

## デマンドバスはペイするか?

野田五十樹<sup>†,††</sup> 太田正幸<sup>†</sup> 篠田孝祐<sup>†,††</sup> 熊田陽一郎<sup>††</sup> 中島秀之<sup>†,††</sup>

<sup>†</sup> 産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター 東京都江東区青海 2-41-6

<sup>††</sup> 北陸先端科学技術大学院大学

E-mail: <sup>†</sup>{I.Noda,h.nakashima}@aist.go.jp, <sup>††</sup>{ohta,kshinoda}@carc.aist.go.jp, <sup>†††</sup>ykumada@jaist.ac.jp

あらまし 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営にとどまっており、採算性の問題を抱えている。本稿ではデマンドバスの大規模運営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) デマンドバスはデマンドの増加に従い急速に利便性が悪化する。(2) デマンド数とバスの運用台数を一定に比率に保つ場合、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する。(3) 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よくすることができる

キーワード デマンドバス、シミュレーション、遺伝的アルゴリズム、利便性、採算性

## Is Demand Bus Reasonable in Large Scale Towns?

NODA, ITSUKI<sup>†,††</sup>, Masayuki OHTA<sup>†</sup>, Kosuke SHINODA<sup>†,††</sup>, Yoichiro KUMADA<sup>††</sup>, and

Hideyuki NAKASHIMA<sup>†,††</sup>

<sup>†</sup> Cyber Assist Research Center, AIST, 2-41-6 Aomi, Koto-ku, Tokyo, 35-0064 Japan

<sup>††</sup> JAIST, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{I.Noda,h.nakashima}@aist.go.jp, <sup>††</sup>{ohta,kshinoda}@carc.aist.go.jp, <sup>†††</sup>ykumada@jaist.ac.jp

**Abstract** Demand-bus, or dial-a-ride systems are focused as a style of new transportation systems for town area. While it is reported that such systems improve usability of bus systems when it is applied in a small town/area, it is not clear what is the condition for the system are reasonable compared with traditional fixed-route bus systems. We conducted a couple of computer simulations of demand-bus and fixed bus systems to compare usability and profitability of both systems. The result of the simulations shows: (1) Usability of the demand-bus drops very quickly when the number of demands increases. (2) When we scale up the number of buses according to the number of demands proportionally, the usability of the demand-bus is improved more significantly than the fixed-bus (3) When the scale of town is large enough, the demand-bus system is a reasonable solution from both viewpoints of usability and profitability.

**Key words** dial-a-ride, demand-bus, simulation genetic algorithm, usability, profitability

### 1. はじめに

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を自由に変更できるバスの運営形態をデマンドバスと呼ぶ。固定路線バスの場合、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ず、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ー、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、携帯電話など情報インフラの普及によりデマンドの情報をきめ細かく収集することが容易になってきており、フルデマンドバスの導入も比較的現実的な解となっている。

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 [2], [15] や車輻配送問題 [3], [18], [24], [25], [28] から派生した問題である Dial-a-Ride Problem [4], [34] におけるスケジューリングアルゴリズムに関するものである。これら最適化問題にアルゴリズムの研究は、主に以下のような分類に分けることができる。

- 運行車両に関する制約条件による違い: 運行台数 (単数あるいは複数) による変化 [6], [21]~[23], [28], [31], 乗車定員に制限がある場合の配車 [4], [16], および乗り換えの有無による比較 [32]。

- オンライン、オフラインアルゴリズム: [1], [6]~[8], [10]

- 荷物などの収集、配送に一定の時間制約を加えた問題 [1], [14], [20], [22]

- 環境に対する条件: 基幹交通網との結合 [13], [33], [34], 対象領域 (地域) の規模 [9], [29], [30], 交通状況の考慮 [10], [19] など

従来のデマンドバス (Dial-a-Ride) 問題に関する研究では、上記の分類を含めた様々な条件での最適化アルゴリズムを求める研究が行なわれてきた [6], [34]。それらの中で適応されているアルゴリズムの多くは、local search [12] や tab search [5], simulated annealing [26], [27], GA 等の従来からある最適化アルゴリズムの応用が主になっている。また、Dial-a-Ride の計算可能性に関しては他の車輻配送問題と同様に NP-hard であるとされている [11]。さらにデマンドバスではないが、[17] では工場などの配送問題としての Dial-a-Ride Problem における効率や利益に関して述べている。

しかし、デマンドバスが従来の路線バスと比べ、どの程度利便性を改善できているのか、いくつかあるタイプのどれが利便性・採算性の面から優位なのか、十分に検討されていない。特に運行台数や都市の規模とどのような関係にあり、都市規模に応じてどのように運営すればよいかではっきりとしたことはわかっていない。本稿の目的は、シミュレーションによりデマンドバスと路線バスのメリット・デメリットを見極め、都市規模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である。

以下では、まず 2. 節において比較を行う問題の設定について述べ、3. 節で個々のシミュレーションの説明を行う。続いて 4. 節で実験結果とその考察を示し、5. 節でまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 問題設定

### 2.1 利便性と採算性

前節で述べているように本稿の目的は、バスの運用形態による利便性と採算性の差違をあきらかにすることである。しかし、これらの指標は一般的には主観的要素や経済的要因を含んでおり、定量的評価が難しい。そこで本稿では、これらの指標を以

下にのべるように単純化して定量的に扱うことのできるものとして定義する。

まず利便性に関してであるが、バスの利便性には、待ち時間の多さや乗り心地、乗り継ぎのよさなどいくつかの要素がある。しかしそれらをすべて数値化して取り上げることは難しいので、ここではバス本来の目的、つまり目的地までいかにスムーズに到着するかに着目し、以下のように利便性を定義する。

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

ここで出発時間ではなく要求発生時間を用いている理由は、路線バスとデマンドバスの条件をそろえるため、予約型デマンドバス (前日などにあらかじめ乗降場所と時間を予約しておくタイプの運行システム) を除外するためである。よって、路線バスではバスが来る時刻に会わせて行動する (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、来たバスに乗るものとする。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。

採算性については以下のように考える。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む。さらに運賃収入にからむ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する。よって、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 台当りのデマンド処理数

### 2.2 シミュレーション条件

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。

- 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。

- 都市全体は正方形とする。

- すべての交差点にバス停があるものとする。

- 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ターン等はすべて同じ時間で行えるものとする。

- バスの乗降には時間がかからないものとする。

- バスには何人でも乗れるものとする。

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いった方が早い場合、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. シミュレーション実験

#### 3.1 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にする。

問題を簡単にするため、路線の数および一路線あたりのバスの台数は固定であるとする。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、円環状の路線を右まわ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。

##### 3.1.1 利便性評価

前節で述べているように、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  $T_{\text{demand}}$  は、ように表すことができる。

$$T_{\text{demand}} = (L_{\text{src}} + L_{\text{dst}})/V_{\text{walk}} + L_{\text{route}}/(M_{\text{bus}} \times V_{\text{bus}}) + L_{\text{bus}}/V_{\text{bus}}$$

ただし、 $L_{\text{src}}$ 、 $L_{\text{dst}}$ 、 $L_{\text{route}}$ 、 $L_{\text{bus}}$  は出発点から乗車バス停までの距離、降車バス停から目的地までの距離、路線長、乗車バス停から降車バス停までの路線距離を、 $V_{\text{walk}}$ 、 $V_{\text{bus}}$  は歩行速度、バス速度を、 $M_{\text{bus}}$  は路線あたりのバス台数を表している。

この式において、乗車バス停、降車バス停の選び方の組み合わせが複数生じる。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乗降車バス停の組み合わ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。

##### 3.1.2 世代交代

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、上記の方法により平均達成時間を計算し、評価値とする。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。

コピーを生成する場合は、以下にの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。

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。Lの字、口の字の選択確率は1/2ずつであるとする。

##### 3.1.3 突然変異

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）。

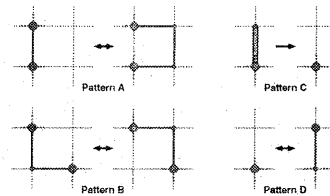


図1 突然変異パターン

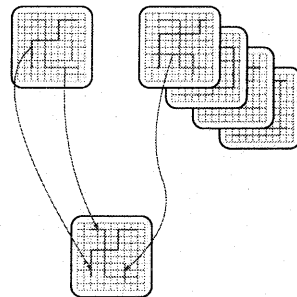


図2 交差

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。（注1）

Pattern D: 一般路線の場合、ターミナル駅を1ブロック移動し、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個所のみとした。（注2）

##### 3.1.4 交差

交差は以下のように行う（図2）。

複製を作る際、各路線をある確率で他の個体の路線と置き換える。

すなわち交差は路線単位で起るものとし、路線のなかは突然変異のみで変化する。

##### 3.1.5 得られた準最適解の例

以上の設定により遺伝的アルゴリズムで獲得された路線の例を図3に示す。ここに示した例は、路線数を3に固定した場合の、10000世代目においてもっとも評価値の高かった個体の路線であり、バスと徒歩の速度の比を8倍から256倍に変化させた場合の結果を示している。この例を見るとわかるように、バスの速度が遅い場合には、3路線で町を取り囲むような配置が得られ、バスの速度が上がるに従い、町の全交差点を経由す

（注1）：Pattern CはPattern AとPattern Bの組み合わせによって表現できる。しかし、その変異の途中段階は多くの場合、改悪になってしまうため、このような盲腸往復路線の縮退に結び付かないことが多かった。よって、このパターンを新たに導入した。

（注2）：多くの突然変異は改悪になるため、複数個所の突然変異を起こすと、数少ない改善につながる突然変異が起きても、他の突然変異による改悪によりほとんど改善できない。これを避けるため、突然変異はどんなに長い路線でも1個所のみとした。

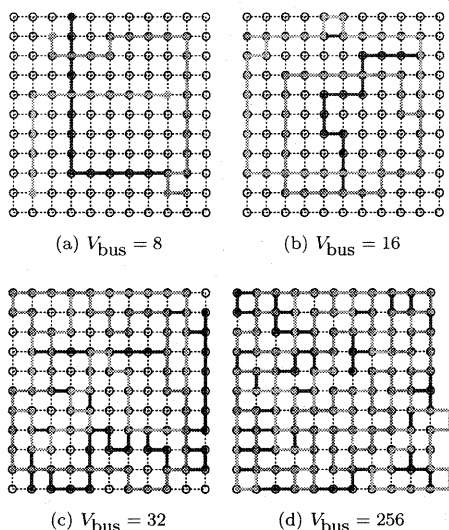


図3 GAにより獲得された固定路線の例

る複雑な路線になることがわかる。ここに示した例はあくまで各々1試行の結果であるが、複数試行を行った場合でも、ほぼ同等の路線が得られており、遺伝的アルゴリズムにより、妥当な準最適解が得られていると考えることができる。

### 3.2 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(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、各デマンドを処理していく。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置き、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。

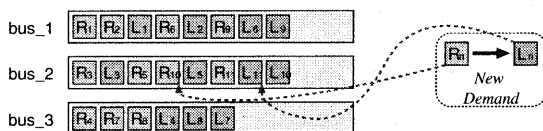
- **リアルタイム配分方式:** デマンドが発生した時点で、運行しているバスのうちそのデマンドを処理するのに最も適したバスに配分する。よってデマンド発生時刻は乗車要求時刻と同じでよい。

今回はこれらのうち、より利便性が高く路線バスと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。

一般に、このような方式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め切り時刻<sup>(注3)</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、以下にのべる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4)。

(1) 各バスは、デマンドの出発地点(乗車地点)と目的地点

(注3): 締め切り時刻とは、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をさす。今回の実験では、そのデマンドをすべて徒歩で行ったと仮定した場合の到達時刻とした。



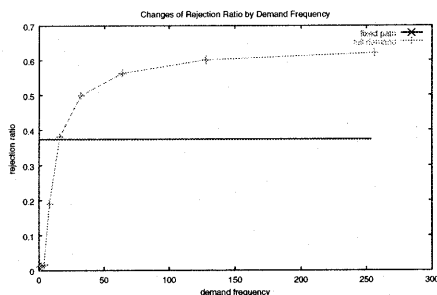


図6 バス3台の場合のデマンド拒否率

締め切り時刻を過ぎるためにバスを利用しなかった比率(デマンド拒否率)の変化を示している。固定路線の場合、バスが満員でない限り平均達成時間およびデマンド拒否率はデマンドの発生件数には関係ないので、各々横一直線となる。一方、フルデマンドの場合は、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を越えたあたりで飽和する。これは、新規に発生したデマンドが他の利用者の達成時間を遅らせるため、締め切り時間をオーバーしてデマンド拒否になってしまうことが原因となっている(図6)。

すなわち、デマンドバスの利便性は、バスが空いている場合に限られることがわかる。

#### 4.2 採算性を固定した場合

図7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)別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、固定路線においてバス台数を増やす場合、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(注5)。図7から、固定路線、フルデマンドともに、デマンド発生件数(およびバス台数)が増加するに従い、利便性が改善されることがわかる。これは、固定路線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、フルデマンドの方が早く改善され、十分多くのデマンドがあれば、フルデマンドの方が固定路線よりも利便性がよくなることがわかる。

#### 4.3 考察

以上の実験の結果をまとめると、以下のようなことがわかる。

- バス台数を固定した場合、デマンド頻度が増えるに従い、フルデマンド方式では利便性(平均デマンド達成時間)、デマンド拒否率ともに急速に悪化する(図5、図6)。一方、固定路線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

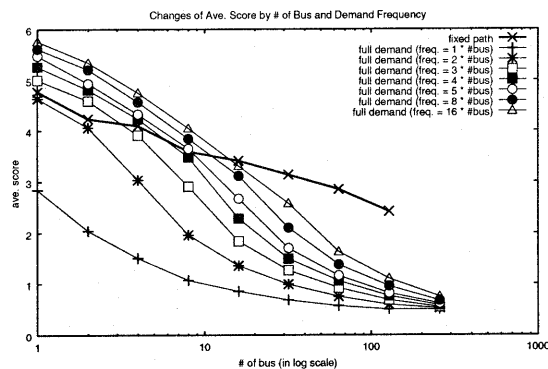


図7 デマンド頻度-バス台数比率を一定に保った場合のデマンドあたりの平均達成時間の変化(対数表示)

えない。このため、同じ台数で運行する限り、デマンド頻度が低い場合にはフルデマンド方式が、頻度が高い場合には固定路線方式の方が利便性が高い。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、バス台数を固定する場合にはデマンドの増減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、「規模が大きくなって客が増えれば採算がとれる」単純な図式は成り立たないことがわかる。

- 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、固定路線方式に比べフルデマンド方式の方が急速に利便性を改善できる(図7)。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、固定路線方式と利便性が逆転する点は大きくなる(デマンド頻度が高くなる)。よって、運行規模が大きくなるに従いフルデマンド方式の方が固定路線方式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、より大きな規模を必要とすることがわかる。

これらのうち後者の結果は、今後バスの需要の多い地域におけるフルデマンドバスシステムの適用に重要な要素となると考えられる。

#### 5. おわりに

本稿では、シミュレーション実験を用いてデマンドバスの利便性と採算性を関係を調べた結果を紹介したその結果によれば、デマンドバスは十分に大きな需要があれば、採算性を維持しながら固定路線より高い利便性を維持することができることが示された。

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11×11の町が実際のどの規模の町で

(注5): すなわち、路線数を増やすこ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。

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。

- デマンドの出発点、目標点の分布が片寄っている場合: 実際の町ではデマンドがまんべんなく発生することはなく、鉄道駅などどちらかのデマンドが集中する場所が存在することが多い。その場合には運営方式による利便性が変化すると考えられる。

- デマンドの距離による変化: 今回はデマンドは出発地点・目的地共にランダムに発生させた。しかし通常はある一定以上の距離を移動する場合に徒歩以外の交通手段を選択すると考えられる。また、十分に長距離の場合、いくら徒歩による達成時間よりも長くかかったとしてもバスを選択する場合があると考えられる。

- デマンド発生の時間的偏り: デマンドの発生頻度はラッシュ時や閑散期など時間的な変化がある。そのような要素を取り入れた採算性と利便性の比較が実際には必要となる。

- 乗降車時間および混雑率: 多くのデマンドをさばく場合、乗客の乗降時間は無視できない。また、混雑率は利便性やデマンド拒否率に影響を与えることになる。

## 文 献

- [1] Norbert Ascheuer, Sven O. Krumke, and Jörg Rambau. On-line dial-a-ride problems: Minimizing the completion time. *Lecture Notes in Computer Science*, 1770:639–650, 2000.
- [2] L. Bianco, A. Mingozzi, S. Ricciairelli, and M. Spadoni. Exact and heuristic procedures for the traveling salesman problem with precedence constraints, based on dynamic programming. In *INFOR*, volume 32, pages 19–31, 1994.
- [3] L. D. Bodin, B. L. Golden, A. Assad, and M. O. Ball. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers and Operation Research*, 10:63–211, 1983.
- [4] Moses Charikar and Balaji Raghavachari. The finite capacity dial-a-ride problem. In *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 458–467, 1998.
- [5] Jean-Francois Cordeau and Gilbert Laporte. A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem.
- [6] Esteban Feuerstein and Leen Stougie. On-line single-server dial-a-ride problems. *Theoretical Computer Science*, 268(1):91–105, 2001.
- [7] M. Grottschel, D. Hauptmeier, S. Krumke, and J. Rambau. Simulation studies for the online dial-a-ride-problem, 1999.
- [8] Martin Grottschel, Sven O. Krumke, and Jörg Rambau. On-line optimization of complex transportation systems, 2001.
- [9] Ali Haghani and Mohamadrez Banihashemi. Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(4):309–333, 2002.
- [10] Dietrich Hauptmeier, Sven O. Krumke, and Jörg Rambau. The online dial-a-ride problem under reasonable load. *Lecture Notes in Computer Science*, 1767:125–133, 2000.
- [11] Dietrich Hauptmeier, Sven Oliver Krumke, Jörg Rambau, and Hans-Christoph Wirth. Euler is standing in line dial-a-ride problems with precedence-constraints. *Discrete Applied Mathematics*, 113(1):87–107, 2001.
- [12] P. Healy and R. Moll. A new extension of local search applied to the dial-a-ride problem. *European Journal of Operations Research*, 83:83–104, 1995.
- [13] M. E. T. Horn. Multi-modal and demand-responsive passenger transport systems: a modelling framework with embedded control systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(2):167–188, 2002.
- [14] J. Jaw, A. R. Odoni, H. N. Psaraftis, and N. H. M. Wilson. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. In *Transportation Research*, volume 20B, pages 243–257, 1986.
- [15] Sven O. Krumke, Willem E. de Paepe, Diana Poensgen, and Leen Stougie. News from the online traveling repairman. *Lecture Notes in Computer Science*, 2136:487–??, 2001.
- [16] Sven O. Krumke, Jörg Rambau, and Steffen Weider. An approximation algorithm for the non-preemptive capacitated dial-a-ride problem, 2000.
- [17] Samuel W. Lau. Autonomous dial-a-ride transit - benefit-cost evaluation.
- [18] Haibing Li and Andrew Lim. A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows. In *IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, volume 13, pages 160–167, 2001.
- [19] Maarten Lipmann, X. Lu, Willem E. de Paepe, Rene A. Sitters, and Leen Stougie. On-line dial-a-ride problems under a restricted information model. *Lecture Notes in Computer Science*, 2461:674–685, 2002.
- [20] O. B. G. Madsed, H. F. Ravn, and J. M. Rygaard. A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time window. In *Annals of Operations Research*, volume 60, pages 193–208, 1995.
- [21] H. N. Psaraftis. A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem. In *Transportation Science*, volume 14, pages 135–154, 1980.
- [22] H. N. Psaraftis. A exact algorithm for the single vehicle many-to-many dial-a-ride problem with time windows. In *Transportation Science*, volume 17, pages 315–357, 1983.
- [23] H. N. Psaraftis. Analysis of an  $O(n^2)$  heuristic for the single vehicle many-to-many euclidean dial-a-ride problem. *Transportation Research*, 17B:133–145, 1983.
- [24] K. S. Ruland and E. Y. Rodin. The pickup and delivery problem: faces and branch-and-cut algorithm. *Computers Math. Applic*, 33(12):1–13, 1997.
- [25] M. W. P. Savelsbergh and M. Sol. The general pickup and delivery program. *Transportation Science*, 29(1):17–29, 1995.
- [26] Zbigniew Czech Silesia. Parallel simulated annealing for the set-partitioning problem. In *The 8th Euromicro Workshop on Parallel and Distributed Processing*, pages 343–350, 2000.
- [27] Zbigniew Czech Silesia. Parallel simulated annealing for the delivery problem. In *The 9th Euromicro Workshop on Parallel and Distributed Processing*, pages 219–226, 2001.
- [28] Jr. William A. Bailey and Jr. Thomas D. Clark. A simulation analysis of demand and fleet size effects on taxicab service rates. In *Proceedings of the 19th conference on Winter simulation*, pages 838–844. ACM Press, 1987.
- [29] 岡谷正博, 平田富夫, and 誉田安秀. 中山間地におけるデマンドバスシステムの開発-デマンドバスの実際の経路探索法-. In 高度交通システム研究会, number 4, pages 7–12. 情報処理学会, 2001.
- [30] 境周平, 若林竜太, and 内村圭一. デマンドバスの運用面積に関する考察. In 高度交通システム研究会, number 2, pages 19–24. 情報処理学会, 2000.
- [31] 斎藤隆司, 内村圭一, and Hiro Takahashi. 複数の車両を用いた dial-a-ride 問題に対する遺伝的アルゴリズムの適応. In 電気学会 道路交通研究会資料, volume 31, pages 17–22, 1997.
- [32] 鳥居健太郎, 愛須英之, and 田中俊明. 乗り換え需要を想定した需要に. In 電気学会 道路交通研究会資料, volume 31, pages 17–22, 1997.
- [33] 内村圭一. 位置情報対応 phs を利用した公共交通管理システムの開発. In 電気通信普及財団平成 12 年度調査研究報告書, pages 800–809, 2000.
- [34] 内村圭一, 斎藤隆司, and Hiro Takahashi. 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, J81-A(4):599–60, 1998.