

1412 乗客経路決定機能を持つ運転整理提案・評価システム

Computer Assisting System to Propose and Evaluate Train-Rescheduling with a Function of Passenger-Path Allocation

○ 高野 求 (東大) 長崎 祐作 (東大)
正 古関 隆章 (東大)

Motomu TAKANO, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo
Yusaku NAGASAKI, University of Tokyo
Takafumi KOSEKI, University of Tokyo

Presently, train rescheduling is operated by conductors with their intuitions and experiences. We are trying to develop a system assisting conductors during rescheduling by proposing rescheduling automatically and evaluating it from the viewpoint of passengers.

In this paper, we introduce passengers' loss as evaluation value of rescheduling plan. To compute this evaluation value, it is required to simulate train operation and passengers' behavior. We also introduce methods for these simulations with graph theory.

By using graph theory, we can simulate train operation and passengers' behavior fastly and get closer to realization of realtime train rescheduling.

Key Words : Train Operation Management, Train Rescheduling, Graph Theory

1 はじめに

列車は通常あらかじめ定められたダイヤに従って運行しているが、事故などの影響によりひとたびダイヤが乱れてしまうと、その影響の波及を最小限にとどめるために、ダイヤを一時的に変更し早期に回復することが必要となる。この作業を運転整理と呼ぶ。現在、運転整理は熟練した指令員が経験と勘に基づいて行なっているが、運転整理時には信号システムや車両性能などの複雑な条件を考慮し、適切な判断を迅速に下さなければならず、指令員にとって大きな負担になっている。そこで筆者らは、計算機により運転整理案を自動的に生成しそれを定量的に評価することにより、運転整理を支援するシステムの構築を目指している。

運転整理支援システムを実現するためには、計算機の生成した複数の運転整理案の評価を短時間で行い、最もよい評価値を達成する整理案を指令員に示す必要がある。筆者らはダイヤの評価値として乗客の被る損失に着目し、乗客の立場から見た運転整理案の評価を行なっている。乗客から見たダイヤの評価値の算出の際には、運転整理を実行したときの列車運行や乗客行動のシミュレーションが必要となる。

本稿では、はじめに運転整理支援システムの概要を説明し、乗客の立場からのダイヤ評価方法について紹介した後、グラフ理論を用いて列車運行や乗客行動のシミュレーションを高速に行なう手法を紹介する。

2 運転整理支援システムの概要

筆者らは、計算機により運転整理を支援するシステムの構築を目指して研究を行なっている。これまでの研究では、分岐のない直線的な単路線を対象とした、運転整理案の生成、評価、提案を行なうプログラムの実装を行なった [1]。このプログラムは、待避駅の変更や時隔調整といった運転整理手法を、条件を変えなが

らダイヤに適用し運転整理案を生成して、それを評価するという処理を繰り返し行い、評価値のよい運転整理案を採用し提案を行なう。

運転整理案の生成方法は運転整理手法によって異なるが、例えば待避駅変更の場合は、待避列車が遅延した通過列車を待つ時間が閾値を超えている個所があれば待避を先延ばしする案を生成し、また、通過列車が遅延した待避列車に追いついてその時隔が閾値を下回っている個所があれば待避を前倒しする案を生成するなどの処理を行なっている。

ダイヤの評価は、目的駅までの所要時間や乗り換え、混雑による乗客の損失の量を評価値として用いて行なう。しかし、これらの量は各乗客がどの列車に乗車するかがわからないと算出できず、この情報を得るために乗客行動のシミュレーションが必要になる。また、乗客の列車選択は各列車の運転時間に依存する。そこで、生成された運転整理案に従って列車を運行した場合の各列車の運転時間を知るために、列車運行のシミュレーションを行なう必要がある。以下では、このような評価値やシミュレーション手法について紹介する。

3 乗客の立場からのダイヤ評価

3.1 乗客の立場からのダイヤ評価の概要

ダイヤの評価値は、乗客が出発駅から目的駅に到達するまでに被る損失を、全乗客について合計したものをを用いる。本研究では以下の3項目を乗客の損失として扱っている。

- 所要時間
- 乗り換え
- 列車の混雑

これらは互いに次元の異なる量であるため、それぞれの損失を金額に換算しその合計をダイヤの評価値とする。

上記の3種類の損失について、乗客にとって最適な状態は以下の状態であると考えられる。

- 駅での待ち時間はない
- 列車は出発駅から目的駅まで無停車・最短時間で運転する
- 乗り換えを必要としない
- 列車の混雑度は0である
(実際には自分自身が乗車しているためこの状態になることはない)

そこで、本研究では、これらの条件を全て満たす状態を無損失の状態と考え、これを基準に各損失を評価する。

3.2 所要時間による損失

出発駅から目的駅までの所要時間はダイヤを評価する上で最も重要な指標であると考えられる。正常時の運行においても、乗客が出発駅に到着してから列車が発車するまでの待ち時間や、途中駅での停車時間、乗り換え駅での移動時間や待ち時間は損失であると考えられる。そこで、駅における待ち時間がなく、出発駅から目的駅までの間の途中駅での停車や、他の列車の影響による低速運転などのない直行列車があると仮定した場合の所要時間を基準として損失を評価する。

所要時間による乗客 i の損失 l_{ti} 及び全体の損失 L_t を次式で定義する。

$$l_{ti} = \omega(\tilde{t}_i - t_i) \quad (1)$$

$$L_t = \sum_{i=1}^P l_{ti} \quad (2)$$

ただし

- P : 乗客の総数
- ω : 時間価値 (円/分)
- \tilde{t}_i : 乗客 i の直行列車に乗車した場合の所要時間 (分)
- t_i : 乗客 i の実際の所要時間 (分)

3.3 乗り換えによる損失

乗り換えは、乗り換え列車待ち時間や乗り場移動時間などの時間的損失だけでなく、階段昇降の負担や乗り換え列車での着席可能性に対する不安などを伴う。このため、乗り換えの時間的損失を評価する以外に、乗り換え回数自体を損失として評価する。

乗り換えによる乗客 i の損失 l_{ri} 及び全体の損失 L_r を次式で定義する。

$$l_{ri} = \omega \epsilon r_i \quad (3)$$

$$L_r = \sum_{i=1}^P l_{ri} \quad (4)$$

ただし

- P : 乗客の総数
- ω : 時間価値 (円/分)
- ϵ : 乗り換え障害時間換算係数 (回/分)
- r_i : 乗客 i の乗り換え回数 (回)

3.4 列車の混雑による損失

列車の混雑は乗客のストレスや疲労の原因となるため、これを損失として評価する。混雑度の評価は、混雑時に人間が感じる1分あたりの不効用を時間に換算する非線形の係数 [2] f_c を用いて行なう。 f_c の概形を図1に示す。

列車の混雑による乗客 i の損失 l_{ci} 及び全体の損失 L_c を次式で定義する。

$$l_{ci} = \omega \sum_{j=1}^{S_i-1} t_i^{j,j+1} f_c \left(\frac{p_i^{j,j+1}}{c_i^{j,j+1}} \right) \quad (5)$$

$$L_c = \sum_{i=1}^P l_{ci} \quad (6)$$

ただし

- P : 乗客の総数
- S_i : 乗客 i の経由する駅の総数
- ω : 時間価値 (円/分)
- $t_i^{j,j+1}$: 乗客 i の j 番目の経由駅と $j+1$ 番目の経由駅間の所要時間 (分)
- $p_i^{j,j+1}$: 乗客 i の j 番目の経由駅と $j+1$ 番目の経由駅間の列車の乗客数 (人)
- $c_i^{j,j+1}$: 乗客 i の j 番目の経由駅と $j+1$ 番目の経由駅間の列車の定員 (人)
- f_c : 混雑に対する人間の感覚を表す係数

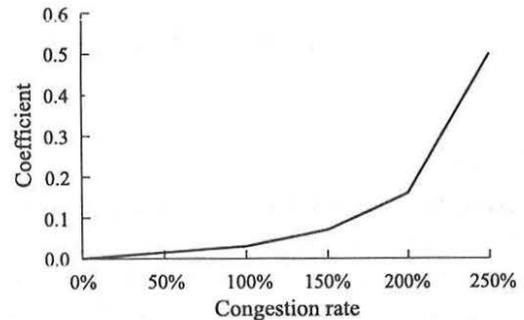


Fig. 1 Human feeling factor against congestion rate

3.5 ダイヤの評価値

最終的なダイヤの評価値 L は全乗客の損失の合計であり、

$$L = L_t + L_r + L_c \quad (7)$$

となる。この値が小さいほどよいダイヤであるということになる。

4 PERTによる列車運行シミュレーション

順序制約のある複数の作業の工程管理をグラフ理論を用いて行なう PERT (Program Evaluation and Review Technique) と呼ばれる手法を、列車の運行シミュレーションに応用した研究が発表されている [3]。筆者らはこの手法を用いて運転整理システムの研究を行なっている。本節では、PERT の概要とそれを用いた列車運行シミュレーションについて紹介する。

4.1 PERTとは

PERT とは、互いに依存しあう複数の作業の関係を重み付きリンクを持つ有向非循環グラフにより表現し、工程管理や日程計画などを行なう手法である。PERT では、グラフの各リンクは1つの作業を表し、リンクの重みはその作業に要する時間を示している。また、グラフのノードは作業の順序制約を表しており、あるノードから出ているリンクに対応する作業は、そのノードに入ってくるリンクに対応する作業がすべて終了してからでないと開始できないことを示している。

このような PERT ネットワークの例を図 2 に示す。図 2 において、リンクの傍らにある数字はリンクの重み、即ちそのリンクに対応する作業に要する時間である。また、ノードにある数字は、そのノードに入ってくるリンクの作業がすべて終了し、そのノードから出ているリンクの作業が開始できるようになるまでに要する最短時間である。

PERT ネットワークにおいて、各ノードの時間は、最初のノード（入ってくるリンクのないノード：このノードから出ているリンクに対応する作業を最初に行なうことになる）からそのノードに至る経路のうち、経路上のリンクの重みの合計（経路長）が最大になるもの（最長経路）の経路長となる。

本研究では、最長経路の探索には、一般的に知られているトポロジカルソートによるアルゴリズムを用いている [4]。

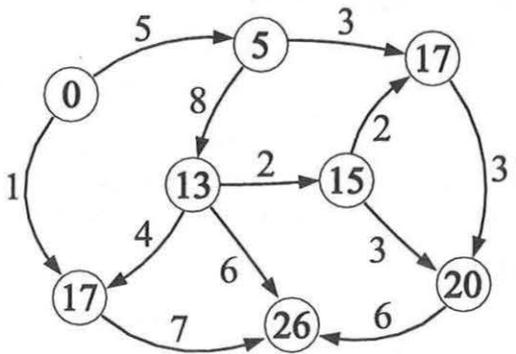


Fig. 2 An example of PERT network

4.2 列車運行シミュレーション

4.1 で述べた PERT は、駅間の基準運転時分や駅の基準停車時分などにに基づく簡単な列車運行シミュレーションに応用できる。列車運行シミュレーションでは、グラフのノードは列車の駅への到着・駅からの出発の事象を表す。また、リンクは各事象間の順序関係を表し、リンクの重みは事象間に要する時間間隔を表す。ここで用いるリンクには以下のようなものがある。

- 計画ダイヤ** 基準時刻を表すノードから、各列車の各駅の到着・出発ノードに張られるリンク。早着・早発を禁止する。重みは計画ダイヤでの到着・出発時刻と基準時刻との差。
- 基準運転時分** 各列車の各駅の出発ノードから次駅の到着ノードに張られるリンク。重みはその列車のその駅間の基準運転時分。
- 基準停車時分** 各列車の各駅の到着ノードから出発ノードに張られるリンク。重みはその列車のその駅での基準停車時分。
- 着発順序・時隔** 各列車の各駅の到着・出発ノードから次列車の到着・出発ノードに張られるリンク。その駅での列車の到着・出発の順序を表す。重みは到着・出発の時隔。
- 着発線使用時隔** 各列車の各駅での出発ノードから次にその列車と同一の着発線を使用する列車の到着ノードに張られるリンク。重みはその着発線を使用する際に必要な時隔。
- 閉そく** 各列車の各駅の到着ノードから N 本後の列車の前駅出発ノードに張られるリンク。ただし、 N はその駅と前駅間の閉そく区間数。駅間に同時に走行可能な列車数を制限する。重みは 0。

このようなグラフに対して最長経路探索を行なうことにより各ノードの時刻が得られ、列車運行のシミュレーションが行なえる。

列車運行シミュレーションのための PERT ネットワークの例を図 3 に示す。ただし、図 3 では、煩雑さを避けるため計画ダイヤを表すリンクは省いてある。また、図 3 は時間を横軸にとりダイヤ図のように表現してあるが、各ノードの時刻はこのグラフに最長経路探索を適用した結果として得られるものである。

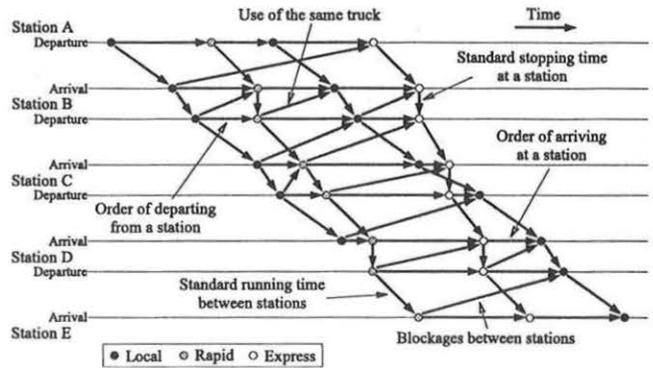


Fig. 3 An example of graph representing train operation constraint

4.3 運転整理時の列車運行シミュレーション

事故などにより列車の運行が乱れると、運転整理により列車の運転時間の調整や運行順序の変更などが行なわれる。そこで、運転整理案に基づいて再度列車運行シミュレーションを行なうことが必要となる。このため、運転整理の対象となる列車に対して、時隔調整や順序変更などの条件を表すように適宜ノード・リンクの張り直し、追加、削除などを行なう。修正した PERT ネットワークに対し最長経路探索を行なうことで、運転整理案に従った列車運行シミュレーションを行なうことができる。ここで、修正を行なったノードからリンクをたどって到達できないノードに対しては修正の影響が及ばないので、修正を行なったノードから到達できるノードに対してのみ再計算を行なえばよい。そのため、単純に再計算するよりも計算時間を短縮することができる。

5 乗客の乗車列車の決定

5.1 乗客行動仮定

3 で述べたダイヤの評価値を算出するためには、各乗客の乗車する列車を決定しなければならない。

本研究では、乗客の行動する時刻に関して以下の条件を仮定している。

乗客は出発駅に時間的にランダムに出現する

これは、都市部の通勤路線によく見られるあらかじめ時刻表を調べてこない乗客に相当する。時刻表を調べてくる乗客に対しては、「目的駅に到着すべき時刻がランダムに指定される」という条件が考えられるが、現段階では扱っていない。

乗客が列車を選択する際には、なるべく損失の少なくなるよう行動すると考えられる。そこで、本研究では列車の選択に対して以下の条件を仮定している。

乗客 i は所要時間による損失 l_{ti} と乗り換えによる損失 l_{ri} の合計が最小になるように乗車列車を選択する

列車の選択過程では、3で述べた3種類の損失のうち、列車の混雑による損失 l_{ci} を用いていない。これは、列車の混雑度は乗客の乗車する列車を決定した後でなければ算出できないため、これを乗車列車の選択に用いると均衡計算が必要となり計算量が増大するためである。

5.2 乗客行動シミュレーション

4.2ではグラフの最長経路探索により列車運行シミュレーションを行なう手法を紹介したが、ここでは、最短経路(あるノードから他のノードへ至る経路のうち経路長が最小となるもの)の探索により、乗客行動シミュレーションを行なう手法を紹介する。本研究では、最短経路の探索には、一般的に知られているアルゴリズムであるダイクストラ法を用いている[4]。

乗客行動シミュレーションで用いるグラフでは、ノードは列車の駅への到着・駅からの出発の事象を表す。また、リンクは各事象間の乗客の行動を表し、リンクの重みは事象間の行動に伴う乗客の損失を表す。ここで用いるリンクには以下のようなものがある。

駅間移動 各列車の各停車駅の出発ノードから次停車駅の到着ノードに張られるリンク。乗客がその列車に乗車して移動したことを表す。重みはその駅間移動時間による損失の金額換算値。

乗車継続 各列車の各停車駅の到着ノードから出発ノードに張られるリンク。その列車に乗車していた乗客がそのまま列車に乗車し続けることを表す。重みはその駅での停車時間による損失の金額換算値。

異種別列車間の乗り換え 各列車の乗り換え可能駅の到着ノードから乗り換え可能な異種別列車の出発ノードへ張られるリンク。ただし、各種別ごとに直後に来る1列車に対してのみリンクを張る。乗客がその駅で乗り換えたことを表す。重みは時間による損失と乗り換えによる損失の金額換算値の合計。

同種別列車間の乗り換え 各列車の終着駅の到着ノードから直後の同種別列車の出発ノードへ張られるリンク。終着駅より先に行く乗客が後続列車に乗り換えたことを表す。重みは時間による損失と乗り換えによる損失の金額換算値の合計。

計算量の縮減のためには無駄なリンクをできるだけ減らすことが重要である。終着駅以外での乗り換えは異種別列車間でしか起こらないとしてよいと考え、種別ごとに直後の1列車のみにリンクを張ることで計算量を減らしている。乗客行動シミュレーションのためのグラフの例を図4に示す。

このようなグラフに対して、ある始点ノードから到達可能な全到着ノードへの最短経路の探索を行なう。各駅の到着ノードのうち始点ノードからの経路長が最小となるノードを選択することにより、その始点ノードから各駅への乗車経路を決定できる。1つの出発駅と目的駅の組み合わせに対して、出発駅での出発時刻の異なる複数の乗車経路が存在する。5.1で述べた仮定「乗客は出発駅に時間的にランダムに出現する」に従い、各乗車経路に対してその経路と直前の経路との出発時間間隔に比例して駅間の乗客需要を配分することにより、各経路の乗客数を決定することができる。

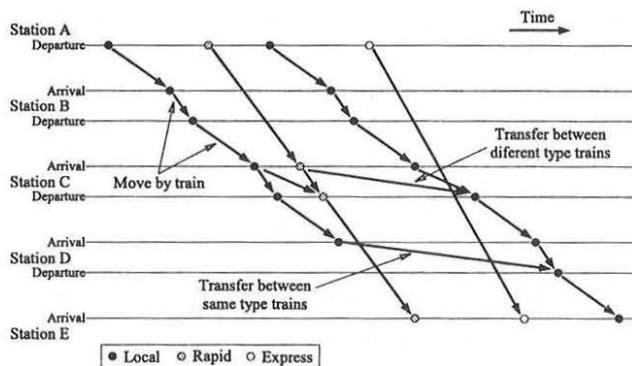


Fig. 4 An example of graph representing passenger's behavior

5.3 運転整理時の乗客行動シミュレーション

運転整理時には4.3で述べたのと同様にグラフを修正し、列車運行シミュレーションの結果に従って再度シミュレーションを行なう必要がある。列車運行シミュレーションと異なり、グラフの修正がない部分でも、列車運行シミュレーションの結果所要時間が変化すれば乗客の経路選択に影響が及ぶので、そうした変化の発生したノードから最探索を行なう必要がある。

6 おわりに

本稿では、乗客の立場から見たダイヤ評価の考え方と、グラフ理論を用いた列車運行シミュレーション、乗客行動シミュレーションの手法について紹介した。

グラフ理論を用いてシミュレーションを行なうことにより、時間順にイベントを処理していくような方式と比較して大幅に計算時間を削減することができ、リアルタイム性を確保できる。また、列車運行の制約条件や乗客の行動の可視化を行ないやすいため、対話型の運転整理支援システムを構築する際に有利である。

今後は、ネットワークを構成する路線に対応できるプログラムの開発や、新しい運転整理案自動生成アルゴリズムの検討を行なっていく予定である。

参考文献

- [1] 江口誠, 長崎祐作, 古関隆章: “グラフ理論を適用した運転整理支援システム”, 電気学会研究会資料, 交通・電気鉄道リアンドライブ合同研究会, TER-03-39, LD-03-64, Jul, 2003.
- [2] 美谷邦章, 家田仁, 畠中秀人: “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.
- [3] 安部恵介, 荒屋真二: “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, vol.27, no.1, pp.103-111, Jan. 1986.
- [4] 長崎祐作, 江口誠, 古関隆章: “鉄道運行計画におけるグラフ理論の適用—理論の基礎と運転整理問題への適用可能性”, 電気学会研究会資料, 交通・電気鉄道研究会, TER-03-23, pp.17-22, Jun. 2003.