

LA_004

デュアルモードビークルに対する利用者デマンドと走行時分の 変動を考慮した確率的スケジューリングアルゴリズム

Stochastic Scheduling Algorithm for Dual Mode Vehicles considering Fluctuations in Passengers Demands and Running Times of Vehicles

北村亮介[†] 富井規雄^{†‡}
KITAMURA Ryoosuke TOMI Norio

1. はじめに

現在、JR 北海道では、鉄道の線路と道路を双方向に直通可能な車両、デュアルモードビークル (DMV) の開発が進められている[1]。DMV は、その機動性を生かして、利用者の利便性を向上させた輸送サービスを提供できる交通機関として、特に、輸送波動の大きな観光地・空港と鉄道を結ぶ路線において大きな期待を集めている[1]。

筆者らは、DMV を用いて、利便性が高くかつ効率的な輸送サービスを提供するためには、DMV の特長を生かしたこれまでにない新しいスケジューリング手法が必要であると考えている。すなわち、輸送波動の大きな路線に主として運行されるであろうことを考慮すると、固定的なダイヤで運行するのではなく、日々、あるいは、その時の「利用者の移動に対する需要」(デマンド) に応じて、運行時刻や運行経路をフレキシブルに決定する運行方式(「デマンド指向スケジューリング」と呼ぶ[2])が望ましいと考えている。これによって、DMV の車両や乗務員を有効に活用して、利便性の高い輸送サービスを提供することができると考えている。

DMV を用いてデマンド指向スケジューリングを実現するためには、必ずしも確定的には把握できない利用者のデマンドに対して、DMV の経路や運行時刻を調整して、利便性を向上させた運行計画を作成する方式を確立する必要がある。さらに、定められた運行時刻に厳密に従って運行が行なわれる鉄道線路上の列車運行と、信号待ちによる遅延等、不確定要素の避けられない道路上から線路に直通する DMV の運行の間の整合性を保ったスケジューリング方式を確立する必要がある。特に、後者は、これまで、ほとんど研究がなされていない項目である。

利用者デマンドや DMV の走行時間は、過去の観測データ等をもとに、統計的には推定できると考えられる。本研究では、利用者デマンドと DMV の走行時間を統計的には推定できるという仮定のもとに、利用者の利便性の評価尺度を「移動に要する時間と待ち時間の和の期待値」と定義し、全利用者に対するその平均値が最小になるような運行計画を求めるというデマンド指向のスケジューリングアルゴリズムを提案する。そして、その中では、DMV の道路上の確率的な走行時分の変動を考慮し、線路上で DMV と列車がなるべく競合しないように、DMV の運行計画を定める。

本研究では、確率的に変動する走行時分やデマンドに対して利用者の到達時間の期待値を求めるために、モンテカルロシミュレーションを用いる。そして、最適化のために

は、遺伝的アルゴリズムを用いる。

現実を考慮した路線に対するデータを用いた実験を行ない、その結果、提案手法は、利便性の高い DMV の運行計画を与える実用的なアルゴリズムであることを実証した。また、利用者デマンド等が変動した場合に対する提案手法の評価を行ない、デマンドに的確に対応した、利便性の高い効率的な輸送サービスを提供可能であることを示した。

2. DMV の運行スケジューリング

2.1 DMV とは

そもそも、鉄道と道路との直通運転に対するニーズは高く、事実、ドイツ、フランス、オランダなどでは、LRT を鉄道と道路上の軌道をまたがって直通運転させることがすでに行なわれている[3][4]。JR 北海道で開発が進められている DMV は、道路とレールを双方向に走行可能な車両で、バスをベースにしている。JR 北海道では、DMV の主たる活躍の場として、比較的鉄道の利用客が少ない線区を想定している。また、鉄道路線からやや距離のある観光地や空港との連絡輸送に対しても大きな期待が持たれている。

DMV が注目を集めているのは、① 鉄道と道路の直通運転によって乗換を不要とし、利便性を向上する(バリアフリー施策としても有効)、② バスと同様のきめ細かさで停留所を設置し、ドアツードアの輸送ができないという鉄道の欠点を克服する、③ 路線の一部区間では鉄道線路上を走り高速な運行を可能とする、等の理由による。

しかし、一方では、大都市圏のように大きな輸送需要が望めるわけではないため、DMV の車両や乗務員などの限られたリソースを有効に使用して効率的な輸送を提供することが望まれているという背景もある。

2.2 DMV に対するデマンド指向スケジューリング

DMV は、道路上では比較的自由に運行経路や運行時刻を決定できる。筆者らは、この特徴を生かして、利便性が高くかつ効率的な輸送サービスを実現することを目的として、日々、あるいは、その時のデマンドに応じて、運行時刻や運行経路(まとめて、DMV の運行計画と呼ぶ)をフレキシブルに決定するデマンド指向スケジューリングを提案する。これによって、限られたリソースを有効に活用した、利便性の高い輸送サービスの提供を目的とする。

図 1 を用いて、筆者らが考えるデマンド指向スケジューリングの概念を説明する。図 1 において、四角は鉄道の駅、○は DMV の停留所である。線に付された数字は、その区間の走行時分を表わす。DMV は、駅 1, 2, 9, 10 のいずれでも鉄道路線への乗入れ・乗出しができる。通常時において、DMV は、駅 1-駅 2-停留所 3-停留所 8-駅 9-駅 10 という経路(経路 1)と、駅 1-停留所 4-停留所 5-停留所

[†]電気通信大学大学院情報システム学研究科

[‡](財)鉄道総合技術研究所

6-停留所 7-駅 10 という経路 (経路 2) の 2 種類の経路に沿って運行されているとする。この時、例えば、停留所 5 の近辺に観光施設が存在し、ある日のある時間帯において、駅 1 から停留所 5 へのデマンドが急増することが事前にわかったとする。この場合、その時間帯については、経路 1 を変更して、DMV を駅 1-駅 2-停留所 3-停留所 5-停留所 8-駅 9-駅 10 と走行させれば、停留所 5 へ向かう利用者の利便性を向上させることができる。すなわち、デマンドの発生予想量・発生予想時刻にあわせて DMV の運行経路や運行時刻などの調整を行なうことによって、利用者の利便性の向上を図ろうとするものである。

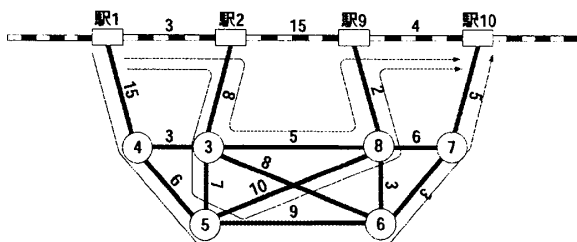


図 1: DMV の路線図

2.3 DMV スケジューリング問題

(1) デマンド指向スケジューリング実現のための課題

DMV に対して、デマンド指向スケジューリングを実現するためには、次の課題を解決しなければならない。

【課題 1】 必ずしも確定的には把握できない利用者のデマンドに対して、利用者の利便性を向上させた運行計画を作成する方法の確立

本稿では、DMV を、乗合バスと同様の公共交通機関として使用することを想定している。そのためには、デマンドバス[5]のように、確定的な利用者のデマンドを得てから、経路や運転時刻を決定するという方式ではなく、利用者が乗車する一定時間 (数時間から数日前など) 前に運行計画を作成して公示し、それにそって運行を行なうという方式がのぞまれる。その場合、その時点の利用者のデマンドを事前に確定的に把握することはできない。従って、確定的には把握できない利用者のデマンドに対して、利便性を向上させた運行計画の作成方法を確立する必要がある。

【課題 2】 鉄道線路上の列車の運行に影響を与えず、かつ、利用者にとって利便性の高いスケジューリング方式の確立

鉄道線路上の列車は、厳密に定められた運転時刻に従って走行する。鉄道線路上では、列車と DMV の追い越しは不可能であるし、また、列車と DMV の運行時刻の間には、保安上の理由から、ある一定の時間間隔を確保する必要がある。他方、DMV が道路上を走行する時には、交通信号等の影響によって停留所間の走行時分が変動する可能性がある。しかし、このような場合であっても、DMV が鉄道線路に合流する時に DMV の遅延等によって鉄道の列車の運行に影響を与えるなどの事態は避けなければならない。

この点を考慮した、鉄道線路・道路それぞれの運行計画の整合を図るスケジューリング方式を確立する必要がある。

(2) 前提条件と制約

【鉄道との関連に関する前提条件と制約】

- ・ DMV は、その経路の一部において、鉄道の線路上を走行することができる。

- ・ 鉄道線路上では、列車と DMV の運転時刻の間には、一定の時間間隔を保つ必要がある。
- ・ 線路を走るときの列車、DMV の走行時分は、その区間に応じた固定値 (列車と DMV では異なる) である。
- ・ 鉄道線路上では、追越しはできない。
- ・ DMV は、あらかじめ定められている箇所でのみ、鉄道線路への乗り入れ・乗り出しができる。
- ・ 鉄道線路上では、DMV よりも列車の運行を優先する。よって、線路上で鉄道の列車との競合が予想される場合には、DMV は、合流地点の手前で一定時間待つ。すなわち、列車の運行時刻の変更はしない。

【DMV の運行に関する前提条件と制約】

- ・ DMV には、定員の制限があり、定員以上は乗車できない。乗車できない人は、次の DMV を待つ。
- ・ DMV の停留所間の走行時分は、渋滞、信号待ち等、その時の条件に応じて変動する。ただし、停留所間の所要時間は、統計的には得られる。
- ・ DMV は、あらかじめ案内されている発時刻より早く発車する (早発) ことはない。
- ・ DMV の運行経路は、あらかじめ定められている経路の集合 (運行経路パターン) の中から選択する形で決定する。これは、DMV のとりうる経路の種類が多かったり、経路が複雑であったりすると、利用者にとってわかりにくくなるためである。

【輸送サービスに関する前提条件と制約】

- ・ DMV の運行計画は、実施の一定時間前 (数日～数時間前を想定) に作成する。
- ・ DMV の運行計画とその時点の運行状況は、ロケーションシステム、携帯電話等の手段によって、運行の一定時間前以降、利用者に案内される。利用者に案内した後は、DMV の運行計画を変更することはしない。
- ・ 利用者のデマンドは統計的には知ることができる。
- ・ 利用者は、その時点で案内されている運行計画に基づいて、目的地に最も早く到着する DMV に乗車する。

(3) 本研究のアプローチ

本研究では、DMV の運行計画の評価値を、「利用者の移動に要する時間 (待ち時間を含む) の期待値の全利用者に対する平均」と定める。そして、これが最小になるような運行計画を求めるアルゴリズムを提案する。図 2 を用いて、本研究における評価値の算出の仕方を説明する。図 2 は、DMV の運行計画の一部 (2 つの停留所の間のみ) をダイヤ図形式で描いたものである。この計画では、DMV が、停留所 n をそれぞれ 10 時 00 分と 10 時 30 分に発車するように定められている。ただし、ここで 10 時 00 分に発車する DMV は、確率 0.5 で 15 分遅延することがわかっているとする。また、停留所 n から停留所 m への利用者が 10 人いて、彼らの出現時刻は、確率 0.5 で 9 時 50 分、確率 0.5 で 10 時 10 分であるとする (本稿では、これらの確率としては連続的な分布を想定するが、ここではわかりやすさのために離散的な分布で説明する)。デマンドがこれだけだとすると、この運行計画の評価値 E は次のように算出される (なお、 $P(x|y)$ で、「停留所 n に、利用者が時刻 x に出現し、かつ DMV が時刻 y に発車する確率」を表わす)。

$$E = \{P(9:50 | 10:00)(10+15)10 + P(9:50 | 10:15)(25+15) 10 + P(10:10|10:00)(20+15) 10 + P(10:10 | 10:15)(5+15)10\} / 10 = 30 \text{ (分)}$$

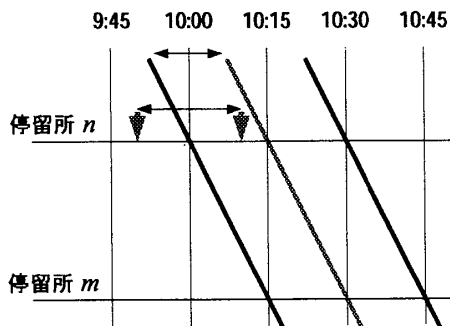


図2：評価値算出のためのDMVの運行計画の例

3. 利用者デマンドと走行時分の変動を考慮した確率的スケジューリングアルゴリズム

3.1 基本的考え方

前述のように、本稿で対象とするDMVスケジューリング問題は、あらかじめ推定したデマンドに対して、利便性の高い運行計画をあらかじめ作成しておくことを目的としている。そのため、前述したデマンドバスのスケジューリング問題や、そのモデルであるDial a Ride問題 ([6]など)とは、性質を異にした問題である。本稿で対象とする問題に類似の問題としては、Vehicle Routing Problem (VRP)がある。確率的な視点が考慮されることもあるが ([7][8]など)、もともと品物の配送を対象としているため、人を運ぶ場合とは前提条件や評価値の算出において相違がある。また、鉄道と道路のように、確定的なスケジューリングが必要な部分と確率的なスケジューリングが必要な部分との整合性をとったスケジューリングを行なうことを目的とした研究は見当たらない。

スケジューリング問題に対しては、近年、メタヒューリスティクスを適用する研究が広く行なわれている[9]。しかし、本稿で対象とする問題は、デマンドや走行時分が確率的に与えられることとしているため、問題の構造を把握することが難しい。例えば、近傍空間を定義することすら容易ではなく、そのため、局所探索に基づくメタヒューリスティクスは適用しにくい。そこで、本稿では、構造を把握しにくい問題に対しても比較的容易に適用できるという点に着目して、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いたアルゴリズムを導入する。また、期待値として表現される解の評価値 (GAにおける個体の適合度) の算出には、モンテカルロシミュレーションを用いる。

3.2 GAの適用

(1) 染色体表現

始発停留所から終着停留所までのDMVの運行計画は、運行経路パターン番号と始発停留所の発時刻 (以下、「始発時刻」) を指定することによって、一意に決定される。そこで、本稿では、運行経路パターン番号と始発時刻の対を、設定するDMVの行路本数分並べたものを染色体とする。例えば、図1の例において、設定するDMVの行路数=2、経路1の運行経路パターン番号=1、経路2の運行経路パターン番号=2、経路1で運行されるDMVの始発時刻=10:00、経路2で運行されるDMVの始発時刻=10:15、であったとすると、この運行計画の染色体表現は、

1, 10:00, 2, 10:15 となる。

(2) 遺伝子オペレータ

交差 (一点交差)、突然変異を用いる。突然変異は、染色体上の運行経路パターン番号、始発時刻をランダムに変更する (結果的に、DMVの運行順序も変更されることがある)。選択は、ルーレット選択とし、あわせて、エリート保存戦略を用いる。

(3) 適合度の算出

利用者のデマンドとDMVの走行時間については、統計的な値しか得られない。従って、DMVの運行計画を評価するには確率的な評価を行なうことが必要となる。これを解析的に行なうことは困難であることから、モンテカルロシミュレーションを用いて、運行計画の評価値の算出を行なう。具体的には、与えられている確率分布に従ってデマンド・走行時分をランダムに変更し、それを反映した運行計画に対して、利用者の行動をシミュレーションすることを繰り返すことによって、評価値を算出する。なお、走行時分を変更したために、鉄道線路上でDMVと列車との競合が発生する場合には、合流地点前でDMVを待たせるように運行計画を修正するという処理を行なう。

4. 実験結果と考察

4.1 実験

提案アルゴリズムの効果を実証するために、次の実験を行なった。

【実験1】提案アルゴリズムが、良好な解を生成することを確認するための実験：図1に示す路線を対象として、約1時間分6行路からなるDMVの運行計画を作成し、ランダムサーチによる結果と比較した。

【実験2】提案アルゴリズムを用いたデマンド指向スケジューリング方式が有効であることを確認するための実験：実験1に対して、入力である利用者デマンドやDMVの予想走行時分のばらつきを変更し、それらの変化に追従した良好な運行計画が作成されることを確認した。

【実験3】より規模の大きな問題に対する提案アルゴリズムの性能の確認：運行計画作成対象時間幅、デマンドの数、運行経路パターン数を増加させた問題に対して、提案アルゴリズムが良好に動作することを確認した。

4.2 実験1の詳細

(1) 実験1の諸条件

- ・ 路線：図1の路線を用いた。
- ・ 利用者デマンド：任意の停留所間に95人のデマンドを発生させた。出現時刻は、標準偏差2.5の正規分布に従って変動するものとした。
- ・ DMV：運行経路パターン数は7とした。DMVの定員は30人とした。また、1時間に6本のDMVが運行されるものとした。ただし、そのうち最初の2本は、すでに運行計画が決定・案内されているとして、それらの運行計画は変更しないものとした (作成対象時間帯内で、それらを利用する利用者も存在するため、運行計画の評価には使用する)。DMVの停留所間の走行時分は、標準偏差2.1の正規分布によって増大するものとした。
- ・ 鉄道の列車：30分ごとに1本走行するものとした。
- ・ GAの諸元：GAの諸元は、次の通りである。これらは予備実験の結果から決定した。突然変異率が通常用いられる値よりも大きいのが、これは、本アルゴリズムでは、運行経路パターンと始発時刻の変更を突然変異のみに頼

っているため、ある程度突然変異率を大きくした方が良好な結果が得られることが判明したためである。

集団サイズ：20，突然変異率：0.3，実行世代数：150
 ・ランダムサーチ：3,000通りの運行計画をランダムに作成し，その中から最良の運行計画を選択した。

(2) 実験結果

表1に，提案アルゴリズム，ランダムサーチのそれぞれによって得られた運行計画の評価値を示す。また，図3に収束の状況を示す。

表1：ランダムサーチとの比較

アルゴリズム	提案アルゴリズム	ランダムサーチ
評価値 (秒)	1,676	1,737

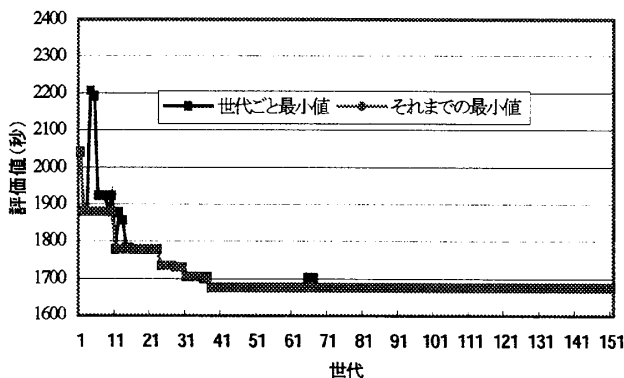


図3：収束の状況 (実験1)

4.3 実験2の詳細

実験2-1：任意の停留所間に作成した65人のデマンドに対して，実験1で得られた運行計画をそのまま適用した場合（すなわち，デマンドの変化に応じた運行計画の変更を行なわなかった場合）の評価値と，そのデマンドに対して提案アルゴリズムを用いて新たに運行計画を作成した場合（デマンドに追従して運行計画を変更した場合）の評価値を比較した。結果を表2-1に示す。

表2-1：実験2-1（デマンド変化への追従）の結果

運行計画	実験1の運行計画	新たに作成
評価値 (秒)	1,799	1,664

実験2-2：実験1の状況において，DMVの走行時分が標準偏差2.9で増大するとした場合に対して，実験1の運行計画をそのまま適用した場合の評価値と，それに対応して作成した運行計画の評価値を比較した。結果を表2-2に示す。

表2-2：実験2-2（走行時間のばらつきの変化への追従）

運行計画	実験1の運行計画	新たに作成
評価値 (秒)	1,746	1,678

4.4 実験3の詳細

実験2-1と同趣旨の実験を，より規模の大きな問題を用いて行なった。路線は図1と同じ，作成時間幅は2時間，DMVの行路本数は12，運行経路パターン数は10である。ある151人のデマンドに対して作成した運行計画（運行計

画A）を，内容の異なる同規模のデマンドに適用した場合の評価値と，そのデマンドに対して新たに作成した運行計画（運行計画B）の評価値を比較した。結果を表3に示す。

表3：実験3（デマンド変化への追従：大規模な問題）

運行計画	運行計画A	運行計画B
評価値 (秒)	2,056	1,607

4.5 考察

実験1の結果から，提案アルゴリズムは良好な解を導出していると言える。ランダムサーチにおいて3,000通りの解を探索対象としたのは，GAにおいて探索された延べ個体数（集団サイズ×実行世代数）とあわせたものである。しかし，図3から，提案アルゴリズムは，おおむね50世代程度で収束していることが観察されることから，ランダムサーチよりも短い処理時間で，より良好な解を導出できると判断できる。

実験2の結果から，提案アルゴリズムを用いれば，デマンドやDMVの走行時分のばらつきが変化しても，その状況にあった利便性の高いDMVの運行計画が作成できていることがわかる。このことは，同時に，本稿で提案するデマンド指向スケジューリングの考え方が有用であることを示していると考えられる。

また，実験3の結果から，提案アルゴリズムは，より規模の大きな問題に対しても良好に適用できると判断できる。

5. おわりに

鉄道と道路を直通して運行可能なデュアルモードビークルに対するデマンド指向スケジューリングを実現するために，モンテカルロシミュレーションとGAを組み合わせたアルゴリズムを導入し，現実規模のデータを用いた実験によって提案手法の有効性を確認した。今後の検討事項として，より多様な路線・デマンド等の状況に対する本アルゴリズムの有効性の検証がある。

文献

[1] 柿沼博彦：地方交通線の経営改善に向けた JR 北海道の技術開発～デュアルモード・ビークル～，運輸と経済 Vol. 64, No. 7, 2004.
 [2] 富井規雄他：鉄道におけるデマンド指向スケジューリング実現のための課題，情処学会第9回高度交通システム研究発表会，2002.
 [3] 服部重敬：拡大する軌道共有と郊外直通サービス，鉄道ジャーナル，Vol. 37, No. 9, 2003.
 [4] 佐藤信之：ドイツにおけるデュアルモード LRT の動向，鉄道ピクトリアル，Vol. 48, No. 9, 1998.
 [5] 野田五十樹 他：デマンドバスはペイするか？，情処学会第131回知能と複雑系研究発表会，2003.
 [6] 内村圭一，斉藤隆司，Hiro Takahashi：公共交通サービスにおける dial-a-ride 問題，信学論 A, Vol. J81-A, No 4, 1998.
 [7] D. J. Bertsimas: A Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand, *Opns. Res.* 40, 1992.
 [8] C. Bastian and A.H.G. Rinnooy Kan: The Stochastic Vehicle Routing Problems Revisited, *Eur. J. Oper. Res.* 56, 1992.
 [9] (財) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室：鉄道のスケジューリングアルゴリズム，NTS 出版，2004.