

デマンド型自動運転公共交通システムのための の配車計画モデルの検討

大勝 友貴¹・杉木 直²・松田 真宜³・松尾 幸二郎⁴

¹学生会員 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:y173520@edu.tut.ac.jp

²正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:sugiki@ace.tut.ac.jp

³正会員 株式会社ドーコン 交通事業本部

(〒004-8585 北海道札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号)

E-mail:mm1700@docon.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学助教 建築・都市システム学系

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:k-matsuo@ace.tut.ac.jp

人口減少や高齢化により過疎地域におけるアクセス性の低下が課題となっている。現在、開発が進んでいる自動運転技術は、運転手不足を解決し、効率的な運行をもたらす可能性があり、需要が疎である地域では、需要に応じて運行するデマンド型公共交通が有効である。デマンド型自動運転公共交通システムの導入においては、需要が疎である地域に対して、どのような配車計画を行うかが、その効率性を高める上で重要である。本研究では、実地域へのデマンド型自動運転公共交通の導入のための基礎的な研究を行う。配車問題の経路評価は、走行距離や時間ペナルティに加え、顧客間の不便さの平均化を扱っている。また、運行形態は、デマンド車両のみの場合と、路線バスを併用した場合の2ケースを考え、最適な運行形態を求める考え方を提案する。

Key Words : *Autonomous Driving, Demand Responsive Transport, Vehicle Allocation Plan, GA*

1. はじめに

我が国では、一般乗合バス事業の参入や退出が自由であるため、採算が成り立たない事業は廃線となり、交通弱者の移動手段の確保が課題となっている。市町村は、直営・運営委託によってバス事業の再開、補助金による運営継続によって、地域の移動手段を確保するが、需要が疎である地域の運行は、採算性が低く、バス路線維持にかかる費用は増加傾向にある。また、バス運転手の高齢化が進行し、今後は、高齢運転手の引退によって交通の維持が困難と考えられる。しかし、高齢者のマイカーによる移動は、免許返納率の上昇から減少することが考えられ、高齢者人口の増加が加わり、今後は公共交通への需要が高まると考えられる。

近年開発が進んでいる自動運転技術は、運転手不足を

解決する可能性があり、需要に応じて運行するデマンド交通は、需要が疎な地域における公共交通の採算性を高めることが考えられる。また、デマンド交通では、ドアツードアの移動となるため、定時定路線の交通に比べ、運転手に与える負担が大きく、求められる技術が一般的に高い。そのため、デマンド交通の導入には、デマンド型自動運転車両が有効だと考えられる。しかし、デマンドサービスは、配車がどのように行われるかによって採算性が大きく変わるため、効率的なサービスを提供するデマンドの配車問題を解く必要がある。本研究では、実地域へのデマンド型公共交通システムの導入に関する研究を行う。具体的には、仮想ネットワークを対象に、デマンド型自動運転公共交通システムの導入において必要な車両数、車両容量、経路などのサービス供給量を決定するモデルの構築を行う。解探索には、遺伝的アルゴリ

ズムを使用し、仮想ネットワークを対象として数値計算を行う。最後に、このモデルを用いた実地域への適用の方向性について示す。

2. 既往研究の整理

デマンド型交通の配車問題を扱う研究には、様々な解法がある。Larsen^らは、修正された最近傍法とGA(遺伝的アルゴリズム)を用いて、時間枠を考慮した配車配送問題であるDARP(Dial-A-Ride-Problem)を解いている。経路の評価項目には、顧客の乗車時間や遅延、ドライバーの最大労働時間などを考慮している。松本^らは、DARPをストリングモデルによる表現とSA(焼きなまし法)の組み合わせで解いており、実際のデマンドバスのデータを処理することで適応可能性を示した。一方、吉野^らは、近似解法では局所最適に陥る可能性を指摘し、経路のグラフ構造表現とZDDによる索引化から、大域的な最適解を得ている。

これらの研究では、デマンド型交通の解探索として良い結果を残している。しかし、経路の評価方法において、顧客の不便さの総量を最小化するため、顧客間で不便さの偏りが生じる可能性がある。そのため、本研究では、顧客間で不便さの偏りが平均化される経路の評価方法を構築する。

3. 自動運転型デマンド交通モデルの構築

(1) 前提条件

本研究では、デマンド型自動運転車両による公共交通システムを想定する。サービス内容は、顧客が希望の到着時刻、出発地、目的地を予約し、その内容をシステムが管理することで最適な送迎ルートを作成する。その際、顧客の出発時刻は、送迎ルートに従って決定され、自動運転型デマンド交通によって送迎が行われる。

また、運行形態としては、デマンド型自動運転車両によって交通サービスが提供される場合と、デマンド型自動運転車両と定時定路線のバスによって交通サービスが提供される2ケースを想定する。図-1に示すケース①では、デマンド型自動運転車両によって、顧客が希望する出発地から目的地へ送迎される。図-2に示すケース②では、デマンド型自動運転車両と定時定路線のバスが運行されている。そのため、顧客はデマンド型自動運転車両によって、希望の出発地から最寄りのバス停に送迎され、バスを利用して目的地に到着する。

最適な送迎経路を求めるには、時間枠を考慮した配車配送問題、つまりDARPを解く必要がある。最適な経路

に求められる条件は、出発地から目的地までの余分な乗車時間が短く、希望到着時刻の早着や遅着が小さくなることである。しかし、この条件では、余分な乗車時間を短くする際に、1人の顧客に偏った不便さを与える可能性がある。そのため、本研究では、顧客間で余分な乗車時間の差が小さくなるように留意する。

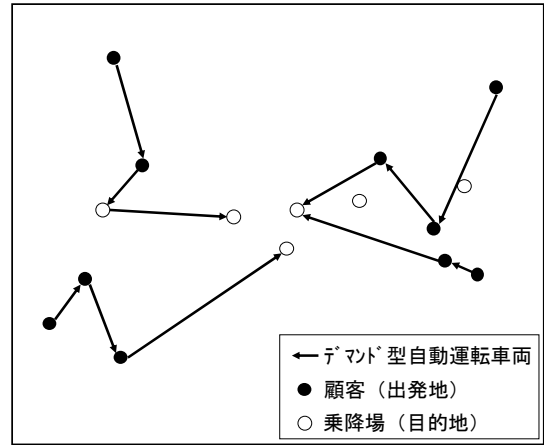


図-1 ケース①：出発地から目的地へ送迎

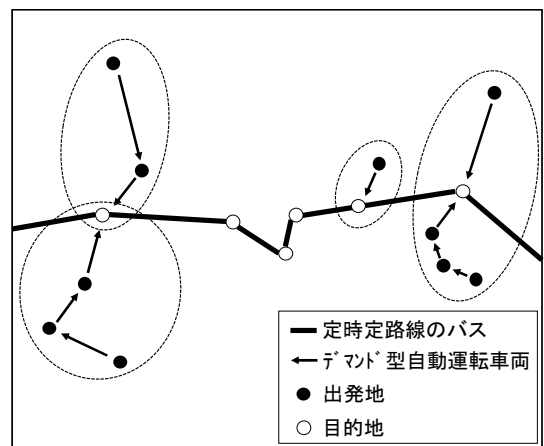


図-2 ケース②：出発地から目的地を経由するバス停に送迎

(2) モデルの定式化

本研究では、時間枠を考慮した配車配送問題を解くためのモデルを構築する。定式化と制約条件をケース別に示す。

a) ケース①の最適化モデル

顧客が、デマンド型自動運転車両によって、出発地から目的地に送迎されるケースの定式化と制約条件を以下に示す。

$$t_i = a_i - b_i \quad (1)$$

$$E_i = \frac{t_i - S_i}{S_i} \quad (2)$$

$$A_i^m > a_i^m \text{ の場合, } V_i^m = 0$$

$$Q_i^m = A_i^m - a_i^m \quad (3)$$

$$a_i^m > A_i^m \text{ の場合, } Q_i^m = 0$$

$$V_i^m = a_i^m - A_i^m \quad (4)$$

$$\min \sum_{m=1}^M PC^m = w_1 x_m + w_2 \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (E_i^m - \bar{E})^2$$

$$+ w_3 \sum_{i=1}^I Q_i^m + w_4 \sum_{i=1}^I V_i^m + w_5 \sum_{i=1}^I p_i^m \quad (5)$$

制約条件

$$r_m < L_m \quad (6)$$

$$I = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M C_{i,m} \quad (7)$$

$$a_i < b_i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M C_{i,m} - \sum_{j=1}^I \sum_{m=1}^M C_{j,m} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M C_{0,m} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M C_{I,m} = 1 \quad (11)$$

ただし,

$m = \{1, \dots, M\}$: 経路のサフィックス

$i = \{1, \dots, I\}$: 顧客のサフィックス

O : 出発地

D : 目的地

I : 顧客数

M : 経路数

L_m : 車両の乗車可能人数

S_i : 顧客*i*の最短乗車時間

A_i : 顧客*i*の希望到着時刻

$$C_{i,m} = \begin{cases} 1, & \text{顧客}i\text{を経路}m\text{で送迎を行う} \\ 0, & \text{顧客}i\text{を経路}m\text{で送迎しない} \end{cases}$$

x_m : 経路*m*の総走行時間

t_i : 顧客*i*の乗車時間

p_m : 経路*m*の乗降回数

r_m : 経路*m*の乗車人数

f_i : 顧客*i*が乗車するときの車人数の変化

a_i : 顧客*i*の到着時刻

b_i : 顧客*i*の出発時刻

E_i : 顧客*i*の超過乗車時間率

PC_m : 経路*m*の送迎コスト

重みづけパラメータ,

w_1 : 経路走行時間

w_2 : 超過乗車時間率

w_3 : 希望到着時刻に対する早着

w_4 : 希望到着時刻に対する遅着

w_5 : 乗降回数

顧客の乗車時間 t_i は, 到着時刻 a_i と出発時刻 b_i の差で表され, 式(1)となる. 顧客が目的地まで寄り道をせず送迎された時間を最短の乗車時間 S_i とし, 実際の乗車時間との差を超過乗車時間とする. 式(2)は, 超過乗車時間を顧客間で比較するために, 超過乗車時間を最短乗車時間で除した超過乗車時間率 E_i を示す.

送迎コストは式(5)で表され, 走行時間が短く, 顧客にとっての不便さが最小であるほど, 最適な送迎であると考え. コストは多目的関数で表され, 各目的に重みづけ関数 w_i を与える. 第1項は, 車両が送迎を行わずに, すべての乗降場を巡回するのに必要な総走行時間を表し, 経路の最短化を図る. また, 顧客の超過した乗車時間が, 平均的に最適化されるように, 第2項の超過乗車時間率の分散を用いる. 第3項と第4項は, それぞれ早着と遅着によるコストを表し, 希望到着時間と実際の到着時間の差によって表現される. 第5項は, 顧客の乗降時間による遅延を表す.

送迎コストの最適化には, 以下の制約条件が存在する. 式(6)は, 経路*m*の送迎を担当する車両の乗車人数が, 車両容量を超えないようにするものである. 式(7)は, すべての顧客が送迎されることを表し, 顧客の予約が拒否されないようにするものである. また, 車両が出発地を訪れた後に, 目的地に向かうことを式(8)で示す. 式(9)は, 車両に乗車した顧客が降車することを示し, 式(10), (11)は車両が拠点から出発し, 拠点に戻ることを示す.

b) ケース②の最適化モデル

顧客が, デマンド型自動運転車両によって, 出発地からバス停に送迎され, 路線バスで目的地に向かうケースの定式化と制約条件を以下に示す.

$$\min \sum_{m=1}^M PC^m = w_1 x_m + w_2 \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (E_i^m - \bar{E})^2$$

$$+ w_3 \sum_{i=1}^I Q_i^m + w_5 \sum_{i=1}^I p_i^m + w_6 \sum_{i=1}^I (U_i - a_i) + w_7 N \quad (12)$$

制約条件

式(6)~(11)は共通である.

$$U_i > a_i \quad (13)$$

$$U_i - a_i > 180 \tag{14}$$

$$A_i > Y_i \tag{15}$$

ただし、

- U_i : 顧客*i*のバスの出発時間
- Y_i : 顧客*i*のバスの到着時間
- N : バスの運行本数(単位時間当たり)
- w_6 : バスの出発待機時間
- w_7 : バスの運営費用

定時定路線のバスを併用するケース②では、移動の出発地からバス停までをデマンド車両、バス停から目的地までを路線バスとするが、出発地から目的地までをデマンド車両によって送迎した方が早い場合は、この限りではない。送迎コストは式(12)で表され、第1~4項までは、式(5)と共通する。第5項は、バス停で路線バスの出発時刻を待つ顧客の待機時間であり、路線バスの運営費用を第6項に示す。制約条件は、共通の式(6)~(11)と、顧客がバスの出発時間に間に合うことを式(13)に示し、乗り換え時間の確保を式(14)で表現する。式(15)は、顧客が目的地の希望到着時刻に間に合う路線バスに乗り換えることを示す。

(3) 解法

モデルの計算を行うために、GAとSAを使用する。はじめに、車両が顧客の送迎を行う乗降場を「1」、経由と送迎を行わない乗降場を「0」とし、図-3のように「0,1」で染色体を作成する。横軸は、巡回する乗降場の数だけ存在し、縦軸は、経路の数であり、1つの車両が1つの経路を担当する場合は、車両数と経路数が同数になる。一般的な染色体表現には、ランダムキー表現があり、巡回する乗降場と順番を染色体によって表現する。しかし、本研究における染色体表現では、ある経路が巡回する乗降場のみを表し、順番を表さない。

乗降場	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
経路①	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
経路②	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1
経路③	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1

図-3 個体の表現例

巡回する順番は、SAによって2-optを繰り返し、経路コストが最も低いものに決定する。SAで用いる経路コスト RC_m の定式化と制約条件を以下に示す。

$$\begin{aligned} \min \sum_{m=1}^M RC^m &= w_1 x_m + w_2 \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (E_i^m - \bar{E})^2 \\ &+ w_5 \sum_{i=1}^I p_i^m \end{aligned} \tag{16}$$

制約条件

式(6)~(11)は共通である。

経路コストの式(13)は、式(5)、(12)における総走行時間、超過乗車時間率、乗降回数をコストとし、式(16)で表される。出発時刻は、SAによって求められた最適な経路から、ケース別に決定される。ケース①は、顧客が自由に到着時刻と目的地を設定するため、到着時刻と希望到着時刻の差が顧客間で平均化されるように出発時刻を決定する。つまり、早着と遅着が発生する。ケース②では、顧客が希望到着時間に間に合う路線バスで、目的地へ向かうことを想定する。出発時間は、バス停の乗り換えに遅れないことを条件に決められる。そのため、早着があっても、遅着は発生しない。

GAでは、SAによって得られた経路と、出発時刻を基に、ケース別に送迎コストを算出し、コストが低い個体ほど優れた個体とする。個体はGAの一般的な手順によって世代を進化させていく。具体的には、最大エリート数を上限に、優秀な個体を順番にエリートとして次世代に残す。エリート以外は、ランダムに2つを選択し、優秀な方を親候補とする。これを繰り返し、親候補の中から親を2つ選び、一様交叉によって子を生成した後、次世代に入力する。突然変異は、エリートを除く次世代の中から、ランダムに選ばれた個体における、経路*m*の顧客*i*の乗降場を「1」、以外を「0」にすることで行われる。作成された次世代は、同様の行程を繰り返すことで最適化される。解探索のフローを図-4に示す。

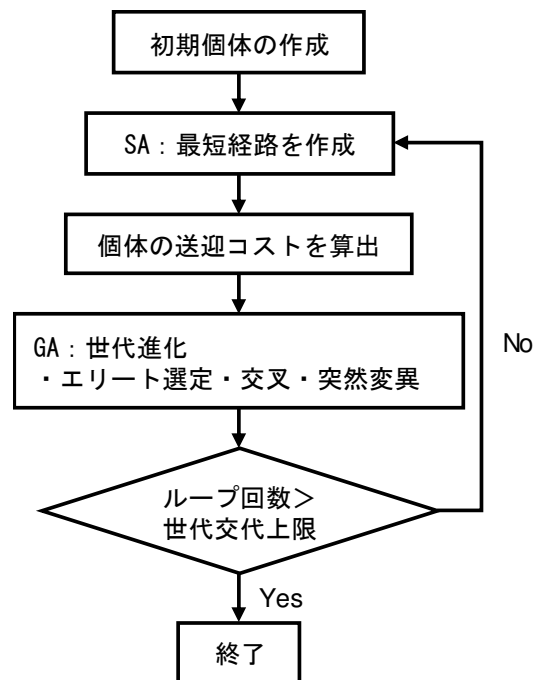


図-4 解探索のフロー

4. 仮想ネットワークを対象とした数値計算

本研究では、デマンド型自動運転車両による配車計画モデルの有効性を検証するために、簡易的な仮想ネットワークを総当たりで解いた結果と比較する。

使用する仮想ネットワークは、5×5の格子状の地域を想定し、顧客の需要をランダムに発生させる。すべての需要は、あらかじめわかっており、予約の追加、取り消しが行われない静的な場合を想定する。

すべての顧客は同じ目的地を希望し、ケース別の交通サービスによって送迎される。仮想ネットワークのリンク数は40であり、各リンクが道路リンクを表している。ノードは乗降場を表し、ケース①では出発地と目的地、ケース②では、出発地と目的地に加え、バス停を担っている。ノード番号13は、交通拠点のため、デマンド車両の発着点である。また、バス停をつなぐ道路リンクをバス路線としている。図-5、図-6に各ケースの仮想ネットワークのイメージを示す。

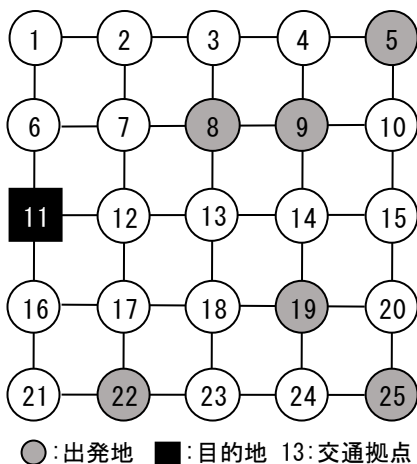


図-5 ケース①の仮想ネットワークイメージ

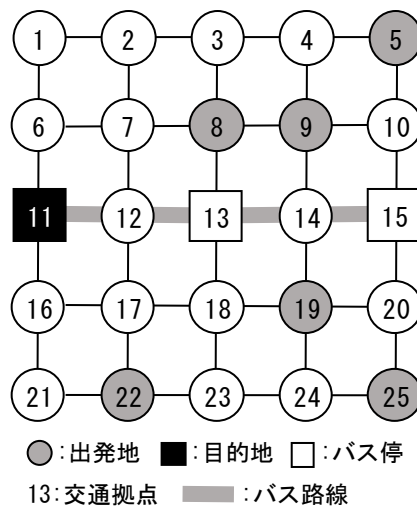


図-6 ケース②の仮想ネットワークイメージ

仮想ネットワークを対象とした、最適な運行形態の決定では、モデル内で考慮されない、車両タイプや路線バスの有無、運行頻度を、同時に最適化する必要がある。車両タイプは、乗車可能人数をタクシーとコミュニティバスの最大乗車人数である4~10人の範囲で変化させる。路線バスが存在するケース②では、1時間当りの運行頻度を2~5本で変化させる。検証項目を表-1に示す。

表-1 検証項目

ケース①	・乗車可能人数4~10人
ケース②	・乗車可能人数4~10人 ・バスの運行本数2~5本/h

仮想ネットワークの数値計算から得られる結果は、ケースと車両タイプ、ケース②では運行本数別の送迎コストPCである。検証する運行形態は35通り存在し、最もコストが低いものが最適な運行形態と考えられるが、送迎コストは優劣を決める絶対的な指標とはならない。

本研究では、ケース②における路線バスの運行費をコストに加えることで、ケース①との比較を可能にするが、路線バスの重みづけを、正確に行うことは困難であるため、ケース①とケース②を比較する際には、複合的に判断に判断することが必要である。

また、有効性の検討では、35通りの中から任意の形態を選び、総当たり計算の結果と比較し、解が最適解、または準最適解であった場合は、モデルの有効性が高いと考える。

5. おわりに

本研究では、デマンド型自動運転車両による交通サービスの最適な運行形態を検討するための基礎的な考え方を示した。主に、定時定路線交通とデマンド型交通の組み合わせの検討と、顧客間におけるサービスの不便さを平均化する点に注目した。モデルの構築では、NP困難と言われるDARPを解くために、GAとSAを用いることに加え、顧客間におけるサービスの差が生じにくい経路の評価方法を提案した。

実地域への適用についての方向性を示す。北海道広尾郡大樹町では、道の駅「コスモール大樹」を拠点とした自動運転サービスの2020年までの社会実装を目指している。背景には、人口減少と少子高齢化の進行による、定住性や生産性の低下という課題がある。解決には、財政的な制約の中で、効率的かつ持続可能な交通サービスを展開することが求められる。本研究で提案するモデルは、需要が点在する大樹町において、効率性と利便性の条件を考慮しながら、デマンド型自動運転公共交通サービスを

システムを検討できる。

今後は、デマンド交通だけでなく、路線バスの運行形態を同時に最適化することが求められる。さらに、仮想ネットワークの数値計算において、ケース①と②の比較のため、同じ需要を用いることを提案したが、定時定路線バスの存在によって、ケース②の需要が変化する可能性を考慮しなくてはならない。

参考文献

- 1) Jesper Larsen, R. M. Jorgensen, K. B. Bergvinsdottir. : Solving the Dial-a-Ride problem using genetic algorithms, Journal of the Operational Research Society. OCT., Vol.58, pp.1321-1331, 2007.
- 2) 松本修一, 國府方久史, 清水洋一郎, 川島弘尚 : 土木計画学研究・論文集, Vol.26, No.1, pp.59-65, 2009.
- 3) 吉野大介, 羽藤英二 : 第 52 回土木計画学会・講演集, pp.1297-1301, 2015.

(2019. 10. 4 受付)

FOR VEHICLE ALLOCATION PLANNING MODEL FOR DEMAND RESPONSIVE AUTONOMOUS DRIVING PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEM

Yuki DAIKATSU, Nao SUGIKI, Masanori MATSUDA and Kojiro MATSUO