

フルデマンド型交通における 利便性と経済性を考慮した配車手法の検討

若園裕太^{1,a)} 石田繫巳^{2,b)} 白石陽^{2,c)}

概要：近年、様々なユーザーのニーズに広く対応できる新たな公共交通サービスとしてフルデマンド型交通が注目されている。フルデマンド型交通を持続的に提供するためには、利便性や経済性など、ユーザーごとに異なるニーズを満たして満足度の高いサービスを提供する必要がある。フルデマンド型交通の従来研究としては、受理デマンド数の最大化や車両の移動距離の最小化を目的とした配車手法に関する研究が多く行われている。これに対し、本研究では、ユーザーごとに異なる利便性（短時間の移動）と経済性（低運賃の移動）のニーズを最大限満たすことを目的とした配車手法及び配車計算に用いる最適化指標を提案する。従来研究により、利便性のニーズに対応可能な最適化指標が提案されていることから、本稿では経済性のニーズに対応する最適化指標、利便性と経済性のニーズが混在する状況に対応するスイッチング手法について取り組んだ結果を報告する。経済性のニーズに対応する最適化指標では、ユーザーの支払う運賃が低くなる配車ができることを確認した。スイッチング手法では、利便性の満足度において、利便性に特化した手法と同水準の満足度の高いサービスを提供できることを確認した。

キーワード：フルデマンド型交通、配車手法、満足度、最適化指標

1. はじめに

新たな交通手段の1つとして、デマンド型交通が注目されている。デマンド型交通とは、ユーザーが送信するデマンドに応じてスケジューリングを行い、他のユーザーとの乗合を許容し運行を行う公共交通サービスである[1], [2]。デマンドは、配車リクエストのことを指し、ユーザーが指定する乗車地点や降車地点、乗車希望時刻、降車締切時刻、乗車人数などの要素から構成される。デマンド型交通は、いくつかの運行方式が存在し、目的地や地域、ニーズに応じた運行方式が導入される。

その中でも、フルデマンド方式のデマンド型交通（以降、フルデマンド型交通）は、その特徴から様々な地域での導入が期待される。フルデマンド型交通は、運行ダイヤや運行経路を固定されておらず、デマンドに応じてドア・ツー・ドアの移動を提供する。タクシーに近い運行の柔軟性を持つことから、運賃が高額になることが懸念される。しかし、ユーザーが乗合を許容することで、バス以上タクシー以下の運賃でサービスを利用することが可能になる。フルデマンド型交通のような高い柔軟性を持った公共交通サービスが低運賃で利用可能になることで、様々な人々が快適に移動できる社会を実現できると考えられる。

フルデマンド型交通は、その有用性を示す研究やユーザー、運行者側の観点で効率化を図る研究が活発に行われてきた。例として、野田ら[3]やMaら[4]により、フルデマンド型交通が既存の公共交通サービスに比べ、様々な利点があることを明らかにしている。さらに、運行者側の利益最大化に

向けた配車や車両制御の効率化を図る研究[5], [6]やユーザーのデマンドを最大限受け付けるための配車や経路の効率化を図る研究[7], [8]など様々な観点で効率化を図る研究が行われている。しかし、フルデマンド型交通のような公共交通サービスを持続的に提供するためには、効率化に向けた手法を検討するだけでは不十分である。そこで、サービスを利用するユーザーの視点から長期的に使い続けたいとする満足度の高いサービスを提供する必要がある。

これに対し、本研究では、フルデマンド型交通におけるユーザーの満足度に着目した配車手法を提案する。発生するデマンドに対して、効率化の観点で配車を行うのではなく、ユーザーが重視するニーズに基づいた配車を行うことで、満足度の向上を目指す。フルデマンド型交通のような公共交通サービスには、ユーザーやその時の状況によって様々なニーズが存在する。本研究では、ユーザーが公共交通サービスを利用する時のニーズとして、利便性（短時間の移動）と経済性（低運賃の移動）に注目し満足度を定義する。

本稿では、ユーザーの満足度に着目した配車の実現に向けた第一歩として、利便性と経済性の観点で定義したユーザーの満足度指標及びそれぞれの満足度最大化に向けた配車手法を示す。本配車手法は、野田ら[3]が提案した逐次最適挿入法を応用したものである。逐次最適挿入法は、短い計算時間で準最適結果を返すことに特化したアルゴリズムであり、定義した最適化指標を基に車両が配車される。そこで、ユーザーの重視するニーズに基づいて最適化指標を切り替えて逐次最適挿入法による最適化を行うことで満足度を最大化するスイッチング配車を実現する。逐次最適挿入法では利便性の満足度向上に向けた最適化指標が用いられていることから、本稿では、経済性の満足度向上の観点から最適化指標を新たに定義する。発生したデマンドのニーズによって最適化指標を切り替えるスイッチング手法により、利便性と経済性が混在する状況に対応する。

1 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

2 公立はこだて未来大学 システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University Hakodate

a) g2121061@fun.ac.jp

b) ish@fun.ac.jp

c) siraisi@fun.ac.jp

提案した経済性の満足度向上のための最適化指標とスイッチング手法の性能を検証するために、交通流シミュレータを用いて実験を行った。経済性のニーズに対応する最適化指標では、既存の最適化指標に比べ、ユーザの支払う運賃が低くなる配車ができることを確認した。スイッチング手法では、利便性の満足度において、利便性に特化した手法と同水準に満足度を得ることができた。

本稿の構成は以下の通りである。2章では、フルデマンド型交通の配車最適化やユーザ満足度向上に向けた研究事例を示す。3章では、本研究の評価方法と配車手法、最適化指標について示す。4章では、本研究で定義した最適化指標の性能検証と、配車アルゴリズムに基づくユーザ満足度の評価を行う。最後に5章でまとめとする。

2. 関連研究

2.1 配車効率化に向けた研究事例

本研究で注目するフルデマンド型交通は、有効性を示す研究[3], [4]や運行側やユーザの観点に立ち効率化を図る研究[5], [6], [7], [8]が盛んに行われてきている。

フルデマンド型交通の有効性を示す研究として、野田ら[3]は、フルデマンド型交通は十分に大きな需要がある場合に、採算性を維持しながら固定路線バス以上の利便性を確保できることを明らかにしている。Maら[4]は、乗合を行わない場合と比較し、乗合を行うことで、デマンド受率率の増加や総走行距離の減少が可能であること、ユーザの運賃を低減させられることを明らかにしている。

フルデマンド型交通の配車効率化に関する研究として、運行者側の利益を最大化することを目的とした配車最適化[5]や需要と供給の差を最小化することを目的とした車両制御手法を提案した研究[6]がある。また、Alonso-Moraら[7]や大社ら[8]は、乗車するユーザ数を最大化することを目的とし、予測した将来需要に基づく配車や経路生成を行う手法を提案しており、様々な観点で効率化を狙う研究が行われている。フルデマンド型交通は、その有用性が明らかにされており、様々な観点でさらなる効率化が図られている。

2.2 満足度向上に向けた研究

フルデマンド型交通特有の問題や制約を取り扱い、ユーザ満足度や不安解消に向けて、様々な観点で取り組まれた研究や[9], [10], [11], [12]やユーザ満足度向上に向けた研究[14], [15]が行われている。

安彦ら[9]は、乗合によって発生する不安解消に向けて、過剰な迂回を抑制する手法を提案している。また、乗合において女性専用車両などの性別による制約を考慮した研究[10]なども行われている。野田[11], [12]は、適切な運賃設定に向けた研究を行っている。

フルデマンド型交通においてユーザ満足度の向上には

利便性と運賃面の経済性のニーズに対応することが重要であると文献[12], [13]により示されている。ユーザの利便性と経済性などの満足度に注目し配車手法を検討した研究としては、文献[14], [15]がある。Atasoyら[14]は、需要の大きさに応じて稼働する車両や運行形態を動的に変更する手法FMOD (Flexible Mobility on Demand) を提案した。しかし、この手法では利便性、経済性からなる満足度を全ユーザ同一の指標で評価しているため、ユーザそれぞれのニーズを考慮することができない。また、Levingerら[15]は、多様なニーズからなる満足度を定義し、満足度が最大となるような配車手法を提案している。この研究では、非常にシンプルなデマンド発生状況を対象にしているため、様々な乗降地点のデマンドが順次発生する状況を考慮できていない。

3. 評価方法と提案手法

本章では、ユーザ満足度向上に向けて設定した前提条件、満足度評価式について述べる。そして、定義した満足度評価式を基に、提案する配車手法と最適化指標を述べる。

3.1 評価方法

3.1.1 前提条件

本稿では、フルデマンド型交通のユーザ満足度向上に向けた配車手法の検討を行う。そこでユーザの満足度評価式を定義する。満足度評価式を定義する第一歩として、以下の3つの前提条件を設定する。

- フルデマンド型交通を利用するユーザの満足度は、利便性もしくは運賃面の経済性のいずれか一方で定まるものとする。公共交通サービスを利用するユーザの満足度は、利便性や経済性以外にも存在する。例えば、乗合の有無や乗合相手の属性、目的地までの走行経路、乗り心地などの要素が挙げられる。しかし、本研究では公共交通サービスを利用する本来の目的である、利便性と経済性の2点にのみ注目して満足度を定義する。本来、ユーザは利便性と経済性の一方を重視するものではなく、ユーザやその時の状況によって重要度は変わってくるのが考えられる。今後、これらの要素をパラメータとし、より複雑な状況を加味することを検討しているが、本稿では、いずれか一方のみを選択するものとする。
- フルデマンド型交通における利便性の満足度は、「目的地にどれだけ早く着くことができるか」のみに依存するものとする。フルデマンド型交通における利便性は、乗車までの待ち時間や乗車時間、運賃精算時のスムーズさなど複数の要素を考慮することができる。これらの要素は、ユーザの状況、観点により複雑に変化することが考えられるため、本研究では考慮しないものとする。

3.1.2 満足度評価式の定義

3.1.1 項での議論を基に利便性と経済性のユーザ満足度評価式を定義する。利便性、経済性共に、満足度は0~1の範囲で値をとる。また、0~1の範囲で値が大きいほど高い満足度を得ているものとする。

まずは、利便性の満足度評価式について説明する。利便性の満足度評価式を式(1)で定義する。

$$cs_d = \frac{dt_d - at_d}{dt_d - eat_d} \quad (1)$$

添え字の d はあるデマンドを指し、 cs_d はデマンドの利便性満足度を示す。 dt_d はデマンドの降車締切時刻、 at_d は実際の降車時刻、 eat_d はデマンド割り当て時の最短降車予定時刻を示す。式(1)の定義により、 at_d が eat_d に近いほど満足度は1に近づき、 dt_d に近いほど0に近づく。すなわち、到着時刻が早ければ早いほど満足度は高くなる。なお、本研究のフルデマンド型交通の仕様として、降車締切時刻に間に合わないデマンドは受理しないものとしているため、負の値をとることはない。

次に、経済性の満足度評価式について説明する。経済性の満足度評価式を式(2)で定義する。

$$es_d = 1 - \frac{\alpha + \beta \times mOD_d - \gamma \times tr_d}{\alpha + \beta \times mOD_d} \quad (2)$$

経済性の満足度は、野田[11]が提案するフルデマンド型交通サービス SAVS (Smart Access Vehicle Service) の評価に用いられる料金決定方式を参考に定義している。 es_d はあるデマンドの経済性満足度、 α はサービスを使用時の固定料金、 β は単位距離あたりの料金、 γ は単位遅れ時間当たりの割戻し料金、 mOD_d はデマンドの OD 間を最短距離で走行した場合の移動距離、 tr_d はデマンド発生から降車までにかかった時間を示す。式(2)の定義により、目的地に到着する時刻が到着予定時刻に近いほど満足度は0に近づき、降車締切時刻に近いほど1に近づく。式(2)では、分子が負の値をとる場合も生じるが、その場合には分子の値を0となるようにする。式(2)は、 α 、 β 、 γ のパラメータを設定する必要がある。パラメータについては4.3.3項で述べる。

3.2 配車手法の全体像

本研究における配車手法の全体像について述べる。本研究では、デマンドを送信したユーザが重視する観点によって、最適化指標を変えて配車計算を行うスイッチング手法を提案する。一般に、配車計算を行う場合、1つの最適化指標を基に配車計算を行うが、本研究では利便性と経済性のニーズに対する最適化指標を定義し、動的に最適化指標をスイッチングして配車計算を行う。本研究の配車手法の流れは、以下ようになる。

STEP-1 ユーザが送信したデマンドを受け付ける。デマンドを構成する要素は、送信時刻、乗車地点、降車

地点、降車締切時刻、重視する要素（利便性もしくは経済性）の5つである。デマンドは事前予約制ではなく、順次発生するものと想定している。

STEP-2 受け付けたデマンドの重視する要素から、ニーズを判断する。

STEP-3 判断したニーズに基づいて最適化指標をスイッチングする。

STEP-4 スwitchングした最適化指標に基づき、逐次最適挿入法の配車アルゴリズムを用いて、配車計算を行う。

STEP-5 配車計算の結果を基に受け付けたデマンドの処理結果をユーザに送信し、車両のリスケジュールを行う。デマンドを受理できる場合には、乗車予定時刻、到着予定時刻、乗車車両がユーザに送信され、割り当てられた車両の運転手にはリスケジュールの結果が送信される。デマンドを受理できなかった場合には、受理できなかった結果がユーザに送信される。

配車計算に用いる逐次最適挿入法の配車アルゴリズムは次節、利便性と経済性のニーズに対応する最適化指標は、3.4節、3.5節で述べる。

3.3 逐次最適挿入法

本研究では、逐次最適挿入法の配車アルゴリズムをベースに配車計算を行う。逐次最適挿入法は、野田ら[3]が提案したフルデマンド型交通向けの配車アルゴリズムであり、少ない計算量で準最適な結果を返すことに特化したアルゴリズムである。フルデマンド型交通のような DARP (Dial-a-Ride Problem) [16]に分類される公共交通サービスにおいて、順次発生するデマンドに対し、最適解を算出することは難しい。そのため、逐次最適挿入法のような多項式程度の計算量で配車が行える配車アルゴリズムは、広く応用されている[10], [17], [18]。逐次最適挿入法（図1）による配車までの手順を以下に示す。

STEP-1 受け付けたデマンドを各車両に提示する。ここで各車両は、現在対応中のデマンド情報を乗降地点リストとして保持している。

STEP-2 各車両は、提示されたデマンドの乗降地点を乗降地点リストの任意の箇所に挿入し配車計算を行う。配車計算を行う際、事前に定義した最適化指標に基づいてコストを算出する。

STEP-3 乗降地点の挿入箇所、全てのペアの組み合わせについて STEP-2 の処理を実行する。全ての乗降地点の組み合わせにおいて、算出されたコストが最も小さい時の組み合わせがデマンドを受け入れる候補となる。ここで、提示されたデマンドが挿入された組み合わせにおいて、降車締切時刻に間に

合わないデマンドが1つでも存在する場合は、組み合わせの候補から除外する。

STEP-4 全ての組み合わせの候補の中で、コストが最小になる組み合わせを持つ車両に対しデマンドを割り当てる。組み合わせの候補が1つも存在しなかった場合には、発生したデマンドがリジェクトされる。

配車アルゴリズムの制約として、各車両間での乗り換えやシステム側からの乗降地点の変更は行わないものとする。また、乗車後の目的地の変更も考慮しないものとする。

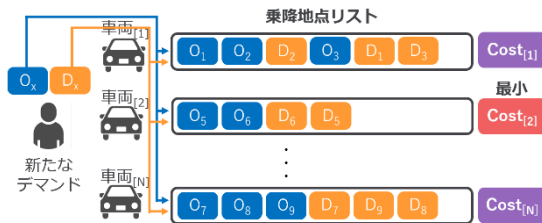


図 1 逐次最適挿入法の概要図

3.4 利便性を重視するユーザーに向けた最適化指標

利便性を重視するユーザーに配車を行うための最適化指標（以降、利便性最適化指標）を定義する。利便性最適化指標の定義に伴い、逐次最適挿入法の最適化指標を採用する。逐次最適挿入法[3]で用いられている最適化指標は、各デマンドの遅延を最小にすることである。逐次最適挿入法の最適化指標は、式(3)のように定義される。

$$coi = veat_d + sded \quad (3)$$

coi は利便性最適化指標、 $veat_d$ はある車両、組み合わせにおける新規デマンドの到着予定時刻、 $sded$ は新規デマンドを割り当てることで発生する車両に割り当て済みのデマンドに発生する遅延の総和である。

式(3)は、各デマンドの遅延が最小になる割り当てを行うため、利便性を重視するユーザーのみが存在する状況において最適な指標となる。一方、別のデマンドに対応中の車両が少し迂回することで新規デマンドに対応できる場合でさえも、未稼働の車両にデマンドが割り当てられるケースが存在し、車両稼働率が上がることが考えられる。よって、フルデマンド型交通の特徴である乗合を抑制する可能性があり、ユーザーの支払う運賃が高額になることが考えられる。

3.5 経済性を重視するユーザーに向けた最適化指標

経済性を重視するユーザーに配車を行うための最適化指標（以降、経済性最適化指標）を定義する。経済性最適化指標の定義に伴い、利便性最適化指標を応用する。経済性最適化指標の方針は、発生したデマンド付近を走行予定の車両にデマンドを割り当てることである。経済性最適化指標を式(4)で定義する。

$$eoi = veat_d + sded + irt \quad (4)$$

eoi は経済性最適化指標、 irt は新規デマンドを割り当てることで増加する走行時間である。 irt は、乗合時に発生する迂回時間や新規デマンドのユーザーの迎車にかかる時間を指す。 irt を最適化指標に取り入れることで、デマンドを割り当てられ走行している車両の走行予定経路付近で新たにデマンドが発生した場合に、算出されるコストが小さくなる。よって、過剰な車両の稼働を抑制することが可能になると考えられ、ユーザーが低運賃でサービスを利用可能になることが期待できる。

式(3)で用いられている指標を残した理由は、過剰な乗合の発生を防止するためである。デマンドへの遅延を考慮しない場合、割り当て済みのデマンドが後々に制約になってしまい、対応できるデマンドが減少してしまうことが考えられる。

4. 実験

提案した経済性最適化指標の性能検証（式(4)）とスイッチング手法によるユーザーのサービス満足度を評価するため、交通流シミュレータを用いて評価実験を行った。

4.1 実験環境

本研究では、SUMO (Simulation of Urban Mobility) を用いてシミュレーション実験を行った。SUMOは、オープンソースの道路交通シミュレータである[19]。SUMOには、外部プログラムとの連携を可能にするTraCIが備わっている。TraCIを用いることで、外部プログラムと連携し、シミュレーション中の車両挙動を動的に変更することが可能である。実験に用いた道路ネットワークはNetEdit、配車アルゴリズムはPythonを用いて構築した。また、シミュレーションの実行に伴い、道路ネットワーク上の各2点間の経路は事前に全て計算、収集しておき、配車計算時には収集したデータにアクセスして経路生成を行った。

4.2 経済性最適化指標の性能検証

4.2.1 実験目的

提案する経済性最適化指標（式(4)）の性能検証を目的とし、逐次最適挿入法を用いて、利便性最適化指標（式(3)）を基に配車計算を行う手法、経済性最適化指標を基に配車計算を行う手法で実験を行った。経済性最適化指標に求められる性能は、同様のデマンド群に対し座席稼働率を向上させ、低い車両稼働率で対応することである。

4.2.2 稼働率の比較方法

車両稼働率、座席稼働率はMaらの文献[4]を参考に定義している。車両稼働率、座席稼働率は式(5)、式(6)から定義

される。

$$VOR = \frac{T_v}{N \times T} \quad (5)$$

$$SOR = \frac{T_r}{N \times C \times T} \quad (6)$$

VOR (Vehicle Occupancy Rate) は車両稼働率, SOR (Seat Occupancy Rate) は座席稼働率, T はシミュレーション期間であり, 最初のデマンドが発生してから全てのデマンドを下ろすまでの時間を示す. N は車両台数, C は車両座席数, T_v は T の間に車両が走行した時間の総和, T_r は T の間に車両がユーザを乗車させて走行した時間の総和を示す.

4.2.3 実験条件

本実験で使用する道路ネットワークを図 2 に示す. 5km 四方のシンプルな道路ネットワークを使用した. 交差点間の 1 辺の長さは 250m, ノード数は 441, エッジ数は 1680 である. 全てのエッジが片側 1 車線である.

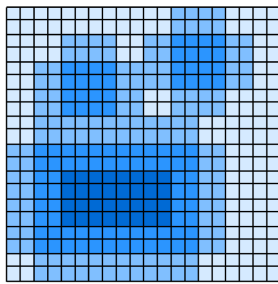


図 2 道路ネットワーク

本実験の実験パラメータを表 1 に示す. 実験パラメータは中島らの文献[20]を参考に決定した. 発生するデマンドの乗降地点は, ランダムではなく地方都市の交通調査を参考に発生させており, 図 2 の色が濃い地点ほど乗降地点として選ばれやすいように設定した. デマンドの発生時刻は, 発生時間の範囲内で完全ランダムに決定している. 各デマンドの降車締切時刻を式(7)で定義する.

$$dt_a = ot_a + pt + \frac{mOD_a}{vs} \times m_a \quad (7)$$

ot_a はデマンドの発生時刻, pt はデマンドが発生してから乗車するまでに必要な迎車時間, mOD_a はデマンドの OD 間の距離, vs は車両の走行速度, m_a はユーザが指定するデマンドに対する余裕度を示す. 今回の実験では, 問題の複雑化を避けるため, 全てのデマンドにおいて, $pt = 600$, $m_a = 1.5$ で統一した. 車両充足率は, デマンド発生数に対する車両台数のパラメータを示している. 中島らの文献[20]を参考に決めており, 車両 1 台あたりの負担デマンド数 2.5 件となる時を 100%としている. 車両の初期待機地点

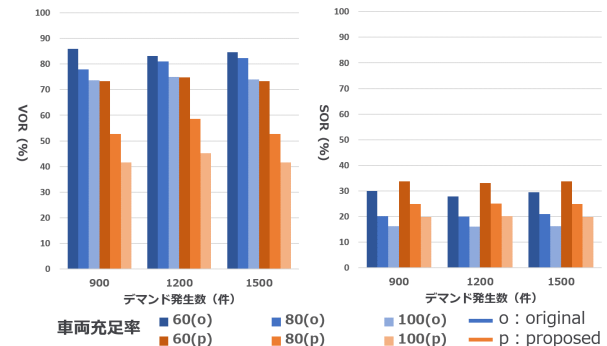
は, ランダムに決定した. また, デマンドを全て処理し空車になった車両は, 次のデマンドが割り当てられるまでは, 最後にユーザを降車させた地点に待機し続けるものとした.

表 1 実験パラメータ 1

パラメータ	値
発生デマンド数 [件]	900, 1,200, 1,500
デマンド発生時間 [秒]	5,400
降車締切時刻 [秒]	式(7)
迎車時間 [秒]	600
余裕度	1.5
デマンド予約人数 [人]	1
車両充足率 [%]	60, 80, 100
車両定員 [人]	4
走行速度 [km/h]	30

4.2.4 実験結果

利便性最適化指標と経済性最適化指標の各実験パラメータの組み合わせに対する車両稼働率 (VOR) と座席稼働率 (SOR) の結果を図 3 に示す.



(a) 車両稼働率 (VOR) (b) 座席稼働率 (SOR)

図 3 稼働率

横軸は, デマンド発生数であり, 縦軸が稼働率を示す. 青色の **original** が利便性最適化指標, オレンジ色の **proposed** が経済性最適化指標であり, 各最適化指標において車両充足率ごとに結果を表している.

車両稼働率 (VOR) (図 3 (a)) では, 全てのパラメータの組み合わせにおいて, 利便性最適化指標より経済性最適化指標の方が低い値を示している. また, 車両充足率が大きくなるほど, 利便性最適化指標と経済性最適化指標の車両稼働率 (VOR) の差が大きいことが分かる. 座席稼働率 (SOR) (図 3 (b)) では, 全てのパラメータの組み合わせにおいて, 利便性最適化指標より経済性最適化指標の方が高い値を示している. これらの結果から, 経済性最適化指標により, 座席稼働率 (VOR) を向上させ, 車両稼働率 (SOR) を減少させることができた結論付けられる.

4.2.5 分析

実験結果より、実験の目的である経済性最適化指標の性能を検証することができた。そこで、経済性最適化指標により影響が表れると考えられる結果について分析を行う。

まずは、座席稼働率 (SOR) の向上により、乗合発生数に違いがあるかを比較する。乗合発生数は、各ユーザが乗車してから降車するまでの間に、同時に乗車した人数の平均である。利便性最適化指標と経済性最適化指標における各車両充足率、デマンド発生数パラメータの乗合発生数を表 2 に示す。

表 2 乗合発生数

デマンド発生数	車両充足率					
	original			proposed		
	60%	80%	100%	60%	80%	100%
900	1.8	1.0	0.6	2.6	2.4	2.5
1,200	1.7	1.0	0.5	2.6	2.4	2.6
1,500	1.8	0.9	0.5	2.7	2.8	2.8

表 2 から全てのパラメータの組み合わせにおいて、経済性最適化指標の方が乗合発生数が多いことが分かる。また、利便性最適化指標では、車両充足率が上がるにつれて、乗合発生数が減少しているが、経済性最適化指標では、乗合発生数が車両充足率に依存していないことが確認できる。

次に、デマンド受理率や平均走行距離について図 4 に示す。

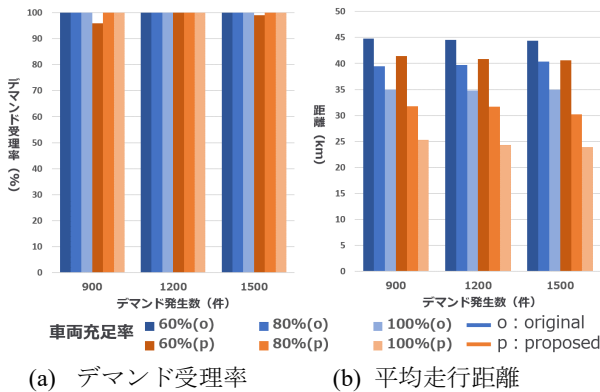


図 4 デマンド受理率と平均走行距離

デマンド受理率 (図 4(a)) から比較を行う。デマンド受理率は、受理したデマンドをデマンド発生数で割ることで算出している。デマンド受理率は、両手法とも、ほぼ全てのパラメータの組み合わせにおいて、100%を示している。しかし、経済性最適化指標において、車両充足率が 60%の時にデマンド受理率が減少している。この結果から、経済性最適化指標は、車両台数に対してデマンド発生数が多い場合にデマンドを全て処理できないことが分かる。

平均走行距離 (図 4 (b)) を比較する。平均走行距離は、稼働しなかった車両も含め、全車両の走行距離の和を車両台数で割ることで算出している。平均走行距離では、全てのパラメータの組み合わせにおいて、経済性最適化指標の方が走行距離の値が短い値を示している。

経済性最適化指標により、デマンド受理率が減少した理由を分析するために、最適化指標ごとで、配車スケジュールがどのように組み立てられていたかを分析する。一例として、デマンド発生数 1,200 件、車両充足率 60%の時の利便性最適化指標と経済性最適化指標におけるシミュレーション中の配車スケジュールリング結果を図 5、図 6 に示す。

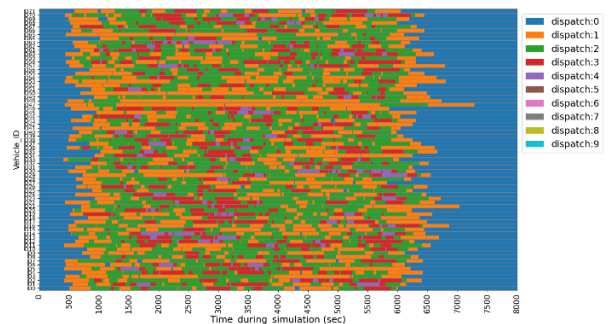


図 5 利便性最適化指標の配車スケジュールリング

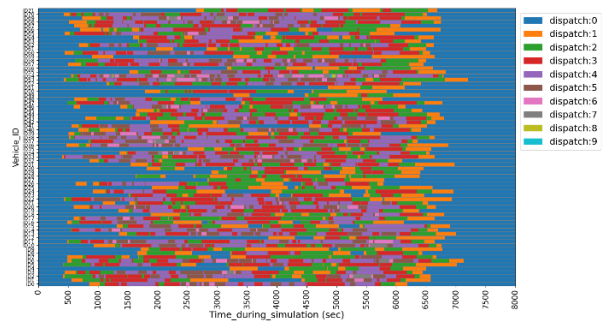


図 6 経済性最適化指標の配車スケジュールリング

このグラフの横軸は、シミュレーション中の時刻であり、縦軸は車両 ID である。車両に割り当てられているデマンド数 (図 5、図 6 中の dispatch) によって色が変わる。デマンド数は、デマンドが車両に割り当てられたタイミングで割り当て数が 1 加算され、ユーザを降車させたタイミングで割り当て数が 1 減算される。デマンド発生区間は、400 秒~5,800 秒の間である。

図 5、図 6 を比較すると、経済性最適化指標では、1 つデマンドが割り当てられた車両にデマンドが割り当てられやすくなっていることが分かる。一方、利便性最適化指標では、デマンドが一部の車両に集中せず、各車両に分散していることが分かる。このことから経済性最適化指標では、車両台数に対してデマンドが密に発生する場合に、割り当てられたデマンドが制約になり、デマンドを受理できる車両が少なくなったと考えられる。デマンドが密に発生する状況下に対応できるよう、過剰な乗合を抑制する制約を検

討する必要がある。

4.3 ユーザ満足度の評価

4.3.1 実験目的

本実験の目的は、利便性と経済性の各ニーズを持ったユーザが共存する環境において、スイッチング手法によるユーザ満足度を評価することである。実験に用いる手法は、スイッチング手法だけでなく、比較対象として利便性最適化指標（式(3)）を用いて配車を行う手法、経済性最適化指標（式(4)）を用いて配車を行う手法の計3つを用いた。

4.3.2 実験条件

本実験の実験条件について説明する。実験に用いた道路ネットワーク、実験パラメータどちらも基本的に4.2.3項で説明したものと同様である。4.2.3項での実験と異なるパラメータについて、表3に示す。デマンド発生数ごとで、実験結果に大きな影響を見られなかったため、デマンド発生数が1,200件の場合のみで実験を行った。利便性を重視するユーザと経済性を重視するユーザの比率は50%とした。

表3 実験パラメータ2

パラメータ	値
発生デマンド数 [件]	1,200
ニーズ割合 [%]	利便性：経済性 = 50 : 50

4.3.3 実験結果

利便性と経済性の満足度の評価を行う前に、各手法におけるデマンド受率率について述べる。今回の実験パラメータでは全ての手法、パラメータにおいてデマンド受率率が100%であった。そのため、利便性、経済性どちらの満足度においても公平に比較することが可能である。

この結果を踏まえ、まず利便性最適化指標と経済性最適化指標、スイッチング手法の各実験パラメータに対する利便性満足度の結果を図7に示す。

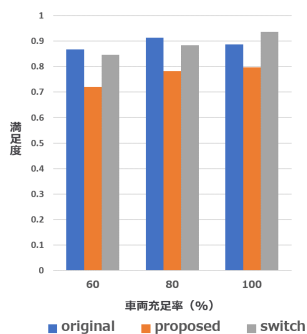
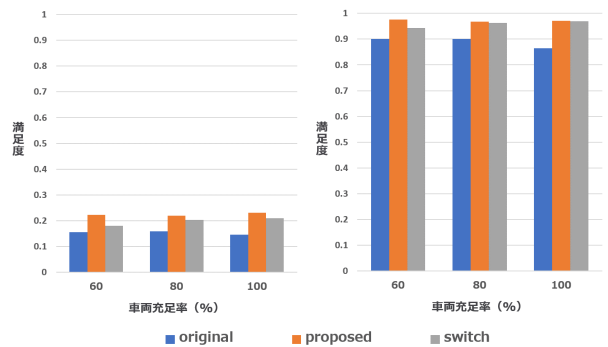


図7 利便性満足度

横軸が車両充足率であり、縦軸が満足度を示す。青色の

original が利便性最適化指標、オレンジ色の proposed が経済性最適化指標、灰色の switch がスイッチング手法である。図7を見るとスイッチング手法が利便性最適化指標のみで配車する手法と同じ水準または、利便性最適化指標のみ配車を行う手法以上の満足度となっていることが分かる。また、経済性最適化指標は利便性を重視するユーザの満足度が最も低い値を示していることが分かる。車両充足率が100%の時に、スイッチング手法が最も満足度が高くなった要因は、経済性最適化指標により、稼働していない車両を利便性を重視するユーザ向けに稼働させることが可能であったことにあると考えられる。

次に、利便性最適化指標と経済性最適化指標、スイッチング手法の各実験パラメータに対する経済性満足度を比較する。経済性を重視するユーザの満足度評価式（式(2)）では、固定料金 α と単位距離あたりの料金 β 、単位遅れ時間あたりの割戻し料金 γ のパラメータを決定する必要がある。本実験では、野田の論文[12]を参考にし、パラメータを決定した。固定料金 $\alpha = 300$ とし、 β と γ は売上をした場合と重視とユーザ評価を重視した場合のパラメータを用いた。売上重視のパラメータでは、 $\beta = 0.4$ 、 $\gamma = 0.4$ とし、ユーザ評価重視のパラメータでは、 $\beta = 0.2$ 、 $\gamma = 1.6$ としている。利便性最適化指標と経済性最適化指標、スイッチング手法の各実験パラメータに対する利便性満足度の結果を図8に示す。



(a) 経済性 (売上重視) (b) 経済性 (ユーザ評価重視)

図8 各パラメータにおける経済性満足度

売上重視のパラメータ（図8(a)）、ユーザ評価重視のパラメータ（図8(b)）どちらのパラメータにおいても、経済性最適化指標、スイッチング手法、利便性最適化指標の順に高い満足度を示していることが分かる。しかし、満足度の値として、 β と γ のパラメータに大きく依存した結果になっており、手法ごとで大きな変化がないことが分かる。

これらの結果から、スイッチング手法により利便性においては高い満足度を得られたが、経済性においては更なる満足度の向上が必要であると結論付けられる。

4.3.4 考察

経済性を重視するユーザ満足度の値の変化が小さい理由として、割り当て済みのデマンドのニーズを考慮していないことが考えられる。現状のスイッチング手法は、発生したデマンドのユーザによって最適化指標を変更するシンプルなものである。そのため、割り当て済みデマンドのニーズが考慮されず、遅延を許容するデマンドと許容しないデマンドが区別されていない。よって、割り当て済みのデマンドのニーズも考慮した配車手法の検討を行う必要があると考える。

5. おわりに

本稿では、フルデマンド型交通における持続的なサービス提供に向けたユーザ満足度の向上を目的とし、逐次最適挿入法の配車アルゴリズムをベースとした各ユーザのニーズに対応する配車方法を提案した。本稿では、利便性最適化指標と経済性最適化指標の定義、各ユーザのニーズに対応するスイッチング手法の提案を行った。そして、提案した経済性最適化指標、スイッチング手法をシミュレーション実験により評価した。

今後は、3つのことに取り組んでいく予定である。1つ目は、経済性最適化指標の検討である。実験結果より経済性最適化指標は、デマンド発生数に対して車両が十分に存在しない場合に、デマンド受率率が下がることが分かった。その原因として挙げた稼働している車両にデマンドが過剰に割り当てられない方法の検討を行う。2つ目は、スイッチング手法の検討である。実験結果より、割り当て済みデマンドのニーズを考慮する必要があることが分かった。今後は、シンプルなスイッチング手法ではなく、様々な情報を考慮した配車手法の検討を行う。3つ目は、ロバスト性の検証である。今回の実験では、非常にシンプルな道路ネットワーク上で他車両が存在しない状況で実験を行った。そこで今後は、OpenStreetMap やタクシーのオープンデータの利用、他交通車両用いたシミュレーション実験を行う予定である。

謝辞 本研究に取り組むにあたり、公立はこだて未来大学の鈴木恵二教授による協力を受けている。ここに深く感謝の意を表す。本研究の一部は JSPS 科研費 JP20K11793 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] 田柳恵美子, 中島秀之, 松原仁, デマンド対応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論文集, Vol.JSAI2013, pp.1-4 (2013).
[2] 続・デマンド型交通の手引き, 国土交通省中部運輸局, https://www.tb.mlit.go.jp/hokkaido/bunyabetsu/tiikikoukyoukoutsu/31manyuaru/08zokudemandoteki_tyuubu.pdf (最終アクセス日: 2022/01/28).

[3] 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).
[4] Shuo Ma, Yu Zhen, and Ouri Wolfson, Real-Time City-Scale Taxi Ridesharing, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol.27, No.7, pp.1782-1795 (2015).
[5] Qiulin Lin, Lei Deng, Jingzhou Sun, and Minghua Chen, Optimal Demand-Aware Ride-Sharing Routing, IEEE Conference on Computer Communications, pp.2699-2707 (2018).
[6] Fei Miao, Shuo Han, Shan Lin, John A Stankovic, Desheng Zhang, Sirajum Munir, Hua Huang, Tian He, and George J. Pappas, Taxi Dispatch with Real-Time Sensing Data in Metropolitan Areas a Receding Horizon Control Approach. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol.13, No.2, pp.463-478 (2016).
[7] Javier Alonso-Mora, Alex Waller, and Daniela Rus, Predictive Routing for Autonomous Mobility-on-Demand Systems with Ride-Sharing, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3583-3590 (2017).
[8] 大社綾乃, 大滝啓介, 小出智士, 西智樹, 相乗りのための将来需要を考慮した経路最適化, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.10, pp.1653-1661 (2019).
[9] 安彦久志, 松浦隆文, 属性を考慮した相乗りタクシーにおける送迎距離を制限した定式化の効果について, 情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS), Vol.2020-MPS-131, No.17, pp.1-6 (2020).
[10] 岩田聖, 鈴木恵二, SAVS における制約を設けた乗り合い条件が与える影響の検証, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2020 (SSI2020), pp.480-485 (2020).
[11] 野田五十樹, 学習と競合を用いた相乗りタクシー配車の価格設定分析の試み, 人工知能学会, 第 17 回 SIG-DOCMAS 研究会, (2019).
[12] 野田五十樹, 学習する利用者と進化する運行者による共進化型相乗りタクシー配車料金体系設計の試み, 情報処理学会研究報告知能システム (ICS), Vol. 2020-ICS-198, No.16, pp.1-7 (2020).
[13] Mohsina Jahan, Factors Affecting Customer Satisfaction of the Ride-sharing Industry in Bangladesh. Business Ethics and Leadership, Vol. 3, No.4, pp.74-80 (2019).
[14] Bilge Atasoy, Takuro Ikeda, Xiang Song, and Moshe E. Ben-Akiva, The Concept and Impact Analysis of a Flexible Mobility on Demand System, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.56, pp.373-392 (2015).
[15] Chaya Levinger, Noam Hazon, and Amos Azaria, Human Satisfaction as the Ultimate Goal in Ridesharing, Future Generation Computer Systems, Vol. 112, pp.176-184 (2020).
[16] Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte, The dial-a-ride problem: models and algorithms, Annals of Operations Research, Vol. 153, No. 1, pp.29-46 (2007).
[17] 恋塚葵, 大岸智彦, 自動運転車を用いたデマンド型交通における配車手法の実装と評価, 情報処理学会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-87, No.35, pp.1-7 (2021).
[18] 西川和真, 平田圭二, 竹川佳成, オンデマンド実時間配車サービス SAVS における待ち時間分散の最適化, 電子情報通信学会情報科学技術フォーラム, Vol. FIT2021, pp.1-4 (2021).
[19] Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, and Daniel Krajzewicz, SUMO - Simulation of Urban MOBility: An Overview, International Conference on Advance in System Simulation, pp.50-60 (2011).
[20] 中島秀之, 小柴等, 佐野涉二, 落合純一, 白石陽, 平田圭二, 野田五十樹, 松原仁, 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, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.4, pp.1290-1302 (2016).