

東京首都圏の列車運行計画に対する実用的アルゴリズム

山内 達貴

中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻 (現：株式会社インターネットイニシアティブ) 准教授, 今堀慎治 中央大学 教授
 指導教員：高松瑞代 中央大学

1. はじめに

首都圏では通勤時間帯に鉄道が非常に混雑する。混雑は遅延の原因や利用者の負担になるため、鉄道会社はダイヤ改正を実施して混雑緩和を図っている。ダイヤ改正では列車運行計画、乗務員のスケジューリング、車両割当を決める必要があり、中でも列車運行計画は利用者の行動に影響を与える重要な要素である。

本研究では列車運行計画を決定する二つのアルゴリズムを提案する。一つは、利用者の行動に基づいて、優等列車の停車駅と運行本数を最適化するアルゴリズムである。このアルゴリズムでは、利用者均衡配分問題を解いて得られる乗客フローを利用して、局所探索法によって最適化を行う。もう一つは、停車駅と運行本数から列車の運行順序を決定するアルゴリズムである。列車の運行本数を変更した場合、運行順序によっては通勤時間帯に列車をすべて走行させることができない場合がある。このアルゴリズムでは、各駅における列車の簡易的な着発時刻を計算することで、通勤時間帯に列車が走行できる運行順序を局所探索法によって計算する。これらのアルゴリズムを京王電鉄の4路線と都営新宿線に対して適用し、数値実験を行う。

2. 優等列車の停車駅と運行本数の最適化

2.1 通勤ラッシュ時 (7時から8時半)

通勤時間帯の利用者は、移動時間や乗換のしやすさ、さらに混雑状況を勘案して乗るべき列車を選択する。このような利用者の行動は、利用者均衡配分に基づいて時空間ネットワーク上に利用者を配分するモデルによって計算することができる [1]。

文献 [2] では通勤ラッシュ時の7時から8時半を対象として優等列車停車駅を最適化する局所探索法が提案された。本研究では文献 [2] を発展させ、停車駅と運行本数を同時に最適化する局所探索法を提案する。

局所探索法における解の評価では乗客フローを利用する。乗客フローを求めるためには、利用者均衡配分を繰り返し計算する必要がある。計算を効率よく行うために、時空間ネットワーク上の同じ列車種別をまとめ

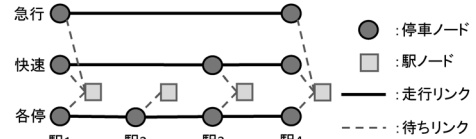


図1 列車種別ネットワーク

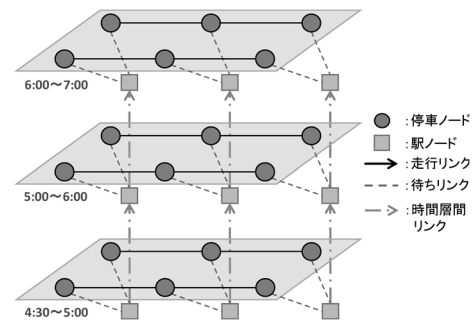


図2 階層構造をもつ列車種別ネットワーク

た列車種別ネットワークを導入する (図1)。停車ノードは各列車種別の停車駅であり、駅ノードと待ちリンクによって乗換を表現する。通勤ラッシュ時に限定すると、列車種別ネットワーク上の乗客フローは時空間ネットワーク上の乗客フローと近い値になる。

提案するアルゴリズムでは、優等列車の停車駅と運行本数を局所探索法により交互に最適化する。それぞれの最適化では、停車駅と運行本数をもとに列車種別ネットワークを構築し、利用者均衡配分を解いて得られる乗客フローを評価し、解を改善することを繰り返す。京王電鉄と都営新宿線に対して実験を行い、得られた解を2016年時刻表と比較すると、評価値と混雑率がともに優れていることが確認できる。

2.2 通勤時間帯 (4時半から9時半)

2.1節のアルゴリズムを通勤時間帯である4時半から9時半に拡張する。列車種別ネットワークは各列車種別を1本にまとめたネットワークであるため、時間帯を広げると、混雑率が低い早朝などの列車に利用者が集中する問題がある。これを解決するために、列車種別ネットワークを1時間おきに構築し、階層構造をもつネットワークに拡張する (図2)。時間帯の移動は、

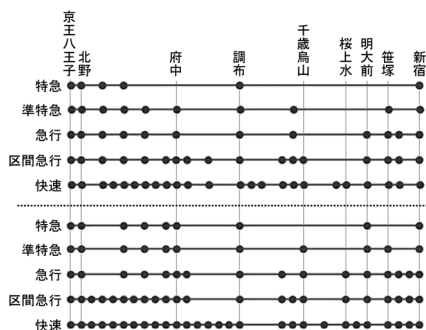


図3 得られた解(上)と2016年時刻表の停車駅(下)

隣り合う時間帯にリンクを張って表現する。このネットワーク上の乗客フローは、時空間ネットワーク上の時間帯別の乗客フローと近い値になる。

停車駅と運行本数の最適化では、階層構造をもつ列車種別ネットワーク上で乗客フローを繰り返し計算する。社会への応用を見据えると、精度の高い解を複数求めておき、鉄道会社がこれらを列車運行計画の参考にできるようにすることが重要であると考えられる。ここでは、乗客フローの評価と最大混雑率によるパレート解を計算する局所探索法を提案する。

利用者均衡配分を解く際に使用する走行リンク a のコスト関数は、以下のBPR関数である：

$$\bar{t}_a(f_a) = L_a \left(1 + \alpha \left(\frac{f_a}{N_a C_a} \right)^\beta \right).$$

f_a と L_a は走行リンク a のフローと移動時間である。 N_a と C_a は列車の本数と容量を表し、 $N_a C_a$ は走行リンク a の容量に対応する。停車駅を最適化する局所探索法では、暫定解 S に対して評価関数を

$$\text{eval}(S) = \sum_{a \in A} f_a \cdot \bar{t}_a(f_a) + \sum_{v \in V} c_v(S)$$

と定める。 A は階層構造をもつ列車種別ネットワークのリンクの集合、 V は駅の集合、 $c_v(S)$ は駅 v のノードの数である。第一項は移動時間と混雑率によって定まる式であり、乗客フローを評価する。第二項は第一項が同じ値の場合のみ有効な項である。この評価関数だけでは最大混雑率を犠牲にして他の混雑率を下げようとするため、最大混雑率も評価関数に利用する。運行本数の最適化では、evalを少し変更した関数と最大混雑率を利用する。提案する局所探索法は、これらの評価関数によるパレート解を計算する。

提案するアルゴリズムを京王電鉄と都営新宿線に対

表1 京王線上市における各列車種別の本数

		特急	準特	急行	区急	快速	各停
得られた解	6時-7時	9	3	0	4	0	2
	7時-8時	0	0	13	9	0	4
	8時-9時	0	0	7	7	5	3
'16時刻表	6時-7時	6	2	0	5	0	5
	7時-8時	0	0	8	8	0	10
	8時-9時	2	0	7	6	0	7

表2 階層構造をもつ列車種別ネットワーク上の混雑率

	得られた解		2016年時刻表	
	列車種別	混雑率	列車種別	混雑率
1位	区間急行	232.61%	区間急行	233.59%
2位	各停	230.02%	急行	232.05%
3位	急行	229.47%	区間急行	230.70%
4位	各停	229.44%	急行	228.31%
5位	区間急行	227.30%	区間急行	227.12%

して適用する。計算時間は約66時間22分であり、得られたパレート解の評価値は2016年の時刻表よりもすべてにおいて優れている。図3は京王線の停車駅の比較である。表1は京王線上市の6時から9時における各列車種別の運行本数の比較である。混雑する7時から8時には急行と区間急行の本数を増やしている。表2は混雑率上位五つの比較である。1位から3位の混雑が緩和されたため、これらのリンクを利用する乗客が分散して4位と5位の混雑率が増加している。

3. 運行順序を決定するアルゴリズム

停車駅と運行本数が与えられたとき、始発駅の列車の運行順序を局所探索法により決定する。局所探索では多スタート法を利用する。ある運行順序から作成した新たな運行順序をもとに、各駅の列車の簡易的な着発時刻を計算する。通勤時間帯に列車が運行できるかを評価し、改善解であれば更新することを繰り返す。

今後の課題は、停車駅、運行本数、運行順序の最適化を繰り返し行う局所探索法の構築である。得られた運行順序に基づいて停車駅と運行本数を再び最適化することで、より優れた運行計画の作成が期待できる。

参考文献

- [1] 田口東, “首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会と文論誌, **48**, pp. 85-108, 2005.
- [2] T. Yamauchi, M. Takamatsu and S. Imahori, “Optimizing train stopping patterns for congestion management,” In *Proceedings of 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017)*, OASiCS, **59**, Article No. 13, 2017.