

## ネットワーク成長，修正モデルによる公共交通機関の路線網構築法

間島 隆博	(独)海上技術安全研究所
高玉 圭樹	電気通信大学
渡部 大輔	東京海洋大学
勝原 光治郎	(社)日本工業技術振興協会

### 概要

LRT(Light Rail Transit)の導入や路線の再構成など，公共交通機関の効率化に関する検討が盛んに行われている。路線経路の決定や複数の路線で構成するネットワークの構築は公共交通機関のパフォーマンスを左右する重要な問題となる。この問題に対し，複雑ネットワークの成長モデルにより，初期路線の集合を生成し，生成された路線をエージェントと見立てたマルチエージェントシステムにより，路線を修正，進化させるモデルを構築した。構築したモデルを過去に行われたベンチマーク問題に応用した結果，利用者の所要時間やバス台数の観点から，既存の結果より良い路線網を生成することが確認出来た。

## Network Evolution, Modifying Model for Public Transit Network

Takahiro Majima	National Maritime Research Institute
Keiki Takadama	The University of Electro-Communications
Daisuke Watanabe	Tokyo University of Marine Science and Technology
Mitujiro Katuhara	Japan Technology Transfer Association

### Abstract

The public transit network is comprised of lines and the organization of the lines affect to the performance of the public transit network. In this paper, a model generating effective public transit network is proposed. This model has two stages. At first stage, modified network evolution model in the research field of complex network produces the initial line set. At second stage, the line modifies its route as agent in the framework of the multi agent system. The proposed model provided better solutions than that of precedent work for a benchmark problem.

### 1. はじめに

LRT(Light Rail Transit)の導入や路線の再構成など，公共交通機関の効率化に関する検討が盛んに行われている。通常，これらの輸送システムでは設定された路線内をバス等が往復する運行形態が採用されるが，路線経路の決定や路線が構成するネットワークの構築は輸送システムのパフォーマンスを左右する重要な問題となる。本稿では路線の経路とバス台数に焦点を当て，両者を同時に求めるモデルについて報告する。

### 2. モデル

ここで取り上げる問題はバス停の位置，道路(バス)，河川(水上バス)，軌道(鉄道)などのインフラネットワーク，OD(出発地:Origin, 目的地:Destination)別

の需要，バスの定員(一定)，バスの運行速度(一定)を所与とし，この条件の下で，バス路線の経路とバス台数を求める。なお，バス路線は停車順に並んだバス停の集合で表現され，バスは路線内の駅やバス停を各駅停車で往復するものとする。まず，2.1節に示すネットワーク成長モデルにより路線が生成される。2.2節では1つの路線を1つのエージェントとしたマルチエージェントシステムが採用され，進化ルールに基づき路線経路が修正される。一方，路線網の利用者は各OD(発着地)別に2.3節に示す手法により経路を選択する。この経路選択の結果は路線エージェントの進化ルールで利用される。生成される路線網の評価関数は過去の報告で利用されている次式とした。

$$\min Z = \sum_{S_i=S_j} T_{S_i,S_j} D_{S_i,S_j} + w_1 \sum_{L_k} B_{L_k} \quad (1)$$

ここで、 $D_{S_i,S_j}$ 、 $T_{S_i,S_j}$ は出発地が $S_i$ 、目的地が $S_j$ となる単位時間当たりが発生する利用者の需要と所要時間であり、所要時間には移動時間だけでなく待ち時間も含む。 $B_{L_k}$ は路線 $L_k$ のバス台数である。第1項は所要時間の総和を意味し利用者のコストを、第2項はバス運行会社のコストを表し、両者のバランスは係数 $w_1$ で考慮できる。なお、係数 $w_1$ は外性的に与えられるべき値があり、この変数の最適化は対象外である。

## 2. 1 路線成長モデル

路線エージェントの生成では、複雑ネットワークの分野で研究が進んでいるネットワーク成長モデルを応用する。多数のモデルが報告されている中で、実存する地下鉄網が再現できたモデル<sup>1)</sup>を参考とし、新たに路線の概念を導入した。ただし、成長の起点となるノードはモデルの性質上1つに限定されるため、目的地となるバス停を1箇所とする。本ネットワーク成長モデルを図1で説明する。

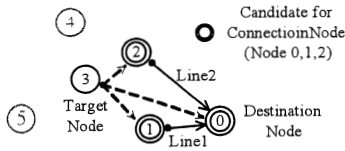


図1 ネットワーク成長モデルの概略図

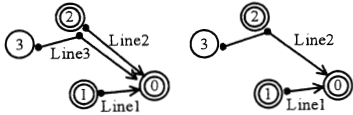


図2 路線接続の型 (左: 追加型, 右: 吸収型)

目的地となるバス停 (以下、目的地ノード、図ではノード0, Destination Node) を1つだけ選択し、そのバス停へ向かう需要があるバス停 (接続元ノード、図1では0以外のすべてのノード, Target Node) を1ステップに1つだけ追加していく。その接続元ノードは目的地ノードに近い順番に選択する。(図1では1,2,3・・・の順番であるが、図は3ステップ目の状態を表している。) 次に、接続元ノードのリンク先となる接続先ノードは、既にネットワークに接続されている全ノード (接続先ノード候補、図1ではノード0,1,2, Connection Node) の中から決定し、1つのリンクを生成して、これをバス路線とする。なお、接続先ノードから目的地ノードまでは、接続先ノードを通る既存の路線と同じルートをたどることとする。ただし、路線の概念を導入するため接続先

ノードとの接続方法には図2のように2つの方法を考慮した。1つは追加型接続で、新たに路線を追加する形態であり、路線数が1増加する。もう一方は吸収型であり、接続先ノードを終点とする既存路線と融合するため、路線数は増加しない。接続先ノードと接続型を決定する評価関数には式(1)を利用するが、 $S_i$ は接続先ノード候補と接続元ノードとなる。この評価値が最小となる接続先ノードと接続型が選択され、路線網が成長していく。ここで、複数の路線が乗り入れるバス停での待ち時間は、以下の式で計算する<sup>2)</sup>。

$$T_{w_i} = t_i \left[ \frac{1}{2} + \sum_{r=1}^{N-1} \frac{(-1)^r t_i^r}{(r+1)(r+2)} \sum_{j_1=2}^{N-r+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-r+2} \dots \sum_{j_r=j_{r-1}+1}^N \frac{1}{t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_r}} \right] \quad (2)$$

なお、路線 $L_i$ の到着間隔は路線 $L_i$ の往復移動時間 $Tr_{L_i}$ およびバス台数 $B_{L_i}$ により次式で計算する。

$$t_{L_i} = Tr_{L_i} / B_{L_i} \quad (3)$$

路線を運行するバス台数は路線に所属するバス停の需要を満たす最低の数を基準として算出する。

## 2. 2 路線修正モデル

前節の路線成長モデルは、目的地を1つに限定している。複数の目的地を持つ問題では、目的地別に前節のモデルを独立に実行し、生成した路線を重ね合わせるが、目的地が多くなると無駄な路線が多数生成されてしまう。ここでは路線をエージェントと見立てたマルチエージェントシステムにより路線を修正、進化させる方法を採用し、前節の手法により生成された路線を初期の路線エージェントの集合として利用する。なお、路線の修正、進化と次節に示す乗客の経路選択は交互に実行される。乗客数が0の路線は削除されるため、結果として路線数は減少する。進化過程の流れを図3に示す。各路線エージェントは下式による収益が計算され、この収益を増加させることを目的として利己的に進化する。

$$P_{L_i} = R_{L_i}^n - w_2 B_{L_i}^n \quad (4)$$

ここで、 $n$ は進化ステップを、 $R_{L_i}$ 、 $B_{L_i}$ は路線 $L_i$ の利用者数とバス台数である。 $w_2$ は路線の利益である利用者数とコストであるバス台数の関係を繋ぐ調整係数である。 $R_{L_i}$ 、 $B_{L_i}$ は以下の式で計算する。

$$B_{L_i} = \max(B_{\min}^n, B_{\text{opt}}^n, 1) \quad (5)$$

$$B_{\min}^n = \max_{S_i, S_{i+1} \in L_i} (d_{S_i, S_{i+1}}^n) Tr_{L_i}^n / C_B \quad (6)$$

$$B_{\text{opt}}^n = \sqrt{Tr_{L_i}^n R_{L_i}^n / (2w_1)} \quad (7)$$

$$R_{L_i}^n = \sum_{S_i \in L_i} d_{S_i, L_i}^n \quad (8)$$

ここで  $d_{ij}$  は次節に示す経路選択の結果得られた  $i$  から  $j$  へ移動する人数を意味する。  $i, j$  はバス停あるいは路線で

ある。また式(6)の  $\max_{S_i, S_{i+1} \in L_i} (d_{S_i, S_{i+1}}^n)$  は、路線  $L_i$  の断面

交通量の最大値であり、式(6)は需要を満たすために必要な最低のバス台数である。式(7)は今考慮している路線  $L_i$  にのみ式(1)を適用した場合、この評価値を最小とするバス台数となる。これは利用者の待ち時間のコストとバス台数にかかるコストが等しくなる点で式(1)の評価値が最小となることから導出されている。本進化過程では、式(4)による収益を基準として降順で路線エージェントを進化させる。すなわち、収益が高い路線の進化を促すことを意図しているが、ある路線で以下に示す進化が発生したら、それより収益の低い他の路線についての進化は実行せず、次節に示す利用者の経路選択に移る。

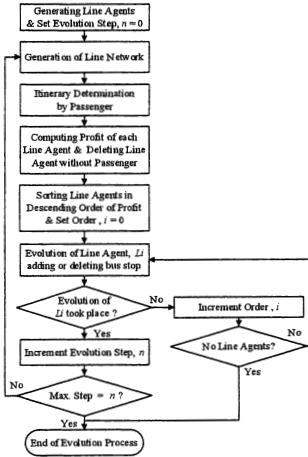


図3 路線エージェントの進化過程の流れ

進化の内容は、対象となる路線エージェント  $L_i$  に所属しない1つのバス停  $S_j \notin L_i$  の取込と、所属する1つのバス停  $S_i \in L_i$  の削除を考慮し、以下の式(9)、(12)による路線  $L_i$  から見たバス停別の魅力度を表す収益の増減  $A$  を計算して決定する。まずバス停  $S_j$  の取込については、迂回距離が最小となる、隣り合うバス停  $S_\mu, S_{\mu+1} \in L_i$  間にバス停  $S_j$  を取り込むこととする。

$$A_{S_j} = \Delta R_{L_i} - w_2(B_{L_i}^{n+1} - B_{L_i}^n), \Delta R_{L_i} = \sum_{S_i \in L_i} D_{S_i, S_j}^n - r \quad (9)$$

ここで、 $D_{S_i, S_j}$  は路線  $L_i$  を利用していないODペアに限る。また、 $r$  は次式のように計算される。

$$\begin{aligned} r &= 0 & \varepsilon &\geq 0.8 \\ r &= -d_{S_i, L_i}^n - d_{S_{i+1}, L_i}^n & \varepsilon &< 0.8 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで  $\varepsilon$  は迂回の度合いを示す「効率」と呼ばれる指標

であり、バス停  $S_1, S_2$  の間の路線に沿った距離を  $l_{S_1, S_2}$ 、直線距離を  $l'_{S_1, S_2}$  とすると、以下の式で計算される。

$$\varepsilon = l'_{S_i, S_{i+1}} / (l_{S_i, S_j} + l_{S_j, S_{i+1}}) \quad (11)$$

次に、バス停  $S_i$  の削除については

$$A_{S_i} = \Delta R_{L_i} - w_2(B_{L_i}^{n+1} - B_{L_i}^n), \Delta R_{L_i} = -d_{S_i, L_i}^n \quad (12)$$

式(9)(12)のバス台数の上付き添え字である  $n+1$  は駅の削除、取込に伴うバス台数の予測値であることを示し、次式で求める。

$$B_{L_i}^{n+1} = \max(B_{\min}^n, B_{opt}^{n+1}, 1) \quad (13)$$

$$B_{opt}^{n+1} = \sqrt{Tr_{L_i}^{n+1}(R_{L_i}^n + \Delta R_{L_i}) / (2w_1)} \quad (14)$$

ここで、 $Tr_{L_i}^{n+1}$  はバス停の取込や削除を行った路線の往復時間である。最終的にどの駅を取込、削除するかは以下の式に示すように、増収の最大値  $\pi$  となる進化（バス停に対する取込、削除）を採用する。

$$\pi = \max_{S_i, S_j} (A_{S_i}, A_{S_j}) \quad (15)$$

ただし、 $\pi < 0$  となる場合は、対象としている路線  $L_i$  の進化は行わず、次に収益が高い路線  $L_{i+1}$  でバス停の取込、削除に関する同様な手順を実行する。また、次の事項に該当するバス停は上記計算から除外する。

- ・ 取込、削除により、前提としている各駅停車が成立できなくなるバス停
- ・ 削除によりバス停が非連結となる（孤立して他のバス停へ至る経路が無くなる）バス停
- ・ 一度取り込んだバス停の再取込（同じバス停の取込と削除の繰り返しを回避）

## 2.3 利用者の経路選択

本過程は図3で旅程決定 (Itinerary Determination) と書かれた解析過程に対応している。ここでは前節の手法で形成される路線網を用いる。この過程で、全ODペアの移動時間、待ち時間、乗換数などの解析が行われ、解析結果は前節の路線の評価や進化に利用される。本稿では全ODペアに対してダイクストラ法により最小所要時間となる経路を求める。すなわち、式(1)の第1項を最小化する経路を採る。

## 3. 解析

前節までに示したモデルを過去に解析が行われた問題<sup>3)</sup>に応用してみる。この問題のインフラネットワークを図4左に示す。図中、ノードの数字はバス停のID番号を、リンク横の数字はバス停間の所要時間を示してい

る。過去に行われた解析例では、表1のような需要が設定されていた。さらに、既報にならない乗換には待ち時間とは別に1人回あたり5分の罰則を与えた。

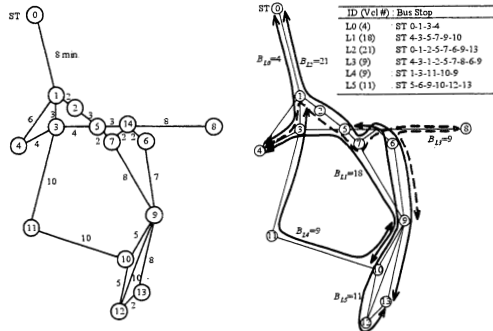


図4 ベンチマーク問題と生成された路線図

表1 ベンチマーク問題のOD需要

ST	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
1	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
2	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
3	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
4	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
5	150	180	180	190	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
6	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0
7	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
8	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
9	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
10	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
11	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
12	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0
13	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

#### 4. 解析結果

調整係数  $w_1$  を 0.8,  $w_2$  を 5 及び 9 とした時の結果を過去の解析結果と合わせて表2で比較する。

表2 問題3の解析結果の比較

	Zhao <sup>5)</sup>	Shih <sup>4)</sup>	This Method	
			$w_2=5$	$w_2=9$
Total Travel Time (hr)	3285	3401	3244	3291
Vehicle Num.	77	68	72	64

過去に報告された最小所要時間の解<sup>5)</sup>, 最小バス台数の解<sup>4)</sup>と比較して本手法はより良い路線網が得られている。 $w_2$ を5とした時の路線図を図4右に示す, 乗降客数が多い, ST9に路線が集中している。また, 所要時間とバス台数の進化履歴を図5に示す。進化とともに各値は減少していく様子が捉えられている。

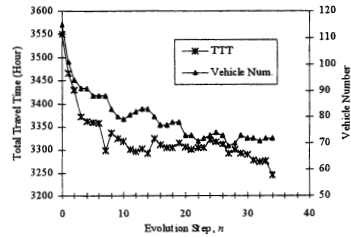


図5 所要時間とバス台数の進化履歴

#### 5. まとめ

本稿では複雑ネットワークで研究されているネットワーク成長モデルに倣い, 路線を生成するモデルを構築した。また, 生成された路線をエージェントと見立てたマルチエージェントシステムにより, 路線網を修正, 進化させるモデルを構築した。構築したモデルをベンチマーク問題に応用した結果, 既報の結果よりも良い路線網が得られた。課題として, 本モデルは Greedy な戦略により路線が成長, 進化する手法を採用しており, 得られる路線網は一意に決定される。よって, 局所最適解を回避する対策が必要となる。

#### 【参考文献】

- (1) Gastner, M.T. and Newman, M.E.J.: Shape and Efficiency in Spatial Distribution Networks, *J. Stat. Mech.* P01015 (2006).
- (2) Lampkin, W. and Saalman, P.D.: The Design of Routes, Service Frequencies and-Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A case study, *Operation Research Quarterly*, No.18, pp.375-397 (1967).
- (3) Mandl, C.E.: Evaluation and Optimization of Urban Public Transportation Networks, Presented at the 3rd European Congress on Operation Research Amsterdam, Netherlands (1979).
- (4) Shih, M.-C. and Mahmassani, H.S.: A Design Methodology for Bus Transit Networks with Coordinated Operations, *SWUTC/94/60016-1*, Center for Transportation, Univ. of Texas at Austin (1994).
- (5) Zhao, F. and Zeng, X.: Optimization of User and Operator Cost for Large-Scale Transit Network, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.133, No.4, pp.240-251 (2007).