

1622 利用者の視点から最適な運転整理案を 迅速に導出するアルゴリズムの開発

学[電] ○椎名 航一 (千葉工大)

正[電] 富井 規雄 (千葉工大)

An optimal train traffic rescheduling algorithm from passengers

Kouichi Shiina, Chiba Institute Of Technology
Norio Tomii, Chiba Institute Of Technology

We propose an algorithm to produce a train rescheduling plan which is optimal from passengers' viewpoints. We set dissatisfaction of all passengers in the whole railway network as a criterion and developed an algorithm which seeks for a rescheduling plan which minimizes passengers' dissatisfaction. The algorithm is a combination of simulation and optimization. The simulation part consists of a train traffic simulator and a passenger flow simulator which work in parallel. The train traffic simulator forecasts future train diagrams and the passenger flow simulator traces behaviour of all the passengers one by one and calculates how many passengers get on/off at each station. This information is given to the train traffic simulator. We estimate passengers' dissatisfaction from the results of the passenger flow simulation. In the optimization part, we use meta-heuristics. We will show the details of our algorithm together with numerical results using real world data.

Key Words: Train Rescheduling, Optimization, Simulated Annealing, Railway

1. はじめに

日本の鉄道は高い定時運行性で知られているが、時として、事故や災害などによって列車ダイヤに乱れが生じることがある。列車ダイヤの乱れを正常に戻すために、列車の運休、臨時列車の運行、番線の変更などの運行計画の変更が行われる。この一連の作業を運転整理と呼び⁽¹⁾、その時に作成される運行計画の変更計画を運転整理案と呼ぶ。

運転整理案作成に当たり、特に考慮すべきこととして、利用者の利便性と指令員の負担がある。

運転整理案によっては鉄道利用者にとって利便性が大きく損なわれる場合がある。例えば、運休による強制的な乗換え、遅れの伝播による待ち時間の増加などである。そのため運転整理を行う場合には、乱れた列車ダイヤを正常に戻すだけでなく、鉄道利用者の利便性を十分に考慮したものである必要がある。

また、列車ダイヤが乱れた場合、指令員にはダイヤの回復に向けて迅速・的確な判断が求められる。これは実際に動いている多数の列車を考慮しながらも、可能な限り影響を抑えて行かなければならないためである。その一方で、ダイヤ変更は列車運行に重大な影響を及ぼす指令業務であり、重い責任を伴う。こうした現状に対して指令員の意思決定支援を目的とした様々な運転整理案の自動作成アルゴリズムが提案されている⁽²⁾。これらの支援を目的とした運転整理案の自動作成アルゴリズムでは指令員に向けた数値的・定量的な評価、緊急性に対応した迅速な求解が求められている。

利用者の視点からの評価を行った研究に、鉄道ネットワーク全体を対象として、利用者の不満を最小にする接続案を求めるアルゴリズムの考案を行ったものがある⁽³⁾。この研究では、シミュレーションと最適化を組み合わせたアルゴリズムを採用している。列車運行シミュレーションと旅客流動シミュレーションを平行に動作させることによって各利用者の不効用を求め、それをもとにシミュレティッド・アニーリングによって利用者の不効用を最小にする接続案を求めることを目的としている。また、運転整

理対象の組み合わせの中から旅客への影響力を事前に予測することで、探索対象の絞込みを行うことにより迅速な導出を可能としている。しかし、考慮されている運転整理手法が接続決定のみであり、中規模な乱れに対して用いられる運休、番線変更、順序変更等の運転整理手法には対応していないといった問題が残っている。

そこで、本研究では、中規模の乱れを対象として、運休、番線変更、順序変更等の運転整理手法に対応し、利用者の視点から最適な運転整理案を導出するための運転整理アルゴリズムの開発を行うことを目的とする。本論文では、その前段階として、運転整理手法の鉄道ネットワークへの対応と大域的な改良解を迅速に導出するための手法について述べる。

2. 本アルゴリズムの概要

2.1 目的

列車ダイヤが乱れた場合、ダイヤを正常に戻すために順序変更や運休、車両運用を考えた取り込み特発など様々な運転整理手法がある。本研究では、中規模乱れが生じた場合に利用者の不効用を改善させるための運転整理手法として順序変更、番線変更、運休、接続の適用を可能なネットワークの改良と効率的な適用手法の提案を行う。

2.2 アルゴリズムの全体構成

本研究では最適解導出のために模擬焼きなまし法の考え方をを用いる。模擬焼きなまし法とは複雑な組み合わせ最適化問題に対して、近似最適解の探索に有効な手法のひとつである。特徴は評価値が改善される解を採択することに加えて、ある制限の元で評価値が悪化する解も採択することである。初期段階では、評価値が悪化する解を採択する確率が大きい。探索処理が進むに従って、より悪化度の小さい解だけが採択されるようになり、最終的によい解だけが採択される⁽⁴⁾。

上記考え方をを用いたアルゴリズムの全体構成は図1のようになる。初期遅延を適用させたダイヤに対して、改善が見込まれる運転整理手法の適用を行い、作成された運転整理案に対して列車運行・旅客流動シミュレーションを行

い評価を行う。得られた評価値が既存の解と比較して改善されていれば最適解の更新とダイヤの更新を行い、改善されていなければ試行回数に応じた確率によりダイヤの更新のみを行う。更新されたダイヤに対して繰り返し運転整理手法を試みることで、組み合わせの中から利用者の視点を考慮した最適解の導出を行う。

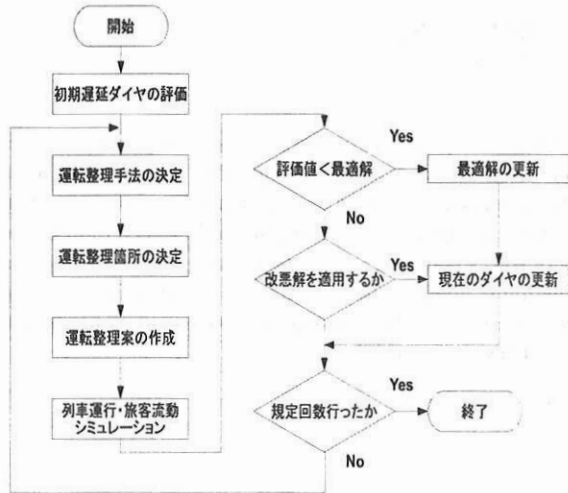


図1 アルゴリズムの全体構成

3. 運転整理手法の適用

図1中の「運転整理手法の決定」では現在の解(ダイヤ)に対してどの運転整理手法を適用するかを決定する。ここで適用する運転整理手法を自由に選択することにより様々な運転整理手法の組み合わせを検討することが可能となる。

また、「運転整理箇所の決定」「運転整理案の作成」では選択された運転整理手法によるダイヤ変更を行う。以下にこれらの運転整理手法の実装アルゴリズムの全体構成とそれぞれの手法における高速化のための手法について記述する。

3.1 順序変更

3.1.1 概要

鉄道運行では様々な信号制約や物理的な制約といったものがある。PERTネットワーク上で順序変更を行った場合、変更後のダイヤもこれらの制約を守ったものである必要がある。

PERTネットワークにおいて変更後のダイヤに制約を適用するための方法の一つにネットワークの作り直しがある。これは修正後の時刻情報を元に制約を設定し直すためネットワーク全体を見た修正を行うことが出来る。しかし、ネットワークが大きい場合には制約の再設定に時間がかかってしまうため実用的でないという問題がある。

そこで本研究では順序変更による影響を予測し、変更範囲を特定することにより部分的な順序変更を可能とした。また、順序変更による番線競合の問題は範囲特定の際に前後の列車との関係を見ることでそのような順序変更を行わない対策を行った。アルゴリズムの全体構成は図2となる。

3.1.2 順序変更対象列車の決定

本研究では順序変更することにより先行列車の遅延の影響を受けていた列車が早く出発できる場合は順序変更が有効であるとした。上記条件は順序変更可能駅で以下の条件を満たす行路を持つ列車を対象としている。なお、 $RealTime$ は実績時刻、 $PlanTime$ は計画時刻、 st は停車駅、 $st+1$ は対象列車の次の停車駅を表している。

$$(RealTime_{st+1} - PlanTime_{st+1}) -$$

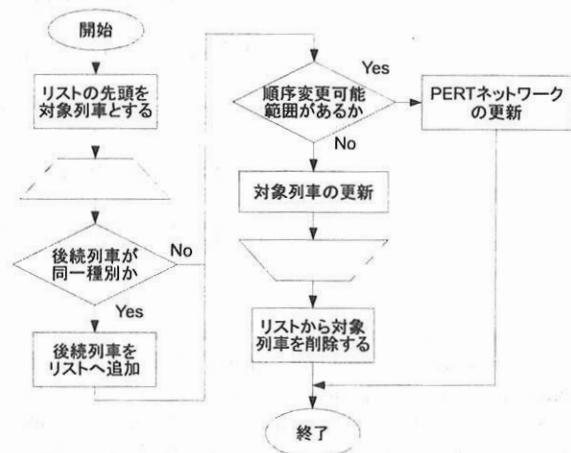


図2 順序変更処理の全体構成

$$(RealTime_{st} - PlanTime_{st}) < k, \\ RealTime_{st} = PlanTime_{st} \quad (1)$$

また、上記条件以外で順序変更を行うべき列車も存在する。例をあげると図3ではx1が遅延し、後続列車に遅れが伝播したダイヤである。上記条件によりx1は順序変更対象となるが、y1を先に走行させるためにx1とx2のそれぞれで順序変更を行う必要がある。そこで、順序変更対象列車の途中に同一種別の列車があった場合、後続の列車を順序変更対象リストへの追加を行うようにした。これにより手順1~3のように複数列車をまたぐ順序変更を可能とした。

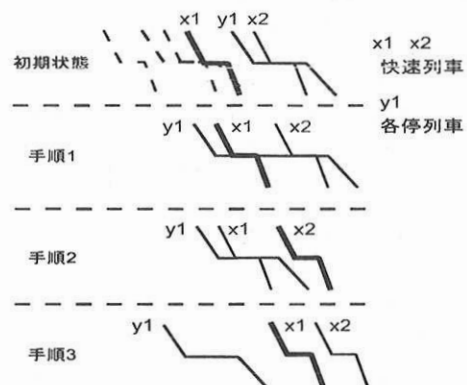


図3 順序変更対象列車の追加例

3.1.3 変更範囲の決定

3.1.2節の条件により求めた順序変更対象列車の始発駅から終着駅に向けて順次順序変更可能範囲があるかの判定を行っていく。順序変更範囲が一駅以上あった場合は該当列車についてPERTネットワークの変更を行う。この範囲決定では、対象ノードから一つずつ次の時刻のノードを見ていき順序変更可能な駅(追い越しを行った列車の順序を戻すため)か、終着駅まで到達した場合(順序を戻す必要がない場合)を順序変更範囲としている。

3.2 番線変更

番線変更を行った場合、本来番線変更された列車に乗車する予定だった旅客には情報を再確認し、移動するといった手間が生じる。そのため、順序変更に必要な最低限の番線変更のみを行うようにすることで旅客にかかる迷惑を可能な限り少なくすることが望まれる。

そこで本研究では番線変更を含まない順序変更処理を優先して行うことで、必要のない番線変更を行わないようにした。具体的には3.1.2節の問題を解決するために順序変更対象列車はスタックリストに追加し、終着駅までの処理が完了後キューリストに同一列車を登録する。また、番線変更を考慮した順序変更処理中に対象列車の追加が合った場合はスタックリストに登録することで番線変更の施行回数を減らしている。処理の流れを示したものを図4に示す。

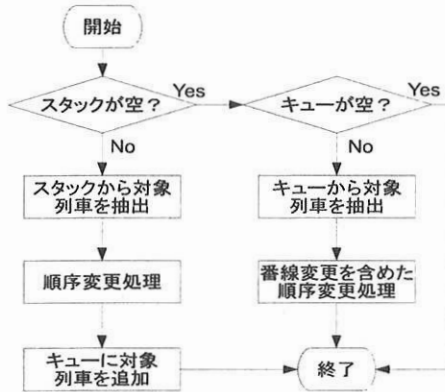


図4 番線変更の優先順位付け

3.3 運休

運休はある列車の運行予定であった区間において、該当列車の運行を取りやめる運転整理手法である。本研究では運休の中で山切りと呼ばれるある列車の運休区間の終わりを、その列車の折返し先に揃える手法を取り扱う。

山切りを行った場合、ダイヤが長期間にわたって改善されるため多くの利用者にとって有益となる。しかし、運休区間を目的地、あるいは乗車駅としていた旅客は乗換えや待機時間の増加といった少なくない迷惑を被ることになる。そこで本研究では旅客流動シミュレーションにより得られた利用者の利用経路から運休を行った場合の不効用の増加を予測することで改善が期待できる運休区間のみを対象とした運転整理を行っている。アルゴリズムの全体構成は図5となる。

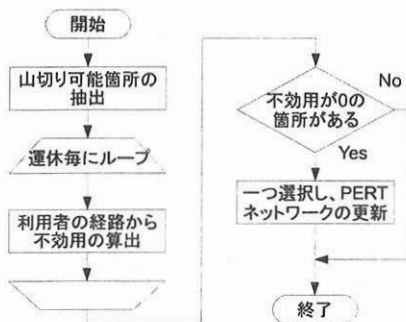


図5 運休処理の全体構成

3.4 接続決定

急行列車と緩行列車、分岐駅における本線列車と支線列車など停車駅の異なる列車同士が同時期に駅に停車することで利用者の乗り継ぎを便利にする接続という考え方がある。接続を確保する場合、乗継客の利便性は確保されるが、接続先列車には遅延が生じ、接続先列車のみの利用者には不便になる。逆に、接続を解除した場合には、乗継客にとって不便になる。そこで本研究では、接続の確保、あるいは解除することによる利用者への影響を事前に予測す

ることで利用者にとって利便性の高い接続を効率的に検証可能とした。運転整理箇所決定には以下の式を用いている。なお、 Y_{eval} は旅客群 Y の接続変更前の不効用値の総和。 Y_{wait} は旅客群 Y が接続を行わなかった場合に次の列車に乗車するまでの待ち時間の総和。 X_{eval} は旅客群 X の接続変更前の不効用値の総和。 X_{wait} は旅客群 X が接続を行なった場合に増加する停車時間の総和を表している。

$$effect = (Y_{eval} + Y_{wait}) - (X_{eval} + X_{wait}) \quad (2)$$

停車時間だけではなく不効用値を計算式に入れることにより不効用値の高い、つまり移動距離の長い旅客を考慮することが可能となる。

4. 利用者の視点からの運転整理案評価

4.1 利用者の視点からの運転整理案評価のための旅客流動シミュレーション

利用者の視点から運転整理案を評価するためには、与えられた運転整理案に対して、利用者の視点からの評価値を算出することが必要となる。そこで本研究では利用者の視点からの評価値として利用者の不満足を数値化した不効用値を用いる。不効用値は、乗車時間、発駅での待ち時間、乗換駅での待ち時間、乗換回数、混雑度から求められる⁽⁵⁾。

運転整理案評価のためのシミュレータ概要は図6の通りとなる。OD データと列車ダイヤを入力とし、それに対して個々の利用者が取るであろう経路(列車の乗継)を推定して、個々の利用者の不効用を算出し、運転整理案の評価とする。経路の推定では、利用者が自らの不効用が最小となる経路をとるという前提のもとに、列車ダイヤのある種の有向グラフ(旅客流動ネットワーク)で表現し、それに対して目的駅までの経路を Dijkstra 法を用いることによって最短経路探索をすることによって推定する⁽³⁾。

また、利用者の行動決定には図6中にある「案内ダイヤ」という概念を用いる。これは、計画ダイヤや運転整理案と同じとは限らない。また、その時の状況の変化に応じて、逐次入れ替える、あるいは一部を修正することも可能である。事故が発生する前のタイミングで行動を決定する際には、計画ダイヤを案内ダイヤとする。これによって、事故が発生する前に利用者が事故を予見した行動をとることを防止することが可能になる。また、案内ダイヤを運転整理案そのものとすれば、将来にわたる運転整理案に関する情報が利用者に渡った状況を表現できるなど、案内ダイヤをシミュレーションの目的に応じた適切なものに随時入れ替えることによって、利用者への案内情報の内容や案内タイミングの検証を行うことも可能になる。

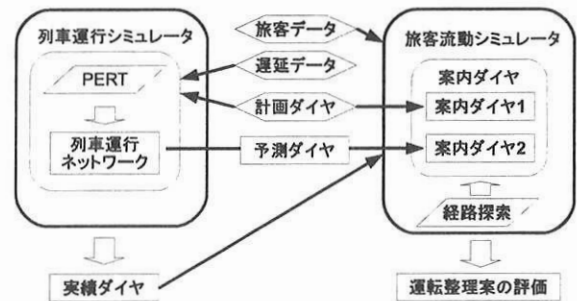


図6 シミュレーション概要

4.2 PERTに基づく列車運行シミュレーション

列車に遅延が生じた場合や、ダイヤ変更を行った場合、それらは将来の列車運行に影響を与えることになる。そのため、ネットワーク全体を考慮した運転整理を行うために

は、それらの影響を反映した列車運行の予測が必要になる。本研究では、高速な列車運行シミュレーションを実現するため、PERT (Program Evaluation and Review Technique) に基づく手法を採用する⁽¹⁾。

5. 実験

本研究で提案した効率的な運転整理手法の適用アルゴリズムの有効性を検証するために仮想的なデータを用いて実験を行った。測定項目には実行時間と旅客への影響を考慮した対象の選定を行った結果による改善解導出までの回数について示す。また、結果については選定を行った運休のみを適用した結果、順序変更・番線変更のみを適用した結果、今回提案した手法を組み合わせた結果について示す。

5.1 実験環境

ダイヤは図7に示した直通列車を含む複数路線を対象とした路線データ(駅数105, 列車本数128)を用いた。旅客は出発駅、目的駅をランダムに決めた仮想的なデータ(1200人分)を用いた。出現時刻は利用者は計画ダイヤに沿った時刻に出現すると想定し、出現時刻を一度ランダムに作成した後、作成した出現時刻から最初に乗車する列車の出発時刻の2~5分前とした。中規模乱れを想定するために、ある列車がある駅で復旧見込み時間が30分の障害が発生したと想定し、シミュレーションを行った。また、評価関数には旅客全体の不効用値の平均を用いた。

なお、測定を行ったPCのスペックは次の通りである。
OS: Windows7 64bit, CPU: Intel(R)Core(TM)i7-2600 @3.40GHz, メモリ: 12.0GB

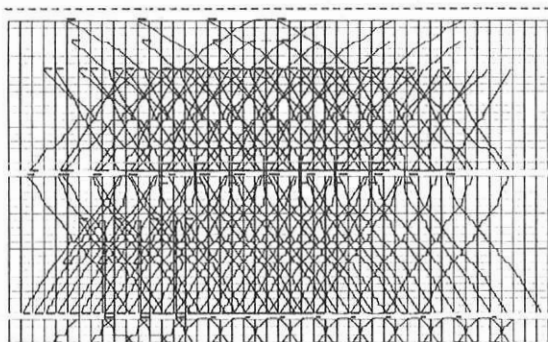


図7 対象線区

5.2 結果

運休のみを適用した結果、評価値の推移は図8のようになった。図8では4回目や15回目で大きな改善がされている点や、10回目以降改善解も認めることで12回目の変更で最適解にたどり着いていることがわかる。また、20回の運休変更パターンの列挙と適用にかかった時間は7738ミリ秒であった。

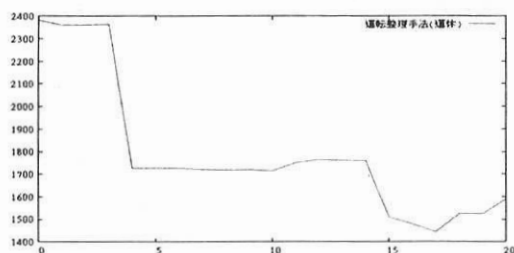


図8 推移結果(運休)

順序変更・番線変更のみを適用した結果、評価値の推移は図9のようになった。こちらも運休処理を適用した場合と同様に大きな改善案の採用と改善解を認めることによる解の多様性を得ることが出来ていることがわかる。また、実行時間は42回の順序変更・番線変更処理を行って14455ミリ秒であった。

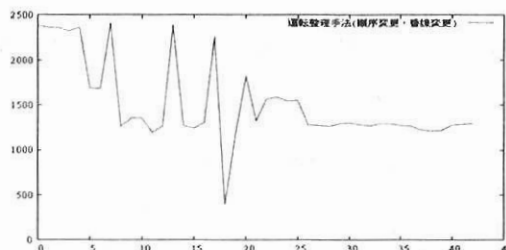


図9 推移結果(順序変更・番線変更)

最後にそれぞれの運転整理手法を順次連続して行った結果、評価値の推移は図10のようになった。検討された運転整理手法は順番に運休が4回、順序変更・番線変更が41回、接続の検討が10回であった。図9と比較すると最適解の評価値がさらに低くなっていることがわかる。また、実行時間は18640ミリ秒であった。

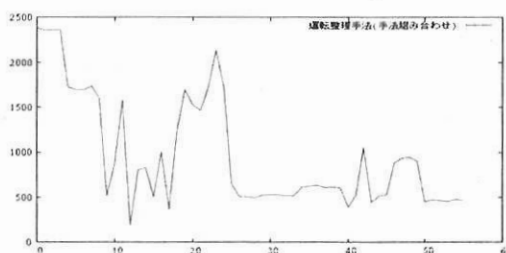


図10 推移結果(手法組み合わせ)

6. おわりに

実験結果を通して本研究で提案した各運転整理手法の適用方法と大域的な探索における実行速度が十分実用的であることを示した。現状の課題として運転整理手法を組み合わせの場合、現在は一定の順番で行っているため組み合わせの検討が十分に出来ているとは言えないという問題がある。そこで今後の方針として、図1の「運転整理手法の決定方法」についてさらなる検討を行うことで旅客への利便性の高いダイヤの効率的な導出を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所 運転システム研究室 (2005), 「鉄道のスケジューリングアルゴリズム」, NTS
- 2) 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門員委員会 (2010), 「鉄道ダイヤ回復の技術7章」, Ohmsha 社, 2010
- 3) 椎名航一, 「複数線区を含む旅客流動を加味した列車運行シミュレータによる接続決定アルゴリズムの考案」, 第17回鉄道技術連合シンポジウム JRail-2010, 2010
- 4) Sait, S.M., Youssef, H. 著, 白石洋一訳, 「組合せ最適化アルゴリズムの最新手法—基礎から工学応用まで—」, 丸善株式会社, 2003.
- 5) 運輸政策研究機構, 「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005」, 2005