

## シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価

野田 五十樹<sup>†1</sup> 篠田 孝祐<sup>†2</sup>  
太田 正幸<sup>†1</sup> 中島 秀之<sup>†3</sup>

利便性の高い公共交通手段としてデマンドバスは注目されているが、現状では小規模な運行にとどまっており、採算性や運行形態の自由度の問題をかかえている。本稿ではユビキタスコンピューティング環境を応用したデマンドバスの大規模運行の可能性を探るため、シミュレーションによりデマンドバスと従来の固定路線バスの利便性と採算性の関係を解析した。その結果、次のようなことが示された。(1) デマンド数とバスの運用台数を一定の比率に保つ場合、運行規模の拡大に従いデマンドバスの利便性は固定路線バスより早く改善し、十分な利用者がいる場合、同じ採算性でも固定路線バスよりデマンドバスの利便性を良くすることができる。(2) 利用者の分布が一極集中の場合はデマンドバスが、二極集中の場合は固定路線バスの方が利便性を改善しやすい。

### Evaluation of Usability of Dial-a-ride System Using Simulation

ITSUKI NODA,<sup>†1</sup> KOSUKE SHINODA,<sup>†2</sup> MASAYUKI OHTA<sup>†1</sup>  
and HIDEYUKI NAKASHIMA<sup>†3</sup>

Evaluation of usability of dial-a-ride bus systems is reported as a case study to assess utilities of ubiquitous computing. In order to avoid complicated subjective evaluations of such public traffic systems, we conducted a pair of simulations of dial-a-ride bus systems and traditional fixed-route bus systems, and compared usability of both bus systems. The result of the simulations tells the following features of dial-a-ride bus systems: (1) Usability of dial-a-ride systems increases faster than one of fixed-route systems when the scale of the systems increases according to the number of users. (2) When many demands occur from/to a certain point like railway stations, improvement of usability of dial-a-ride systems is better than one of fixed-route systems so that a break-even point between the two systems is reduced. On the other hand, when there are two demand centers, the fixed-route bus systems got more benefit on the usability.

#### 1. はじめに

都市部における公共交通システムは、ユビキタスコンピューティング環境を活用して人々の状況や移動目的をリアルタイムに収集することで、新たなサービスを提供できる可能性を秘めている。しかし実際には、具体的なアプリケーションがもたらす利便性がどの程度であるのかは明確ではなく、実際の運用に結び付く動きはあまりない。そこで我々は、デマンドバスという公共交通システムを取り上げ、ユビキタス環境の実現でより円滑なサービスが可能となるこのアプリケー

ションについて、利便性の評価がどの程度可能かを検討することとした。

本稿の目的は2つある。1つは、情報技術の活用により実用的になると考えられるデマンドバスという題材を用いて、情報技術による社会全体の利便性の向上をシミュレーションを通じて示すことである。インターネットの普及の例のように、新しい情報技術が社会に与える影響を予測することは一般に難しい。これは、ある情報技術が社会に十分に広く浸透するまではその技術の恩恵がなかなか顕在化せず、小規模な実証実験だけではその評価が難しいためである。本研究ではこの問題に取り組むために、社会シミュレーションを取り上げ、それにより新しい情報技術が浸透した社会である事象の効率を現状方式と比較するという方法を提案する。

もう1つの目的は、社会シミュレーションにおける人工知能の応用の可能性の1つを示すことにある。

<sup>†1</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

<sup>†2</sup> 防衛大学校

National Defense Academy

<sup>†3</sup> 公立はこだて未来大学

Future University Hakodate

社会シミュレーションでは扱う現象が幅広く、その社会の設定や人々の行動に非常に多くの自由度がある。このため、上記のような実験評価を行う場合、前提となっている設定の妥当性を検証していく必要がある。これに対して本稿では、エージェントや社会の設定はある尺度で最適化されると考え、その最適化に人工知能の手法を導入する手法を提案する。この方法の利点は、各エージェントやシステムが最適行動をとるという前提をおくことで、ゲーム理論における Nash 均衡解と同じく、広い解空間のなかで、比較的少数の設定のみを検討すればよくなる点にある。

以下では、まず 2 章において比較を行う問題の設定について述べ、3 章で個々のシミュレーションの説明を行う。続いて 4 章で実験結果を示し、5 章で考察を述べる。

## 2. デマンドバス

### 2.1 デマンドバスと関連研究

一定の路線の決められた停留所で乗客を乗降させる通常の固定路線バスに対し、乗客の要望に応じて乗降場所やバス経路を自由に変更できるバスの運行形態をデマンドバスと呼ぶ。固定路線バスの場合、地方都市のように人口が比較的少なく市域が平面的に広がる地域では、採算性の面から路線数や運用台数を十分に増やすことができないため利便性の確保が難しく、それにより利用者が減って採算性が悪化するという悪循環が生じやすい。このような状況に歯止めをかけるため、少ない運用台数で利便性を確保できるデマンドバスの運用を検討する自治体が増えてきている。

デマンドバスの形態には、

- あらかじめ決められた路線に幅を持たせ、デマンド（利用者の乗降要求）に応じてその幅内で寄り道をしてくれる寄り道タイプ
- 観光地やショッピングセンタ、市役所など利用の可能性の高い場所に停留候補地を設け、その候補地におけるデマンドを処理するよう経路を決めるセミデマンドタイプ
- 町中のあらゆる場所を出発地/目的地としてデマンドを出すことができるフルデマンドタイプ

などいくつかのタイプがある。現状ではデマンドを受けるシステム構築の難しさから、寄り道タイプあるいはセミデマンドタイプが主流であるが、ユビキタス環境が整備されることで、デマンドの情報をきめ細かく収集することが容易になると考えられ、最も利便性の高いフルデマンドバスの導入も現実的な解となってきた。

デマンドバスに関する従来研究の多くは、巡回セールスマン問題<sup>1),2)</sup> や車輻配送問題<sup>3),4)</sup> から派生した問題である Dial-a-Ride Problem<sup>5)-8)</sup> のスケジューリングアルゴリズムに関するものであり、様々な条件での最適化アルゴリズムを求める研究が主として行われてきた。Bailey ら<sup>7)</sup> および Feuerstein ら<sup>8)</sup> は、運行台数が変化した場合の最適化手法について取り組んでおり、Charikar ら<sup>6)</sup> は乗車定員を考慮にいれた方法を検討している。また、鳥居ら<sup>9)</sup> は、バスの乗り換えを考慮した場合について、内村ら<sup>5)</sup> は、鉄道など基幹交通網と連携したデマンドバスの配車最適化問題に取り組んでいる。

しかし先に述べているような、デマンドバスが具体的にどのようなメリット・デメリットを持つのか、という条件でそのメリットが発揮されるのか、という視点での評価はほとんど行われてきていない。そこで本研究では、シミュレーションによりデマンドバスの運行を固定路線バスの運行と比較することで、そのメリット・デメリットを見極め、利用者数や運行台数とバス運行の方式の関係を明らかにすることを目指す。

### 2.2 評価方法

本研究では、デマンドバスと固定路線バスの 2 つの運行方式のメリット・デメリットを評価する軸として、利用者にとっての利便性に着目する。しかし、利便性という主観的な評価を、シミュレーションに乗る形でモデル化することは難しい。特に、デマンドバスのように乗車賃や利用料など対価を要求するサービスについては、金額とサービス内容の釣り合いという要素も入ってくることになる。このため、絶対的な評価軸を用意することはより困難になってしまう。

この問題に対処するため、本研究では以下の 2 つの単純化を行う。

- バスの利用客の利便性は、待ち時間を含めた移動時間のみにより依存するものとする。バスの利便性としては、乗車時間やバスの混み具合やバス停までの距離、待ち時間や乗り心地、乗り継ぎの良さなど、多くの要素を考慮することができる。しかし、本研究ではバスなど交通機関を利用する本来の目的、つまり、目的地にできるだけ早く到達する、ということのみに注目して移動時間を使って利便性評価を行うこととする。
- 対象とするデマンドバスと同じ運行規模の固定路線バスのサービスとの比較を行う。利用料と利便性を天秤にかける代わりに、現状で同等のサービス（利用客の目的地に達するための公共交通サービス）を提供している固定路線バスとの利便性と

対比することで、料金の多寡の問題を除外する。すなわち、サービスと料金の問題を、固定路線バスとデマンドバスのサービスの良し悪しという問題に置き換えて考えることとする。

次節ではこの2つの単純化した評価方法について具体的に述べていく。

### 2.3 利便性と採算性

前節で述べているように本稿では移動時間の短縮という利便性を評価軸としてバスの運用形態によるメリット・デメリットを洗い出すことを目指している。具体的には利便性を以下のように定義する。

利便性：出発地から目的地まで乗り換えなしで到達する場合の、要求発生時刻から達成時刻までの平均時間

ここで出発時刻ではなく要求発生時刻を用いている理由は、固定路線バスとデマンドバスの条件をそろえるためである。すなわち、固定路線バスではバスが来る時刻に合わせて行動する（要求が発生する）のではなく、要求が発生した時点（＝移動を開始したい時点）で最寄りのバス停まで歩き、バス停で目的のバスを待つものとする。また、デマンドバスの場合には、要求が発生した時点でバス会社に配車を依頼するものとする。

この利便性の定義は、一見、固定路線バスに不利に思われる。バスの出発時刻が事前に分かる固定路線バスの場合、バスの時刻にあわせてスケジュールを調整できる。それにより、バスの待ち時間分、移動時間を短縮できる可能性がある。しかしこれは、交通手段により人の行動が制約を受けるというデメリットを暗黙のうちに無視したものになっている。逆にデマンドバスの場合、出発時刻が事前に分かっている場合にはバスを予約しておくといった機能が実現されることが十分考えられる。この場合、人は交通手段の制約を最小限にして行動スケジュールを組むことが可能となり、現在よりも行動に自由度が増すという利便性が生じることになる。このことは、携帯電話の普及の前と後で、待ち合わせや外出時の連絡手段の自由度が格段に拡大し、それらに対する考え方そのものが変わってしまったことに相当する。ただ、現状ではこれらの利便性を適切な形で取り扱うことができないため、本稿では、人が交通手段の制約を考えずに行動スケジュールを立てるという前提をおき、利便性の計測開始を要求発生時刻とした。

一方、採算性については、以下のように考える。バスの運行会社にとっては、採算がとれないシステムの運行は行うことができない。バス運行の採算性には、

車体の維持費、燃料費、人件費と運賃収入などが絡み、さらに運賃収入を左右する運賃設定に関しては、それにより利用者が増減するなどの2次要因が生じるため、シミュレーションでモデル化して扱うことが難しい。そこで問題を収入と支出の割合に単純化し、収入は単位時間における総乗客数（総デマンド数）、支出はバス台数に比例するものと考え、採算性は以下のように数量化されると考える。

採算性：単位時間におけるバス1台あたりのデマンド処理数

以下では、固定路線バスとデマンドバスで同じ採算性を仮定して比較を行うことで、現行システムである固定路線バスに対するデマンドバスの利便性の優劣を調べ、デマンドバスのメリット・デメリットを検証する。

## 3. シミュレーション設定

### 3.1 対象都市の設定

シミュレーションの舞台設定としては、以下のような仮想都市を考える。

- 都市全体は正方形とする。また、街路は碁盤目状であり、すべての街区は同じ大きさとする。
- すべての交差点にバス停があるものとする。デマンドバスの場合、任意の交差点から乗降するものとする。
- 交通渋滞は存在せず、バスは一定速度で運行できるものとする。
- 交差点での右左折、直進、Uターンなどはすべて同じ時間でできるものとする。
- バスには何人でも乗ることができ、乗降の時間は無視できるものとする。

一方、デマンドに関しては、以下のような条件を仮定する。

- デマンドは一定時間ごとに一定数発生するものとする。
- デマンドの発生点（出発点）および目的点は、一様にランダムに決定される。
- 目的地までバスを利用するよりも歩いて行った方が早い場合、バスは利用しない。この場合、デマンドは拒否されたと見なされ、利便性の評価の際には、徒歩による時間がデマンド達成時間として用いられる。
- バスの乗り換えは行わないものとする。

### 3.2 固定路線バス

固定路線ではどのような路線を引くかによって、利便性が変化する。またこの利便性は、都市サイズ、バ

スの台数，速度，路線の数によっても変化するため，最適の路線図を解析的に求めることは容易ではない．そこで，ここでは遺伝的アルゴリズムの手法を用いて，準最適な路線を求めることとした．

まず，与えられた都市に対して，ある決められた数の路線の組を遺伝的アルゴリズムの各個体とする．すなわち，1 個体は一定数の路線を持ち，この路線の組でバスを運行して利用者の利便性を評価するものとする．ただし，一般性を保ちつつ問題を簡単にするため，1 路線あたりのバスの台数は固定（1 台）とする．また路線の形状として，始発終着駅を往復運行する往復路線と，円環状の路線を右回り左回り両方向に運行する循環路線の 2 種類が存在するものとする．

各世代は 100 個体からなるとし，各個体について 50 個のデマンドをランダムに生成し，式 (1) 式により利便性を計算し，適合度とする．この評価によるベスト 10 の個体が生き残り，各々 8 個体ずつコピーを作成し，残り 20 個体は新たにランダム生成して次の世代を構成する．このうち，コピーについては，以下で述べる突然変異と交差を適用して個体差を生じさせる．ただし，1 体は完全なコピーを残すものとする．また，ランダム生成は以下のような手順で行う：任意の交差点を 2 つ，ランダムに選択し，その 2 点を結ぶ L の字型（往復路線），あるいは口の字型（循環路線）の選択を行う．往復・循環経路の選択確率は 1/2 とする．

この世代交代を 1000 世代分行い，最終世代で最も優秀な個体の路線を準最適な路線配置と見なした．なお，個体数 100 および世代数 1000 は，十分な多様性を保持しつつ効率良く解空間を探索できる値として選んでいるが，この値については今後，十分吟味する必要がある．

適合度である各個体の路線の利便性は，デマンドの平均達成時間により計測する．固定路線の場合のデマンドの達成時間  $T_d$  は，次式のように表すことができる．

$$T_d = (L_{src} + L_{dst})/V_{walk} + \text{rand}(0, (2 \times L_{route})/(M_{bus} \times V_{bus})) + L_{bus}/V_{bus} \quad (1)$$

ただし，

- $L_{src}$  出発点から乗車バス停までの距離
- $L_{dst}$  降車バス停から目的地までの距離
- $L_{route}$  路線長
- $L_{bus}$  乗車バス停から降車バス停までの路線距離
- $V_{walk}$  徒歩による移動速度
- $V_{bus}$  バス速度

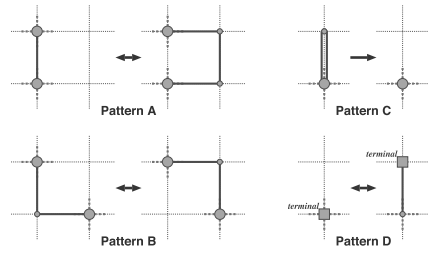


図 1 突然変異パターン  
Fig. 1 Mutation pattern for GA.

$M_{bus}$  路線あたりのバス台数（ただし，本実験では 1 に固定）

を表している．また， $\text{rand}(x, y)$  は， $[x, y]$  の区間で一樣に発生させた乱数である．すなわち，この式の右辺の第 1 項は出発地および目的地とバス停の間の徒歩移動時間を，第 3 項はバス乗車中の移動時間を表している．また，第 2 項はバス停での待ち時間をモンテカルロ的に表している．なお，この第 2 項において， $(2 \times L_{route})/(M_{bus} \times V_{bus})$  はバスの平均時間間隔を示している\*1．

この式において，乗車バス停，降車バス停の選び方の組合せが複数生じる場合がある．また，複数路線を運行している場合，どの路線に乗るか自由度がある．そのため，各々の路線のすべての乗降車バス停の組合せについて上記の達成時間を求め，その最小となる路線を利用するものとする．

路線の経路の突然変異には，以下の 4 つの変換パターンが用意されている（図 1）．

- Pattern A**：隣り合う交差点を経路が直接結んでいる場合，それをコの字状に迂回する経路に変換する（およびその逆変換）．
- Pattern B**：ある街区の対角線位置にある交差点を L の字状に経路が結んでいる場合，それを逆 L の字の経路に変換する．
- Pattern C**：隣り合う交差点を直接往復しているような経路がある場合，それを縮退させる\*2．
- Pattern D**：往復路線の場合，ターミナル駅を 1 づつ

\*1 往復路線バスの場合は行き帰りの総延長  $2 \times L_{route}$ ，循環路線バスの場合は右回り左回りの総延長  $2 \times L_{route}$  を，各々  $M_{bus}$  台のバスで運行するために，バスの時間間隔は  $(2 \times L_{route})/(M_{bus} \times V_{bus})$  となる．

\*2 Pattern C は，盲腸のように延びた枝を往復するだけの経路区間が形成されたとき，それを縮退させるためのパターンである．これは Pattern A と Pattern B の組合せによって表現できる．しかし，A・B の 2 段階変異では，その変異の途中段階の状態は多くの場合，改悪となってしまうため，GA の過程で盲腸状の路線が縮退せず多く無駄に生き残ってしまうことが多かった．この局所最適解を避けるため，このパターンを導入した．

ロック移動し、路線を伸ばす/縮める。

ただし、突然変異は、1 路線につき最大 1 カ所のみとした。

交差を行う場合には、複製を作る時点で、親の個体内にある各路線がある確率で他の個体の路線と置き換える操作を行う。すなわち交差は路線単位で起こるものとし、路線の中では突然変異のみで変化するものとした。

### 3.3 デマンドバス

デマンドバスでは、各バスが各々いくつかのデマンド（利用者の乗降車希望地点のペア）を持っており、そのデマンドを達成する最適な経路を計画して運行し、利用者を乗降させていく。デマンドの配分方式は、

- バッチ処理方式：デマンドは予約の形であらかじめためておき、それらをバッチ的に処理して最適な配分を計算する。よって、デマンドの発生時刻は乗車要求時刻より一定時間以上先立っている必要がある。
- リアルタイム配分方式：デマンドが発生した時点で、運行しているバスのうちそのデマンドを処理するのに最も適したバスに配分する。よってデマンド発生時刻は乗車要求時刻と同じでよい。

今回はこれらのうち、利用者の行動スケジュールに与える制約が少なく、式 (1) で示した固定路線バスの利便性とほぼ同じ条件で比較できるものとして、リアルタイム配分方式を仮定した。

2.1 節でも述べているように、一般に、デマンドバスで最適な配分および経路探索をする問題は動的な巡回セールスマン問題と等価であり、完全な最適解を求めることは計算量の点で難しい。特にリアルタイム方式では新たなデマンドを受け入れるにあたって、既存のデマンドの締切り時刻<sup>\*1</sup>を越えないように配分する必要があるため、問題としてはより複雑になっている。そこで今回は、マルチエージェントによる単純なオークションシステムを応用した、以下のような逐次最適挿入法を用いて準最適解を求める方法をとった（図 2）。

- (1) デマンドは出発地点（乗車地点）と目的地（降車地点）の 2 つの経由地点に分割され、各バスは配分されたデマンドをこれらの経由地点のリスト（経由地点リスト）として保持している。バスが各経由地点に到着した場合には、その地点はリストから取り除かれる。また、いったん

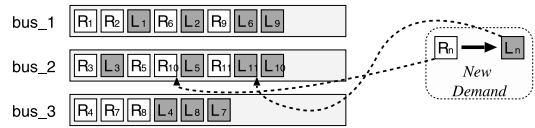


図 2 逐次最適挿入法

Fig. 2 Successive best insertion method.

保持された経由地点の列の順序は、変更されないものとする。

- (2) 各バスは各時点において、自分がかかえているデマンドの達成予定時刻を計算する。この達成予定時刻は、そのバスが新たにデマンドをかかえずにリストにある各経由地点を順番どおり回ると仮定して計算する。
- (3) 新たにデマンドを配車センタが受けたときには、そのデマンドを各バスに提示する。各バスはデマンドの出発地点および目的地を各々、現在の経由地点リストの任意の場所に挿入し、全経由地点における挿入により生じる遅延の総和を、上で求めた達成予定時刻と比較して求める。さらに、新しいデマンドの達成予定時間も求め、この達成予定時間と遅延の総和を挿入のコストとする。出発地点と目的地の挿入場所のペアのすべての組合せについて、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、挿入により既存あるいは新しいデマンドの締切り時刻を過ぎてしまう場合は、その挿入は候補から除外される。すべての可能性で締切り時間を過ぎてしまう場合は入札を行わない。
- (4) すべてのバスからの入札のうち、最もコストが小さくなるものを求め、そのバスにデマンドを配分する。

## 4. 実験結果

前節で述べた両シミュレーションを、街のサイズを  $11 \times 11$ 、バスと徒歩の速度比を  $1:8$  としていくつかの評価実験を行った。

### 4.1 バス台数を固定した場合

まず、運行バス台数を固定し、デマンドを徐々に増やしていった場合の利便性の変化を検証した。

図 3 は、バス台数を固定（デマンドバスの場合は 3 台、固定路線バスの場合は 3 路線）し、単位時間あたりのデマンドの発生件数を変化させた場合の、各デマンドの平均達成時間を示している。固定路線バスの場合、バスが満員でない限り平均達成時間はデマンドの

\*1 締切り時刻とは、目的地到達時刻がその時刻を越えてしまう場合、バス以外の代替手段を選択する判断条件となる時刻をさす。3.1 節で述べているように、今回の設定では、そのデマンドをすべて徒歩で移動したと仮定した場合の到達時刻とした。

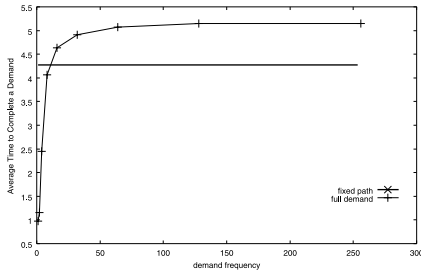


図 3 バス 3 台の場合のデマンドあたりの平均達成時間の変化  
Fig.3 Changes of average time to complete a demand in the case of three buses.

発生件数には関係ないので、横一直線となる。一方、デマンドバスの場合は、デマンドの発生件数が多くなるに従い、利便性 (= デマンド達成時間の逆数) が急速に悪化し、5 を超えたあたりで飽和する。これは、新規に発生したデマンドによりバスの経路に寄り道が増え、他の利用者の達成時間を遅らせることが原因となっている。また、デマンド達成時間が飽和するのは、多くのデマンドが締切り時間をオーバーしてデマンド拒否になってしまうためである\*1。

すなわち、運行バス台数を固定した場合、デマンドバスの利便性はデマンドの増加により急速に悪化し、固定路線バスより優れた利便性を示すには、バスが絶えず空いている状態でなければならないことが分かる。

4.2 採算性を固定した場合

バスの利用者が増えた場合、バス会社としては運行台数を増やしても採算がとれることになる。そこで、デマンドの増加に従ってバス台数を増やした(運行規模を拡大した)場合の利便性の変化について実験を行った。

図 4 は、採算性を一定に保つ(単位時間あたりのデマンド発生件数とバス台数の比率を固定した)場合の、デマンド発生件数に対する平均デマンド達成時間の変化である。デマンドバスに関しては異なる採算性(デマンド頻度バス台数比率)ごとにその利便性がプロットされている。固定路線の場合は、採算性の違いによって利便性に差は生じないため、1つのプロットとなっている。ただし、固定路線において運行規模を拡大する場合、路線あたりのバス台数を増やすのではなく、路線の数を増やす形で総バス台数を増やしている\*2。図 4 から、固定路線バス、デマンドバスともに、

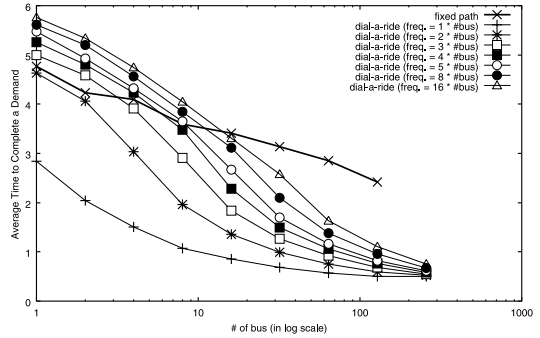


図 4 デマンド頻度-バス台数比率を一定に保った場合のデマンドあたりの平均達成時間の変化(対数表示)

Fig.4 Changes of average time to complete a demand when the number of buses increases constantly according to the number of demands.

運行規模が拡大(デマンド発生件数が増加)するに従い、利便性が改善されることが分かる。これは、固定路線バスの場合は路線数の増加によりデマンドに対する路線の選択肢が増えることが改善の原因になっており、デマンドバスの場合はバス台数の増加によりデマンドの競合による寄り道やデマンド拒否が減少することが改善の原因になっている。

しかし、改善の速度には違いがあり、デマンドバスの方が固定路線バスに比べ、運行規模拡大による利便性の改善が速いこともグラフから読み取れる。すなわち、いずれの採算性をとったとしても、ある運行規模以上ではデマンドバスの方が固定路線バスより高い利便性を提供できることを、この結果は示している。

4.3 デマンドの一極集中による利便性の変化

前節までは、各デマンドの始点・終点は都市全体に一樣に分布すると仮定してきた。このような状況は、大きなショッピングセンタ内などで運用する通勤者のようなシステムに相当する。一方、通常の都市交通を考えると、駅や商店街など、デマンドが集中することが一般的と考えられる。そこで以下では、このデマンドがいくつかの地点に集中した場合に、デマンドバスや固定路線バスの利便性がどのように変化するかを調べる。

まず、デマンドの始点あるいは終点が、仮想都市の中心に集中する場合を調べてみる。実験の設定としては、デマンドの始点・終点のうち一方が市の中心になる確率を (a) 0.0 (前節までの一樣なデマンドと同じ設定), (b) 0.5, (c) 0.7, (d) 0.9, (e) 0.99 とし、各々の場合において、前節までの実験と同じ設定で評価を行った。ただし、この残りの始点・終点は、都市全体から一樣に選択するものとする。結果を図 5 に示す。

この図から、運行規模が大きくなるに従い、いずれ

\*1 3.1 節で述べているように、デマンド拒否になったものについては、出発地から目的地までの全行程を徒歩で移動したものとしてデマンド達成時間を計測している。  
\*2 すなわち、路線数を増やすごとに前節で述べている遺伝的アルゴリズムに従い準最適解を求めている。

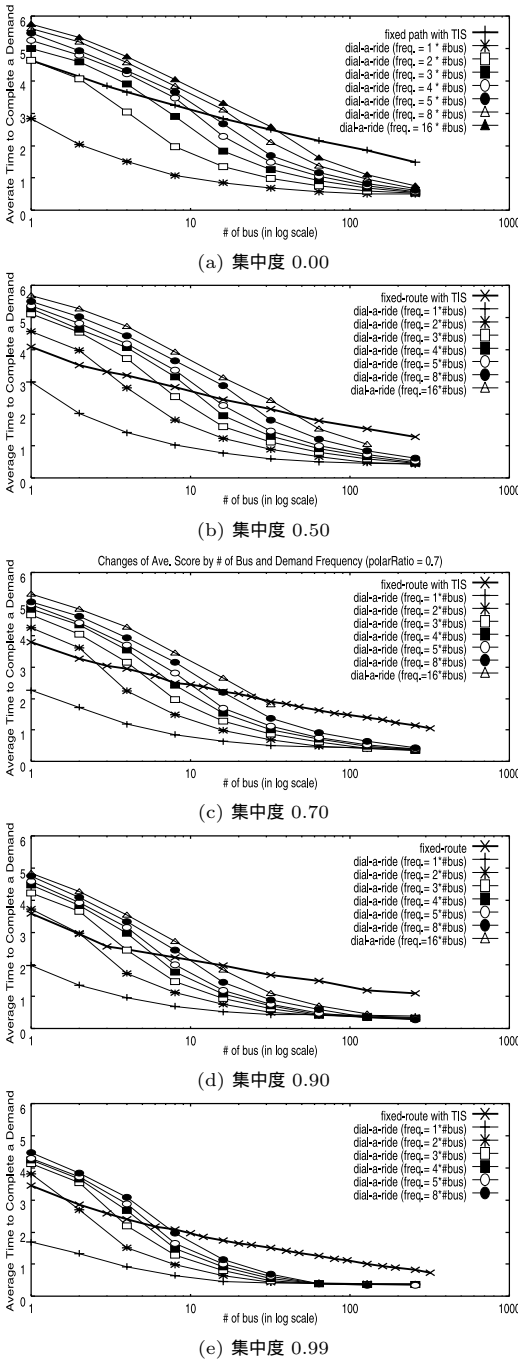


図5 デマンドが都市の中心に集中した場合の利便性の変化  
Fig.5 Changes of average time to complete a demand when the ratio of concentrated demands is changed.

の運行形式でも利便性が改善していく傾向は保たれるが、一極集中が進むにつれ、デマンドバス・固定路線バスともに利便性が改善（グラフ全体が下がる）していくことが分かる。特に、各採算性に対するデマンドバスの利便性の線が固定路線バスを下回る点（以下、

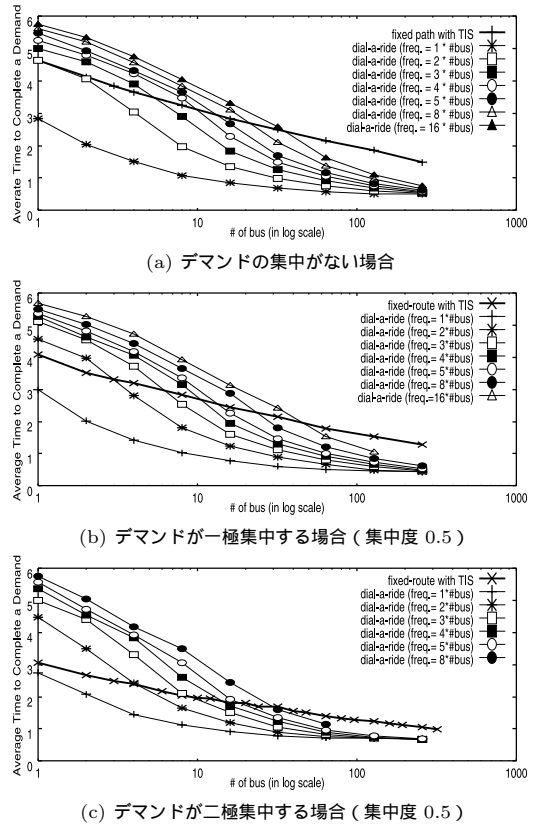


図6 デマンドの集中の極が増えた場合の効果

Fig.6 Comparison of average time when the number of concentration centers is changed.

利便性逆転点と呼ぶ)に注目すると、集中が進むに従い、より小さな運行規模で利便性逆転点を迎えることが分かる。つまり、デマンドが一極集中する場合には、よりデマンドバスにメリットがあることが分かる。

4.4 デマンドの二極集中による利便性の変化

つぎに、デマンドの集中の極が2つに増えた場合を考える。すなわち、駅前とショッピングセンタが離れた位置にあり、都市全体からその二極への移動およびその二極間の移動を行う利用者が多い場合を想定した実験を行った。極の位置は、11×11の碁盤目の(2,2)および(8,8)の位置とした。

図6は、各デマンドの始点・終点が0.5の割合で二極のいずれかに集中する場合の結果を、集中なしおよび一極集中の結果と比較したものである。この結果から、二極集中の場合は一極集中の場合と異なり、固定路線バスの利便性の改善の方がデマンドバスの改善より大きいことが分かる。よって、利便性逆転点は右に寄ることになり、より広範囲の条件で固定路線バスが有利であることが分かる。

このように、デマンドが集中する場合でも、その集中のタイプによりデマンドバス・固定路線バス相互に有利な場合がありえることが分かる。

## 5. 考 察

### 5.1 デマンドバスの特性と運行規模

以上の実験の結果をまとめると、以下のようなことが分かる。

バス台数を固定した場合、デマンド頻度が増えるに従い、デマンドバスでは利便性は急速に悪化する(図3)。一方、固定路線バスではバスが満員でない限り、デマンド頻度は利便性に影響を与えない。このため、同じ台数で運行する限り、デマンド頻度がかなり低い場合にはデマンドバスが、頻度が多少とも高い場合には固定路線バスの方が利便性が高くなる。採算性を考えた場合、できるだけ多くのデマンドをさばく必要があるが、デマンドバスの場合、バス台数を固定する場合にはデマンドの増加や運行規模の拡大によって、利便性が悪化することは避けられない。すなわち「規模を大きくして客が増えれば採算がとれる」という単純な図式はなり立たないことが分かる。

一方、デマンド頻度とバス台数を一定比率で比例させた場合、デマンド頻度が高くなるに従い、固定路線バスに比べデマンドバスの方が急速に利便性を改善できる(図4)。ただ、デマンド頻度とバス台数の比率(1台、単位時間あたりのデマンド数)を大きくとるほど、利便性逆転点は右に寄るようになる。よって、運行規模が大きくなるに従いデマンドバスの方が固定路線バスよりも高い利便性を確保できるが、採算を重視(バスあたりのデマンド頻度を大きく)すると、より大きな運行規模を必要とすることが分かる。

また、デマンドが数個の極に集中する場合、極の数により規模拡大による両方式の利便性の改善度合いが異なることが分かった。まず一極集中の場合、集中が進むにつれ両方式の利便性が改善するが、デマンドバスの方が改善の速度が速い。これは、デマンドの集中によりデマンドバスの各バスがその集中の極を必ず通るように自然に整理され、これにより全体的な利便性が改善されたものと考えられる。結果として、固定路線バスとデマンドバスで利便性が逆転する運行規模が小さくなることを意味している。

集中の極の数が2つに増えた場合は固定路線バスにメリットがあった。これは、その2つの極を移動する客が多い場合、固定路線バスではその間を結ぶ路線を増やすことで効果的に利用者をつなぐことができ、利便性の改善に結び付いていると考えられる。一

方、デマンドバスでは利用者を歩かせないよう経路選択を行うため、必ずしも二極を最短で結ぶ経路とならず、結果として固定路線バスほど利便性が上がらない結果となったといえる。ただし、利用者の家の前まで迎えにくるデマンドバスに対し、利用者が路線のバス停まで歩くことを前提とする固定路線バスを比較しており、デマンドバスにとって多少不利な条件になっている。

以上のように、デマンドバスは利用者およびバス台数が大きくなった場合にそのメリットを発揮でき、特にデマンドが一極に集中するケースでそのメリットがより明確になることが分かる。一方、デマンドバスも万能ではなく、運行規模が十分でない場合やデマンドが二極集中の場合などでは、従来の固定路線バスの方が利用者にとってメリットがあることが分かった。

これらの結果は、デマンドバスに対し新たな視点を与える。従来デマンドバスは、主として利用者の少ない地域における公共交通の生き残り策として考えられてきた。これは、図3に示したグラフの最も左側の部分にあたる。つまり、利用者が非常に少ない場合でもデマンドバスならば少ないバスで路線バスよりすぐれた利便性を提供できる。一方、図4以降に示した結果では、利用者数およびバス台数が非常に大きい領域でも、デマンドバスの利便性が路線バスを上回る場合がありうることを示している。すなわち、これまでデマンドバスは無用と考えられていた大都市域においても路線バスをデマンドバスに切り替えて運行することを検討する意味があることが、これらの実験結果から分かる。また、一律にデマンドバスに切り替えるのではなく、利用者の増加に従い、デマンドバス → 固定路線バス → デマンドバスと運行形態を切り替えることが、利用者の利便性とバス会社の採算性を両立させるのに重要であることも、これらの結果から分かる。

このような特性は、デマンドバス普及に重要な示唆を与える。デマンドバスでは従来の路線バスよりも利用の手順が複雑であるため、簡便な手順でデマンドを受け付けたり、デマンドを構成する細かい条件(出発地、目的地や時間的制約など)を利用者を煩わせることなく集約し、その結果求められた配車プランをバス運転者に伝達・ガイドするシステム、さらに、利用者にはバス来訪を通知するといった機能が実現されることが望ましい。これらの機能の多くは、高機能な携帯電話などユビキタス環境が充実することで可能となるものであり、多くのシステム投資や研究開発が必要となるであろう。よって、運行規模が大きく高い投資効率が期待できる大都市域でのデマンドバス運行に意味



があるとするれば、そこで実用化技術開発が行われ、結果として地方においても整備可能な基盤技術が確立することが期待できる。その意味で、大規模な領域でのデマンドバスのメリットは、重要であるといえる。

### 5.2 実験設定についての検討

4章では、都市のサイズや形状、およびバスと徒歩の速度比を与えられたものとして実験を行った。しかし本来ならば、これらは現実則した値、あるいは一般性の得られる値を選択する必要がある。

まず都市のサイズおよび形状について考えると、今回の実験では2つのバス運行形態の利便性の相対比較にのみ着目している。都市形状はその両方の運行形態に対して同様に影響してくるので、4章で示された全体的な傾向は維持されると考えられる。ただし、極端に細長い都市などでは、2つの運行形態の利便性にほとんど差が生じない(いずれの場合も細長い都市を往復するようにバスが移動するようになるため、利便性はほとんど同じになってしまう)。このように都市の形状は両バスシステムの全体的な傾向の顕在化には影響があると考えられ、今後、検討していく必要がある。

一方、速度比の変化については、両方式に異なる影響を与える。徒歩の速度は、固定路線バスではバス停までの徒歩移動時間として直接的に利便性に反映されるが、デマンドバスでは、締切り時間を決める要因として、間接的にのみ影響を与える。今回用いた速度比1:8を一般的な市街地でのバス速度である時速10~20キロにあてはめると、徒歩速度は時速1.25~2.5キロとなる。これは通常の歩行速度時速4キロに比べるとかなり遅めになっている。つまり、今回の設定は、純粋に移動時間という観点では、若干、固定路線バスには不利なものになっている。ただ、徒歩による身体的・心理的疲労といった要素を考えると、徒歩が必要となる固定路線バスよりは、door-to-doorのサービスを提供できるデマンドバスの方が利便性を高く評価すべきという考えもある。今回の実験ではデマンドバスの利便性の全体的傾向を調べることを主眼としたため、上記のことをまとめて速度比を設定したが、今後は徒歩移動の主観的・心理的負担などのモデル化・精緻化が必要であると考えられる。

また、固定路線バスの最適路線配置をGAで求める際に、各路線あたりのバス台数を1として仮定した。一方、多くのバス路線では複数台のバスで運行することが通常である。今回、路線あたりのバス台数を固定したのは、GAによる探索空間の次元を削減するためであり、そのかわり、GAの過程で1つの個体の中に同じ経路を持つ路線が複数生じることを排除しな

いことで、路線あたりの運行台数の増減を表現できると見なした。これはあくまで近似であり、厳密に計算すれば、式(1)の第2項で示される待ち時間の平均が異なってくる。すなわち、まったく同じ経路を持つ路線(バス台数1)が $N$ 個ある場合、その平均待ち時間は $(2 \times L_{route}) / ((N + 1) \times V_{bus})$ となるが、1つの路線に $N$ 台均等に運行した場合の平均待ち時間は $L_{route} / (N \times V_{bus})$ となる。ただ、バス1台ごとに路線が独立していれば、微妙にずれた路線で面的に都市をカバーして、徒歩移動時間を削減できることも考えられ、一概にどちらの方式が優れているかは明確ではない。この点の精緻化についても、今後の課題である。

## 6. おわりに

本稿では、デマンドバスの利便性と採算性を関係性を調べるため、シミュレーション実験を用いて固定路線バスとデマンドバスの比較を行うことを試みた。その結果によれば、デマンドバスは十分に大きな需要(運行規模)があれば、採算性を維持しながら固定路線バスより高い利便性を提供できることが示された。

また、駅前のようなところにデマンドが極集中する場合にも、運行規模の拡大によるデマンドバスの利便性向上は優れていることが判明した。一方、集中の極が2つになった場合は、固定路線バスの利便性向上が上回り、一様にデマンドバスが有利であるわけではないことが、実験により示された。

最初に述べているように、本稿の目的は、ユビキタスコンピューティング環境のような情報基盤により可能となるサービスの利便性を具体的に示すことと、人工知能の手法を応用することで、さまざまな社会シミュレーションが可能となることを示すことであった。まず前者に対しては、デマンドバスというサービスの利便性を絶対的に示す代わりに、既存のサービスである固定路線バスと相対比較することで、多くの要因が関係する利便性を抽象的に扱う手法を提案し、デマンドバスが有利となる条件を洗い出すことに成功した。特に、従来は無用と考えられてきた大都市域でのデマンドバスの運行にメリットがあることを示したことは、デマンドバス普及の方向性に示唆を与えるものと考えられる。また、後者に対しては、固定路線バスとデマンドバスについて、各々遺伝的アルゴリズムとマルチエージェントによるオークションという人工知能的手法を用いることで各々の最適運用を求めるという方法をとった。Izumiら<sup>10)</sup>でも用いられているように、個人の行動や社会システムがある種の最適を目指すというモデルは複雑な社会現象を計算機で扱う1つの可

能性であり、そこにおいて、人工知能的手法はまだまだ多くの可能性を秘めていると考えることができる。本稿では、まだ遺伝的アルゴリズムやマルチエージェントオークションの比較的単純な手法しか取り上げなかったが、1つの方向性を示していると考えられる。

ただし、ここで示したシミュレーションは多くの現実的要素を簡略化しており、今後はそれらの要素を取り入れたシミュレーションを行っていく必要がある。具体的には、以下のような要素を考慮していく必要がある。

- シミュレーションの単位と現実との擦り合わせ：今回の実験では具体的な町のサイズ、バス速度などは抽象化してしまっている。今回示した  $11 \times 11$  の町が実際のどの規模の町であるかは、具体的な数値を調査して埋め込んでいく必要がある。また、用いた仮想都市についても、より具体的な都市を対象に評価を行っていく必要がある。
- 渋滞および乗客の混雑率：今回の実験では、背景交通やバス自身による渋滞を考慮していない。また、バスの乗降にかかる時間なども無視している。より精密な評価のためには、これらの要因を含めたシミュレーション設定を行う必要がある。
- 利便性向上による利用率の変化：本稿では、利用者の数が固定であると仮定して議論を進めた。一方、利便性が改善されれば利用者が増え、利用者が増えれば運行規模を拡大できて、より利便性を改善できる可能性がある。これらのフィードバックを含めた社会シミュレーションを検討する必要がある。
- 準最適化手法の精緻化：今回、固定路線バス、デマンドバスの両方において、各々GAおよび逐次最適挿入法を準最適解を求める手法として用いている。これらの適用について、GAの個体数や世代交代回数、デマンドバスの配車・巡回計画の異なる最適化手法の検討など、準最適化手法の精緻化の検討が必要である。

### 参 考 文 献

- 1) Krumke, S.O., de Paepe, W.E., Poensgen, D. and Stougie, L.: News from the Online Traveling Repairman, Lecture Notes in Computer Science, Vol.2136, p.487 (2001).
- 2) Bianco, L., Mingozzi, A., Riccardi, S. and Spadoni, M.: Exact and Heuristic procedures for the traveling salesman problem with precedence constraints, based on dynamic programming, *INFOR*, Vol.32, No.1, pp.19-31 (1994).

- 3) Savelsbergh, M.W.P. and Sol, M.: The general pickup and delivery program, *Transportation Science*, Vol.29, No.1, pp.17-29 (1995).
- 4) Li, H. and Lim, A.: A Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows, *IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Vol.13, pp.160-167 (2001).
- 5) 内村圭一, 斎藤隆司, Takahashi, H.: 公共サービスにおける Dial-a-Ride 問題, 電子情報通信学会誌 A, Vol.J81-A, No.4, pp.599-60 (1998).
- 6) Charikar, M. and Raghavachari, B.: The Finite Capacity Dial-A-Ride Problem, *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp.458-467 (1998).
- 7) Bailey Jr., W.A. and Clark Jr., T.D.: A simulation analysis of demand and fleet size effects on taxicab service rates, *Proc. 19th conference on Winter simulation*, pp.838-844, ACM Press (1987).
- 8) Feuerstein, E. and Stougie, L.: On-line single-server dial-a-ride problems, *Theoretical Computer Science*, Vol.268, No.1, pp.91-105 (2001).
- 9) 鳥居健太郎, 愛須英之, 田中俊明: 乗り換えを想定した需要に対する Dial-a-Ride スケジューリング, 電気学会産業計測制御研究会 (2002).
- 10) Izumi, K. and Ueda, K.: Analysis of Dealers' Processing Financial News Based on an Artificial Market Approach, *Journal of Computational Intelligence in Finance* (1999).

(平成 19 年 4 月 2 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



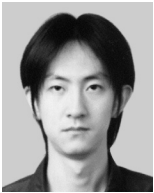
野田五十樹 (正会員)

1992 年京都大学大学院工学研究科電気工学第 2 専攻博士課程修了。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所。2002 年改組により、独立行政法人産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター。2004 年より同研究所情報技術研究部門主任研究員。1999~2000 年スタンフォード大学言語情報研究センター滞在研究員。博士(工学)。神経回路網によるシンボル・パターン統合処理, 機械学習, マルチエージェントシステム, 分散シミュレーション・社会シミュレーション, 災害情報システムの研究に従事。人工知能学会会員, RoboCup Federation 理事。



篠田 孝祐 (正会員)

2004年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了。博士(知識科学)。2005年より防衛大学校情報工学科助教,現在に至る。災害等の社会問題へのマルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決に興味を持ち,最近は,ネットワーク的視点からの問題解決手法ならび分析の開発に取り組んでいる。人工知能学会会員。



太田 正幸 (正会員)

2005年東京工業大学大学院数理・計算科学専攻博士課程修了,現在,独立行政法人産業技術総合研究所情報技術研究部門,産業技術総合研究所特別研究員。博士(理学)。機械学習,マルチエージェントシステム,分散シミュレーションの研究に従事。人工知能学会,ソフトウェア科学会各会員



中島 秀之 (正会員)

公立はこだて未来大学学長。産業技術総合研究所情報技術研究部門研究顧問。東京大学大学院情報工学専門課程修了(工学博士)。人工知能を状況依存性の観点から研究。マルチエージェントならびに複雑系の情報処理とその応用に興味を持っている。認知科学会元会長,ソフトウェア科学会元理事,人工知能学会元理事,情報処理学会副会長。マルチエージェントシステム国際財団元理事。主要編著書:『知能の謎』(講談社ブルーバックス),『AI事典第2版』(共立出版),『知的エージェントのための集合と論理』(共立出版),『思考』(岩波講座認知科学8),『記号の世界』(岩波書店),『Prolog』(産業図書)。