

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21510156

研究課題名（和文）コラボラティブアプローチによる鉄道のダイヤ乱れ時支援アルゴリズムの研究

研究課題名（英文）A rescheduling algorithm for disrupted railway traffic based on collaborative approach

研究代表者

富井 規雄（TOMII NORIO）

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：50426029

研究成果の概要（和文）：

鉄道におけるダイヤ乱れ時の運行計画の変更案（運転整理案）作成アルゴリズムに関して、利用者の視点から評価することを目的として、利用者の不満推定手法、不満推定の高速化を実施し、それを用いて、実用的な運転整理案作成アルゴリズムを作成した。さらに、列車ダイヤ・車両運用計画・乗務員運用計画の各スケジューラをエージェントとして、それらが交渉と妥協を繰り返して運転整理案を作成する枠組みを考案し、有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a train traffic rescheduling algorithm which minimizes passengers' dissatisfaction and confirmed its usefulness using real world data. The algorithm is a combination of an optimization algorithm and a train traffic and passenger flow simulator. We have also developed a framework of an algorithm in which a diagram agent, a train-set scheduling agent and a crew scheduling agent conduct negotiation and compromise in order to get a feasible rescheduling plan and confirmed its usefulness.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 社会システム工学・安全システム

キーワード：社会システム、鉄道

1. 研究開始当初の背景

日本の鉄道は、高い定時運行性で知られている。しかし、特に都市圏においては、ダイヤ乱れ時の鉄道会社への不満は非常に大きい。それらの不満は、ダイヤ乱れ時の運行計画の変更（この業務を運転整理と言う）が必

ずしも適切に行なわれていないこと、および、ダイヤ乱れ時の利用者への案内情報が十分でないことに大別される。そのため、例えば、列車の頻度が極端に低下して積み残しがでるほどの混雑になったり、あるいは、次の列車がいつ来るかなどの情報すら十分に提供

されないなどの問題が常態化している。

このような問題が発生している理由は、運転整理案の作成作業が、現状においては、全面的に人手に依存しており、コンピュータシステムによる支援がほとんど行なわれていないことにある。その背景には、運転整理案の作成は、その時と状況によってさまざまな条件を考慮しなければならない複雑でかつ大規模な問題であること、また、評価基準がケースバイケースに変化するきわめて扱いにくい問題であることなどの事情がある。

これまで、鉄道のダイヤをはじめとする運行計画の作成アルゴリズムについては、多数の研究事例が発表されてきた。しかし、それらのアルゴリズムは、ダイヤ改正時に作成される運行計画の自動作成を目的とした、いわば静的な環境を対象としたアルゴリズムであって、運転整理のような、実際に列車が走行して利用者が移動しているという動的な環境には適用できない。

一方、最近では、運転整理案作成問題に対するアルゴリズムもいくつか発表されている。それらは、運転整理案作成問題を組合せ最適化問題ととらえ、ある評価関数の値を最小とするような運転整理案をなんらかのアルゴリズムで求めるというアプローチをとっている。

しかしながら、それらのアルゴリズムでは、実用上、特に大規模のダイヤ乱れに対しては十分ではない。その理由としては、次がある。

- (1) 個々の利用者の視点や利用者の数を考慮した評価尺度となっていない。
- (2) 鉄道ネットワーク全体に対する考慮がなされていない
- (3) リソースの条件が考慮されていない

運転整理案の評価のためには、現状では、総遅延時間等が用いられている。しかし、遅延時間は、利用者の（不）満足度と必ずしも一致するものではない。運転整理案を利用者の立場から評価するためには、個々の利用者の移動経路や数を推定し、それに基づいた評価を行なう必要がある。しかし、主として計算速度の点から、現状では、個々の利用者の動きを推定する等のことはほとんど行なわれておらず、小乱れを対象としたものがある程度である。

また、都市圏においては、会社や路線をまたがって列車が運転されているため、ある線区のダイヤ乱れは、他の線区に波及する。会社や路線をまたがって移動する利用者が多いため、運転整理案の作成にあたっては、既存研究のように一つの路線を対象とした運転整理案ではなく、鉄道ネットワーク全体として最適な運転整理案を作成することが求められる。

さらに、既存研究は、車両や運転士・車掌等のリソースを考慮したものとはなってい

ない。それらの研究では、運転整理案を作成した後、それをもとにして、車両、運転士、車掌の運用計画を作成することを前提としている。しかし、本来は、運転整理案の作成と並行して、それらの運用計画を作成すべきものであり、既存研究の方法では、手戻りが多く発生する（例えば、運転整理案を作成してから、運転士の運用計画を作成しようとしたところ、条件を満たす解が存在しなかったなどの事態が発生する）。そのため、リソースの運用計画と運転整理案の作成とを並列に行なうアプローチをとる必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、前項で述べた課題(1)、(2)、(3)を解決するための手がかりを得ることを目的として、具体的には、次に注力することとした。

- (a) 個々の乗客の満足度を推定する手法の高速化に関する研究
- (b) 列車ダイヤ、車両運用計画、乗務員（運転士・車掌）運用計画、利用者等の個々のスケジューラをエージェントとみなし、それらが交渉と妥協とを重ねながら、社会全体として満足される運転整理を行なうメカニズムに関する研究

(a)は、利用者の視点から運転整理案を評価するために必須となる技術で、これまでDijkstraの最短経路探索アルゴリズムを発展させた手法に関する研究が行なわれている。しかし、既存研究では、利用者の行動に関する仮定が一般的でないという問題があった。本研究では、数千人規模の利用者の動きを数分程度で推定するアルゴリズムを開発することを目指した。

(b)は、現実の鉄道が、列車ダイヤ、車両運用計画、乗務員運用計画等の個々の構成要素の事情を含んだ非常に複雑な系であること、運転整理については、厳密な最適化は必ずしも求められていない（最適性の評価基準そのものもあいまいである）ことを念頭において、feasible—実行可能—でかつ社会全体として満足できる結果を得るためのメカニズムを確立することを目指した。エージェントの交渉による問題解決についてはこれまで多数の研究例があるが、現実の鉄道のような複雑な対象を扱った研究はほとんど見られない。

本研究の学術的な特色は、鉄道という現実存在するきわめて複雑で大規模な問題を対象とし、現実を使い物になるアルゴリズムを確立しようとしていることにある。また、その際、AI-Artificial Intelligence や OR - Operations Research など、分野をまたがって複数の手法を組みあわせて実用的な成果を得ようとしていることにある。本研究の

成果は、鉄道だけでなく、複数のアクターが関係してリアルタイムに問題解決を行なっていくような産業への応用も期待される。

3. 研究の方法

3.1 個々の乗客の不満足度を高速に推定するアルゴリズム

運転整理が難しい理由の一つは、その評価が難しいことにある。最近、運転整理を乗客の視点から評価する試みが見られる。それらは、従来の列車遅延や運休本数等による評価とは異なり、乗客がこうむった迷惑を定量化しようとしている。そのためには、運転整理案が与えられた時に、個々の乗客がとるであろう経路（どの列車を選択し、どの駅で乗り換えたか等）を推定し、所要時間、混雑度、乗換回数等から、個々の乗客の（不）満足度（以下、不効用と呼ぶ）を推定する必要がある。乗客の経路の推定は非常に複雑であり、シミュレーションによることになる。運転整理は、現に走行している列車を対象とするリアルタイム性を要求される業務である。一方で、対象となる乗客の数は非常に多い。そのため、実用的なアルゴリズムを構築するためには、乗客の経路推定のためのシミュレーションの速度を向上することが必須である。

本研究では、

- 個々の乗客の嗜好や出現駅での待ち時間等の状況を考慮した、より一般的に適用可能な経路探索アルゴリズムの考案
- 最適化アルゴリズムにおいては、経路の探索が繰り返し行なわれることに着目して、再利用可能な探索履歴を使用することによる経路探索の高速化

を行ない、運転整理の一部である接続判断アルゴリズムに適用した。

この接続判断アルゴリズムは、複数の路線を対象とし、乗客の視点から運転整理案を評価するために、乗客の不効用をなるべく少なくする接続変更案をメタヒューリスティクスを用いて生成する。

3.2 列車ダイヤ、車両運用計画、乗務員（運転士・車掌）運用計画、利用者等の個々のスケジューラをエージェントとみなし、それらが交渉と妥協とを重ねながら、社会全体として満足される運転整理を行なうメカニズム

運転整理案は、列車ダイヤだけで決められるものではなく、車両運用計画、乗務員運用計画それぞれの事情を反映して作成する必要がある。そこで本研究では、列車ダイヤ、車両運用計画、乗務員運用計画それぞれを作成するスケジューラをエージェントとし、複数のエージェントが、交渉、妥協を繰り返して共通の解を導くマルチエージェントシステムを模した枠組みを考案した。その際、各エージェントは自身の都合だけで動作を決

定するのではなく、他のエージェントの事情も考慮した上で動作を決定し、それぞれのエージェントの制約条件を守った上で、全体の評価値をなるべく向上させた解を導出しようとする。

4. 研究成果

前節で述べた手法を応用し、具体的には次のような研究成果を得た。

(1) 鉄道ネットワーク全体を対象とした接続判断アルゴリズム

都市圏においては、複数の路線の間で、列車の接続を考慮した列車ダイヤが提供されていることが多い。接続を考慮した列車ダイヤは、乗換のための待ち時間を少なくするためには有益であるが、一方で、列車に遅延が生じた時には問題となる。接続を守るためには、接続先の列車を待たせる必要があり、その列車が遅延することになる。また、この遅延は、当該路線全体に影響を及ぼし、別の箇所での接続に問題を生じさせることになる。また、接続を守らないとすれば、接続先の列車に遅延は生じないが、乗客の待ち時間は増大する。

このように、接続の判断は、局所的な判断では不十分で、路線全体を対象とし、利用者全体の不効用を考慮して行なう必要がある。しかし、接続駅の局所的な状況判断に基づいて接続の設定・解除が行なわれているのが現状である。

本研究では、接続判断問題を、利用者の不効用を最小にするように接続の解除・維持を決定する組合せ最適化問題として定式化し、メタヒューリスティクスを用いて、最適な接続維持・解除案を生成するアルゴリズムを作成した。また、本アルゴリズムを、1万人規模の利用者を含む現実の鉄道路線に適用し、実用的な処理速度で解を生成できることを確認した（図1）。

(2) 探索履歴の再利用を考慮した乗客の経路推定の高速化アルゴリズム

メタヒューリスティクスを用いて、乗客の不効用を評価関数とする運転整理アルゴリズムを動作させる場合、乗客の経路推定を何度も繰り返すことになり、その部分が処理時間の大半を占めることになる。そこで、本研究では、それ以前に実施した経路推定の結果のうち再利用可能なものは再利用することとして、経路探索処理に要する時間を短縮し、運転整理案を迅速に作成できるようにすることを目的とした。

本研究における再探索処理とは、ある運転整理案に対して経路探索を行った後、運転整理案の修正を受けて再度経路探索を行なうときの経路探索処理のことを指す。運転整理案が修正されると、修正前と修正後で利用

者の最短経路は変化するのは明らかであるが、メタヒューリスティクスを用いる場合には、1回ごとの修正箇所は限定的であるため、とる経路に変更のない乗客が多数存在する。このような乗客を効率的に抽出する手法を考案し、経路探索を省略することによって再探索処理の効率化を図ることに成功した。

その結果、運転整理案の作成に要する時間を従来の約半分に短縮することに成功した。

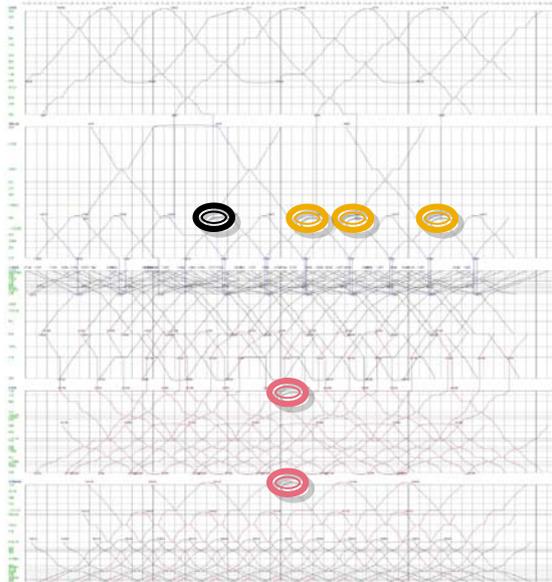


図1：接続判断アルゴリズムの結果
(○が接続が変更された箇所)

(3) 複数エージェントの協調による運転整理案作成アルゴリズム

現状の運転整理案作成業務においては、列車ダイヤの変更を担当する輸送指令が事故の状況などから、列車ダイヤの変更案を作成し、車両運用計画・乗務員運用計画の変更を担当する運用指令が、それを受け取って車両、乗務員運用計画の変更案を作成するという方法が取られている。しかし、この方法で運転整理案を作成しても、それに見合った車両、乗務員が充当されないと、新たに運転整理案を作成し直すことになり、実現可能な運転整理案の作成に時間を要する可能性がある。

そこで本研究では、ダイヤと車両運用・乗務員運用に着目し、ダイヤの都合だけを考慮するのではなく、車両運用、乗務員運用の都合も考慮し、これら3者が平行して運転整理案の作成を行なうアルゴリズムに関する研究を行なった。

運転整理案の評価方法として、利用者の「不満」の他、滞泊地、帰区時刻等の車両運用・乗務員運用側の「不満」も定義し点数化することとした。

そして、各エージェントがその時点の運転

整理案に対する各自の視点からみた制約違反箇所の解消を試みた運転整理案の作成を繰り返し実行する枠組みを考案した。また、制約違反の内容から、該当するエージェントに改善の要求を提案するメカニズムを考案した。

(4) 複数会社間での相互直通運転を対象とした運転整理案作成アルゴリズム

大都市圏を中心に、多くの路線において相互直通運転が行われている。ここで、相互直通運転とは、列車の運用が複数の会社にわたって相互に直通の列車を運転させることをいう。

しかし、相互直通運転を行なっている路線では、ある路線でのダイヤの乱れは、直通運転先にも伝播し、路線全体に影響を及ぼすという問題がある。また、相互直通運転区間の運転整理においては、会社間で意見の食い違いが見られる場合もある。そのため、お互いの会社の思惑を考えて、それに見合った運転整理案の作成を行なうことが求められる。

本研究では、相互直通運転を行なっている路線を対象として、列車の遅延が発生した場合に、互いの思惑を考慮しながら、乗客への影響をできるだけ軽減する運転整理案を作成する枠組みを作成した。

本研究では、運転整理案作成システムを、直通運転を行なっている会社ごとに準備し、ネットワークを用いて列車および乗客の情報をやりとりしてシミュレーションを行う方法を確認した。また、運転整理の手法としては、順序変更と運行変更を対象とした。ここで、順序変更とは、待避が可能な駅や、途中駅のうち始発列車がある駅において、所定の計画ダイヤの列車の発車順序を変更することを言う。本研究では、順序変更を行なう場所を会社境界駅に設定し、直通列車に遅延が生じている場合、境界駅からの始発列車の発車順序を交渉の結果に応じて変更するようにした。また、運行変更とは、境界駅において、始発列車を遅延している列車の計画ダイヤにあわせて運行する運転整理手法である(図2)。

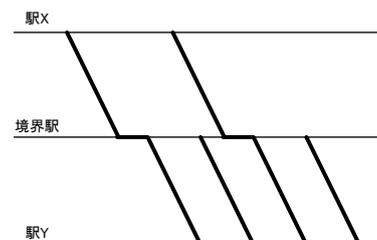


図2-1 所定のダイヤ

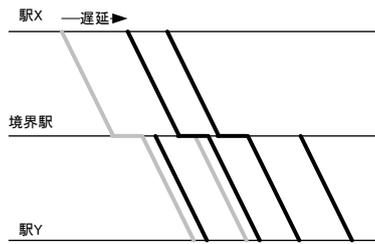


図 2-2 運行変更後のダイヤ

全体のシステムは、次のように動作する。

- ・列車の遅延が発生した場合、その会社のシステムは、直通する列車の予想遅延時刻を、直通相手先に送信する。
- ・会社ごとに利用者の不効用による評価値を算出し、その評価値を共有して運転整理の比較対象にする。
- ・各社が算出した評価値をもとに、各社ごとで最適な運転整理案を選択する。会社別の結果が同じ場合は、その結果で得られた運転整理案を採用する。もし、会社ごとに最適な運転整理案が食い違った場合は、両社の評価値の中から直通する乗客の不効用値を加算し、最小であった運転整理案を採用する。

(5) 混合整数計画法にもとづく運転整理案作成アルゴリズム

乗客の視点を考慮した研究の多くは、メタヒューリスティクスが用いられ最適性が考慮されていない。一方、最適性を考慮した研究も数多く発表されているが、それらは、列車の遅延を評価値としたものであり、実用上問題がある。そこで本研究では、乗客が被る損失が最小となるように最適化された運転整理案を作成するアルゴリズムを考案した。

既存の類似の研究は、一方向の運転のみが考慮され折り返しを考慮していないことや、乗客が列車を乗り換える回数を1回に限定しているなどの点で現実的ではないため、それらの課題を解決することを目的とした。また、途中折り返し運転などのダイヤ変更手法の実現を可能にすることを目的とした。

本研究では、列車の運行の制約と乗客が鉄道を利用する際に発生する制約を数理モデルで表現し、乗客の損失を定義して、これを最小化すべき目的関数とした混合整数計画法を適用した。

混合整数計画法を用いる理由は、線形計画問題に論理条件が加わった複雑な問題に対し最適解が得られるため、同様に運転整理案作成問題を数理モデル化し、混合整数計画法を用いることで最適解が得られると考えたためである。

折り返し運転への対応として、進路支障を避けられるようにする必要がある。進路支障とは、2つの列車の進路が重なり、同時に通

ることができない状態のことである。これに対して、本研究では、発生する可能性のある進路支障を定義し、進路支障を起こす可能性のある列車間に十分な時間間隔を空けるように制約式を追加した。

また、求解には数理計画ソルバー CPLEX12.2 を用いた。

実装結果を評価したところ、処理時間をさらに短縮する必要が認められたものの、導出される解は、すべての制約を満たし、乗客の損失を最小化した運転整理案であることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Satoshi KANAI, Koichi SHIINA, Norio TOMII, An Optimal Delay Management Algorithm from Passengers' Viewpoints considering Whole Railway Network, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Elsevier, 査読有, Vol.1, 2011, pp. 25-37

② 國松武俊, 平井力, 富井規雄: マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法, 電気学会論文誌 (産業応用部門), 査読有, Vol. 130-D, 2010, pp. 459-467

[学会発表] (計17件)

① 黒田真司, 富井規雄: 再探索処理を考慮した鉄道旅客の経路探索の高速化, TER-11-045, 電気学会交通・電気鉄道研究会, 2011年9月5日, 早稲田大学(東京).

② Satoshi KANAI, Koichi SHIINA, Shingo HARADA, Norio TOMII : An Optimal Delay Management Algorithm from Passengers' Viewpoints considering Whole Railway Network, *4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis - RailRome2011*, 2011年2月17日, Rome (Italy).

③ 中村恭平, 富井規雄: マルチエージェントモデルに基づく詳細な列車運行および旅客行動を再現するシミュレータの開発, 電気学会全国大会, 2010年3月17日, 明治大学(東京).

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, J-Rail2009 第16回鉄道技術連合シンポジウム, 2009年12月2日, 代々木(東京).

〔図書〕(計2 件)

①富井規雄他著：鉄道ダイヤ回復の技術，オーム社，2010，252 ページ。

②富井規雄編著：鉄道ダイヤのつくりかた，オーム社，2012，232 ページ。

〔その他〕

ホームページ

<http://www.tomii.cs.it-chiba.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

富井 規雄 (TOMII NORIO)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：50426029