

Smart Access Vehicle システムの実装

中島 秀之¹ 小柴 等² 佐野 渉二¹ 白石 陽¹

概要：筆者らはこれまで、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て、シミュレーションによる利便性評価を行いその効率性を確認し、さらに数回にわたる実証実験を行って配車システムが実際に稼働することを確認した。フルデマンド型乗合い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上で有用な成果と考えている。これらの実験の概要とそれに用いたシステムについて報告する。

キーワード：スマートシティはこだて、Smart Access Vehicle (SAV)、Demand Responsive Transportation (DRT)、フルデマンドバス

1. はじめに

本稿では中規模都市を対象とした新たな交通機関 Smart Access Vehicle System (以下システム全体には SAVS、個々の車輛を指す場合には SAV を使う) の実験運行と、そのために作成したシステムについて報告する。

「スマートシティはこだて」の一環 [8] として我々はこれまでに、SAVS を実運用するためのサービスデザイン [7]、人流 (デマンド) の基礎調査 [12]、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 [6] などを行ってきた。これらの結果から、我々は利便性 [9] という評価軸で見た場合に SAV サービスが社会にとって有用であると判断しており、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、都市内移動における自家用車の必要性が減り、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。

以下では、まず SAVS の概要 (方式とシステム) を示し、その後これまでに行った SAV 実験運行の概要とその結果について述べる。

2. Smart Access Vehicle System の概要

SAVS は形態としてはデマンドバス (Demand Responsive Transportation : DRT) [3], [13] の一種で、その特徴は、

(1) 過疎地域ではなく都市全域を対象とすること、

(2) 運行車輛としていわゆるバス (定員 10 名以上) だけでなくタクシー (定員 9 名以下) も含むこと、
(3) 事前予約ではなくデマンドが生じた時点で SAV を呼び出すこと、
などがあげられる。

SAVS はユーザが乗りたいと思ったときに呼び出す方式を採るが、タクシーと違い、乗車地点と降車地点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選び出すようになっている。SAV は固定経路を持たず、呼び出しに応じて乗合いをし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になっている。

現在 DRT の運行は世界中で始まっているが、SAVS 以外はすべて過疎地域を対象としたものとなっている [1]。これは実証実験等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の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の投入では (実証実験の結果通り) 効率が下がるが、ある程度以上の大量投入を行えば現状より効率が改善される [10], [11] という結果を得ている。実証実験では少数台の投入しか行われないうえ、効率の悪い部分が出たと考えている。そのため我々は函館全域での SAV 運用 (函館市内のすべてのバスとタクシーを統合して運用する^{*1}) を目指している。

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

² 文部科学省 科学技術・学術政策研究所
NISTEP

^{*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しているが、バス型定時運行やタクシー型占有 (非乗合) 運行も SAVS の枠内で可能である。

3. 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って連携を実現する（図 1）。

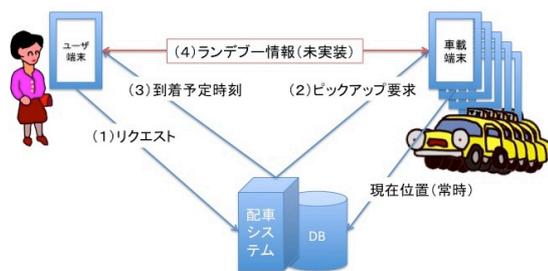


図 1 SAVS の全体構成

これにより、SAVS は人間のオペレータを介することなく、自動でデマンドの受付からアサインまでを行うことができる。全自動での対応は、SAV サービスの提供上重要であるのみならず、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、普段は一般のタクシー配車システムとして使いながら、アルゴリズムを切り替えて特定の日だけタクシーを SAV として運行する、というような使用方法が可能となり、事業者らが実態を見ながら徐々に SAVS を導入することが可能になる。

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・通知するためのアプリケーションで、後述する配車システムでデマンドを処理した結果、デマンドが SAV にアサインされると、何時頃に乗車・降車（目的地到着）できそうかという、見込み時刻も表示される。なお、これらのサービスを提供するために、乗客 App 起動中は適時ユーザの位置情報を収集し、送信している。

乗客 App の機能は以下である：

- (1) SAV リクエスト
 - (a) 乗車位置を地図上で指定。デフォルト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

*2 ユーザと乗客の境界は定かでないが、一応乗車後はユーザ、乗車中は乗客としている。



図 2 乗客 App の画面

を文字で指定できる。また、第 2 回実験よりランドマーク（1d 参照）からも指定できるようにした。

- (b) 降車位置を地図上で指定。
- (c) 降車希望時刻を指定（オプション）。鉄道や航空機への接続などの締め切り時刻を指定する。これに間に合わないとシステムが判断した場合はリクエストが拒否される。
- (d) ランドマークをリストから検索。第 2 回実験では函館の主な交通ターミナル、観光名所、レストランなどを用意した。これはアプリ起動時に端末にダウンロードされる。

- (2) SAV の状況確認。SAV の現在位置を地図上で表示したり、到着予想時刻を表示する。
- (3) アンケート（第 2 回実験で実装）。特に「今回のサービスにいくらくらい払いますか」という質問で価格感を知ろうとした。

3.3 車載 App

車載 App（図 8、図 13）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、Android v4.0.4 以上を搭載した端末で稼働する。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 にアサインされると、音で通知すると共に、画面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、乗せ間違い防止のために乗客名、ユーザ入力による乗車地点の目印情報、乗降地点、などが表示される。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 1 分ごとにサーバに自動送信している。

3.4 配車システム

配車システムはデマンドに対して適当な車輛（SAV）を探索するシステムである。これが SAVS の要であり、乗合

*3 将来的には IC カード等を使って乗降確認も自動化する予定である。

いの為の寄り道が少ない効率の良い配車ができなければシステムとして成立しない。少数台の実証実験では車輛選択の余地があまり無いが、我々は 1000 台あるいはそれ以上の規模の車輛数を想定している為、それらの中から最良の（あるいはそれに準じた）一台を選ぶことが重要課題である。なお、以下に述べる現状のシステムはその意味ではまだ最適とは言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)[5] (図 3) の機能限定版で、各車輛の乗客数上限を盛り込んでいること以外に大きな差はない。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 [2] 上の函館の道路地図を用いた。



図 3 SAVSQUID

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について、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 DB に記録しておく。

その上で、逐次最適挿入法 [9] (図 4) により適切な SAV の探索を行う：

- (1) 新たにデマンドを配車システムが受けたときには、そのデマンドを各車輛^{*4}に提示する。
- (2) 各車輛はデマンドの出発（乗車）地点および目的（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。これを元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) 出発地点と目的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。ただし新しい挿入により、既存あるいは新しいデマンドの締め切り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、いったん車輛にア

^{*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のであるがここでは簡単のため車輛としている。

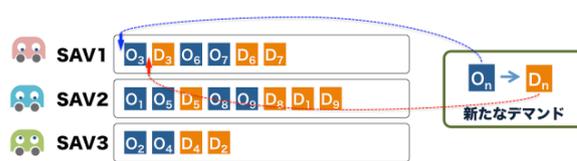


図 4 逐次最適挿入法

サインされたオーダーの前後関係は常に保持される。また、乗客の指定した締め切り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 へのデマンドのアサインを拒否（リジェクト）する。

配車の計算はデマンド情報が記録される DB を 15sec ごとにチェックすることで行う。DB 上に新たなデマンドが検出されると、配車システムはその都度計算を実行し、結果を DB に記録することで乗客 App には乗降予定時刻／リジェクトを、車載 App にはデマンドのアサインを通知する。

4. 実証実験

4.1 概要

実験の目標は主に以下のシステムを用いて実際に SAV の運行（予約受付、配車計画、通信、実走）ができることの確認である：

- (1) SAV ユーザのための配車依頼システム（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 のドライバーのための配車指示システム（車載 App）、

なお現状では SAV 運行自体の効率性（乗客を如何に目的地に早く運べるか等）は実験の対象としていない。

これまでに実証実験は 2 回行った。

4.2 第 1 回実験

期間 2013 年 10 月 24 日（木） - 30 日（水） 合計 7 日間

場所 北海道函館市中心部の限定エリア (図 5)

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 40 名程度

第 1 回の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 四方のエリアで、主要道路（基本的に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無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 6 の点線でエリアを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、青枠内であればデマンドを受け付けることにした。サービスエリアをどのように規



図5 第1回実験エリア

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。

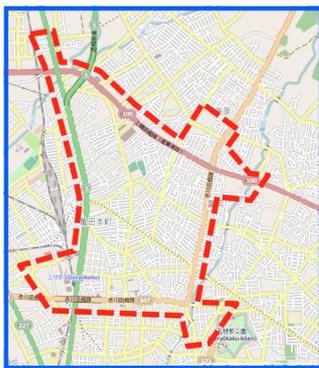


図6 システムがリクエストを受け付けた範囲(青枠内)

第1回実験では、3Gもしくは4G回線の契約を行ったAndroid端末を実験者側で用意し、アプリケーションを設定した状態で貸与して運用した。スクリーンショットを図7に示す。

車載端末としては、ドライバーの可視性などを勘案して、4G回線の契約を行った約10インチのAndroidタブレット端末を用意し、この端末上で運用した。スクリーンショットを図8に示す。

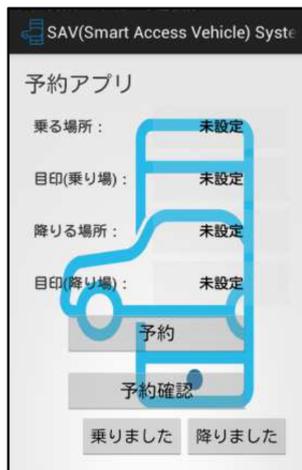


図7 第1回実験用乗客 App 画面



図8 第1回実験の車載 App 画面

SAVドライバーは事業者らの都合から期間中、日ごとに入れ替わり、専属のドライバーは存在しなかった。また、タブレット端末などの操作に慣れたドライバーはほとんどいなかった*5。そのため、毎朝運行開始前にシステムだけではなく端末の操作方法などを説明する必要があった。

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名の内訳は以下の通りである。

表1 実験協力者の内訳

NPOによる募集	21名
未来大学生	15名
一般参加*	2名
合計	38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

今回の実験では、自宅や職場からの利用も想定されていた。それらが乗降位置として指定された場合に備え、プライバシー・個人情報保護の観点から、未来大の学生も含め、基本的に実験協力者の募集と管理はNPO法人に一任しており、個人情報は実験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

実験モニタリングと故障時のマニュアル介入の為に、各車の位置や、デマンドのアサイン状態を可視化するオペレータ向けのツールも用意した。後述のように、このシステムは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単なるモニターとして使われた。スクリーンショットを図9に示す。

4.3 第2回実験

期間 2014年4月27日(日)

場所 北海道函館市中心部全域

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に協力し

*5 乗客として乗車して観測していると、地図等をうまく操作しているドライバーとそうでない人の差が大きいことが判った。誰でも操作できるよう、ユーザインターフェース(UI)の改善が必要である。



図 9 支援システムの画面

てくれた人 (50 名程度)

第 2 回実験では外部委託によって、第 1 回実験で Android のみであった端末を iPhone にまで広げるとともに乗客用、車載用それぞれのユーザインタフェースの改善とデバッグを行った。

配車システムは基本的に同じであるが、今回はカバーする範囲が広いので、コストテーブルの計算範囲を拡大した。このコストテーブルは配車ルート計算の一部をあらかじめ展開しておくもので、システムの数値向上に必須のものである。ただし、ルート計算を高速化 [4] することができれば必ずしも必要ないかもしれない。

ユーザとしては我々の用意した実験協力者ではなく、サービス学会に参加した人に参加を呼びかけ、乗客 App をダウンロードして使ってもらう方式を採った。なお iPhone アプリ配布の制限や、道路交通法の問題を避けるため実験協力者にはあらかじめ NPO スマートシティはこだての賛助会員登録をしてもらうこととした。今回の実験では旅行中のユーザが主で職場や自宅が含まれないため、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 回より大幅に広げ、空港から駅前、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 10)。この広域で 100 人規模のデマンドが発生した場合に 16 台という台数は少ないのではないかと考えるがその検証は今後のデータ分析を待つ必要がある。SAVSQUID 上のシミュレーションで車輛台数やデマンド発生率を変化させた分析を行う予定である。

図 12 は実際に乗車中の様子で、左が乗客 App の「調べる」画面、右が車内風景である。黄枠内に見えるのが車載端末である。

車載 App のユーザインタフェース (UI) も改善した



図 10 第 2 回実験のエリア (函館中心部全域)



図 11 第 2 回実験用乗客 App の画面 (左はホーム、右はリクエスト中)



図 12 第 2 回実験の走行状況

(図 13). 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り付けない。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れる。休憩モードに入るとこのボタンは「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」は乗客が見つ

*6 UI においてボタンのデザインには二派が存在する。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。我々はいつも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。

からないなどのトラブルのときに配車センターに連絡するためのボタンである。

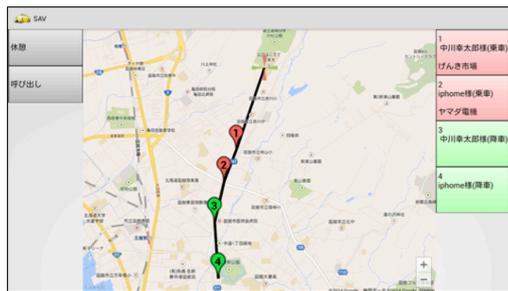


図 13 第 2 回実験に用いた車載 App の画面

4.4 運行結果

第 2 回実験の結果は集計中のため、ここでは第 1 回の結果のみを示す (図 14)。

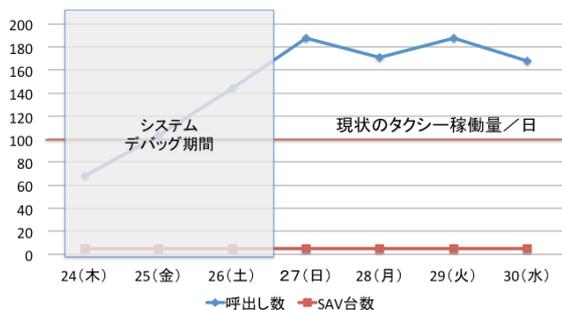


図 14 第 1 回実験の運行統計

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などを行ったため運行データとしては意味がない。最後の 4 日間がトラブルなく運行できた期間となる。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的に行うことができ、一日あたり 170 件程度のデマンドを処理することができた。一般タクシーの稼働レベルが 1 日あたり 25 件程度のデマンド処理であるため 5 台で 125 件となる。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 件のデマンドは十分な量といえる。なお、効率良くさばける 1 台当たりの最大デマンド数は今後の検証に待たねばならない。

これにより、

- (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する SAVS が実際に構築・運用できること、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 (これは第 2 回についても同様である)。

フルデマンド型乗合い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、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は、SAV サービスの社会実装を行う上で有用な成果となった。

5. 今後の課題

現状ではシステムが動作するという確認に留まっている。社会実装に向けた今後の課題としては以下が残っている。

- 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リクエスト後のキャンセル、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丁度入りきる縮尺への自動ズーム機能が望まれる。
- 車載 App カーナビとの連携。現在、車載端末では乗客が指示した乗車、降車ポイント間を直線でないルートが表示されている。実際の走行経路はドライバーにまかされているのだが、ドライバー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丁度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移るボタン) 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等が必要。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、ドライバーが乗客位置を確認する方法が無い。地図上で相手の位置を表示するなどの方法が必要。また互いの位置以上のランデブー情報の提示の可能性も探る必要がある。
- 空港等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。
- ルート検索アプリなどとの連携 (当該アプリからの予約など)。
- 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。
- 実稼働に向けた料金体系等のデザイン、法的問題の確認。

6. まとめ

本稿では、SAV サービスの社会実装を目的として、シミュレーションを通じたサービスデザインの枠組みと、実運行の結果について述べた。

システム開発を行った上で北海道函館市の特定エリアにおいて7日間の運行を実施し、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い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、これを1日あたり11時間維持できたことは、SAV サービスの社会実装を行う上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、アルゴリズムの切り替えで、特定の日だけタクシーをSAVとして運行するというような使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、という導入方法が採用可能となった。

また、2014年10月にも実運行を計画しており、本稿の実験結果や上述したシミュレーションの結果にもとづいてサービスをデザインしてゆく予定である。

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、SAV運行などについては函館タクシーと函館バス、路線バスの知見などについては函館バスの協力を得た。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。

参考文献

- [1] Ambrosino, J. and Nelson, M. R.(eds.): *Demand Responsive Transport Services: Towards the Flexible Mobility Agency*, Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment (2003).
- [2] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J. and Krajzewicz, D.: SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview, *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 63–68 (2011).
- [3] Hiekata, K., Yamato, H. and Tsubouchi, K.: A Demand Responsive Transit Service with Emphasizing on Better Punctuality, *The 5th International Workshop on Intelligent Transportation*, pp. 93–98 (2008).
- [4] Kishimoto, A. and Sturtevant, N. R.: Optimized algorithms for multi-agent routing., *AAMAS 2008* (Padgham, L., Parkes, D. C., Müller, J. P. and Parsons, S., eds.), pp. 1585–1588 (online), available from <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/atal/aamas2008-3.html#KishimotoS08> (2008).
- [5] 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, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2013 (JAWS-2013) (2013).
- [6] 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 研究報告 知能システム (ICS), Vol. 2014-ICS-174, No. 1, pp. 1–8 (オンライン), 入手先 (<http://id.nii.ac.jp/1001/00098617/>) (2014).
- [7] 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).
- [8] 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, 観光と情報, Vol. 7, No. 1, pp. 19–28 (2011).
- [9] 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).
- [10] 野田五十樹, 太田正幸, 篠田孝祐, 熊田陽一郎, 中島秀之: デマンドバスはペイするか?, 情報処理学会研究報告 2003-ICS-131, pp. 31–36 (2003).
- [11] Noda, I., Ohta, M., Kumada, Y., Shinoda, K. and Nakashima, H.: Usability of Dial-a-Ride Systems, *Proc. AAMAS 2005*, pp. 1281–1282 (2005).
- [12] 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, 人工知能学会第16回社会におけるAI研究会 (2013).
- [13] 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).