

グラフ理論に基づく乗客経路決定機能を持つ 運転整理評価・支援システム

長崎 祐作*, 高野 求, 古関 隆章 (東京大学)

Train Rescheduling Evaluation and Assistance System
with Passengers' Behavior Simulation based on Graph Theory

NAGASAKI Yusaku, TAKANO Motomu, KOSEKI Takafumi (The University of Tokyo)

Abstract

Currently train rescheduling is executed by train operators based on their experiences and intuitions. We propose the method to evaluate train rescheduling plan in order to assist their decision. We introduce passengers' behavior estimation and simulation method based on Dijkstra search to calculate the evaluation value. And we combine the method and train operation simulation based on PERT diagram, we have designed train operators' assistance system. In this paper, we introduce the train operators' assistance system.

キーワード: 運転整理、支援、評価、運行管理、グラフ理論

Train Rescheduling, Assistance, Evaluation, Train Operation Management, Graph Theory

1. 序論

鉄道の運行が事故や災害の影響などで乱れた時には、列車の順序を変更するなどして早期に正常ダイヤへの復帰を図る、「運転整理」と呼ばれる作業が行われている。現状では、この作業は完全に運転指令員の手作業であり、指令員の経験と勘に基づいて実施されている。運行が混乱している時は現場の状況がよくわからないことも多く、不明確な状況で一度に多くの列車や駅に対して指示を出さなければならないため、非常に負担が大きな作業となっている。

一方、鉄道の競争力向上という観点から考えても、運行混乱の際に適切な対処を行うということは重要である。このため、運転整理時の運行指令員の負担を軽減し、よりよい案を作成できるような仕組みが求められている。

本論文では、運転整理を乗客が受けた損失を積算するという方式で評価することを提案し、その計算の前提となる乗客行動計算の方法と実際の乗客行動との一致の程度について示す。また、その評価プログラムを列車運行シミュレータと組み合わせることで、統合した運転整理支援システムとして実装し、提案する。

2. 乗客の損失の積算による評価法

運転整理の評価は、よく列車の遅延時間を全て合計するというやり方が用いられている。これは単純であり高速に計算できるが、各列車の乗客数を考慮に入れておらず、乗客の立場に立った評価法とはなっていない。これに対して筆者らは従来から乗客の損失を積算する方式による評価法を提案し

てきた^{[1][2]}。評価値を各乗客の損失の積み上げという形で表すことにすると、損失が0になる、乗客にとっての理想的な状況は、

1. 乗客が駅にやってくると待ち時間無く乗車する列車がやってくる。
2. 乗車した列車は乗客の目的地の駅までノンストップで(最小の所要時間で)走る。
3. 乗車した列車には他の乗客は乗っていない(混雑度が0である)。

というように考えられる。しかしこれを全ての乗客に対して満たすことは不可能であるので、この理想的状態に対して各乗客がどの程度損失を受けるかを評価することにする。評価項目は以下の3点である。一次元的な評価量が欲しい時はこれらを全て金額に換算して合計する。

2.1. 損失時間

損失時間は、出発駅から到着駅まで直行する列車があったと仮定した場合の所要時間に比べてどれだけ余計に時間がかかったかを表すものである。従って、正常運転時であっても乗換や待ち時間があるため損失は発生している。損失時間の評価式は式(1)に示した通りである。

$$L_1 = w \times \sum_{i=0}^N (t_i' - t_i) \quad (1)$$

N : 乗客の総数

t_i : i 番目の乗客の直行時の所要時間

t_i' : i 番目の乗客の運転整理時の所要時間

: 時間価値(円/分)

時間価値 は、乗客の時間あたりの賃金をもとにした所得接近法により、都市圏ではおよそ50[円/分]と求められている^[3]。

2.2. 乗換回数

乗換は、実際に乗換にかかる時間以上に乗客に負担となるため、乗換にかかった時間を損失時間として評価する以外に、その回数自体を評価する。乗換1回を何秒の損失時間と等価に換算するかは、各駅での乗換のパターンによって設定できるようにしてある。

$$L_2 = w \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij} \tag{2}$$

- N: 乗客の総数
- M_i: 乗客iの乗換回数
- r_{ij}: 乗客iのj番目の乗換の換算係数
- : 時間価値(円/分)

2.3. 混雑度

混雑度の評価については、混雑時に1分を何分を感じるか、人間の感覚の非線形性を表した係数^{[3][4]}を用いて時間に換算し、それにその混雑を経験した人の人数と時間をかけ、これに時間価値をかけて金額に換算する。

$$L_3 = w \times \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{H_j} \{ f_c(c_{jk}) \cdot q_{jk} \cdot t_{jk} \} \tag{3}$$

- n: 全駅数
- : 時間価値
- H_j: 駅jに停車する列車本数
- c_{jk}: 駅jにh番目に停車する列車の、次の駅までの区間における混雑度
- q_{jk}: その乗客数(人)
- t_{jk}: その所要時間(分)
- f_c: 図3に示す混雑に対する人間の非線形な感覚を表す係数

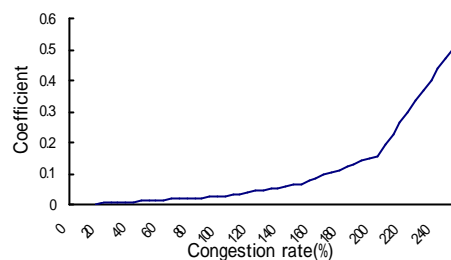


図1. 混雑度と係数の関係

Fig 1. Characteristic curve of the human feeling factor against congestion rate

2.4. 評価範囲

列車の遅延時間を合計する評価方法では評価範囲は明白であるが、乗客の損失を積算する方式では単純には評価範囲が決定できない。乗客の損失は正常に列車が運転している範囲でも発生しているため、損失が発生しなくなるまで積算するという方式にはできない。評価範囲として含めるべきなのは、遅延範囲の中を移動している経路、遅延範囲に進入する経路、遅延範囲から進出する経路、遅延範囲の列車で発生した積み残し乗客のいる範囲であり、その概念を図2に示す。こうした評価対象の経路は、第4章で示す乗客経路計算の際に確定することができる。

3. 乗客行動経路の推定

2.で述べた評価値を計算するためには、まず乗客がどういう経路で移動したかを知る必要がある。このために乗客行動仮定を導入する。乗客は自分にとっての損失が最も少なくなる経路を選ぶであろうから、2.で示した損失が自分にとって一番小さくなる経路を選ぶものと考えられる。ただし、混雑度については、乗客が実際にその経路で移動してみないと混雑度による損失を知ることはできないと考えられ、また過去の経験から混雑を予想して乗車するという行動も運行混乱時には役に立たないので、混雑度は考慮せずに経路を選ぶ

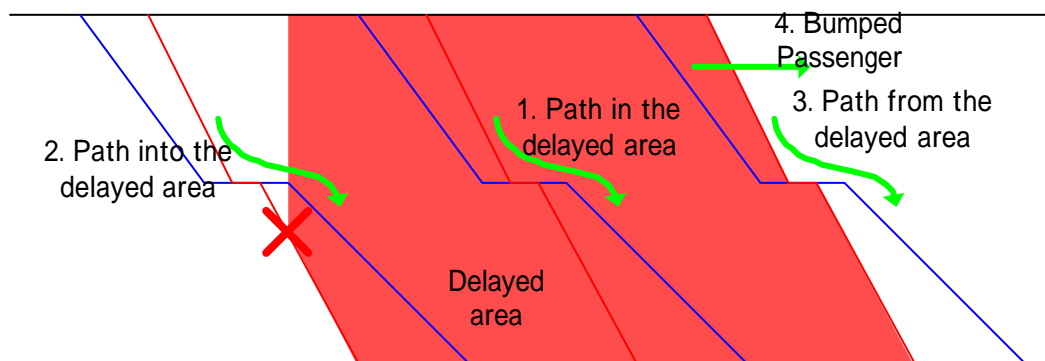


図 2. 評価範囲の概念

Fig 2. Concept of evaluation range

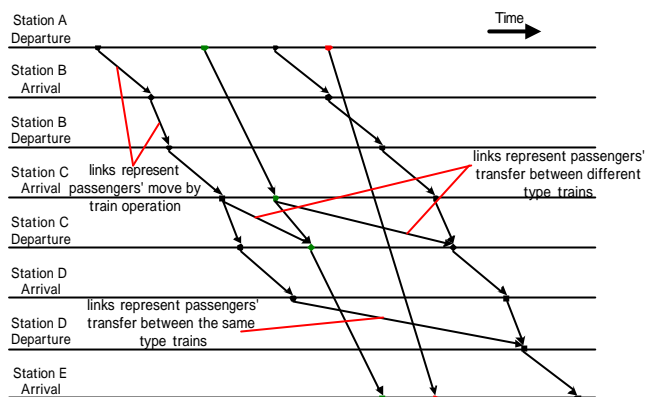


図 3. 乗客行動を表したグラフ

Fig 3. A graph represents passengers' behavior

ものとする。つまり、損失時間と乗換回数の損失の合計が自分にとって最も小さくなる経路を選ぶものとする。

このように乗客行動仮定を置くと、各乗客の行動は図3.に示したようなグラフ構造を、最短経路探索法であるダイクストラ法により探索することで求めることができる。乗客行動を表現したグラフは、各列車の出発と到着をそれぞれノードとして表し、列車の走行を表すリンクでその間を結ぶ。列車走行を表すリンクの重みはその所要時間となる。また、列車間の乗換を表現するために、乗換の可能性がある場所には異なる列車のノード間に乗換のリンクを張る。この重みは乗換の所要時間とその乗換の換算値の合計とする。この乗り換えリンクの生成規則については図4.に示すように、列車の停車パターンで分類して、異なる停車パターンの列車の間で張る、ということと、同じ停車パターンが2回目以降に現れても張らない、という規則となる。

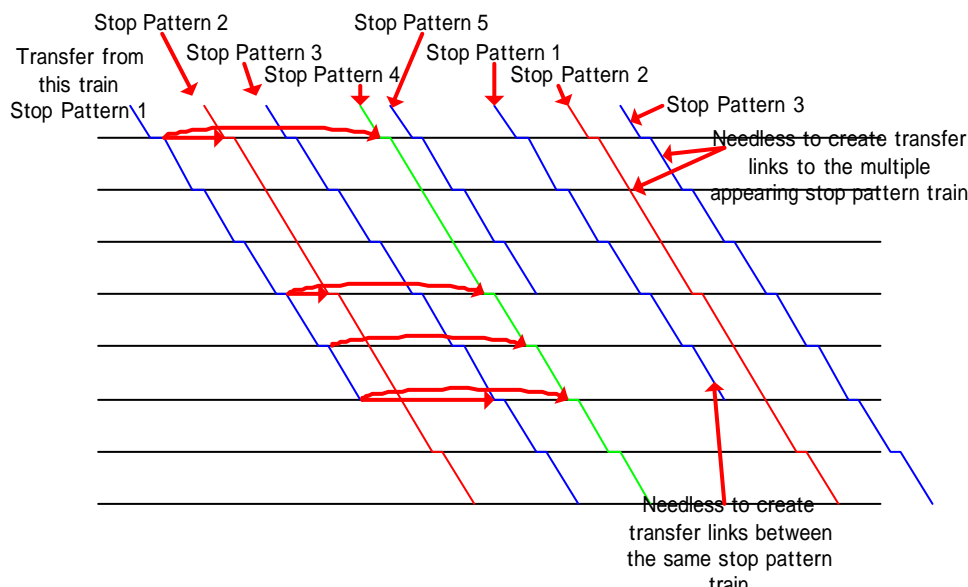


図 4. 乗換リンクの生成規則

Fig 4. Transfer link generation rule

このグラフに対してダイクストラ法を適用すると、ある始点からの各ノードへの最小となる評価値の一覧が出来上がることになる。そのうち、各駅への到着ノードの評価値の中から一番低いものを選んでいくと、その始点から全ての駅への経路が定まることになる。任意のODに対して全ての可能な始点でこの作業を繰り返すと、全ての駅間での乗客経路を決定することができる。このようにグラフで探索して得られる最短経路は、所要時間と乗換の換算値の合計が最小となる経路となる。同一の駅間では式(1)で示した損失時間の計算で所用時間から差し引く直行時の所要時間は一定なので、この方法により損失時間と乗換換算値の合計が最小となる経路を探索することができることになる。

乗客経路が決定すると、都市近郊鉄道においては乗客は時刻表を気にすることなく、乗車駅に時間的に均等に現れるものと考えられるので、同一ODに対して考えられる複数の経路に対して、その経路の時間間隔に比例してODを配分することで、各経路の乗客数を決定することができる。

また逆に、到着駅に着くべき時刻が時間的に均等に与えられ、時刻表を調べてそれに間に合う列車に乗車するという、長距離鉄道に多く見られる乗客行動モデルを考えることができる。これに関しては、図3の乗客行動を表したグラフのリンクを全て逆向きにして、ダイクストラ法の探索を逆から行い、また到着駅の時間間隔に比例してODを配分することで各経路の乗客数を計算することができる。

本論文では前者の行動仮定に従うものをモデル1、後者の行動仮定に従うものをモデル2と呼ぶことにする。

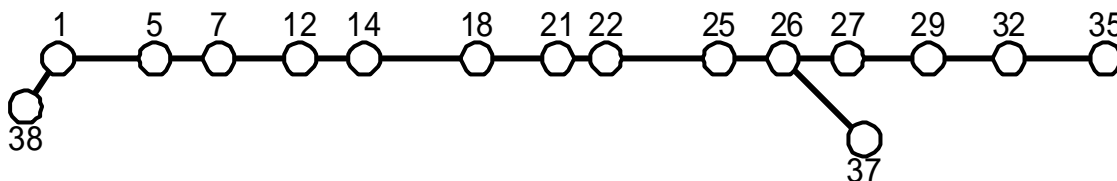


図5. モデル路線の路線図

Fig 5. Network layout of model line

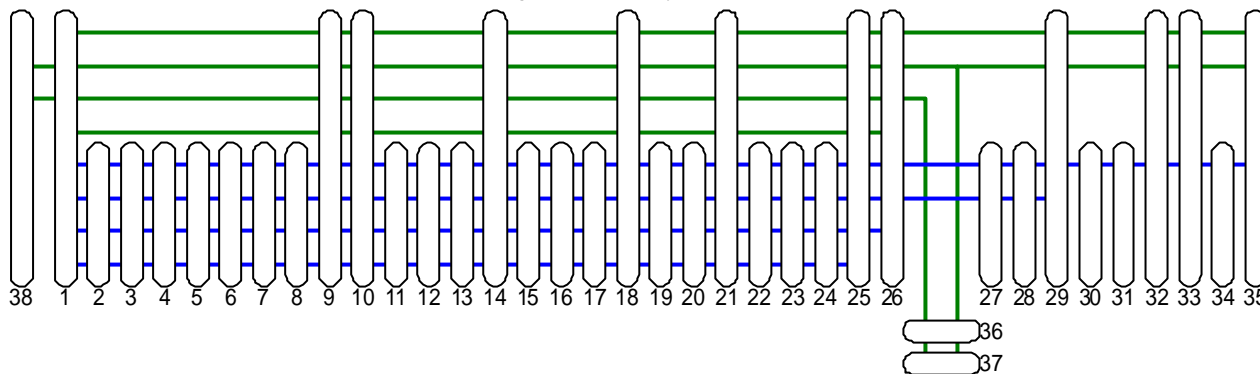


図6. モデル路線の運行系統図

Fig 6. Train operation of model line

このようにして得られた乗客行動が、どの程度現実の乗客行動と合致しているかを調べるため、実在の鉄道路線をモデルとして乗客行動計算を行い、実際に調査された乗客行動のデータと比較した。図5に示したような構造の全線複線の都市型鉄道をモデルとし、図6に示したような急行列車と各駅停車の2種類の種別があり、その行き先の違いを含めると全部で8種類(上下で16種類)の停車パターンがあるモデルダイヤを作成して行った。その結果を図7と図8に示す。

モデル1とモデル2の乗客行動仮定を取る乗客の比率は分からないので、あらかじめ与えた駅間乗客需要の全てがモデル1であるようなシミュレーションと、モデル2であるようなシミュレーションとを行って比較した。図7、図8のうち左側6列車ずつが図6の急行列車に相当し、右側6列車ずつが図6の各駅停車に相当する。もともと乗客数の少ない各駅停車では、乗客行動モデル1で上下ともかなり正確に推定できており、急行列車においても若干外れているところもあるが、全体的な傾向はよくつかめていると考えられる。

今回は完全なコンピュータシミュレーションで乗客行動を計算したが、実際の鉄道においては他に自動改札の入退場の情報や、車両に搭載されている重量センサの情報など、乗客行動を把握するのに利用できる情報源があり、そうした情報を積極的に利用することで乗客行動計算を補正して、より正確に近づけることが可能であると考えられる。さらに、こうした計算を元にした混雑予測情報を駅の電光掲示板やWWWなどのメディアを用いて配信することで乗客サービスに繋げるという方向の発展もありえる。

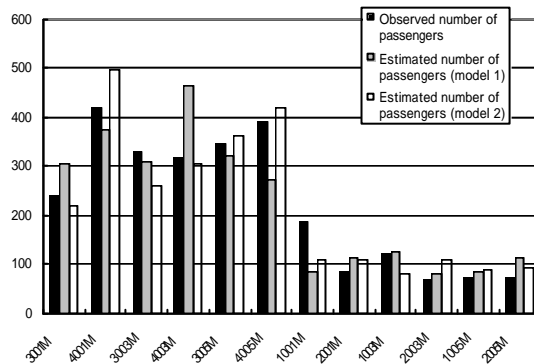


図 7. 下り列車の推定結果

Fig 7. Estimation result for downward train

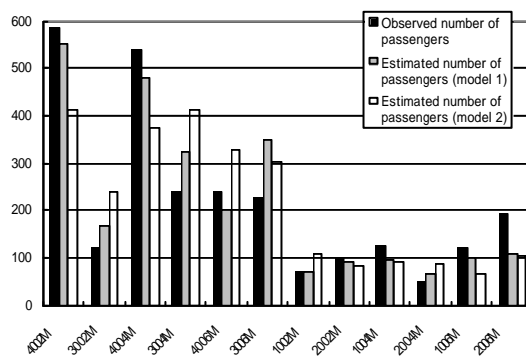


図 8. 上り列車の推定結果

Fig 8. Estimation result for upward train

4. 列車運行シミュレーション

相互に依存関係がある仕事の解析・スケジューリングなどを行うのに用いられる、PERTダイアグラムと呼ばれる手法があり、それを用いて列車運行シミュレーションを行う研究が先行研究として存在する^[5]。本論文でもこれを踏襲して列車運行シミュレータを構築した。

図 9.にこのPERTの手法を適用するグラフ構造を示す。各ノードは列車の駅への到着や出発などの事象を表し、ノード間のリンクは各事象の間の遷移関係を表し、リンクの重みは時間となる。

このグラフを作成するためにはまず、全ての列車の駅への到着と出発を表すノードを作成する。続いてそれらのノードを結ぶリンクとその重みを設定する。リンクは次のようなものを設定する。

1. 各列車の各駅出発ノードとその次の駅の到着ノードの間に張られる、駅間走行を表すリンク。リンクの重みはその列車の駅間走行基準時分。
2. 各列車の各駅到着ノードとその駅の出発ノードの間に張られる、駅への停車を表すリンク。リンクの重みはその列車のその駅における標準停車時分。
3. 各列車の駅出発ノード・到着ノードと、その次の列車の駅出発ノード・到着ノードとの間に張られる、駅出発・到着順序制約を表すリンク。リンクの重みは最小出発・到着時隔。
4. 各列車の駅出発ノードと、同一ホームを次に利用する列車のその駅への到着ノードの間に張られる、同一ホーム利用制約を表すリンク。リンクの重みは最小同一ホーム利用時隔。
5. 列車の駅到着ノードから、 n 本後の列車の前駅出発ノードの間に張られる、閉塞制約を表すリンク。ただし、 n は駅間の閉塞数。リンクの重みは0。
6. 基準となるノードから、各列車の各駅出発・到着ノードとの間に張られる、ダイヤ制約を表すリンク。リンクの重みは正常運転時の出発、到着時刻と基準時刻の差。

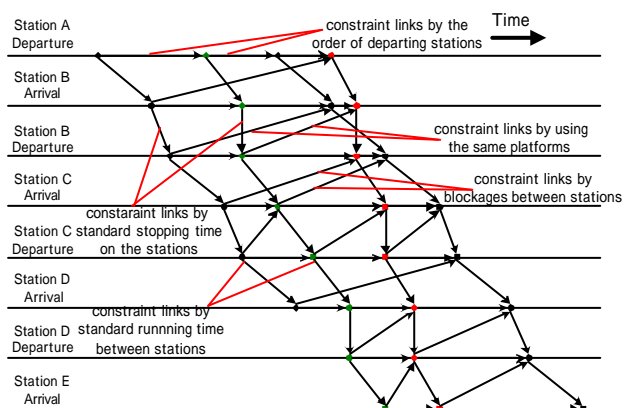


図 9. 列車運行の制約を表したグラフ

Fig 9. A graph representation of train operation constraint.

こうして得られたグラフ構造にPERTの手法を適用すると、各ノードの値としてそのイベントが発生する最も早い時刻が得られる。最も早い時刻が得られるということは、できるだけ速く走って時刻回復に努める運転整理時のシミュレーションが行えるということである。また、6.のダイヤ制約を表すリンクがあるため、早着・早発を行わないことになるので、列車の運行が正常ダイヤに回復するとそれ以上早くはならない。

列車の運行の混乱を表現するために、わざと遅れを設定する場合には、遅れが発生する場所の駅間走行リンクは駅への停車リンクの重みを大きくしたり、事故からの運転再開時刻を設定するリンクを張ったりする方法を用いることができる。

また、PERTの手法では、グラフのループを検出することで、デッドロックの検出を行えるという特徴も持っている。運転整理の指令を指令員が入力する時に、気付かずにつっかり実行不可能な整理案を作成するという事は普通にあることであり、それをコンピュータシステムは適切に検出できなければならない。PERTでは、こうした現象がデッドロックとして検出できるので、その点でも適している。

5. 結論

本論文で示した乗客行動計算機能と、列車運行シミュレータを組み合わせることで、運転整理の評価と支援が行えるシステムを構築できることを示した。

乗客行動計算機能は、携帯電話などの情報端末を利用して乗客個別に案内するシステムを構築するベースとして利用することも考えられ、応用の可能性がある機能である。

今後は運転整理の支援機能をより強化する方向での研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 林, 古関 「都市圏鉄道における運転整理の評価と効果的手法の提案」, 平成13年電気学会全国大会 4-234, 2001
- [2] 長崎, 古関, 村木, 館, 駒谷 「都市近郊鉄道における運転整理案の作成と評価」, 平成14年交通・電気鉄道 リニアドライブ合同研究会 pp.11-16, 2002
- [3] 「鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル99」, 運輸政策研究機構, 1999
- [4] 美谷, 家田, 畠中: 「乗車位置選択行動モデルを用いた混雑費用の定量的評価法」, 土木計画学研究・論文集, No.5, pp.139-146, 1987
- [5] 安部, 荒屋 「最長経路法を用いた列車運行シミュレーション」, 情報処理学会論文誌, 1986