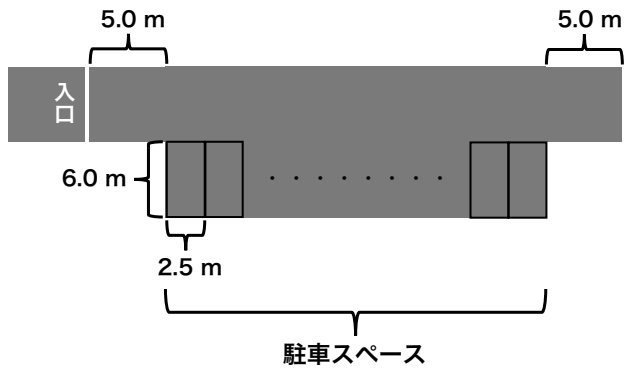


図 5 想定する駐車環境

Fig. 5 Assumed parking environment

表 2 車両に関して設定したパラメータ

Table 2 Parameters set for the vehicle

最高速度	10 km/h
全長	4.211 m
車両台数	2 台, 4 台, 6 台, 8 台, 10 台

動運転のモデルの車間距離の最小値は駐車スペース幅以上である必要があったため、車間距離の最小値は 2.5 m とした。前向き駐車を行うシナリオにおいては、自律型自動運転のモデルの車間距離の最小値を 0 m としても車両同士の衝突しなかったため、車間距離の最小値は 0 m とした。

## 5. 結果と考察

### 5.1 評価結果

まず、バック駐車を行うシナリオによるシミュレーション評価の結果を述べる。自動バレー駐車制御方式と自律型自動運転のモデルについて、全車両が駐車を完了する時間を図 6 に示す。

車両台数が 2 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 3.9 s 小さくなった。車両台数が 4 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと、全車両が駐車を完了する時間が 6.8 s 小さくなった。車両台数が 6 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 6.8 s 小さくなった。車両台数が 8 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 11.1 s 小さくなった。車両台数が 10 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 14.4 s 小さくなった。

次に、前向き駐車を行うシナリオによるシミュレーション評価の結果を述べる。自動バレー駐車制御方式と自律型自動運転のモデルについて、全車両が駐車を完了する時間を図 7 に示す。

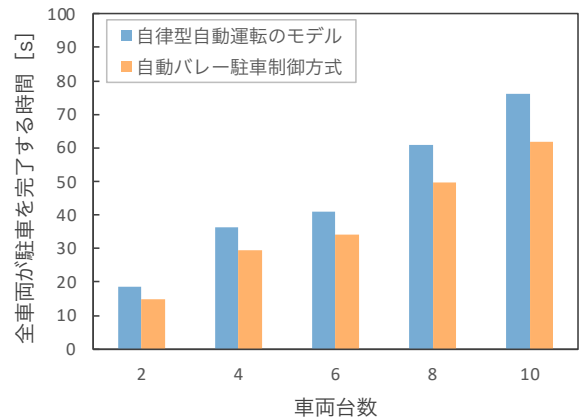


図 6 バック駐車を行うシナリオによる全車両が駐車を完了する時間  
Fig. 6 Time for all vehicles to complete parking in a reverse in parking scenario

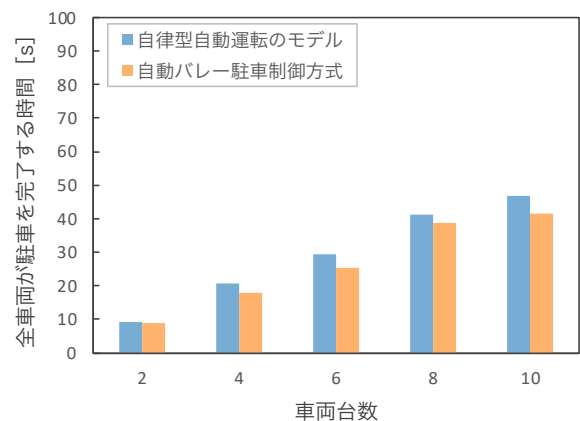


図 7 前向き駐車を行うシナリオによる全車両が駐車を完了する時間  
Fig. 7 Time for all vehicles to complete parking in a front in parking scenario

車両台数が 2 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 0.3 s 小さくなった。車両台数が 4 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと、全車両が駐車を完了する時間が 2.8 s 小さくなった。車両台数が 6 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 4.1 s 小さくなった。車両台数が 8 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 2.4 s 小さくなった。車両台数が 10 台の場合、自動バレー駐車制御方式は、自律型自動運転のモデルと比較して、全車両が駐車を完了する時間が 5.5 s 小さくなった。

### 5.2 考察

バック駐車を行うシナリオにおいて、車両台数が増加するに従って、自動バレー駐車制御方式と自律型自動運転の

モデルの全車両が駐車を完了する時間の差が大きくなる傾向となった。自律型自動運転のモデルでは、車間距離を一定以上に保って走行するため、車両台数が増加するに従って、車間距離が駐車を完了する時間の増加に与える影響が大きくなった。一方、自動バレー駐車制御方式では、車間距離を一定以上ではなく、車両同士が衝突しないように保って走行するため、車両台数が増加しても、車間距離が駐車を完了する時間の増加に与える影響は小さかった。よって、車両台数が増加するに従って、自動バレー駐車制御方式と自律型自動運転のモデルの全車両が駐車を完了する時間の差が大きくなった。

前向き駐車を行うシナリオにおいては、車両台数が増加しても、自動バレー駐車制御方式と自律型自動運転のモデルの全車両が駐車を完了する時間の差は5.5 s以内となった。自律型自動運転のモデルでは、車間距離を一定以上に保って走行するが、車間距離の最小値を0 mとして走行したため、車両台数が増加しても、車間距離が駐車を完了する時間の増加に与える影響が小さかった。また、自動バレー駐車制御方式では、車間距離を一定以上ではなく、車両同士が衝突しないように保って走行するため、車両台数が増加しても、車間距離が駐車を完了する時間の増加に与える影響は小さかった。よって、自動バレー駐車制御方式と自律型自動運転のモデルの全車両が駐車を完了する時間の差はバック駐車の場合と比較して、小さかった。

以上より、バック駐車を行う環境において、車両台数が増加するに従って、自動バレー駐車制御方式は自律型自動運転と比較して、有効である。バック駐車が前向き駐車と比較して、駐車場の空間を効率的に利用することが可能であることを示されている [10]。ことを考慮すると、駐車場の需要が高まった場合、駐車場の空間を効率的に利用するために、バック駐車を行う AVP サービスが必要となる。また、大型施設のような駐車できる台数が数百台から数千台に及ぶ場合がある。これらの環境を想定すると、自動バレー駐車制御方式は自律型自動運転と比較して、効率的に AVP が可能である。

## 6. おわりに

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 AVP システムの研究・開発が行われている。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自動バレー駐車制御方式が提案されているが、実装によるシミュレーション評価は行われていない。また、駐車場を想定した車両挙動が十分に考慮されていないという問題点がある。そこで本論文では、駐車場を想定した調停に適したアルゴリズムを実装し、自動バレー駐車

制御方式のシミュレーション評価を行った。シミュレーション実験では、全車両がバック駐車を行うシナリオと全車両が前向き駐車を行うシナリオにおいて、駐車を完了する時間を評価し、提案したアルゴリズムを適用した自動バレー駐車制御方式は自律型自動運転のモデルと比較して、効率的に AVP が可能であることを示した。

今後の検討すべき課題としては、出庫の予約に対応することがある。本研究では、駐車のために予約をリクエストするという前提で実装を行なったが、実際には駐車を行う車両と出庫する車両は駐車場内に混在するため、そのような場合に対応する必要がある。また、優先度を設けることも課題である。本研究のアルゴリズムでは、予約のリクエストを送信した順番に従って走行するようになっているが、緊急時などを想定すると、優先度を考慮する必要がある。

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] 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>）（2022.02.11）。
- [2] 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))，Vol. 2019，No. 10 月 (2019)。
- [3] 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 シンポジウム論文集，No. 2019-1-A-05，pp. 1-6(2019)。
- [4] 山本浩太郎，藤原，佐藤健哉：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，研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS)，Vol. 2021-ITS-86，No. 3，pp. 1-6(2021)。
- [5] Yousuke Watanabe, Kenya Sato, and Hiroaki Takada: *DynamicMap 2.0: A traffic data management platform leveraging clouds, edges and embedded systems*, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Vol. 18, No. 1, pp. 77 - 89(2018)。
- [6] 杉坂竜亮，青野朝日，綾木良太，佐藤健哉：Web ベースダイナミックマップの実装と評価，マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集，Vol. 2017，pp. 1197-1202(2017)。
- [7] PTV GROUP：交通シミュレーションソフトウェア — PTV Vissim，<https://www.ptvgroup.com/ja/ソリューション/製品/ptv-vissim/>（2022.02.10）。
- [8] 国土交通省：駐車場設計・施工指針について，<https://www.mlit.go.jp/road/sign/kijyun/pdf/19920610tyuusyaajou.pdf>（2022.02.10）。
- [9] 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，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol. 68，No. 5，pp. 1149-1154(2012)。
- [10] You Kong, Scott Le Vine, Xiaobo Liu: *Capacity Impacts and Optimal Geometry of Automated Cars' Surface Parking Facilities*, Journal of Advanced Transportation, Vol. 2018(2018)。