

推薦論文

Smart Access Vehicle System : フルデマンド型公共交通配車システムの実装と評価

中島 秀之^{1,a)} 小柴 等^{2,b)} 佐野 渉二^{1,c)} 落合 純一^{3,d)} 白石 陽^{1,e)} 平田 圭二^{1,f)}
野田 五十樹^{3,g)} 松原 仁^{1,h)}

受付日 2015年7月7日, 採録日 2016年1月12日

概要: 筆者らは, デマンド応答型公共交通の一種である Smart Access Vehicle System (SAVS) の社会実装を目指して, これまでにシミュレーション実験による利便性評価を行う中でその効率性を確認してきた. 本論文では, SAVS の実装, 実証実験, およびシミュレーション評価実験について述べる. 2回にわたる実証実験において, SAVS が実際に稼働することを確認した. フルデマンド型乗合車輛複数台のリアルタイム自動配車は筆者らの知る限り世界初であり, このシステムを全自動で稼働できたことは, Smart Access Vehicle サービスの社会実装を行ううえで有用な成果であると考えている.

キーワード: スマートシティはこだて, Smart Access Vehicle (SAV), Demand Responsive Transportation (DRT), 配車システム

Smart Access Vehicle System: Implementation and Evaluation of a Vehicle Operation System for Demand Responsive Public Transportation

HIDEYUKI NAKASHIMA^{1,a)} HITOSHI KOSHIBA^{2,b)} SHOJI SANO^{1,c)} JUNICHI OCHIAI^{3,d)}
YOH SHIRAISHI^{1,e)} KEIJI HIRATA^{1,f)} ITSUKI NODA^{3,g)} HITOSHI MATSUBARA^{1,h)}

Received: July 7, 2015, Accepted: January 12, 2016

Abstract: Our aim is to implement a new demand responsive public transportation, Smart Access Vehicle System (SAVS). We confirmed the efficiency of SAVS by simulation, and then we conducted field tests to confirm that the system is actually operational. As far as we know, we succeeded in the world-first fully automatic operation of multiple vehicles with real-time rerouting. We regard this as an important step toward real-world implementation of SAVS. We report the results of field tests and the system used there.

Keywords: Smart City Hakodate, Smart Access Vehicle, Demand Responsive Transportation, vehicle operation system

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

² 文部科学省科学技術・学術政策研究所
National Institute of Science and Technology Policy, Chiyoda, Tokyo 100-0013, Japan

³ 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Ibaraki 305-8560, Japan

a) h.nakashima@fun.ac.jp

b) hitoshi.koshiba@nistep.go.jp

c) sano@fun.ac.jp

d) j.ochiai@aist.go.jp

e) siraisi@fun.ac.jp

f) hirata@fun.ac.jp

g) i.noda@aist.go.jp

h) matsubar@fun.ac.jp

1. はじめに

本論文では中規模都市を対象とした新たな公共交通機関 Smart Access Vehicle System (以下, システム全体を指す場合には SAVS, 個々の車輛の場合は SAV とする) の実装と実証実験におけるシステム運用, およびシミュレーション評価について述べる.

現在の地方都市の公共交通の課題として, バスの利用者が少ないために, バスの運行本数が減ることで利便性が低

本論文の内容は 2014 年 7 月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウムにて報告され, 高度交通システムとスマートコミュニティ研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

下し、さらに利用者が減少するという負のスパイラルに陥っていることがあげられる。そこで、我々はスマートシティはこだて [1] の一環として、新しい公共交通システムとして SAVS を提唱し、これまでに SAVS を実運用するためのサービスデザイン [2]、移動手段に関する人流（デマンド）の基礎調査 [3]、SAVS の利便性評価・配車評価のためのシミュレーション基盤の構築・運用 [4] を行ってきた。これらの結果から、我々は公共交通の利便性という評価軸でみた場合に SAV サービスが社会にとって有用である [5] と判断しており、SAVS の社会実装を推進している。すなわち、利便性の高い公共交通システムの導入により公共交通が活性化され、都市内移動における自家用車の必要性が減ることで、ユーザ、事業者、そして自治体のすべてにとって Win-Win-Win の関係が築けると考えている。同時に、交通渋滞や CO₂ 排出量の削減にも貢献するはずである。

スマートシティはこだて構想としては、現状のバス、タクシーを含む、はこだて圏におけるすべての都市内公共交通を SAVS に置き換えることを目指すが、本論文では、はこだて圏の中核である函館市において SAVS を社会実装することを想定している。すなわち、約 10km 四方を領域とする人口 30 万人程度の中都市規模を対象とし、数千台の車輛を使用した公共交通網を考える。

本論文では、デマンド応答型で乗合いを許容するリアルタイム完全自動配車システムである SAVS の実装と評価について述べる。また、SAVS がリアルタイムで完全自動配車できることの実証と乗客によるスマートフォンアプリ、ドライバによるタブレット端末アプリの操作性を確認するために行った 2 回の実証実験の結果を示す。さらに、シミュレーション評価実験により、函館市内のバス、タクシーを SAV に置き換える場合には、1 時間あたり 2.5 万件程度のデマンド（配車リクエスト）（デマンド数見積り）の根拠については 5.1 節）に対し、SAV がおよそ 3 千台あれば、円滑に運行できることを示したことについて述べる。

以下、2 章で SAVS の概要、3 章で SAVS の設計と実装について示す。4 章では、2013 年 10 月、2014 年 4 月に行った 2 回の実証実験の概要とその結果について述べ、5 章でシミュレーション評価実験により函館市で SAVS を実運用する場合の利便性について評価する。6 章で今後の課題について記し、7 章でまとめる。

2. Smart Access Vehicle System の概要

SAVS は形態としてはデマンド応答型公共交通 (Demand Responsive Transportation : DRT) [6], [7] の一種で、その特徴としては、

(1) 乗客からのデマンド応答処理を予約ベースでなく即時ベースとしたことで、従来のバスとタクシーを輸送モードの 1 つとして含むような上位の輸送システムが実現できる。

(2) 乗客輸送を制御するパラメータ、たとえば移動経路、出発時刻、乗合可否などを動的かつ連続値として設定できる。柔軟にサービスレベルを変更することで、コストと利便性のトレードオフに対処できる。

(3) 過疎地域ではなく都市全域の規模を対象としている。ある規模を超えると、現状のタクシーとバスによる乗客輸送システムの効率を上回る領域があることがシミュレーション結果から明らかになっている。

などがあげられる。

SAVS は固定経路を持たず、呼び出しに応じて、場合によっては乗合いながら乗客を目的地まで届ける。つまり、従来のタクシーとバスを統合したようなシステムである。SAVS はユーザの要求が生じたときに SAV を呼び出す方式をとるが、タクシーと違い、乗車位置と降車位置の両方を告げることにより、配車システムが最適の車輛を自動で選び出せるようにしている。

現在、DRT の運行・実証実験は世界中で行われているが、SAVS 以外はすべて過疎地域を対象としたものである [8]。日本においても、NTT 方式 [9]、コンビニクル [10] などの DRT が運行されているが、過疎地を対象としたものであることに加え、人手で配車を行っていたり、乗車位置、降車位置が限定されたりしており、ユーザが乗車位置、降車位置を任意の位置に指定できること、コンピュータによりリアルタイムで全車輛の配車を行えることをともに満たすシステムは存在しない。

DRT の運行が過疎地を対象としていることは、これまでに行われてきた既存システム [8], [9], [10] の実証実験などの結果から、都市部ではフルデマンド方式は効率が悪いという結果を得ているためであると推測される。しかしながら、我々はシミュレーションにおいて、都市部においては少数台車輛の投入では（上記、既存システムの実証実験結果通り）運行効率が下がるが、ある程度以上の車輛を投入すれば現状より効率が改善されるという結果を得ている [11], [12]。

既存システムによる実証実験では少数台の投入しか行われていないため、効率の悪い部分が出たと考えられる。実運用する場合には、対象地域の道路交通環境、走行車輛密度（交通渋滞発生状況）や積雪などの交通事情、利用者数を含む様々な要素が関わるが、ある程度以上の車輛を投入することで運行効率が改善されるという傾向に変わりはないと考える。このため、我々は函館市全域での SAVS 運用（函館市内のすべてのバスとタクシーを統合した運用*1）を目指している。

*1 従来型のバスやタクシーは残らないという前提でデザインするが、バス型定時運行やタクシー型占有（非乗合）運行も SAVS の輸送モードの特殊ケースとして実現可能である。

3. SAVS のシステム構成

3.1 全体構成

SAVS は大まかには以下より構成される：

- (1) ユーザ*2がデマンドを入力するためのアプリケーション (乗客 App)
- (2) SAV ドライバがデマンドを確認するためのアプリケーション (車載 App)
- (3) デマンドに応じて最適な車輛と訪問順序を計画する配車システム

また、これらのサブシステムはデータベースを介したデータのやりとりにより連携を実現する (図 1)。これにより、SAVS は人間のオペレータを介することなく、デマンドの受付から SAV の配車までを自動で処理する。全自動での対応は、SAV サービスの提供上重要であるだけでなく、サービスを社会実装する際に有用な特徴である。つまり、全自動化を行うことで、普段は既存のタクシー配車システムとして使いながら、ある特定の日だけ配車アルゴリズムを切り替えることでタクシーを SAV として運行するというような利用方法が可能となり、事業者らが運行の実態を見ながら徐々に SAV を導入することも可能である。

3.2 乗客 App

乗客 App (図 2) は、ユーザが自身のデマンドを入力・通知 (配車リクエスト) するためのアプリケーションで、後述する配車システム (3.4 節) でデマンドを処理した結果、

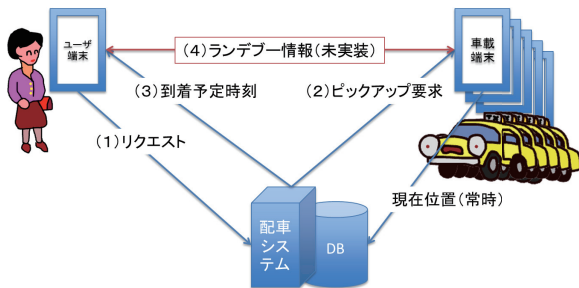


図 1 SAVS の全体構成
Fig. 1 Structure of SAVS.



図 2 乗客 App の画面
Fig. 2 Passenger application screen.

*2 ユーザと乗客の境界は定かでないが、本論文では、乗車前はユーザ、乗車中は乗客とする。

デマンドが SAV に割り当てられると、何時頃に乗車・降車 (目的地到着) できそうかという見込み時刻が表示される。なお、これらのサービスを提供するために、乗客 App 起動中はユーザの位置情報を収集し、適宜配車システムに送信している。乗客 App の機能を以下に示す：

(1) SAV の配車リクエスト

- (a) 乗車位置を地図上で指定する。デフォルト (アプリ起動時) はユーザの現在位置。オプションとしてドライバ向け目印を文字で指定できる。また、第 2 回実証実験よりあらかじめ登録されたランドマークからも指定できるよう改良した。
- (b) 降車位置を地図上で指定する。オプションとして降車位置に到着したい時刻として降車締切時刻を指定できる。つまり、会議や人との待ち合わせ、鉄道や航空機への接続などを考慮した締切時刻として指定できる。配車システムがこれに間に合わないと判断した場合、デマンドは拒否される。
- (c) ランドマークをリストから検索できる。第 2 回実証実験では函館の主な公共交通ターミナル、観光名所、レストランなどを用意した。これは乗客 App 起動時にダウンロードされる。

(2) SAV の状況確認

- (a) 配車リクエスト前は、すべての SAV の現在位置を地図上で確認できる。
- (b) SAV が割り当てられた後は、その SAV の現在位置を地図上に表示され、到着見込み時刻も確認できる。

3.3 車載 App

車載 App (図 3) は、SAV ドライバに向けて、乗客の乗車・降車位置や順序と、それらの更新を適時通知するためのアプリケーションである。配車システム (3.4 節) でデマンドを処理した結果、デマンドが SAV に配車されると、音で通知するとともに、アプリ画面の上の乗客リストと地図上の訪問順序を更新する。乗客リストには、乗せ間違い防



図 3 車載 App の画面
Fig. 3 Driver application screen.

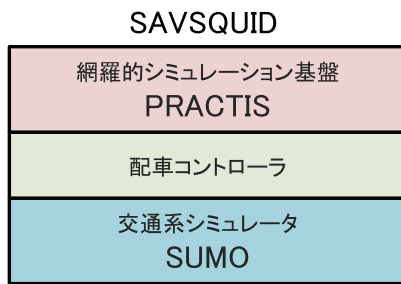


図 4 SAVSQUID
Fig. 4 SAVSQUID.

止のための乗客名, ユーザ入力による乗車地点の目印情報, 乗車位置・降車位置が表示される. また, ドライバが乗客の乗降をシステムに通知するために, 乗客の乗降を通知するボタン*3を有する. 本アプリは車輛の位置情報を定期的(現状のシステム設定は 60 秒ごと)にサーバに自動送信している.

3.4 配車システム

配車システムは, 配車リクエストに対して適当な車輛を探索するシステムである. この探索において, 乗合いのための寄り道に要する時間が少ない配車を実現し, 運行効率を高めなければならない. 4 章で述べるような少数台の実証実験では車輛選択の余地はあまりないが, 5 章で述べるシミュレーションのように我々は数千台規模の車輛数を想定しているため, それらの中から最適の(あるいはそれに準じた)1 台を選ぶことは重要課題である. なお, 以下に述べる現状のシステムはその意味では最適とはいえないが, ほぼ満足できるものである.

現状の配車システムは SAVS のためのシミュレーション基盤 SAVSQUID (SAVs Simulator for Qualitative Utility Investigation and Design) [13] (図 4) の機能限定版であるが, 各車輛の乗客数に上限を設けていること以外に大きな差はない. SAV の移動所用時間の計算などのベースとしては交通シミュレータ SUMO [14] 上の函館市の道路地図を用いた.

まず, 対象エリア内における 2 地点間の最適経路と移動時間をあらかじめ求めておく. 実際には SUMO の提供する貪欲法ベースの経路探索ツールを用いて, 事前に他の車輛などが存在しない理想状態で算出した結果をデータベース(移動コスト格納データベース)に記録しておく. そのうえで, 以下に示す逐次最適挿入法 [5] (図 5) により適切な SAV の探索を行う:

- (1) 配車システムが新たにデマンドを受けたときには, そのデマンドを各車輛*4に提示する.

*3 将来的には IC カードなどを使って乗降確認も自動化する予定である.

*4 実際には配車システム内で各車輛の経路を管理しているソフトウェアエージェントが計算するが, ここでは簡単のため車輛としている.

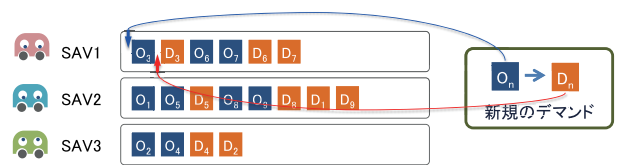


図 5 逐次最適挿入法
Fig. 5 Successive best insertion method.

- (2) 各車輛はデマンドの乗車地点および降車地点を各々, 現在の経由地点リストの任意の箇所に挿入し, 全経由地点における挿入により生じる遅延の総和を挿入前の達成予定時間と比較して求める. これを基に新しいデマンドの達成予定時間を求め, この達成予定時間と遅延の総和を挿入後のコストとする.
- (3) 乗車地点と降車地点の挿入場所のペアのすべての組み合わせについて (2) を計算し, コストが最小となるペアをデマンドの受け入れ候補とし, そのコストをもって入札する. ただし, 新しいデマンドの挿入により, 既存あるいは新しいデマンドの締切時間を過ぎてしまう場合は入札を行わない.
- (4) すべての入札のうち, コストが最小のものを選択し, その車輛にデマンドを配分する.

各車輛間での単純オークションで準最適解を求めるものとし, 車輛間での乗客の交換は行わず, いったん車輛に配車された訪問順序の前後関係はつねに保持される. また, ユーザが配車リクエストの際に指定した降車締切時間をオーバーしたり, 徒歩で移動した方が早くなると判断される場合には SAV の配車を拒否 (リジェクト) する. 配車計算はデマンド情報が記録されるデータベースを定期的(現状のシステム設定は 15 秒ごと)にチェックすることで行う. データベース上に新たなデマンドが検出されると, 配車システムは配車計算をそのつど実行し, その結果をデータベースに記録する. また, 乗客 App には乗車降車見込み時刻/リジェクトを通知し, 車載 App にはデマンドの配車情報を送信する.

4. 実証実験

4.1 概要

3 章で述べた SAVS を用いて実証実験を行った. 実証実験の目的は主に以下のサブシステムを用いて実際に SAV の運行 (配車リクエストの受付, 配車計画, 通信, 実走) ができることの検証, およびユーザインタフェースの操作性の確認である:

- (1) SAV ユーザのための配車リクエストシステム (乗客 App)
- (2) ユーザからのデマンドに応じて適切な車輛と訪問順序を選定する配車システム
- (3) SAV ドライバのための運転指示システム (車載 App)
なお, 小規模実験であるため, 現状では SAV 運行自体



図 6 第 1 回実証実験エリア (2013)
Fig. 6 Area of the 1st field test (2013).

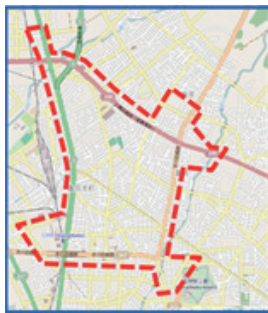


図 7 システムが配車リクエストを受付けた範囲 (青枠内)
Fig. 7 Available area in the 1st field test (2013).

の効率性 (乗客を目的地に如何に早く運べるかなど) は実験の対象としていない。

本章では、これまで 2013 年 10 月と 2014 年 4 月に行った実証実験について述べる。

4.2 第 1 回実証実験

- 期間：2013 年 10 月 24 日 (木)~30 日 (水) の合計 7 日間
- 場所：北海道函館市中心部の限定エリア (図 6)
- 車輛台数：5 台 (普通タクシー 3 台, ジャンボタクシー 2 台)
- ユーザ：事前募集の実験協力者 38 名

第 1 回実証実験エリアは、函館市街地である五稜郭からみて北西に位置する約 5km 四方のエリア (図 6) で、主要道路 (基本的に実験エリアの枠線内側に接する道路) 沿いに病院や複数のショッピングモール, 大規模電器店が点在し, 住宅街なども含んでいる. 一方で, 路線バスの乗り入れはほとんどないため自家用車利用が中心の地域である. なお, ユーザには図 7 のようにエリアを赤点線で表示した地図を渡したが, システム上では範囲を矩形で判定しており, 図中の青枠内であれば基本的にすべての配車リクエストを受付けることにした*5.

*5 サービスエリアをどのように規定するかは実験の主旨ではないし, 将来的にどのようなデザインになるかは確定していないからである.



図 8 第 1 回実証実験用乗客 App 画面
Fig. 8 Passenger application screen in the 1st field test (2013).



図 9 第 1 回実証実験の車載 App 画面
Fig. 9 Driver application screen in the 1st field test (2013).

表 1 第 1 回実証実験協力者の内訳
Table 1 Participants in the 1st field test (2013).

NPO 法人スマートシティはこだてによる募集	21 名
公立はこだて未来大学学生	15 名
一般参加	2 名

※一般参加は函館市が実施したノーマイカーデ어의応募者

第 1 回実証実験では, LTE 回線の契約を行ったスマートフォン (Android) を実験運営側で用意し, 乗客 App をインストールした状態で貸与して運用した. 第 1 回実証実験で用いた乗客 App のスクリーンショットを図 8 に示す. 車載端末としては, ドライバの可視性などを勘案して, LTE 回線の契約を行った液晶サイズが大きめ (10.1 インチ) のタブレット端末 (Android) を用意して運用した. 第 1 回実証実験で用いた車載 App スクリーンショットを図 9 に示す.

SAV ドライバは事業者らの都合から期間中, 日ごとに入れ替わり, 専属のドライバはいなかった. また, タブレット端末の操作に慣れたドライバはほとんどいなかった. このため, 毎朝, SAV 運行開始前に車載 App だけではなくタブレット端末の操作方法を含めてドライバに説明した. 乗客候補となる実験協力者を募集した結果, 38 名の実験協力者を確保できた. 実験の本質とは関係ないが, 38 名の内訳を表 1 に示す.

第 1 回実証実験では, 実験協力者が自宅や職場から SAV を利用することも想定していた. それらを乗車位置または降車位置として指定された場合に備え, プライバシ保護,



図 10 オペレーション支援システムの画面
Fig. 10 Support system screen.

個人情報保護の観点から、公立はこだて未来大学学生も含め、実験協力者の募集と管理はNPO法人スマートシティはこだてに一任したため、個人情報は我々実験運営者には開示されていない。

4.2.1 オペレーション支援システム

SAV 運行モニタリングと故障時のマニュアル介入のために、各車輛の位置や、デマンドの配車状態を可視化するオペレータ向けツールを用意した。実証実験中はSAVサポートセンタを設置し、乗客App、車載Appの使い方に関する問い合わせに答えるなど、実験協力者やドライバをサポートした。後述のように、このシステムは実証実験前半で故障診断マニュアル介入などに活躍したが、自動運転が可能となった後半では実時間運行監視モニタとして使われた。オペレーション支援システムのスクリーンショットを図10に示す。

4.3 第2回実証実験

- 期間：2014年4月27日(日)
- 場所：北海道函館市中心部全域(図11)
- 車輛台数：16台(普通タクシー12台, ジャンボタクシー3台, 小型バス1台)
- ユーザ：サービス学会参加者のうち実験の協力者55名

第2回実証実験では外部業者委託によって、第1回実証実験でAndroid版のみであった乗客AppをiOS版にまで広げるとともに、乗客App(図12)、車載App(図13)それぞれのユーザインタフェースの改善を行った。

車載Appについては、乗客リスト上において、乗車(赤)と降車(緑)を色分けし、地図上の地点表示との対応付けが容易になるようにした。また左端に「休憩」「呼び出し」のボタンを配置した。ドライバーからの「休憩」リクエストが入ると配車システムはそのSAVに新たなデマンドを割



図 11 第2回実証実験エリア(2014)
Fig. 11 Area of the 2nd field test (2014).



図 12 第2回実証実験用乗客App画面(左はホーム、右はリクエスト中)
Fig. 12 Passenger application screen in the 2nd field test (2014).

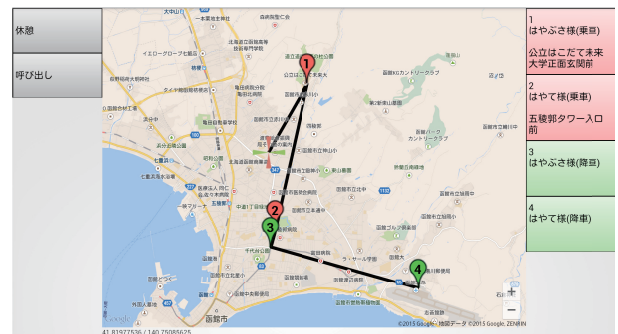


図 13 第2回実証実験の車載App画面
Fig. 13 Driver application screen in the 2nd field test (2014).

り当てず、乗車中の乗客がすべて降車した時点でドライバーは休憩に入ることができる。休憩モードに入るとこのボタンのテキストは「運行開始」に変わる。つまり、有効なボタンだけを表示*6するようにした。「呼び出し」は乗客が

*6 UIにおいてボタンのデザインには2派が存在する。現在状態を表示する(ビデオ再生中には再生状態の意味で▶を表示する)方式と、動作を表示する(ビデオ再生中には停止ボタン◻を表示する)方式である。我々はいまのところ後者を選択しているが今後の吟味が必要である。



図 14 第 2 回実証実験の走行状況

Fig. 14 Experimentation situation in the 2nd field test (2014).

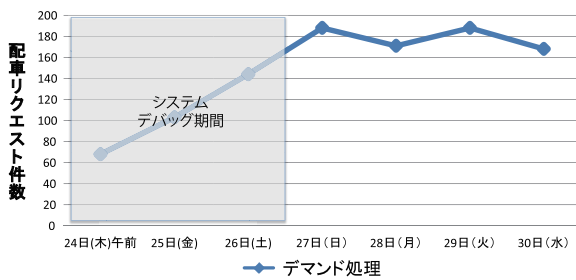


図 15 第 1 回実験の運行統計

Fig. 15 Result of the 1st field test (2013).

見つからないなどのトラブルのときに SAV サポートセンターに連絡するためのボタンである。

配車システムは基本的に同じであるが、第 2 回実証実験ではカバーする範囲が広いため、移動コスト格納データベースを用いた計算範囲を拡大した。この移動コスト格納データベースは配車ルート計算の一部をあらかじめ部分計算して格納しておくためのもので、配車システムの配車計算速度の向上のために重要である。ただし、経路計算を高速化 [15] できれば不要となろう。

ユーザとしては、実験運営側が用意した実験協力者ではなく、第 2 回サービス学会の参加者に協力を呼びかけ、乗客 App をダウンロード、インストールして使ってもらうこととした。なお、道路交通法の問題などを避けるため実験協力者にはアプリ配布前に NPO 法人スマートシティはこだて賛助会員の登録をしてもらうこととした。第 2 回実証実験では、サービス学会参加者、つまり、函館市外からのユーザが多く、乗車位置や降車位置として職場や自宅が含まれることがないと判断し、個人情報秘匿の配慮は行わなかった。

SAV 運行エリアとしては、学会参加者に函館観光を楽しんでもらうべく第 1 回実証実験より大幅に広げ、函館空港から函館駅前、函館山や五稜郭公園など主要観光施設を含んだものとした (図 11)。図 14 は実際の乗車中の様子で、左が乗客 App の「調べる」画面、右が SAV 車内風景である。黄枠内にあるのが車載タブレット端末である。

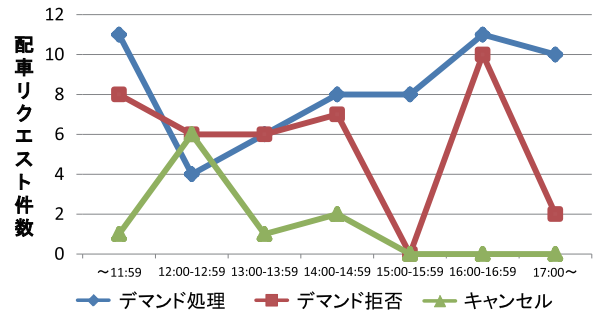


図 16 第 2 回実験の運行統計

Fig. 16 Result of the 2nd field test (2014).

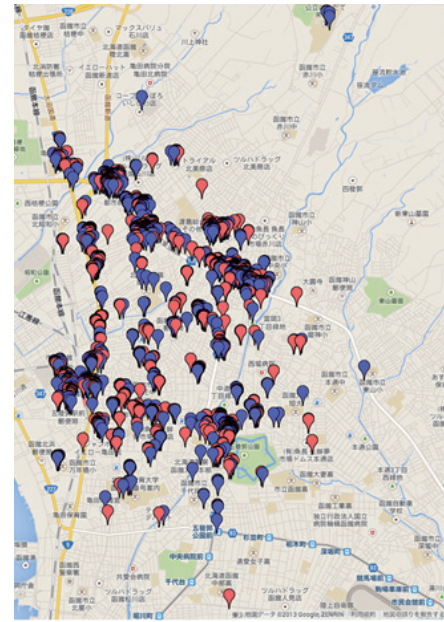


図 17 第 1 回実証実験の乗車位置 (青) と降車位置 (赤) の分布
Fig. 17 Record of all pick-up (blue) and delivery (red) points in the 1st field test (2013).

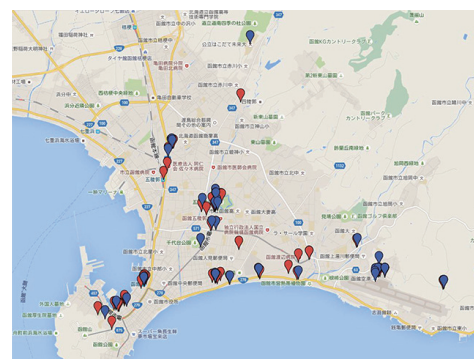


図 18 第 2 回実証実験の乗車位置 (青) 降車位置 (赤) の分布
Fig. 18 Record of all pick-up (blue) and delivery (red) points in the 1st field test (2014).

4.4 実証実験の結果

第 1 回、第 2 回の実証実験における SAV 運行実績をそれぞれ図 15、図 16 (横軸は時間、縦軸は配達リクエスト件数)、ユーザが配車リクエストを行った際に指定した乗車位置・降車位置を図 17、図 18 に示す。

まず、第1回実証実験の結果について述べる。図15において実証実験初期には様々なシステムトラブルが発生してそのデバッグを行ったため、運行データとしてはあまり意味をなさない。このため、最後の4日間がトラブルなく運行できた期間であった。この期間は通常の処理についてはオペレータを介さずに自動運行が達成され、1日あたり170件程度のデマンドを処理できた。一般タクシーの稼働レベルは1日あたり25件程度[16]であり、5台では125件程度となる。一般タクシー以上の数のデマンドが発生し、処理することができたといえる。なお、一般タクシーのデマンド処理数25件は12時間以上の稼働で達成されているため、SAVが11時間の運行時間であったことを考慮すると、170件のデマンドはSAVSの動作検証としては十分な量といえる。

次に、第2回実証実験の結果について述べる。第1回実証実験でシステムの稼働が確認されていたので、第2回実証実験は主としてユーザインタフェースの操作性の確認を行った。実証実験はサービス学会前日1日だけ運行し、計107件の配車リクエストを受付けた。このうち、SAVへの乗り降りまでを行えたものが58件、配車リクエストが配車システムによりリジェクトされたものが39件、SAVが配車されたのちにキャンセルされたものが10件あった。配車システムでリジェクトされた39件の多くは、降車締切時刻が短く設定されているもの、あるいは乗車位置と降車位置が近距離すぎることであった。この問題はユーザインタフェースの改善で避けることができ、今後の課題である。ユーザインタフェースの問題としては、ほかに、乗客AppのSAV呼び出しページの後戻り機能(1つ前の画面に戻る)やSAV呼び出し後のキャンセル機能がないこと、配車後のSAVの位置確認機能はあるものそこへの誘導が不親切なため、自分の呼んだSAVがどこに居るか分からずに結局乗れなかったことなどが明らかとなった。

なお、これらの実証実験の目的はSAVSの利便性^{*7}ではなく、SAVSが実運用できることの検証、および乗客App、車載Appユーザインタフェースの操作性の確認にある。効率良くさばける1台当たりの最大デマンド数などは、シミュレーションによる今後の検証を待つ必要がある。

これら実証実験の結果より、

- (1) ユーザの要望(デマンド)に応じて、
- (2) 実時間内に適切・妥当な車輛と訪問順序を決定(計画/推薦)し、
- (3) SAVに通達し、
- (4) SAVが実際にユーザのデマンドを満たす、という一連の動作を実現し、SAVSが実際に構築・運用で

^{*7} 公共交通システムとしての利便性の検証は実運用まで待たねばならない。たとえば、実証実験では料金徴収ができないため、どのくらいの価格であればSAVを利用するかは不明である。これとともに待ち時間や移動所用時間の許容度も不明である。

きることに、特に(2)、(3)の部分について人手を介さずに(自動的に)達成できることが検証できた。フルデマンド型乗合車輛複数台のリアルタイム完全自動配車は筆者らの知る限り世界初である。第1回実証実験において、1日あたり11時間の稼働を4日にわたり維持できたこと、第2回実証実験により、ほとんどはスマートフォンの操作に慣れていたと考えられるサービス学会参加者ではあったが、一般の方に対して中断なくSAVSを運用できたことは、SAVサービスの社会実装を行ううえで有用な成果となった。ただし、社会実装に向けては、ユーザインタフェースの操作性を向上させる必要があることが確認されたので、今後の課題として6章にまとめる。

5. シミュレーション評価実験

1章で述べたように、我々は函館市においてSAVSを実運用することを想定している。函館市でSAVSを効率的に運用できることを示すために、シミュレーション評価実験を行った。

5.1 シミュレーション評価実験の条件

実験に用いた道路網を図19に示す。道路網のデータはオープンストリートマップ[17]を用いた。緯度を41.744–41.852、経度を140.692–140.837として、約12km四方を対象領域とした。図19には17,785ノード、43,137リンクが含まれている。

シミュレーション評価実験に用いたパラメータの値を表2に示す。2010年時点で函館市の公共交通(バス、タクシー)利用者数は1日あたり約6万人である[18]。昼間12時間で6万人が移動すると仮定すると、1時間あたり0.5万件のデマンド(以下、配車リクエスト1件を1デマンドと表す)となる。また、SAVSが社会実装されると、現状の公共交通の利便性が低いために自家用車を利用している人が自家用車を手放し、SAVSを利用するようになると考



図19 実験に用いた道路網

Fig. 19 Real road network used for experiments.

表 2 シミュレーション評価実験に用いたパラメータの値
Table 2 Parameter values of simulation.

パラメータ	値
デマンド数	5,000, 25,000
デマンド発生時刻	範囲 [0 秒, 3,600 秒) の一様乱数
デマンドの乗車位置	ランダム
デマンドの降車位置	ランダム
デマンドの予約人数	1 人
車輛の速度	34.2 km/h
車輛の定員	3 人

えられる。昼間 12 時間に函館市の人口約 30 万人 [19] の半数が往復の移動を行うと仮定すると、1 時間あたり 2.5 万デマンド*8となる。本論文では、デマンドの乗車位置と降車位置をランダムに設定したため、1 時間あたり 0.5 万デマンドと 2.5 万デマンドの発生頻度に対して、それぞれ乱数のシードを変えて 10 回実験を行った。

SAV の平均速度は、国土交通省の調査結果 [20] により算出した。なお、シミュレーションにおいては加減速なく一定の速度で移動するものとしている。比較対象として、すべてのデマンドを自家用車で移動した場合を考えるが、自家用車の移動時間を SAV の平均速度とデマンドの乗車位置・降車位置間の距離から計算される移動時間と定義する。つまり、SAVS においては、デマンドが発生して（乗客が配車リクエストを行って）から SAV が乗車位置に着くまでの待ち時間、乗合いが生じて迂回する場合による遅延時間が生じるが、自家用車の移動時間はこれらの時間だけ短くなる*9。作成したデマンドリストに対して、自家用車の移動時間の平均値を計算すると、1 時間あたり 0.5 万デマンド、2.5 万デマンドともに 10 分であった。

シミュレータは Java 8 で開発した。実験環境は、CentOS 7, AMD Opteron 6282 SE, 128 GB RAM である。

5.2 シミュレーション評価実験の結果

まず、デマンドごとの車輛待ち時間の変化を図 20, 図 21 に示す。どちらも横軸は発生時刻でソートされたデマンド (数値は 1 から始まるデマンドの番号)、縦軸はデマンドごとの車輛待ち時間である。図 20 は 1 時間あたり 0.5 万デマンドの結果、図 21 は 1 時間あたり 2.5 万デマンドの結果である。ただし、傾向を見やすくするために 30 項移動平均を示している。

SAVS では時々刻々と発生するデマンドに対して、そのときどきで最良の SAV にデマンドを割り当てる。よって、デマンドの発生頻度に対して SAV の台数が少ないと、デマ

*8 観光客が積極的に利用するなど、利便性の向上とともに、ここで想定している以上に公共交通が需要喚起されることが期待される。

*9 実際には駐車場が必要であるので、自家用車の移動時間はこれより長くなるが、比較対象としては最善のケース (SAVS にとって是最悪のケース) を想定した。

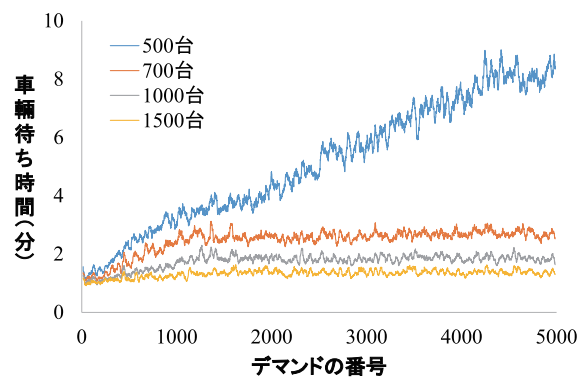


図 20 デマンドごとの車輛待ち時間の変化 (0.5 万デマンド)
Fig. 20 Variation of vehicle waiting time of each demand (5,000 demand).

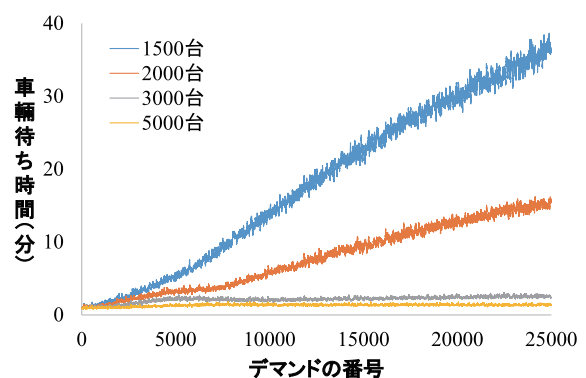


図 21 デマンドごとの車輛待ち時間の変化 (2.5 万デマンド)
Fig. 21 Variation of vehicle waiting time of each demand (25,000 demand).

ンドが生じたときに満席となっている SAV が増え、SAV が空席になるまで待たなければいけないため、デマンドの車輛待ち時間は増加傾向となる。図 20 を見ると、1 時間あたり 0.5 万デマンドでは車輛 700 台、図 21 を見ると、1 時間あたり 2.5 万デマンドでは車輛 3 千台が必要であることが分かる。

次に、全デマンドに対する評価実験結果を表 3 に示す。自家用車との比較の項目は、SAVS での所要時間 (SAV 待ち時間+移動時間 (乗合いにより迂回する場合あり)) と自家用車の移動時間の差を表しており、自家用車に対する SAVS の遅延時間を意味する。乗合回数の項目は、乗客が SAV に乗車してから降車するまでの間に、乗合いになった他の乗客の人数を表す。図 20 より 1 時間あたり 0.5 万デマンドでは 700 台、図 21 より 1 時間あたり 2.5 万デマンドでは 3 千台が SAV を円滑に運行するために必要な台数であると判断し、その両者を函館市で SAV を実運用するための閾値とし、表 3 では太字で強調した。

表 3 より、1 時間あたりの各デマンド数に対して、閾値未満では乗合いが多く発生していることが見て取れるが、これは、デマンドに対して SAV の運行が間に合っておらず、乗客が降車する前に次のデマンドが発生してしまうた

表 3 全デマンドによるシミュレーション評価実験結果
Table 3 Simulation results of all demands.

デマンド数	車輛台数	車輛待ち時間 (分)			自家用車との比較 (分)			乗合回数		
		平均値	標準偏差	最大値	平均値	標準偏差	最大値	平均値	標準偏差	最大値
5,000	200	48	28	114	54	27	118	3.17	0.68	6
	300	22	13	54	28	13	63	2.96	0.67	6
	500	5	2	14	9	3	21	2.27	0.66	4
	700	2	1	9	5	1	12	1.28	0.51	3
	1,000	2	1	6	3	1	7	0.31	0.19	2
	1,500	1	1	5	2	1	6	0.05	0.07	1
	2,000	1	0	4	2	1	6	0.01	0.04	1
25,000	500	121	69	280	129	68	285	3.42	0.72	9
	1,000	42	26	106	49	26	111	3.21	0.66	7
	1,500	18	12	52	24	12	57	2.99	0.67	7
	2,000	8	5	25	13	5	29	2.68	0.69	6
	3,000	2	1	9	5	1	13	1.69	0.63	4
	5,000	1	1	5	2	1	8	0.16	0.13	1
	10,000	1	0	6	2	0	7	0.00	0.02	1

めであると考えられる。一方で、閾値より多くの車輛を導入した場合、平均では2分未満でSAVが乗車位置に到着し、所要時間も自家用車と比べて平均3分未満の違いしかない。閾値より多くのSAVを導入することで利便性が高くなるが、ほぼ乗合いが発生していないことから、タクシーと同等の交通システムとなることが分かる。

現実には即したデマンドの発生条件やSAV配置戦略を考慮したシミュレーション評価実験については、今後行う予定である。

5.3 考察

シミュレーション結果を基にSAVSを函館市で社会実装することを想定して考察する。5.2節で述べたように、現状の公共交通利用者を想定した1時間あたり0.5万デマンド(シナリオ1)ではSAVが700台、SAVS実運用による需要喚起を想定した1時間あたり2.5万デマンド(シナリオ2)ではSAVが3千台必要という結果となった。ただし、シミュレーション評価実験においてはデマンド(乗車位置、降車位置)をランダムに発生させているが、実際には、空港や駅、主要な観光地などでデマンドがまとまって発生することが想定される。このため、デマンドを予測して戦略的かつ適切にSAVを事前に配置することでSAVの運行効率を上げられる。つまり、デマンドをランダム発生させるというシミュレーション条件は、SAVの運行効率に対してワーストケースであると考えており、上述のSAV台数より減らしても円滑に運用できると考えられる。

現在の函館市におけるバスとタクシーを合わせた総車輛数は約1千台である[18]。シナリオ1においては、現状のバスとタクシーをSAVに置き換えることで実現できる。シナリオ2については、函館市内の現状のバス、タクシーをすべてSAVとして利用してもSAVSを円滑に運行でき

る3千台には達しない。しかし、現状に即したデマンド発生条件とすることでこれよりも少ない台数でも円滑に運行できると考えられること、仮に3千台のSAVを要するとしても、シナリオ2では現状で自家用車を利用して移動している人がそれを手放してSAVSを利用することを想定しており、手放された自家用車をSAVとして用いることを考えると函館市において3千台のSAVを投入することは現実的であると考えられる。

6. 今後の課題

現状では、実証実験によるSAVSの動作確認と、シミュレーションによる函館規模の都市での実現可能性の確認に留まっている。社会実装に向けた今後の課題を以下にあげる。

- 乗客Appのユーザインタフェースの改善：乗客に様々な情報を提供するとともにSAV配車後のキャンセル、変更、エラーへの対応を可能にする必要がある。また、乗車位置、降車位置を地図上で示す場合に全体がちょうど入りきる縮尺への自動ズーム機能が望まれる。
- 車載Appのカーナビとの連携：現在、車載Appではユーザが指示した乗車位置、降車位置間を直線でつないだものが表示されているのみである。実証実験においては、実際のSAVの走行経路はドライバに任せだが、ドライバからはカーナビとの連携を望む声が多い。また、乗客App同様に、乗車位置、降車位置を地図上で示す場合に全体がちょうど入りきる縮尺への自動ズーム機能(あるいはそのような表示モードに遷移するボタン)の追加が望まれる。
- 車載Appの操作性の向上：押し間違いの取り消しなどが必要である。SAV走行時の情報提示に音声を用いることが望まれる。また、現在の静電式タブレット

トでは手袋装着時に操作できないため、圧力式のタッチパネルの使用（あるいは静電式に対応した手袋の装着）が望まれる。

- 通信方式：現在は携帯電話網による通信を行っている。設備導入コストは安いが運用コストが高額になる。タクシー用デジタル無線などの利用が望まれる。
- 乗客と SAV ドライバが相互に相手の位置を確認する方法：現在、SAV の位置は乗客端末で確認できるが、ドライバが乗客位置を確認する方法がない。図 1 で未実装としている部分であるが、地図上で相手の位置を表示するなどの方法が必要である。また互いの位置以上のランデブー（待ち合わせ）情報の提示の可能性も探る必要がある。
- 戦略的かつ適切な SAV の事前配置：空港などで多くの乗客が見込まれる場合の配車や待ち合わせ方式の洗練が必要。
- 学習機能：あらかじめ予測されるデマンドに備えて空き車輛の配置を行う。
- アプリ機能の拡充：（当該アプリからの予約など）ルート検索アプリなど他のアプリと連携する。
- 料金体系のデザイン、法的問題：実稼働に向けた料金体系などのデザイン、法的問題を含めて確認する必要がある。
- 現実的な状況でのシミュレーション：統計データを基に現実的なデマンドの発生条件や SAV 配置戦略を考慮したシミュレーションを行う必要がある。

7. まとめ

本論文では、SAV サービスの社会実装を目的として、シミュレーション実験を行い、サービスデザインを通じた SAVS の実装、および実証実験、シミュレーション評価実験の結果について述べた。システム開発を行ったうえで函館市において 2 回の実証実験を行い、当初の目標通り、全自動でのデマンド受付、配車を実現できた。フルデマンド型乗合車輛複数台のリアルタイム自動配車は筆者らの知りうる限り世界初であり、SAV サービスの社会実装を行ううえで有用な成果となった。つまり、全自動での対応が達成できたことで、普段は一般のタクシー配車システムとして使いながら、特定の日だけアルゴリズムを切り替えることで既存のタクシーを SAV として運行するという利用方法が可能となり、事業者らが実態を見ながら徐々に SAV サービスを導入するという導入方法が可能であることが分かった。

またシミュレーションによって函館規模の都市での SAVS 導入が現実的なものであることが確認できた。

今後、本論文の実証実験結果やシミュレーションの結果に基づいて SAV サービスをデザインしていく予定である。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構社会技術研究

開発センター（JST RISTEX）の問題解決型サービス科学研究開発プログラム「IT が可能にする新しい社会サービスのデザイン」の研究助成によって行われている。また、実証実験においては函館タクシー株式会社と函館バス株式会社、路線バスの知見などについては函館バス株式会社の協力を得た。実験協力者の募集・管理については NPO 法人スマートシティはこだての協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 中島秀之, 白石 陽, 松原 仁:「スマートシティはこだて」の中核としてのスマートアクセスビークルシステムのデザインと実装, 観光情報学会, Vol.7, No.1, pp.19-28 (2011).
- [2] 松原 仁, 中島秀之, 平田圭二, 佐野渉二: 新しい都市型公共交通サービスのデザイン, サービス学会第一回国内大会, pp.304-307 (2013).
- [3] 佐野渉二, 金森 亮, 平田圭二, 中島秀之: スマートシティはこだてプロジェクト: 人流シミュレータ構築に向けた交通行動調査結果の速報, 人工知能学会社会における AI 研究会第 16 回研究会, pp.1-6 (2013).
- [4] 小柴 等, 野田五十樹, 平田圭二, 佐野渉二, 中島秀之: Smart Access Vehicles の社会実装—シミュレーションを通じた分析と実証, 情報処理学会知能システム研究会研究報告, Vol.2014-ICS-174, No.1, pp.1-8 (2014).
- [5] 野田五十樹, 篠田孝祐, 太田正幸, 中島秀之: シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.242-252 (2008).
- [6] Hiekata, K., Yamato, H. and Tsubouchi, K.: A Demand Responsive Transit Service with Emphasizing on Better Punctuality, *Proc. 5th International Workshop on Intelligent Transportation*, pp.93-98 (2008).
- [7] 田柳恵美子, 中島秀之, 松原 仁: デマンド応答型公共交通サービスの現状と展望, 人工知能学会全国大会, 2J4-OS-13a-1, pp.1-4 (2013).
- [8] Ambrosino, G., Nelson, J.D. and Romanazzo, M. (Eds.): Demand Responsive Transport Services: Towards the Flexible Mobility Agency, *Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment* (2004).
- [9] 奥山修司: おばあちゃんにやさしいデマンド交通システム, NTT 出版 (2007).
- [10] 坪内孝太, 大和裕幸, 稗方和夫: オンデマンドバスシステムの実証実験による評価運輸政策研究, Vol.10, No.4 (2008).
- [11] 野田五十樹, 太田正幸, 篠田孝祐, 熊田陽一郎, 中島秀之: デマンドバスはベイするか?, 情報処理学会知能と複雑系研究会研究報告, Vol.2003-ICS-131, pp.31-36 (2003).
- [12] Noda, I., Ohta, M., Kumada, Y., Shinoda, K. and Nakashima, H.: Usability of Dial-a-Ride Systems, *Proc. 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS 2005)*, pp.1281-1282 (2005).
- [13] 小柴 等, 野田五十樹, 山下倫央, 中島秀之: 実環境を考慮したバスシミュレータ SAVSQUID による実運用に向けたデマンドバスの評価, コンピュータソフトウェア, Vol.31, No.3, pp.141-155 (2014).
- [14] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J. and Krajzewicz, D.: SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview, *Proc. 3rd International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2011)*, pp.63-68 (2011).

- [15] Kishimoto, A. and Sturtevant, N.R.: Optimized algorithms for multi-agent routing, *Proc. 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS 2008)*, pp.1585-1588 (2008).
- [16] 国土交通省：自動車輸送統計月報（平成 26 年 12 月分），Vol.52, No.9（オンライン），入手先 <http://www.mlit.go.jp/k-toukei/jidousya/jidousya.html>（参照 2015-07-07）.
- [17] OpenStreetMap（オンライン），入手先 <http://www.openstreetmap.org/>（参照 2015-11-30）.
- [18] 函館市：函館市地域公共交通網形成計画（案）（オンライン），入手先 <https://www.city.hakodate.hokkaido.jp/docs/2015090200085/>（参照 2015-11-30）.
- [19] 函館市：函館市の人口（オンライン），入手先 <https://www.city.hakodate.hokkaido.jp/docs/2015020600107/>（参照 2015-11-30）.
- [20] 国土交通省：平成 22 年度道路交通センサス（オンライン），入手先 <http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/>（参照 2015-11-30）.

推薦文

本論文は、デマンドバスの一種である Smart Access Vehicle System の社会実装を目指し、中規模都市をターゲットとして提案システムの利便性と効率性をシミュレーションにより確認したとともに、数回にわたる実証実験により配車システムが実際に稼働することを確認しており、有用性は非常に高く評価できる。今後の交通分野での研究の発展に寄与すると考えられるので、本論文を推薦論文として推薦する。

（高度交通システムとスマートコミュニティ研究会主査 齋藤正史）



中島 秀之（正会員）

1983 年東京大学大学院情報工学専門課程修了（工学博士）。同年電総研入所。2001 年産総研サイバーアシスト研究センター長。2004 年より公立はこだて未来大学学長。JST さきがけ領域研究総括。人工知能学会，認知科学会，各会および本会フェロー。

科学会，各会および本会フェロー。



小柴 等（正会員）

2008 年北陸先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。博士（知識科学）。国立情報学研究所，産業技術総合研究所を経て現職。公立はこだて未来大学客員教授，産業技術総合研究所外来研究員。政策立案や制度設計に資することを目的とした各種の情報処理に従事。人工知能学会，サービス学会，IEEE 各会員。

人工知能学会，サービス学会，IEEE 各会員。



佐野 渉二（正会員）

2004 年神戸大学工学部電気電子工学科卒業。2006 年同大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。2012 年同大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年 4 月より神戸大学工学研究科学術推進研究員，11 月より公立はこだて未来大学特任研究員となり，現在に至る。博士（工学）。サービス工学，ユビキタスコンピューティング，クラウドコンピューティングの研究に従事。人工知能学会，ヒューマンインタフェース学会，IEEE の各正会員。



落合 純一（正会員）

2009 年筑波大学第三学群情報学類卒業。2011 年同大学大学院システム情報工学研究科博士前期課程修了。2014 年同大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程修了。同年より産業技術総合研究所特別研究員。博士（工学）。マルチエージェント社会シミュレーション，メタヒューリスティクスの研究に従事。2011 年情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会プレゼンテーション賞受賞。



白石 陽（正会員）

2002 年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学。東京大学空間情報科学研究センター研究機関研究員，助手，助教を経て，2009 年より公立はこだて未来大学助教，2011 年より同大学准教授。博士（工学）。データベース，高度交通システム，都市センシング，地理情報システムに関する研究に従事。電子情報通信学会，地理情報システム学会，ACM 等会員。

電子情報通信学会，地理情報システム学会，ACM 等会員。



平田 圭二 (正会員)

1987年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年NTT基礎研究所入所。1990～1993年(財)新世代コンピュータ技術開発機構(ICOT)に出向。2011年より公立ほこだて未来大学教授。

1993年音楽情報科学研究科初代主査。2005～2007年および2011～2013年本会理事。2010年よりデジタルプラクティス誌編集委員長。シニア会員。現在、音楽情報学に加え、うつ病家族看護者のICT支援、スマートシティの研究に従事。本会フェロー。



野田 五十樹 (正会員)

1992年京都大学大学院工学研究科修了。通商産業省工業技術院電子技術総合研究所に入所後、改組を経て、現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター総括研究主幹。博士(工学)。マルチエージェント

社会シミュレーション、災害情報システム、災害シミュレーション、災害情報共有、災害救助ロボット、機械学習の研究に従事。人工知能学会、電子情報通信学会各会員。RoboCup編集Federation President、ロボカップ日本委員会・防災推進機構理事。大都市大震災軽減化特別プロジェクト、首都直下地震防災・減災特別プロジェクト、安全・安心科学技術プロジェクト、CREST:「超大並列計算機による社会現象シミュレーションの管理・実行フレームワーク」等に参画。



松原 仁 (正会員)

1981年東京大学理学部情報科学科卒業。1986年同大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。同年通産省工技院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)入所。2000年公立ほこだて未来大学教授。ゲーム情報

学、エンタテインメントコンピューティング等に興味を持つ。著書に『将棋とコンピュータ』、『鉄腕アトムは実現できるか』、『先を読む頭脳』(共著)、『観光情報学入門』(共著)等。人工知能学会会長。本会理事。本会フェロー。