

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

椎名 航一* (千葉工業大学), 富井 規雄 (千葉工業大学)

An Optimal Delay Management Algorithm using Passenger Flow and Train Traffic Simulators
for Whole Railway Network

Kouichi Shiina* (Chiba Institute Of Technology), Norio Tomii (Chiba Institute Of Technology)

Abstract

When a small delay occurs in railways, dispatchers have to make a decision whether they maintain a connection or give it up. This decision is called delay management. Delay management has to be done considering the whole railway network because a change of one connection might give an influence to the whole railway network. We introduce a delay management algorithm which gives a near optimal delay management plan from passengers' viewpoint considering the whole railway network. This algorithm is a combination of an optimization part and a simulation part. The simulation part consists of train traffic simulator and passengers flow simulator. These two simulators work in parallel to forecast the future train traffic and estimate passengers' disutility, which is used as a criterion of optimality. In the optimization part, we use the tabu search to search for a delay management plan which makes passengers' disutility minimum. We are confirming the effectiveness of our algorithm using actual train diagram data. In this paper, we discuss a technique to make the algorithm more efficient.

キーワード: 運転整理, 接続判断, 最適化, タブーサーチ, 鉄道
(train rescheduling, delay management, optimization, taboo search, railway)

1. はじめに

列車ダイヤにおいて、急行列車と緩行列車の接続、分岐駅における本線列車と支線列車の接続などが考慮されていることがある。その場合、接続の元となる列車（接続元列車）が一定分以上遅延した場合には、接続先の列車（接続先列車）を待たせて接続をとるか（接続を確保すると言う）、あるいは、接続元列車の到着を待たずに接続先列車を発車させるか（接続を解除すると言う）の決断（接続判断）を行わなければならない。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。接続判断は、遅延の規模や利用者の数などを考慮して行われる。ただし、ここで、接続を確保する場合には、接続先列車の遅延がさらに先の駅での接続に影響する場合もあること、また折返し列車に遅延が生じ、それ以降の列車の接続にも影響する場合があることなどに留意しなければならない。すなわち、接続判断は、あるひとつの列車・ひとつの駅だけを考慮して行えばよいのではなく、鉄道ネットワーク全体を考慮して行わなければならない。

接続判断は、ヨーロッパでは、delay management と呼ばれ、そのアルゴリズムについては、遅延を評価尺度とした研究事例がある⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、接続判断においては、総遅延時間を最小とすることには本来意味はなく、利用者の

数や流れを考慮した利用者の視点からの評価としなければならない。

筆者らは、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ような接続案を求めるアルゴリズムについての研究を行っている⁽³⁾⁽⁴⁾。これらのアルゴリズムは、シミュレーションと最適化を組み合わせたものである。すなわち、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並行に動作させることによって各利用者の不効用を求め、それをもとにタブーサーチ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。

これらのアルゴリズムは、タブーサーチにおいて、変更対象とする箇所を乱数を用いて選択している。そのため、利用者の数や不効用とは無関係に変更対象箇所を選定している。その結果、最適解が効率よく求められていない可能性があると考えられる。そこで、筆者らは接続判断箇所を決定する際に、接続を行うことで影響を受ける旅客の影響度を考慮し、影響度が高い箇所を優先して接続判断を行う手法を考案し、現在、既存手法との比較、効果の検討を行っている。

2. 利用者の視点からの運転整理案評価

〈2・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 利用者の視点から接続判断を評価するためには、与えられた接続案に対して、利用者の視点からの評価値を出力することが必要である。本節では、個々の

利用者がどのような列車を乗り継いで移動するのかを推定し、利用した経路から個々の利用者の不効用（不効用）を推定するためのシミュレータ（旅客流動シミュレータ）の概要について述べる。

(1) 目的

本シミュレータは、OD データと運転整理案を入力とし、それに対して個々の利用者がとるであろう経路（列車の乗継）を推定して、個々の利用者の不効用を算出することを目的とする。

(2) 基本的考え方

- 運転整理案と OD データに基づいて、利用者がとるであろう経路を推定する。経路探索は、運転整理案に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最短経路を探索することによって行う⁽⁴⁾。
- 経路の探索にあたっては、利用者は自らの不効用が最小になる経路をとるという前提のもとに経路を探索する。
- 不効用の値は、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、混雑度から求める⁽⁵⁾。
- 本研究で設定した利用者の行動モデルを図1に示す。このモデルでは、列車に乗車した後も、経路変更が可能なあらゆるタイミング（具体的には、列車が駅に停車した時）に経路探索をあらためて行うこととしている。これにより、例えば、最初に決めた経路に沿って移動している途中に、状況が変化（乗ろうと思っていた列車が遅延したなど）した場合でも、それに追従して動的に経路を変更することが可能になる。

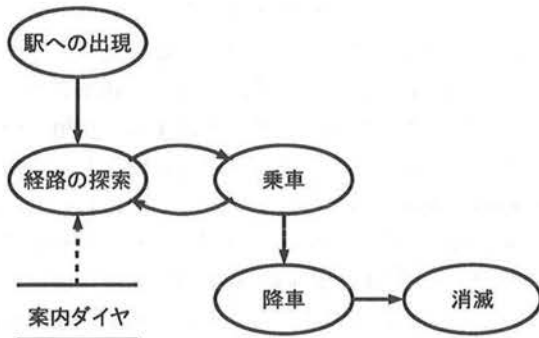


図1 利用者行動モデル

- 図1中の「案内ダイヤ」は、利用者が経路を決めるために参照するダイヤのことを言う。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。

〈2・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り、接続を変更したりした場合、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、ネットワーク全体に対する接続判断を行うためには、それらの影響を反映した列車運行の予測が必要になる（列車運行シミュレーションと呼ぶ）。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⁽⁶⁾。

〈2・3〉 旅客流動シミュレーションと列車運行シミュレーションの並行動作 列車運行と利用者行動の動的なインタラクションの考慮と、利用者が移動途中で状況の変化に応じて行動を変更することの推定を可能とするためには、旅客流動シミュレーションと列車運行シミュレーションを並行に動作させ、それぞれが互いの途中経過等の情報を参照できるようにしなければならない。そこで本稿では、文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾の手法に基づいて、図2のようにして並行動作を実現する。

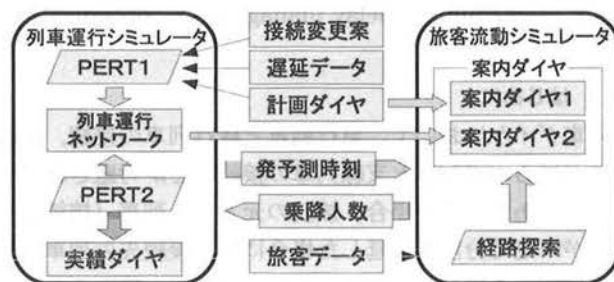


図2 旅客流動シミュレータと列車運行シミュレータの並行動作

最長経路の計算過程において、当該ノードが発ノードである場合、乗降人数によっては、発が遅延する可能性があるため、旅客流動シミュレータによってその列車への乗降人数を求め、その人数の利用者が乗降するのに必要な停車時間を求める。詳細は、文献⁽⁴⁾を参照していただきたい。

〈2・4〉 単線・複線を含む複数線区に対応したシミュレータ 単線を考慮した列車運行シミュレータを作成する場合には、単線区間における行き違い制約を考える必要がある。行き違い制約とは、単線区間内では方向の異なる列車は行き違い設備のある箇所では行き違いができないというものがある。この制約をシミュレータ内で表現するために、単線区間の線路の使用順序を規定するアークを新たにもうけた。これにより、単線区間の駅間での列車の行き違いの発生しないシミュレーション結果を得ることができる（図3）。

3. 既存研究で提案された接続判断アルゴリズム

〈3・1〉 基本的考え方 既存研究⁽⁴⁾では、ネットワーク全体を考慮した接続判断を実現するために、接続判断問題をある種の組合せ最適化問題として扱った。具体的には、2節のシミュレータで算出された個々の利用者の不効用を用

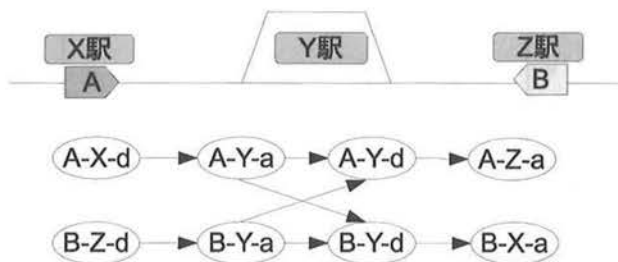


図 3 単線区間の制約表現

いて算出される評価値を最小とするように、接続の解除と設定を決定する問題と考える。そのためのアルゴリズムの全体構成を図 4 に示す。このアルゴリズムは、前述の組合せ最適化問題を解くために、メタヒューリスティクスの 1 種であるタブーサーチ⁽⁹⁾を用いている。

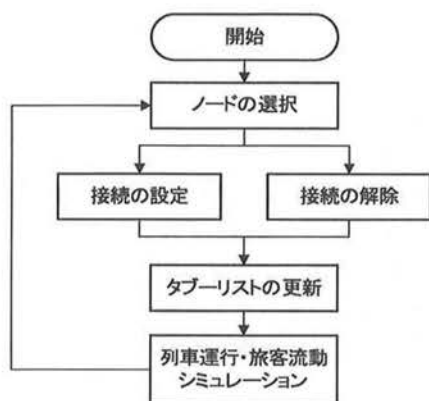


図 4 既存研究の接続判断アルゴリズムの全体構成

〈3・2〉 接続判断アルゴリズムの詳細 図 4 に従って、接続判断アルゴリズムの詳細を説明する。

〔ノードの選択〕ランダムにノードを選択する (vx とする) 〔接続の設定〕ノード vx が接続をとっておらず、かつ、同一駅で実績時刻の差が α 分以内のノードが存在する時 (vy とする)、ノード vx, vy の間に接続アークを設定する。ただし、タブーリストの中に、ノード vx, vy の間に接続を解除したという情報がある場合には、接続アークを設定しない。

〔接続の解除〕ノード vx がノード vy との間で接続をとっており、かつ、当該ノードが β 分以上の遅延となっている時、接続アークを削除する。ただし、タブーリストの中に、ノード vx, vy の間に接続を設定したという情報がある場合には、接続を解除しない。

〔タブーリストの更新〕ノード vx, vy をタブーリストに登録する。

〔列車運行・旅客流動シミュレーション〕列車運行・旅客流動シミュレーションを行なって、変更された接続案のもとでの列車ダイヤを更新するとともに、評価値を算出する。

4. 評価関数についての考え方

既存研究⁽⁴⁾では、旅行距離に応じた公平感を達成するた

めの方策として、不効用の平均とその標準偏差を用いることを提案している。その理由は、移動距離が長い旅客は必然的に不効用の値そのものが大きくなり、単純な不効用の総和では、短距離を移動する旅客との間で不公平感が生じるためである。一方、生理学では、人間の刺激に対する感覚は、刺激の対数に比例することが知られている (Weber-Fechner の法則)。そこで、筆者らは不効用値の対数の総和を評価関数とすることで距離の相違に起因する不公平感を除去できるかどうかについて検討を行っている。

5. 本稿で提案する接続判断アルゴリズム

〈5・1〉 既存研究のアルゴリズムとの相違点 6 節で結果を示すが、既存研究のアルゴリズムでは最適解が効率よく得られない場合がある。原因として、〈3・2〉節で説明したとおり、接続変更の対象とするノードをランダムに選択していることが挙げられる。接続変更の対象とするノードをランダムに選択しているため、選択したノードによっては解が良くなり、最適解が得られるまでの繰り返し処理回数が増える場合がある。そこで、本稿では接続設定の対象とするノードを選択する際に、選択対象となるノードを絞り込むことによって、余分な探索を減らすことで最適解を効率よく得られる手法を提案する。具体的には、接続により影響の出る旅客の影響度を計算し、その計算結果を元に、選択対象となるノードを絞り込み接続判断を行う。上記手法を取り込んだアルゴリズムの全体構成を図 5 に示す。

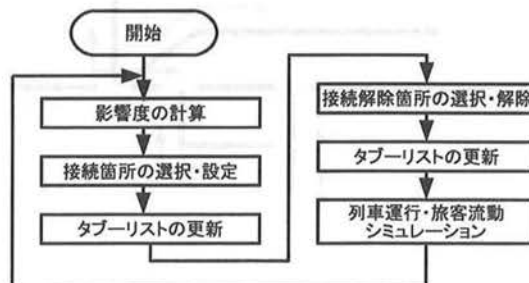


図 5 本研究の接続判断アルゴリズムの全体構成

〈5・2〉 影響度の計算 接続が取られていない駅で、ある列車 (列車 A とする) と 1 本前の接続可能な列車 (列車 B とする) とで接続を行った場合、列車 B に乗車している旅客 (旅客 X とする) は接続待ちをする分、待機時間が増加する。また、列車 A から列車 B と同じ路線へ乗り換えを行う旅客 (旅客 Y とする) は列車 A が駅に到着した後、待たずに乗り換えを行うことが出来る。

本稿では、上記特徴から以下に示す式を用いることで接続を行った場合の影響度の算出を行う。

$$\text{影響度} = (Y_{\text{wait}} + \log(Y_{\text{eval}})) - (X_{\text{wait}} + \log(X_{\text{eval}}))$$

Y_{wait} : 旅客 Y の平均待ち時間

Y_{eval} : 旅客 Y の平均不効用

X_{wait} : 旅客 X の平均待ち時間

X_{eval} : 旅客 X の平均不効用

〈5・3〉 接続箇所を選択・設定 接続設定箇所は以下の手順で選択・設定を行う。

- 〈5・2〉で示した式で接続を取っていない全ての接続可能箇所の影響度を計算する
- 接続可能箇所の内、影響度の高い上位 k 箇所を抽出する
- 抽出した接続箇所からランダムに一つ選択し、該当ノード間に接続アークを設定する。ただし、タブーリストに登録されている場合は接続の設定を行わない

〈5・4〉 接続解除箇所の選択・解除 接続解除箇所は以下の手順で選択・解除を行う。

- 既存の接続箇所からランダムに 1 つの接続箇所を選択する
- 選択した接続箇所の接続先ノードのシミュレーションで求めた実績時刻より接続元の計画時刻が早い時、接続アークを削除する。ただし、タブーリストに登録されている場合は接続の解除を行わない

6. 実験と結果

実験では、図 6 のような単線・複線を含む複数線区を想定した仮想路線データ (駅数 81, 列車本数 190), および仮想 OD データを用いた。また、タブーサーチ回数を 100 回, k を 10, タブーリスト長を 7 とする。図 7 は、既存研究の接続判断アルゴリズムを適用した場合、図 8 は本稿で提案した接続判断アルゴリズムを適用した場合の探索回数と最小評価値を折れ線グラフで表したものである。

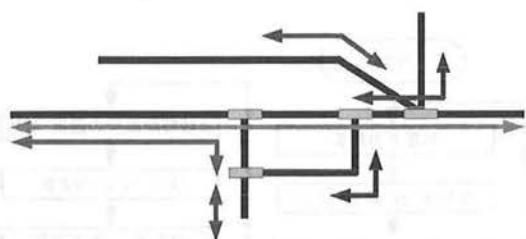


図 6 単線・複線を含む仮想対象線区

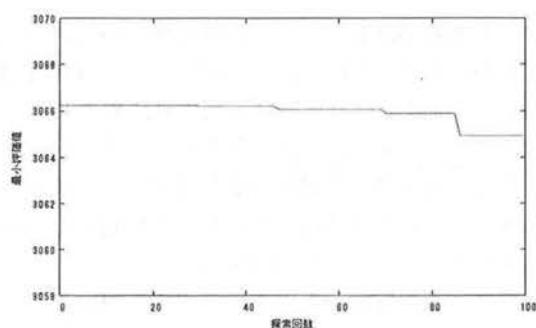


図 7 既存研究のアルゴリズムの探索過程

図 7 に示すように既存研究の接続判断アルゴリズムでは解が 100 回探索を行ってもほとんど初期解と変わらない場合がある。しかし、図 8 に示すように筆者らが提案したア

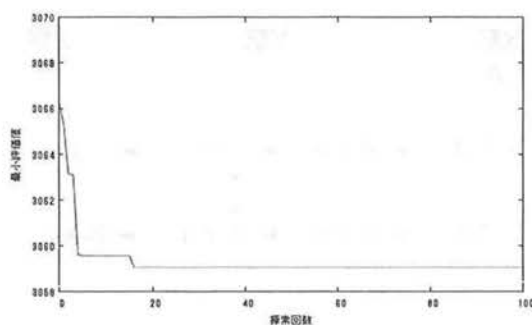


図 8 新アルゴリズムの探索過程

ルゴリズムでは探索の早い段階で解が改善され、100 回探索時まで一定となっている。このことから、解が改良される接続案が効率よく選択されていることがわかる。

7. おわりに

単線・複線を含む複数線区対応のシミュレータの構築、接続元となるノードの選択時に接続による影響度を考慮することで効率よく解を求めることの出来る接続判断アルゴリズムの提案を行った。

今後の課題として以下があげられる。

- 複数線区対応によって増大した旅客の経路探索の高速化
- 実データを用いて本稿のアルゴリズムの有効性の確認
- 旅客行動を考慮せず遅延時間の大きさのみによって接続判断を行なう場合との比較

なお、本研究は、科研費 21510156 の助成を受けている。

文 献

- (1) Cicerone, S., D'Angelo, G., Di Stefano, G., Frigioni, D., Navarra, A.: On the Interaction between Robust Timetable Planning and Delay Management, *2nd Annual International Conference on Combinatorial Optimization and Applications (COCO'08)*, St. John's, Newfoundland, Canada, August, 2008.
- (2) Schobel A.: Integer programming approaches for solving the delay management problem, *Algorithmic Methods for Railway Optimization, LNCS4359*, Springer, 2007.
- (3) 原田真吾, 富井規雄: 「鉄道ネットワーク全体を考慮した最適接続判断アルゴリズム」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料 TER-09-42, 2009 年 7 月.
- (4) 金井里司, 富井規雄: 「鉄道ネットワーク全体を考慮した最適接続決定アルゴリズムとその評価」, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2009, 2009.
- (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
- (6) (財) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室: 「鉄道のスケジューリングアルゴリズム—コンピュータで運行計画をつくる—」, NTS 出版, 2005.
- (7) 武内陽子, 富井規雄: 「旅客の不効用値を元にした列車の接続判断のケーススタディ」日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, Vol.2005, pp.66-67, 2005.
- (8) TAKEUCHI Yoko, HIRAI Chikara, TOMII Norio: Robustness Indices based on Passengers' Utilities, *WCRR 2006 World Congress on Railway Research*, Montreal, June 2006.
- (9) 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—」第 4 章 タブー・サーチ手法 (TS), 丸善株式会社, 2003.