

待ち時間を短縮する駐車ナビゲーション

孫 為華^{1,a)} 剣持 真弘^{2,b)} 柴田 直樹^{2,c)} 安本 慶一^{2,d)} 伊藤 実^{2,e)}

概要：本稿では、路車間の通信を用いたナビゲーションシステムでショッピングセンター駐車場における渋滞を解消する手法を提案する。場内の車両位置情報を基に、サーバが駐車場の利用状況を推定し、駐車場の各エリアに到達するために必要な時間や駐車待ち時間を見積もり、場内車両に配信する。各車両は、受け取った情報を用いて、駐車待ち時間の期待値が最小となる経路を計算し、ドライバーに提示することで短い時間での駐車を目指す。提案手法の有効性を評価するために奈良市内のショッピングセンターを模した駐車場シミュレータを作成し、実際の入庫データを用いてシミュレーション実験を行った。その結果、複数の比較対象手法と比べ、平均で20~50%程度駐車待ち時間を削減可能であることを確認した。

1. まえがき

車両の渋滞は、従来より大きな社会問題であり、燃料の浪費や余分な二酸化炭素の排出といった環境への悪影響を与えており、渋滞による社会活動の滞りなどは経済に悪影響を与えている。本研究では、大型立体駐車場に焦点を当て、車車間や路車間の通信を用いたナビゲーションシステムで大型立体駐車場における渋滞を解消する手法を提案する。

日本では駐車場の渋滞は普遍的な現象である。ショッピングセンター、空港、駅など、複数階に渡る多数の駐車ゾーンからなる大型駐車場を整備していることが多い。そのような大型駐車場において、全ての駐車ゾーンの人気は等しいわけではなく、駐車場入り口からの距離や、店舗の入り口までの距離などに依りて異なる。この人気の差が渋滞をしばしば引き起こす。人気の高いゾーンに入庫車両が集中することで渋滞が発生し、一方で、人気のないゾーンはほとんどの駐車スペースが空いているような状態となる。これから駐車場に入場するドライバーが、そのような大型駐車場において、どのゾーンが空いているのか知ることが容易ではなく、その上、一度渋滞に巻き込まれると脱出したくても身動きができない場合が多い。このような渋滞による機会損失は、ショッピングセンターにとっても大きな損失につながる。したがってショッピングセンター駐

車場における渋滞の解消と回避はドライバーと店舗の両方の観点から重要な課題である。

本研究では、大型立体駐車場を対象に、駐車待ち時間を短縮する駐車案内手法を提案する。その際、できるだけシステムの導入コストを抑制することで、手法の実現可能性を高める。本研究で対象とする大型立体駐車場では、車両出入口、駐車ゾーン、店舗入口を接続する経路の組み合わせが多く、人気のないゾーンは、早く駐車できても、駐車スペースから店舗入り口までの距離が長かったり、出入庫車両数の動的な変化に伴い各ゾーンの空き状況がリアルタイムに変化するなど、制約の多い環境である。さらに、提案手法を利用するには、車載通信機器やアプリケーションを実行する計算機が必要である。しかし、これらの技術が実用化しても現実的に普及率が低いと思われる。そのような環境でも有用な案内手法を実現することが本研究の目指す目標である。

提案手法では、駐車場内に一台の駐車情報管理サーバが設置されており、図1に示すように、駐車場の利用状況を収集する、そして各駐車ゾーンにおける占有率や車の出入り台数に基づき、それぞれのゾーンにおける駐車成功率を求める。その後、図2に示すように、駐車場情報を定期的にアナウンスする。提案システムを搭載している車両がこの情報に基づき、自身にとって最も駐車待ち時間が短くなる経路を自車両において探索する。その際、図3に示すように、各車両は自身の位置を起点とし、一定距離内の複数駐車ゾーンを経由する経路を全探索し、各ゾーンを経由するにかかる時間及び駐車成功率に基づいて、各経路に対し駐車待ち時間期待値を算出する。さらに、同時に到来する車両とは異なるゾーンに誘導するように、待ち時間期待値

¹ 大阪大学 サイバーメディアセンター

² 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

a) sunweihua@ais.cmc.osaka-u.ac.jp

b) masahiro-k@is.naist.jp

c) n-sibata@is.naist.jp

d) yasumoto@is.naist.jp

e) ito@is.naist.jp

の短い複数経路中、ランダムに一つを選択し、図4に示すようにドライバーに提示する。こうすることによって、駐車場に到達する車両を駐車成功率が高いと思われるゾーンに振り分け、駐車待ち時間を短縮させる。

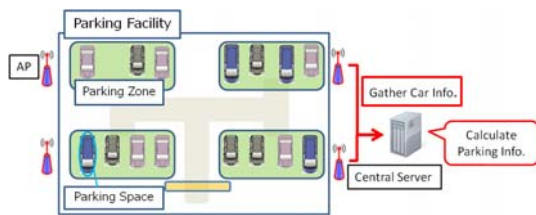


図1 1, 駐車場情報の収集, 駐車確率の計算

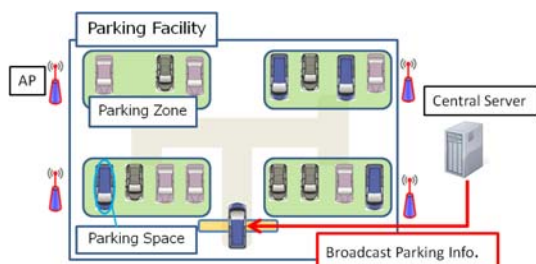


図2 2, 駐車場情報の配信

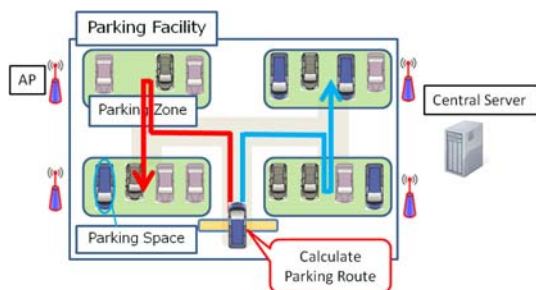


図3 3, 手法概要 (経路探索)

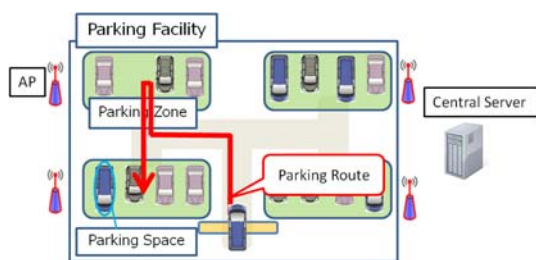


図4 4, ドライバーに提示

提案手法の有効性を確認するため、駐車場シミュレータを作成し、シミュレーションによる評価実験を行った。駐車場シミュレータはセルオートマトン方式を採用し、最小単位をセルで、駐車場全体をセルの集合で表現し作成した。シミュレーションで用いた駐車場モデルは奈良市内の大型ショッピングセンターの駐車場の構造データに基づいて作

成し、入出庫の分布は実際のトレースデータを用いた。提案手法の有効性を様々な観点から評価するため、(1) 入場口ごとの入場車両数の偏りの有無による影響、(2) 提案手法の普及率による影響、(3) 提示経路長による影響を検証した。その結果、提案手法の普及率が低い場合でも、比較対象手法に比べ、入場車両数に偏りが無い場合で平均15~25%程度、偏りが有る場合で平均30~50%程度、駐車待ち時間を削減できた。これらの結果をもって、入場車両数に偏りがあり、渋滞しやすい駐車場では、提案手法の搭載率が低くても、平均駐車待ち時間を短縮する効果が明らかに見られることが分かった。この結果より、現実においても提案手法は実用性が有ると考えられる。

2. 関連研究

駐車問題に対する研究開発のほとんどは、駐車場内の渋滞を軽減させ、駐車待ち時間を短縮することを目的としている。これらの研究は主に、(1) 駐車状況の検知、(2) 駐車ナビゲーション、(3) 車両位置特定に分類される。

2.1 駐車状況の検知

センサーフラップ駐車システム(図5)は日本で広く用いられている。このシステムでは、駐車場内の各駐車スペースにセンサーを配置し、スペースに車両が進入したことを検知すると、車輪止め用のフラップ板が上がる。この方式は駐車状況を把握するほか、駐車中の車両の位置も正確に取得できるメリットがある。しかし、センサーの数が多く、配備コストがかかり、故障対応の手間が大きい。

ゲート方式(図6)は駐車場の入出庫口にゲートを設置し、通過する車両をカウントすることで、駐車場内の車両数を把握する上、駐車場の容量と比較することで、混雑状況の情報を取得する。設置コストは安いですが、フラップ方式と比べ精度が低く、入場以降どこに駐車したかは把握できない。



図5 フラップ式駐車場



図 6 ゲート式駐車場

センシング技術を利用した車両検知の研究は既に多くなされており、Iwasaki ら [1] は車両の影を用いることでかなり正確に通行車両数を検知出来る手法を提案している。Chinrungrueng ら [2] は駐車場内に無線センサネットワーク環境を用いることで、リアルタイムに駐車場の空車状況の情報を取得し、個々のドライバーにそれぞれ違った空車スペースの情報を提供する手法を提案している。Bi ら [3] も同様に個々の駐車スペース全てにモニタリングノードを設置し、各通路にガイドノードを設置することで、空車スペースまでの経路を指定し、誘導する手法を提案している。しかし、これらの手法ではセンサの設置と維持のコストを顧慮しておらず、現実にもそのまま応用することは困難である。

そこで、Tan ら [4] は低コストのセンサを用いて、駐車場全体での設置コストを軽減させるシステムを提案している。しかし、センサは時間経過とともに機能が劣化して不正確になることや、故障して機能が停止するといった問題が残っている。

一方、車車間通信 (VANET) 技術もまた注目されており、これを用いた ITS の研究は産業レベルでも学術レベルでも多くなされている。Lu ら [5] は、車車間通信を用いた駐車場ナビゲーションシステム SPARK (図 7) を提案している。この方式では、車車間、路車間の通信を用いて空車の駐車スペース情報を得て、入場してくる車両毎に異なる空車スペースの情報を与え、ナビゲーションする。収集した情報に基づき、サーバは各車両に対し電子駐車チケットを発行する。各電子駐車チケットは駐車スペースが指定されており、チケットがなければ、異なる駐車スペースには駐車ができない。そのため、駐車場内車両流量のバランスを取ることができ渋滞を軽減することができる。しかし、ドライバーが案内されたとおりに駐車すると仮定している。案内された場所以外のスペースに駐車されると、システムはそれを把握できず、その駐車スペースに車両を案内

すると、ナビゲーションが破たんするという問題がある。

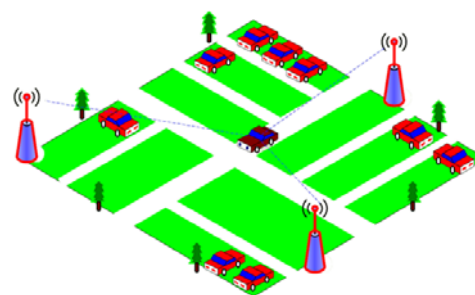


図 7 SPARK 手法

Panayappan ら [7] は、高価なインフラを用いずに、車車間通信技術により駐車場ごとの空車状況を大まかに検知し、駐車場外の車両に配信するネットワークモデルとそのアーキテクチャのセキュリティに関しての提案をしている。Caliskan ら [6] は、車両入庫から出庫までの時間を見積もり、マルコフモデルを使った到来車両の入庫時間を推定する手法を提案している。この手法では車両の出入庫がある確率モデルに従うと仮定しており、また駐車待ちの車両が全部駐車場内にあり、場内を自由に行き来ができると仮定している。しかし、実際には駐車場内は混みやすく、駐車場に進入する前に道路で待ち行列ができる日本の状況とは異なる。

2.2 車両位置測定

近年、多くの車両は GPS 測位システムを搭載している。Abbott ら [8] は GPS が車両ナビゲーションのパフォーマンスに与える影響を定量的に評価している。測定値は正確な位置にかなり近い値となっており、車両が屋外駐車場にある場合、完全に GPS に頼っても問題はない。

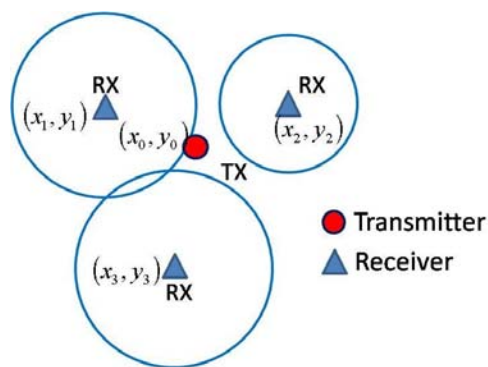


図 8 レンジベース位置推定法

屋内位置推定に関する様々な研究も行われてきた [9], [10], [11]. 例えば、基準点となる幾つかの無線局 (アンカーノード) との無線通信状況 (受信電波強度) を基に測位を行う方法 (レンジベース位置推定法, 図 8) が多数提案されている。対象とされる無線通信方式は 3G, Wi-Fi,

RFID, 超音波, FM, UWB などであり, 推定精度は異なるものの, 三辺測量法を用いて受信電波強度から位置を推定する点は同じである. この手法では, あらかじめ位置がわかっているアンカーノードを, 少なくとも3点利用する. 推定したい位置への3つのアンカーノードからの距離を受信電波強度から算出し, 各アンカーノードからの測定距離を半径とする球面が交わる点を対象物の位置として推定する.

以上述べたとおり, 位置推定に関しては, 既存の手法を用いても十分な精度がある. しかし, 低コストで駐車状況が把握でき, 及び有効なナビゲーション手法としてまだ有効な方法はない. 本研究では, 複数出入口のある大型立体駐車場を対象に, (1) 配置コストが低い, (2) 維持コストが少ない, (3) 利己的なドライバーにも影響されにくい駐車場ナビゲーション手法を提案する.

3. 提案手法

3.1 仮定

本提案手法は, 日本の大型ショッピングセンターに併設される典型的な立体駐車場を想定する. 以下に想定する仮定を列挙する.

- 駐車する車両の一部に提案手法による案内が可能なカーナビやスマートフォンのようなオンボードデバイスが搭載されている.
- 駐車場は複数の駐車ゾーンから構成され, 各駐車ゾーンには WiFi のアクセスポイントが設置されている. 駐車場の構造例は図 1-4 に示されている.
- ショッピングセンターには車両のオンボードデバイスと通信可能な中央サーバが設置されており, 情報の蓄積と配信を行う.
- オンボードデバイスは WiFi デバイスを介して中央サーバにアクセス可能である.
- 提案手法を搭載している車両は WiFi のフィンガープリンティングなどを用いて自分が現在存在するゾーンを知ることができる.
- 車両のオンボードデバイスは, エンジン音や電気が使用可能といった情報を基にエンジンのオンオフを検知することで, 駐車スペースに駐車したタイミングと発車したタイミングを知ることができる.
- 駐車場が空の時に, 入場口に車両が到達してから駐車して入店するまでの時間が短いゾーンほど人気は高い.
- カーナビは, 車内でドライバーに対し, 駐車場から受信した駐車案内を表示する機能, 及びドライバーの操作結果を車載通信ユニットに出力する機能を持つ.

3.2 駐車場モデル

駐車場の構造に関して以下を仮定する.

- 駐車スペースは, 一台の自動車を駐車するのに必要な

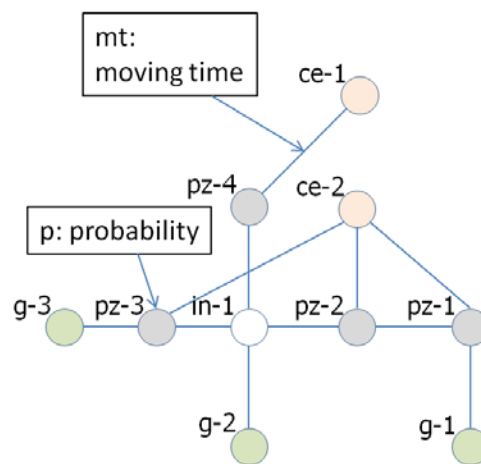


図 9 駐車場のグラフ表現

スペースである. 駐車ゾーンは, 複数の駐車スペースと, 隣接する駐車ゾーンに至る自動車用経路から構成される. 駐車場は複数の駐車ゾーンと, 各ゾーンから店舗入り口に至る歩行者用経路から構成される.

- 駐車場各ゾーン内の駐車スペースの数, ゾーンや自動車用通路, 歩行者用通路の配置は既知であり, 駐車ゾーンをノード, 自動車用通路及び歩行者用通路をリンクとするグラフとして与えられる.

駐車場に含まれる全ての車両出入口, 通路分岐点, 駐車ゾーン, 店舗入り口のそれぞれの集合を G, IN, PZ, CE で表す. 場内通路の集合を R とするとき, 駐車場全体は, $G \cup IN \cup PZ \cup CE$ をノード全体の集合とし, R をリンクの集合とするグラフで表される. 図 9 は駐車場に対応するグラフの例である.

3.3 手法詳細

提案手法では, 推薦駐車ルート (rpr, Recommended Parking Route) が出力される. 提案手法を搭載した車両のオンボードデバイスは駐車場に入場する時に中央サーバにアクセスする. 中央サーバは他の提案手法を搭載した各車両がどのゾーンを通過し, 最終的にどのゾーンに駐車したかにより各ゾーンに空きがあるかを知ることができる. 中央サーバは, これらの情報から各駐車ゾーンへ移動にかかる時間, 及びそのゾーンで駐車できる確率を推定し, これらのデータをアクセスしてきた入場車両へ送信する. 車両はこのデータを基に駐車場内のいくつかのゾーンを経由する各経路に対して駐車スペースを見つけるまでの時間期待値を計算し, 時間期待値が最小の経路, つまり推薦駐車ルート rpr を導き, ドライバーに提示する.

提案手法を搭載した車両は各駐車ゾーンに設置されている無線 LAN のアクセスポイントから受信する電波のフィンガープリンティングにより, 各車両は自分が位置するゾーンを知る. また, 各車両のナビゲーションシステムはエンジンの ON/OFF を, 電源またはマイク等から検知す

ることにより、駐車したタイミング、買い物から戻り発車したタイミングが分かる。このことから、推薦駐車ルート rpr を通過中の提案手法を搭載している車両はゾーンに駐車、もしくは通過する度に、その情報を中央サーバへと送信する。このようにして提案手法を搭載した各車両から得られた情報が中央サーバに蓄積され、今後入場してくる提案手法を搭載した車両へ送信するデータの計算に用いられる。また、提案手法を搭載した車両は推薦駐車ルート rpr に示されたようにゾーンを通過してもまだ駐車出来ない場合、中央サーバにアクセスし、中央サーバは車両の現在いる位置からの各駐車ゾーンへの移動にかかる時間と、そのゾーンに駐車できる確率を再計算し、車両へ返す。この情報を基に車両は新たな推薦駐車ルート rpr を計算する。

提案手法は、中央サーバで動作するサーバ部と、各車両で動作する車両部からなる。サーバ部では、車両がゾーン間を移動するのに必要な時間期待値と、各ゾーンで駐車できる確率を計算し、駐車場内の車両にアナウンスする。車両部は、サーバ部によりアナウンスされた内容から、駐車するまでの時間の期待値が最も低い経路 rpr を探索し、ユーザに提示する。提案手法の動作を図 10 に示す。また以下に、それぞれの部分の詳細を述べる。

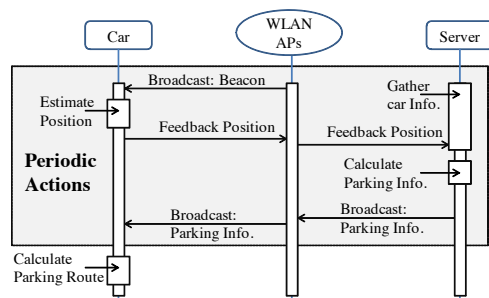


図 10 提案手法の動作

3.3.1 サーバ部

サーバ部では、近隣ゾーン間を移動するのにかかった時間と、過去 30 分でそのゾーンに駐車できた割合から、このゾーンに駐車できる確率を計算する。車両があるゾーンに駐車した場合、それまでに通過したゾーンのうち、駐車したゾーンより人気の高いゾーンは全て空きがなかったと判断する。

各ゾーンに駐車できる割合は、ある提案システム搭載車が到来した時より過去 30 分以内に、各ゾーンを通過した他の提案システム搭載車が駐車できた確率とした。例えば、過去 30 分以内にゾーン 1 を提案システム搭載車が 4 台通過し、3 台駐車できている場合はゾーン 1 に駐車できる確率は 75% とする。30 分以内に一台も他の提案システム搭載車が通過しておらず未知の場合は 50% とした。

サーバ部でのアルゴリズムの入出力は以下のようになっている。

入力 30 分以内に駐車場を訪れた車両がゾーン間を移動するのにかかった時間、各自動車がゾーンを通過したか、駐車したかの情報。また、過去のそれらの情報、駐車場の地図。

出力 ゾーン間を移動するのに必要な時間の期待値 E 、各ゾーンで駐車できる確率 P_{pz}

3.3.2 車両部

車両は入場後、自身の位置を特定し、中央サーバと通信しながら駐車経路を算出する。立体駐車場に入場した後、GPS による位置特定が使えなくなるので、本論文では、既存の位置推定手法 [12] を利用し、WiFi 電波強度に基づいて車両の位置を推定する。車両は、定期的にサーバに自車の位置情報を送る。各車は駐車経路が必要となった際（入場後や駐車経路が失敗した場合）、サーバがアナウンスする parking information に基づき、自身の位置から最も駐車期待時間が短い経路を計算する。厳密に期待値を計算するためには、任意の長さの経路全てについて計算する必要があるが、提案手法では決められた長さまでで計算を打ち切り、これを近似値として扱う。提案手法ではこの長さをゾーン 4 つ通過するまでとした。このようにして計算した経路の中で駐車できるまでの時間の期待値の小さな経路をユーザに提示する。ただし、全てのユーザに最も期待値の小さな経路を提示すると、多数の車両が同じ経路を通過してしまい、渋滞が発生することが考えられる。そこで、提案手法では、各車両は求めたベスト 3 の経路からランダムに経路を選択し、ドライバーに提示する。

$$Exp_{rpr} = \sum_i^{i \in rpr} \underbrace{(P_{pzi}(TP_{ei} + TZ_{pzi}))}_{term_1} \prod_{k < i}^{k < i} \underbrace{(1 - P_{pzk})}_{term_2} \quad (1)$$

推薦駐車ルート rpr の時間期待値は式 1 に示す Exp_{rpr} で表す。 P_{pzi} , TZ_{pzi} , 及び、 TP_{ei} はそれぞれ、駐車ゾーン i で駐車できる確率、ゾーン i 内の移動時間、そして、前のゾーンからゾーン i までの移動時間である。式 1 は駐車ゾーン i に到達して駐車するまでの時間期待値を表しており、 $term_1$ は駐車ゾーン i においてかかる時間期待値を表しており、 $term_2$ は推薦経路における駐車ゾーン $i - 1$ まで駐車できなかった確率を表している。

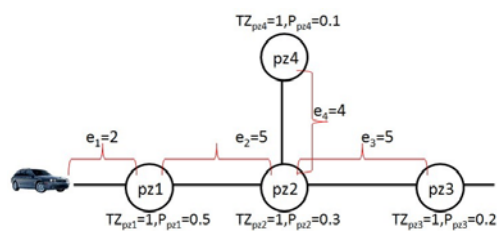


図 11 ルート例

例:図 11 において、駐車ゾーン $pz1, pz2, pz3$ を含む経路

の Exp_{rpr} は以下のように計算される。ただし $e1 - e4$ は場内の通路を表す。 $path1, path2, path3$ はそれぞれ、駐車ゾーン $pz1, pz2, pz3$ に到達するための通路を表し、 $e1, e1 + e2, e1 + e2 + e3$ となる。

$$\begin{aligned}
 TP_{path1} &= e1 = 2 \\
 TP_{path2} &= e1 + e2 = 7 \\
 TP_{path3} &= e1 + e2 + e3 = 12 \\
 Exp_{rpr} &= 0.5 * (2 + 1) + (1 - 0.5)(0.3 * (7 + 1)) \\
 &\quad + (1 - 0.5)(1 - 0.3)(0.2 * (12 + 1)) = 3.61
 \end{aligned}$$

サーバー部の入出力は以下のようにになっている。

入力 サーバ部の出力、駐車場の地図

出力 車両の現在地からゾーン4つ通過する経路のうち、駐車できるまでの時間の期待値の小さな経路ベスト3からランダムに選んで得た経路

4. 評価実験

提案手法の性能を評価するために、実際の駐車場とトレースデータを使ってコンピュータシミュレーションを行った。複数の状況における駐車待ち時間を計測し、提案手法と比較手法の特性を分析した。その結果、提案手法は著しく駐車待ち時間を短縮できることがわかった。また、提案システムの搭載率が低くても、同じ性能が見られた。以下、実験で用いたシミュレータ、設定、比較対象手法、実験結果について述べる。

4.1 駐車場シミュレータ

本実験ではシミュレータを Java で自作した。作成したシミュレータはセルオートマトン方式を採用し、最小単位をセルで表現し、図12のように駐車場全体をセルの集合で表現する。セルのサイズは $5m \times 5m$ で、約車1台分のスペースである。駐車場内の通路及び駐車スペースをセルで表現される。各車両は移動する際、一度にセル一つだけを移動し、隣接8セルにのみ移動できる。移動先セルに他の車両が入っている場合、そこに移動できない。車両のセルを移動する速度は、速度パラメータで指定する。実験のデフォルト設定では、単位時間を1秒としており、単位時間ごとに、車両は隣接セル ($5m/s$) に移動できるものとしている。

シミュレータの全イメージは図13で表現されており、奈良市内の大型ショッピングセンターの駐車場の構造データに基づいて作成した。シミュレーションでは、各駐車ゾーンの形状・容量のほか、ゾーン間の経路の長さなどを正確に再現した。グレーのブロックは通路、白のブロックは駐車スペース、赤のブロックは提案システムを搭載していない車及び駐車が完了した車両、青のブロックは提案システ

ム搭載車をそれぞれ表現している。

利用車両のトレースデータとして、1ヶ月間、1時間ごとに駐車場への入庫・出庫車両台数を利用した。このデータは、駐車場全体のものであり、各ゲートにおける入庫・出庫台数は含まれていない。これは、駐車場の各ゾーンやスペースにセンサーが設置されておらず、駐車券の発行と回収でしか車両台数が把握できなかったからである。

シミュレーションにおける、それぞれのゲートから入庫・出庫する車両台数は、上記の駐車場全体のデータを一定割合で各ゲートに割り振ることで作成した。また、駐車時間は30分、60分、90分の三種類に設定し、各車両はランダムに決定した。



図12 セルオートマトン図

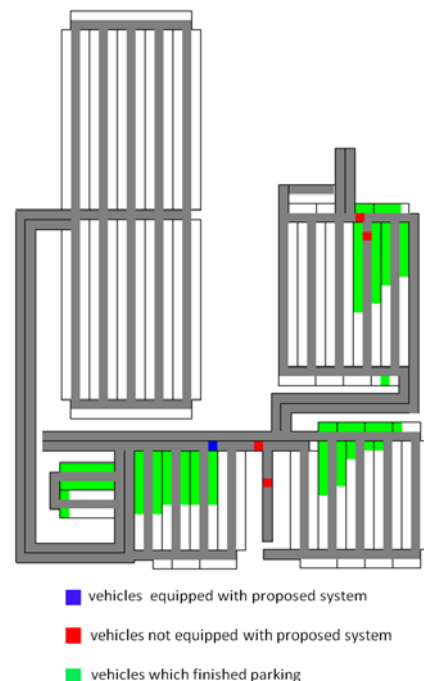


図13 実験シミュレータ図

4.2 シミュレーション設定

駐車場構造やドライバーの振る舞い、実験で検証した様々な状況についてのシミュレーションの設定について述べる。

4.2.1 駐車場構造

実験で用いる駐車場グラフを図14に示す。ce, pz, in, g はそれぞれ店舗入り口、駐車ゾーン、場内交差点、駐車場入り口を表す。実際の駐車場に倣い、5つのゾーンを有したものを有した。その容量や、店舗入り口までの歩行時間をまとめたものを表1に表す。各駐車ゾーンの初期状態は空とし、全駐車ゾーンが満車の場合、新たな到来車両を入場させないこととした。

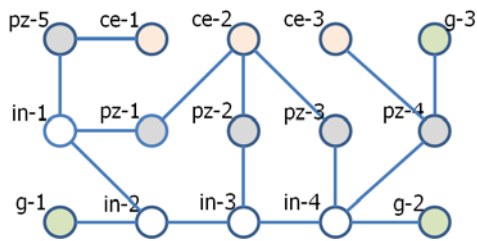


図14 駐車場グラフ (駐車容量 818)

表1 駐車ゾーンのパラメータ

駐車ゾーン	駐車容量 (台)	歩行時間 (秒)
pz-1	28	35
pz-2	100	20
pz-3	121	40
pz-4	169	25
pz-5	400	30

4.2.2 ドライバーの振る舞い

ドライバーの振る舞いを考慮する上で各駐車ゾーンに“人気度”という属性を与えた。人気度はゾーンの混雑具合にかかわらず固定値とした店舗入り口までの歩行距離が短いほど、駐車ゾーンの人気度が高くなるとする。後述の比較手法のドライバーの振る舞いに、この人気度を用いた。

また提案手法、比較手法共にドライバーは空車スペースを見つけ次第、提示されているナビゲーションにかかわらず、すぐさまそのスペースに駐車するとした。このことにより、利己的なドライバーを実現した。

4.2.3 システム搭載率

現実世界では、100%の普及率があり得ないことも考え、今回の実験では、高搭載率 (100%) と低搭載率 (10%) の二つの提案手法のバージョンを用いた。これは搭載率の提案手法性能に対するインパクトが重要な考察になると考えたためである。

4.2.4 入場口毎の到来車両比率

現実世界では駐車場外部の周辺道路の規模により、入場口ごとに到来する車両の台数に偏りが存在し、駐車場内部でゾーンごとに車両密度に偏りが生じる場合が存在する。そのような状況下での提案手法の効果を検証するために、以下の二通りの入場負荷シナリオを用いた。

- 均等入場：三つのゲートに車両が均等に入場してくる。

- 非均等入場：意図的に混雑した状況を作り出すために、それぞれのゲートに非均等に車両が到達する。ゲート $g-3$ に全体の 50%の車両が殺到し、ゲート $g-1$ 及び $g-2$ に 25%ずつ車両が到達する。

4.2.5 駐車場容量と構造の設定

提案手法のスケラビリティを考察するために、駐車場容量と構造を変化させて実験を行った。図14のマップをベースに、一部の駐車ゾーンを削除して容量、構造の変化を実現させた。新たに作ったトポロジーを図15, 16, 17に示した。実験で用いたマップは以下の通りである。

- パターン1：元のマップ (図14), 容量 818。
- パターン2：駐車ゾーン $pz-3$ を閉鎖したマップ (図15), 容量 697 (パターン1の 85%)。
- パターン3：駐車ゾーン $pz-5$ 及びストア入り口 $ce-1$ を閉鎖したマップ (図16), 容量 418 (パターン1の 51%)。
- パターン4：駐車ゾーン $pz-3, pz-5$ 及びストア入り口 $ce-1$ を閉鎖したマップ (図17), 容量 297 (パターン1の 36%)。

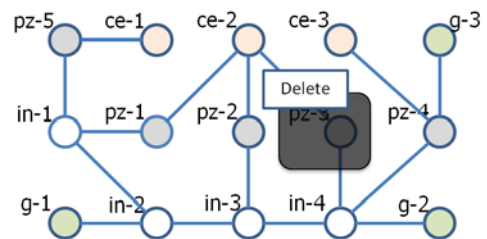


図15 駐車場グラフ (駐車容量 697)

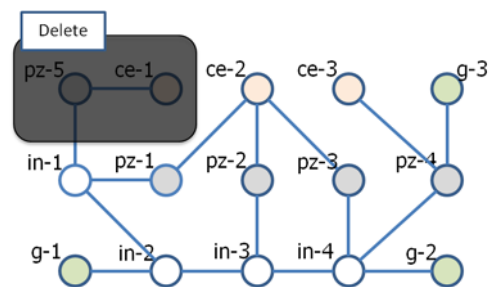


図16 駐車場グラフ (駐車容量 418)

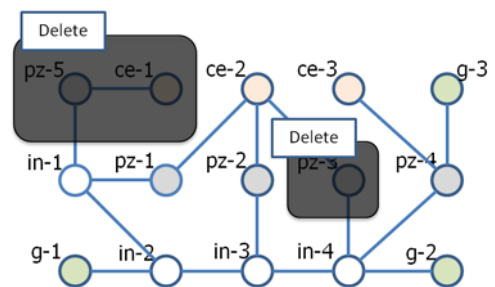


図17 駐車場グラフ (駐車容量 297)

4.2.6 提示推薦ルート長の設定

また、提案手法では提示される推薦駐車ルート長の長さをゾーン4つ通過するまでとしているが、その推薦ルート長の変化が駐車待ち時間に与える影響を検証するため、提案手法の車両部のアルゴリズムにおいて計算するルート長を2~6に変更させて、それぞれについて実験を行った。

4.2.7 提案経路の再計算タイミングの設定

提案手法を搭載した車両は推薦ルートとして提示されたゾーン全てに駐車出来ず通過した後に、中央サーバにアクセスし、推薦ルートを再計算することとしている。これに対し、再計算を行うタイミングを一つゾーンを通過するごとした場合にどの程度駐車待ち時間が改善されるかを検証した。

4.3 比較手法

提案手法の効果を検証するために、3つの比較対象手法を用意した。

- ランダム方式：車両はランダムに駐車ゾーンを選択し、そちらに駐車しに行く。選択した駐車ゾーンが満車の場合、再度ランダムに次の行き先を決め、止められるまで繰り返す。
- 掲示板方式：50%の車両は掲示板に表示されている最も空きのあるゾーンに向かい、他の車両はランダムに行き先を決める。行き先の駐車ゾーンが満車の場合、車両はランダムに次の行き先を決め、止められるまで繰り返す。
- グリーディ方式：50%の車両は最も人気の高い駐車場に向かう。行き先の駐車場が満車の場合も諦めずに、4回まで中で巡回する。それでも空きがなければ次の人気駐車場に向かい、同じ行動をする。駐車するまでこの行動を繰り返す。残りの50%はランダムに駐車ゾーンを選択する。

また、前述したように、我々は提案手法に異なる搭載率を設定している。

- 搭載率 100%：全車両は提示された推薦経路に従って空きスペースを探索する。推薦経路のゾーンが全て満車の場合、再度経路を提案される。
- 搭載率 10%：搭載車両のみ提案された経路に従って空きスペースを探索する。推薦経路のゾーンが全て満車の場合、再度経路を提案される。搭載していない車両は掲示板方式と同様に行き先駐車ゾーンを選択する。実験では存在しないが、システムを搭載しているにもかかわらず、推薦経路に従わない車両は未搭載車とみなす。

4.4 実験結果

提案手法の性能を複数の観点から解析するために、以下の四種類のシミュレーション実験を行った実験結果を述

べる。なお、すべての実験結果は5回の実験の平均結果である。

- 入場車両比率の偏りによる駐車待ち時間への影響
- 異なる駐車場容量、トポロジーによる駐車待ち時間への影響
- 推薦経路長による駐車待ち時間への影響
- 経路再計算タイミングによる駐車待ち時間への影響

4.4.1 到来車両比率変化の実験結果

この実験では、入場負荷に偏りが存在するとき、各種駐車方式で駐車するまでの待ち時間を計測した。実験に用いた手法は：提案手法 (100%)、提案手法 (10%)、グリーディ法、ランダム法、案内板法であり、実験に用いたマップは容量 818 のマップである。実験に均等負荷、非均等負荷の二通りの状況に対し、4回実験の平均結果をとった。入場負荷偏りによる駐車待ち時間への影響についての実験結果を表 4.4.1, 4.4.1 に示す。均等負荷、非均等負荷の CDF グラフをそれぞれ 18, 19 に示す。

表 2 入場負荷偏りによる実験結果 (均等入場)

車両	平均時間 (s)	最大時間 (s)
搭載率 100%	79.2	216.0
搭載率 10%(搭載車のみ)	96.1	219.0
搭載率 10%(非搭載車のみ)	124.0	961.0
ランダム方式	121.4	1184.0
掲示板方式	109.4	997.0
グリーディー方式	244.1	3964.0

表 3 入場負荷偏りによる実験結果 (非均等入場)

車両	平均時間 (s)	最大時間 (s)
搭載率 100%	100.0	549.0
搭載率 10%(搭載車のみ)	109.1	575.0
搭載率 10%(非搭載車のみ)	132.3	1193.0
ランダム方式	226.0	1792.0
掲示板方式	161.4	1716.0
グリーディー方式	375.4	5834.0

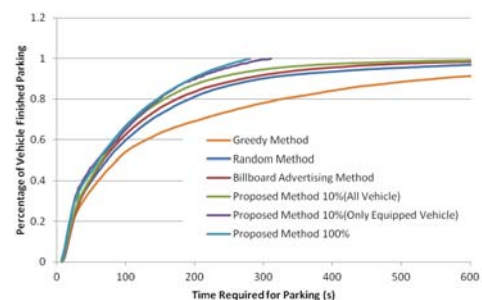


図 18 均等入場における駐車待ち時間の CDF

両方のケースにおいて、提案手法を搭載する車両は他の手法より、早いペースで駐車を終えることが見られた。提

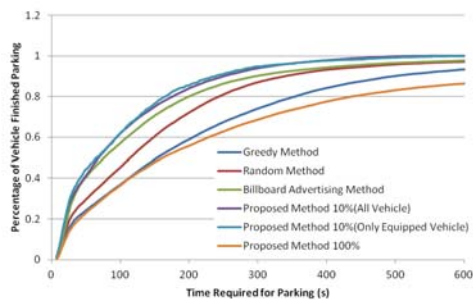


図 19 非均等入場における駐車待ち時間の CDF

案手法搭載率が高いほど、早く駐車できることが見られた。提案手法 (100%) は提案手法 (10 提案手法 (100%) 対 10%全車両の性能の向上率は均等入場と非均等入場のケースにおいてそれぞれ 25%, 10%が向上している。

この原因は、搭載率が高いほど、車両の流れが統率され、場内渋滞が発生しにくくなったからであると考えられる。さらに、提案手法搭載率 10%の場合、提案手法搭載車と未搭載車のパフォーマンスの差が大きい。搭載車対未搭載車の性能向上率はそれぞれ 23%, 18%向上している。興味深い結果は、非均等入場のケースにおいて、提案システムを搭載する車両がわずかでも、全体の駐車待ち時間が短縮される効果が見られた。

均等入場のケース：全手法において、80%の車両が駐車し終わるまでにかかった時間と解析は以下である。

- グリーディ手法 350 秒。人気駐車場を次々に探索するため、駐車場の利用率が高ければ、駐車可能スペースが見つかるまで長い時間を要することになる。
- ランダム手法 170 秒。ランダムに駐車する場合、車両はバランスよく分散しているため、駐車場の利用率が 8 割を超えるまで、効率良く駐車ができた。
- 案内板手法 160 秒。効果はランダム駐車と拮抗している。ドライバーに与える情報が多い分、わずかに性能が良い。
- 提案手法 (搭載率 10%) 全車両平均 150 秒。案内板手法とランダム手法よりちょっとだけ性能は良いが大差ではない。150 秒~170 秒はスムーズに駐車できた目安と考えたら良い。
- 提案手法 (搭載率 10%) 搭載車両のみは 120 秒。提案手法を搭載した車両は最も駐車しやすい経路を提示されているため、もっと短い時間で駐車ができている。ただし、非搭載車による推定誤差の関係で、搭載率 100%より若干性能が低い。
- 提案手法 (搭載率 100%) は 110 秒。全車両は最も駐車しやすい経路を提示され、それに従っているため、非常に短い時間で駐車ができた。

非均等入場のケース：同様な車両数でも、均等入場よりも場内渋滞が深刻である。実際、ゲート g-3 は他のゲートよりも多い車両が到来し、ゾーン pz-4 は非常に混雑した。

全手法において、80%の車両が駐車し終わるまでにかかった時間と解析は以下である。

- グリーディ手法 420 秒。均等入場時と本質的に同様である。場内の渋滞がさらに深刻になるため、待ち時間がさらに長くなる。
- ランダム手法 380 秒。多くの車両はゾーン pz-4 の混雑に巻き込まれてしまったため、駐車待ち時間が大幅に増加した。この結果から、場内フローが均等でない駐車場では、ランダム駐車は性能が悪いといえる。
- 案内板手法 240 秒。入場時に各ゾーンの利用情報が与えられ多くの車両は pz-4 に入らずに他のゾーンに向かうため、ランダムやグリーディ法より大きく時間を短縮できた。シンプルな方法で良いパフォーマンスが得られるのも、世界中の駐車場に最も採用されている理由といえる。しかし、この方式では、多くの車両は同じ情報を与えられたため、多くのドライバーは同じ判断をするため、同じ駐車ゾーンに殺到してしまう問題が起こっている。
- 提案手法 (搭載率 10%) 全車両平均 180 秒。少数な車両が提案システムを搭載するだけで、全車両の駐車待ち時間が短縮されたのは興味深い結果である。提案手法搭載車は、最初の渋滞ゾーン pz-4 を避け、さらに他のゾーンの渋滞状況を予測したうえで行き先を探索する。その結果、提案手法搭載車は利用率の低いゾーンに行き、利用率の高いゾーンに行く車両数がわずかに減っただけで、他の車両も短い時間で駐車できるようになった。
- 提案手法 (搭載率 10%) 搭載車両のみは 180 秒。搭載車が未搭載車と比べ、駐車待ち時間はさほど変わらなかった。
- 提案手法 (搭載率 100%) は 170 秒。全車両が提案システムを搭載する場合、車両の流れが統率され、ほぼ最適な時間で駐車できるようになる。

この結果から、混雑した駐車場において、提案手法は顕著に性能を発揮できることが分かった。特に、提案手法を搭載する車両が少量にあるだけで、駐車場内のバランスを調節でき、全体の駐車待ち時間を短縮することができる。

4.4.2 駐車場容量、トポロジー変化の実験結果

異なる駐車場の容量や構造に対し、提案手法が同様に有効であるかどうかを確認するために実験を行った。実験では 4 種類のマップ (図 13, 15, 16, 17) を用いて、均等入場、非均等入場の各ケースについて検証した。入場車両台数は駐車容量によって実データをフィッティングして用いた。均等入場、非均等入場のケースにおいて駐車場容量を変化させたシミュレーションの結果をそれぞれ図 20, 21 に示す。

結果より駐車場の容量とゾーン数が増えるにつれ、駐車待ち時間が長くなったことが分かる。これは駐車場が大き

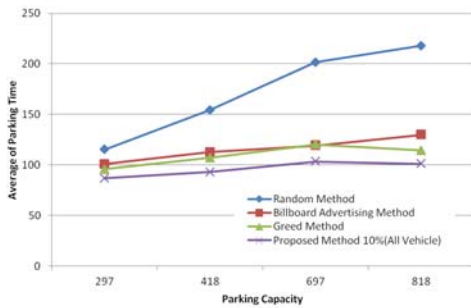


図 20 均等入場における駐車容量変化の結果

くると入場車両、及びゾーン間移動時間が増えたためである。ランダム方式では目的ゾーンが満車の場合、次の目的ゾーンをランダムに決定するため、移動時間が大きくなる可能性の高い大きな駐車場では駐車待ち時間が増加した。掲示板方式では入場時に空車ゾーンを提示し目的ゾーンとするが、駐車場が大きくなるにつれて目的ゾーンまでの移動時間が大きくなり、到達したときには入場時の状況とは変化しているケースが多くなったため、駐車待ち時間が増加した。グリーディー方式では人気ゾーンに車両が集中するため、入場車両数の増加するにつれて渋滞の規模も大きくなり、駐車待ち時間が増加した。それに対して、提案手法はほとんど渋滞を起こさずにスムーズに駐車できるため、短い時間で駐車を完了している。

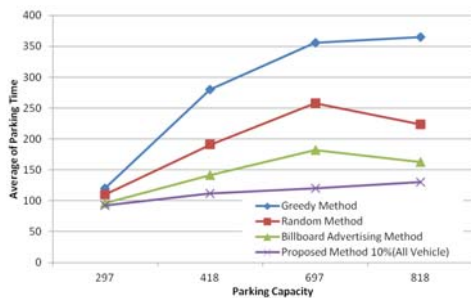


図 21 非均等入場における駐車容量変化の結果

この結果から、駐車場の構造や容量に影響されずに、提案手法は安定した性能を発揮できることが分かった。

4.4.3 推薦経路長変化の実験結果

上記の2実験では、提案手法の有効性を示せたが、推薦経路の長さが駐車待ち時間に対する影響をこの実験で考察する。実験に使用した方法は、搭載率100%の提案手法のみである。実験に用いたマップは容量818のマップ(図13)で、均等入場、非均等入場の各ケースで実験を行った。ただし、推薦経路を完走しても駐車できなかった場合、経路の再推薦を行わずに、ランダム方式で行き先を決める。その結果を図22に示す。

推薦経路1ホップの場合、ドライバーに与える駐車ゾーン候補は1つのみで、案内板方式と同じになるため、ホップ数を2~6までとした。その結果、推薦経路は2ホップの

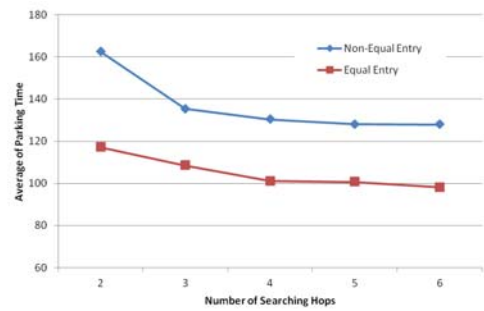


図 22 推薦経路長変化の結果

場合、駐車待ち時間は160秒となっており、この結果は実験1の案内板方式と大差はない。その原因は、ドライバーに与える駐車場候補は2つで、案内板方式より1つ多いが、混雑した場内では、失敗する可能性が高い。一方、推薦経路3ホップになれば、平均駐車待ち時間は110程度となり、提案手法の性能を大きく向上させた。3ホップ以上経路を推薦しても、特に顕著な影響は見られなかった。この結果によって、提案手法の推薦経路ホップ数は3~4で十分と思われる。

4.4.4 再計算タイミング変化の実験結果

提案手法において、推薦経路が失敗するたびに、再度新しい経路を提案する方式に対して考察を行った。実験に用いた手法は搭載率100%の提案手法である。実験に用いたマップは容量818のマップ(図13)で、均等入場、非均等入場の各ケースで実験を行った。推薦経路の長さを1と4の2通りとした。均等入場、非均等入場のケースにおいて実験結果をそれぞれ図23,24に示す。

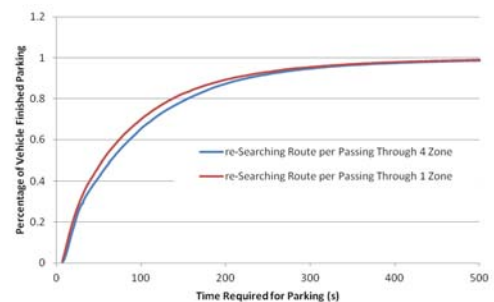


図 23 均等入場における推薦経路再計算のタイミング変化の結果

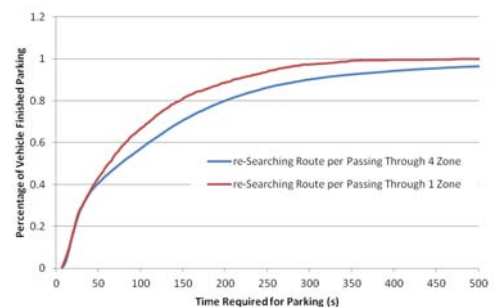


図 24 非均等入場における推薦経路再計算のタイミング変化の結果

均等入場, 非均等入場どちらの場合もわずかに推薦経路長さ1の場合が性能が良い結果が確認された. その理由は, 推薦経路を計算する際, 経路が長いほど, 誤差が蓄積されるからである. しかし, 1個だけ駐車ゾーンを辿り, すぐに再計算すれば, ほとんど誤差なく最適なゾーン選択できるため, 駐車待ち時間も最短となる. しかし, それを実現するために, 駐車場管理サーバから駐車場の利用状況を頻繁に取得しなければならない. 車両台数が多い場合, 通信トラフィックの混雑を招き, 通信帯域使用の観点では好ましくない. 一方, 推薦経路長さ4の場合は, わずかな待ち時間と引き換えに, サーバは定期的に利用状況をブロードキャストするだけで実現できるため, コストパフォーマンスの良い方式と考えられる.

5. 結論

本稿では, 大型立体駐車場において, 各車両が入場してから駐車するまでの駐車待ち時間を短縮することを目的とし, システムの導入コストや普及率を考慮した駐車場ナビゲーション手法を提案した. 奈良市内の大型ショッピングセンターを模した駐車場シミュレータを作成し, 評価シミュレーションを行った. 実験結果より, 提案手法を用いることで比較対象手法に比べ平均20~50%程度, 入店所要時間が削減できることが分かった. また, 駐車場の構造や容量を変化させてシミュレーションを行った結果, 提案手法は駐車場の構造や容量に影響されずに, 安定した性能を発揮できることが分かった. 一方, 提案システム普及率による影響に対して評価を行った結果, 低い普及率の場合においても, 提案手法は有効に駐車待ち時間を短縮することが見られた. また, 場内車流量が均衡となる駐車場よりも, 入出場車流量が不均衡で, 渋滞が発生しやすい環境において提案手法の効果が顕著に現れる傾向が見られた.

参考文献

- [1] Y. Iwasaki and H. Itoyama, "Real-time Vehicle Detection Using Information of Shadows Underneath Vehicles," In Proceedings of IETA pp. 93-97, 2005
- [2] J. Chinrungrueng, U. Sunantachaikul, and S. Triamlumlerd, "Smart parking: an application of opticalwireless sensor network," in Proceedings of the the 2007 International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINTW' 07), Hiroshima, Japan, pp. 66-69, January 2007.
- [3] Y. Bi, L. Sun, H. Zhu, T. Yan, and Z. Luo, "A parking management system based on wireless sensor network," In Proceedings of ACTA AUTOMATICA SINICA, Vol. 32, No. 6, pp. 38-45, November 2003
- [4] V. Tang, Y. Zheng, and J. Cao, "An intelligent car park management system based on wireless sensor networks," in Proceedings of the First International Symposium on Pervasive Computing and Applications, Urumchi, Xinjiang, P.R. China, pp. 65-70, August 2006.
- [5] R. Lu, X. Lin, H. Zhu, and X. Shen, "SPARK: A New VANET-based Smart Parking Scheme for Large Park-

- ing Lots" in Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) 2009, pp1413-1421, 19-25 April 2009.
- [6] M. Caliskan, A. Barthels, B. Scheuermann, M. Mauve, "Predicting Parking Lot Occupancy in Vehicular Ad-Hoc Networks," in Proceedings of IEEE VTC 2007 Spring pp. 277-281, 2007.
- [7] R. Panayappan, J. Trivedi, A. Studer, and A. Perrig, "VANET-based approach for parking space availability" in Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2007), Montreal, Quebec, Canada, pp. 75-76, Sept. 2007.
- [8] E. Abbott and D. Powell, "Land-vehicle Navigation Using GPS" In Proceedings of the IEEE Volume 87, pp.145-162, 2002.
- [9] Y. Gu, A. Lo, and I Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," In Proceedings of IEEE Communications Surveys & Tutorials, pp. 11(1):13-32, 2009.
- [10] P. Bahl and V. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RFbased user location and tracking system," In Proceedings of IEEE INFOCOM, pp. 775-784, 3, 2000.
- [11] N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The cricket location support system," Proceedings of ACM MobiCom, pp. 32-43, 8, 2000.
- [12] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS)," In Proceedings of IEEE GLOBECOM, pp. 2926-2931, 2001.