

2401 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

学〔電〕○金井里司（千葉工大） 正〔電〕富井規雄（千葉工大）

Evaluation of Optimal Delay Management Algorithm considering whole Railway Network

Satoshi KANAI Norio TOMII

Chiba Institute of Technology 2-17-1 Tsudanuma Narashino, Chiba 275-0016 Japan

A delay management algorithm considering the whole railway network is presented. This algorithm gives an optimal delay management plan meaning which connection must be maintained and which connection must be abandoned once a small delay occurs. As the criteria of optimality, passengers' disutility is used. In order to estimate passengers' disutility, we have introduced a simulator which actually is a combination of a train traffic simulator and a passenger flow simulator which work in parallel. We are confirming the effectiveness of our algorithm using actual train diagram data. In this paper, we discuss several criteria for the delay management considering passengers' disutility.

Keywords: 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）が一定時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なわれる。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な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な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]。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。

利用者の視点を考慮した接続判断に関する既存研究としては、文献[2][3]がある。筆者らは、文献[2][3]を発展させ、利用者の視点からの評価値を旅客流動シミュレーションによって算出し、タブーサーチによってその評価値を最小にする鉄道ネットワーク全体で最適な接続判断を行なうアルゴリズムについての研究を行っている[4]。

文献[4]では、各利用者について不効用を算出し、そ

の総和が最小になる接続案を求めることを目的とするアルゴリズムを導入した。しかし、単に利用者の不効用の総和が最小であるだけでは、最良解として出力された接続案であっても、利用者間に不公平が生じている可能性がある。そこで、筆者らは、設定する評価関数とその時に最良解として導出される接続案における個々の利用者の不効用との関連についての検討を行なっている。本稿では、その途中経過について報告する。

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満足（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（列車の乗り継ぎ）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

旅客流動シミュレータの基本的考え方は、次の通りである。

・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（ここで、経路には、どの列車を利用するか、どこで乗換えるかも含む。また、この処理を経路探索と呼ぶ）。経路探索は、運転整理案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最短経路を探索することによっておこなう。旅客流動ネットワークは、列車の着・発をノードとし、利用者の移動の可能性（駅に

- ・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。
- ・不効用は、文献[5]に示されている式に基づき、乗車時間、発駅での待ち時間、乗換駅での待ち時間、混雑度から求める。
- ・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なうこととしている。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。

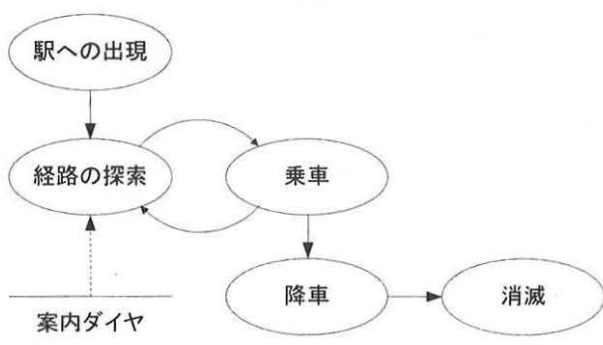


図 1 利用者行動モデル

- ・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なうことも可能になる。

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なうためには、それらの影響を反映した列車運行を予測することが必要になる（これを、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。詳細は、文献[6]を参照していただきたい。

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、利用者が移動途中に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。イベントドリブン型の列車運行シミュレーションの場合には、列車運行シミュレータ、旅客流動シミュレータともに共通のクロックに従って動作（状態遷移）を行なうこととすればよいため、これは比較的容易に実現できる。しかし、PERT によるシミュレーションの場合、クロックという概念がないため、両者の動きに整合性をとり、矛盾がないように両者を並行に動作させなければならない。本稿では、文献[2][3]の手法に基づいて、次のようにして並行動作を実現する（図2参照）。

- ・ 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。

・乗降時間を考慮しない予測発時刻 (max (着時刻 + 最小停車時分, 計画発時刻)) と, 最長経路計算において途中まで計算された予測時刻を旅客流動シミュレータにわたす。

- ・旅客流動シミュレータでは、これらの情報をもとに、自身で保持する案内ダイヤを必要に応じて書き換える（注：案内ダイヤをこの時書き換えるかどうかは、シミュレーションにおいて利用者がどのような情報をどのようなタイミングで獲得可能と仮定するのかに依存する）。
- ・この案内ダイヤに対して、旅客流動シミュレータ側で列車運行予測を行なう。
- ・案内ダイヤを用いて最短経路探索を行ない、当該駅で乗降する人数を求める。

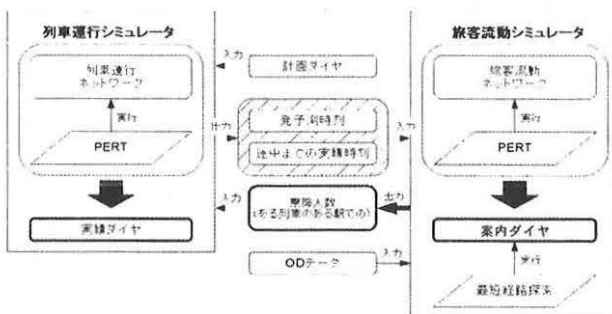


図 2 列車運行シミュレータと旅客流動シミュレータの並行動作

3.1 基本的考え方

本稿では、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う。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3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[7]を用いている。ここで、タブーリストには、接続の解除または接続の設定を行なったノードの対と接続の設定・解除のいずれを行なったかの情報を格納している。

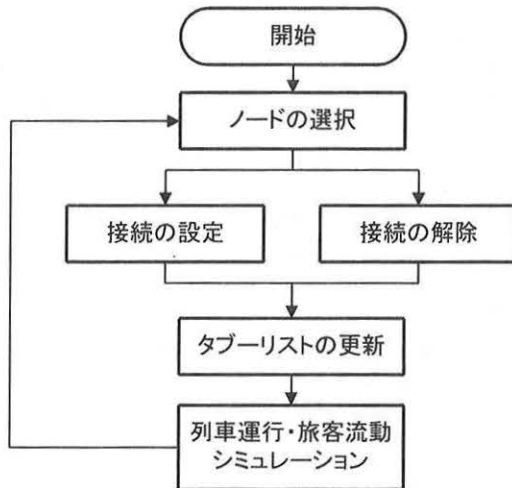


図3 接続判断アルゴリズムの全体構成

3.2 接続判断アルゴリズムの詳細

図3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（ v_x とする）。

〔接続の設定〕ノード v_x 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（ v_y とする）、ノード v_x, v_y の間に相互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 v_x, v_y 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 v_x がノード v_y 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 v_x, v_y 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 v_x, v_y 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

文献[7]では、各利用者について不効用を算出し、その総和が最小になる接続案を求めることを目的としていた。しかし、単に利用者の不効用の総和が最小であるだけでは、最良解として出力された接続案であっても、利用者の間に不公平が生じている可能性がある。そこで、

本稿では、利用者間の不公平を減少させることを目的とした評価関数を検討する。

(1) 標準偏差・平均による評価関数

標準偏差・平均を用いた評価関数として式(1)を提案する。

$$\alpha \frac{\sum_{i=0}^n (t_{li} - t_{0i})}{n} + \beta \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n ((t_{li} - t_{0i}) - \mu)^2}{n}} \quad \dots\dots (1)$$

n : データの個数

t_{li} : 対象としているデータの数値

t_{0i} : 基準となるデータの数値

μ : 平均を表す数値(1項目の値)

α, β : 重み

ここで、基準データ t_{0i} の決定方法としては、以下がありうる。

1. 旅客の所要時間をそのまま利用する手法 ($t_{0i} = 0$ とする)

旅客の所要時間が長い場合、評価値が大きな値になる。所要時間が長い旅客の不効用値が小さくなるようなダイヤほど評価値が減少するので、所要時間がある程度均等になるように修正されていくことが期待される。

2. 計画ダイヤとの所要時間の差を利用する方法 ($t_{0i} =$ [計画ダイヤでの所要時間] とする)

遅延発生によって大きく影響を受けた旅客の評価値が大きくなる。これにより、影響を大きく受けた旅客の不効用値が減るダイヤほど評価値が小さくなり、遅延の影響を多くの旅客に分散させることになることが期待される。

3. 初期解との所要時間の差を利用する方法 ($t_{0i} =$ [初期解での所要時間] とする)

シミュレータの接続決定による改善が行なわれていない旅客の評価値が大きくなる。そのため、旅客1人1人の不効用値が減少しているダイヤほど評価値が小さくなり、旅客に対して平等に改善が行なわれることが期待される。

(2) 比率による評価関数

$$\frac{t_l}{t_0} \quad \dots\dots (2)$$

t_0 : ダイヤにおける所要時間

t_l : 実績ダイヤにおける所要時間

この評価関数では、通常運行時にかかる所要時間に対して、遅延の影響が大きい旅客ほど評価値が大きくなるため、本来の所要時間に合わせて遅延が解消されることが期待される。

5. 実験

現在、評価関数の実装が終了し、実データを用いた評価関数の比較・評価を行なっている。

今後、以下で述べるようなチャートを用い、目的駅・出発駅や不効用値の変化の度合いによって、区別して表示できるようにする事で、評価関数の違いによる不効用値の変化の仕方を比較する予定である。

図4は、横軸を計画ダイヤにおける各旅客の不効用値、縦軸を初期解あるいは最良解の不効用値とした散布図である（差が生じていない利用者は表示していない）。遅れが発生しない時と比べて、被害を受けた程度を個人について比較・評価する事ができる。

図5は、x軸が出発駅、y軸が目的駅、z軸が初期解における不効用値と最良解における不効用値の差である。旅客の出発駅・目的駅（OD=Origin Destination）ごとに、不効用値が改善されたか、あるいは、かえって悪化したかなどを把握することができる。

以上の手法を用いて、評価関数の比較・考察を行い、利用者間の不公平等、最良解として導出される接続変更案と各利用者の不効用値の関係を明らかにしていく。

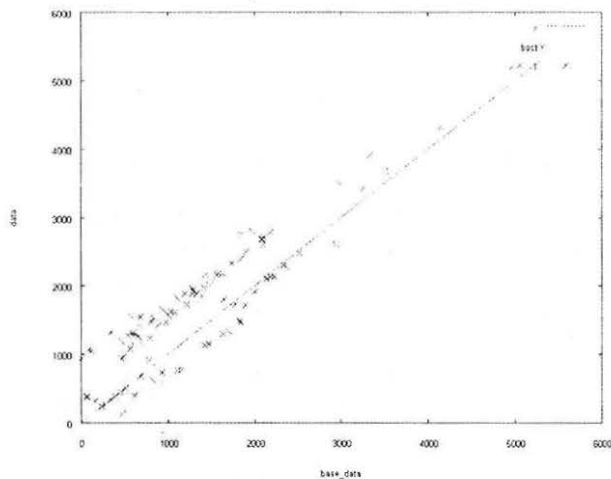


図4 遅延影響度合ごとの旅客の不効用値表示の例

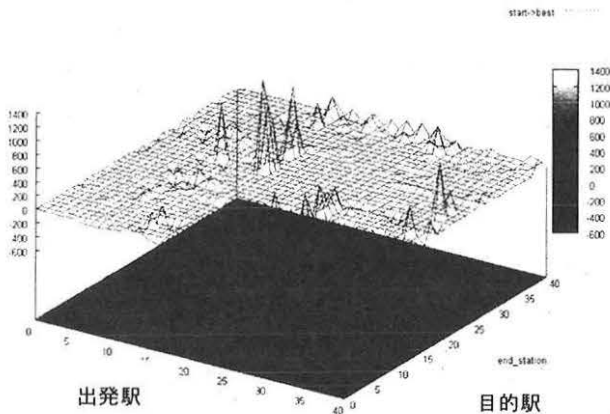


図5 ODごとの旅客の不効用値改善度合表示の例

6 おわりに

鉄道ネットワーク全体を対象として利用者の視点から見て最適な接続判断を行なうアルゴリズムにおける評価関数として、各利用者の不効用の標準偏差・平均を加味した評価関数、不効用値の比率をもちいた評価関数を提案した。また、それらの結果を分析するために用いるための可視化手法として2種類のチャートを提案した。

今後、実データを用いて、各評価関数に対して得られた最良解とその時の各利用者の不効用値との関連を分析し、それぞれの評価関数の特質を明らかにして行く所存である。

参考文献

- [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] 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.
- [3] TAKEUCHI Yoko, HIRAI Chikara, TOMII Norio: Robustness Indices based on Passengers' Utilities, *WCRR 2006 - World Congress on Railway Research*, Montreal, June 2006.
- [4] 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.
- [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] 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.