

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文概要

論文題目

鉄道輸送サービスデペンダビリティ向上のための列車運用整理リアクティブスケジューリング技術の研究

申請者
佐藤 達広

情報生産システム工学専攻
生産情報制御研究

2012年 9月

第 1 章 序論

近年、環境意識の高まりや都市の過密化、資源高騰などの理由から、CO₂ 排出量やエネルギー効率等の環境負荷が小さく大量輸送が可能な交通機関として、鉄道システム復権の動きが世界的に高まっている。そのため、列車ダイヤの超高密度化、列車種別の多様化、線区間相互乗り入れ運転の増加等を要因として各種輸送業務の複雑化が進んでおり、計算機システム導入による業務支援が求められている。信頼性、保全性、可用性等を総合した広義の概念を「デペンダビリティ」と呼ぶが、社会を支える重要インフラである鉄道には、運行乱れというある種の非定型的な状況においても「頼りがいのある」サービス、すなわちデペンダブルなサービスを提供することが求められている。

列車運行が乱れた際に列車ダイヤを再作成し運転回復をおこなう業務を「列車運転整理」と呼ぶ。列車運転整理業務に関しては、支援システムの導入が早くから進められてきた。一方、再作成された列車ダイヤに従って列車を運行するために必要な資源である車両や乗務員の運用計画を再作成する業務を「列車運用整理」と呼ぶ。列車運用整理業務に関しては、未だ殆どの鉄道事業者が人手でおこなっているのが現状である。そのため、車両・乗務員の手配ミスや、場当たりの対応による業務の非効率化といった問題が生じている。こうした状況を改善すべく、列車運用整理を支援するシステムも徐々に開発されつつある。ただし、再作成された列車ダイヤの要求を満たしつつ、資源の利用可能性に関する様々な制約に配慮してスケジュールを再構成することの困難さから、意思決定に関わる多くの作業が依然として人手に委ねられているのが現状である。また、システム化事例の多くは、特定の路線を対象とした個別対応的なものであり、それらを他の路線へ適用することが難しいという問題がある。

本論文は鉄道輸送サービスのデペンダビリティ向上を目指し、列車運行乱れ時の列車運用整理業務に焦点をあて、取り組むべき課題を提示する。そして、これらの課題を解決するために、最適化技法（ラグランジュ緩和法、局所探索法、制約プログラミング）とヒューリスティクスとを組み合わせたりアクティブなスケジューリング方式を提案する。さらに実路線を含むダイヤ再編成データを用いた数値実験により提案方式の有効性を示す。

以下、各章ごとにその概要を述べる。

第 2 章 関連研究および関連技術

本章では、リアクティブスケジューリング技術に関する近年の研究開発動向をサーベイした結果を示す。

第 3 章 列車運用整理業務におけるリアクティブスケジューリング

本章では、列車運用整理業務を支援するシステム実現のための課題を明らかにする。列車運用整理業務において、旅客・貨物等を輸送する本線上の営業列車の運行に直接関わるものを、特に「本線運用整理」と呼ぶ。運行乱れ時に再作成された列車ダイヤの下で、資源である車両や乗務員の割当スケジュールを再作成することを目的とする。駅や乗務員区所といったスケジュール実施現場

の混乱を抑えるため、再作成にあたっては元のスケジュールからの変更量を少なくすることが求められる。また、実行可能なスケジュールを得るには、列車ダイヤからの要求と資源の運用に関する制約の双方を満足する必要がある。運転再開までの限られた時間の中でこれらの要件を満たして再作成を実施することが必要である。

一方、車両基地における車両の清掃・点検といった保全作業に関わる業務を特に「車両基地運用整理」と呼ぶ。運行乱れ時でも保全作業を円滑に進めるため、車両基地構内における車両の移動と配置のスケジュールを再作成することを目的とする。再作成にあたっては、本線運用整理と同様に元のスケジュールからの変更量の最小化が求められるが、それに加えて、実行可能性を確保するために車両基地のレイアウト（配線構造）を考慮することが重要である。レイアウトは車両基地毎に異なり、しかも複雑・多岐にわたるため、それらをスケジューリングの制約として共通的に扱うことが求められる。

以上より、鉄道輸送サービスのデペンダビリティ向上のために列車運用整理支援システムを実現するためには、次の課題を解決することが必要である。

（課題 1）再作成された列車ダイヤからの要求と資源運用制約の双方を可能な限り満たした上で、元のスケジュールからの変更量を最小化した再スケジューリング結果を算出可能な効率的なスケジューリング方式が必要である。

（課題 2）車両基地の様々なレイアウトに対応し、車両の移動・配置に関わる物理的な制約とその他の資源運用制約とを満足した再スケジューリング結果を算出可能な効率的なスケジューリング方式が必要である。

第 4 章 本線運用整理のためのリアクティブスケジューリング技術

本章では、課題 1 に対処するための本線運用整理向けリアクティブスケジューリング技術について明らかにする。まず、リアクティブスケジューリング問題の構造や制約を陽に扱うため、列車ダイヤからの要求である列車の運行時刻及び位置の情報と、資源の運用制約と、スケジュール自体とを統合して扱うことが可能なネットワークフローモデルを提案する。そして、提案モデルで記述したリアクティブスケジューリング問題を 0-1 整数計画問題として定式化し、問題の特徴をふまえたヒューリスティクスを組み込むことで問題を効率的に解くための 2 通りの方式を提案する。（方式 1）は最適化技法としてラグランジュ緩和法を応用し最適値の下界と上界とのギャップを用いた解の精度評価を行うことにより元のスケジュールからの変更量を最小化した再スケジューリングを求めるものである。（方式 2）は最適化技法として局所探索法を応用したものであり、（方式 1）では評価できない非線形な評価指標（全車両の折り返し時間の標準偏差と各車両の走行距離の差分の総和）に基づく最適化を行うものである。

これらの提案方式を組み込んだプロトタイプシステムを実装し、実路線の運行乱れ時の運用データを用いた数値実験を実施した。その結果、方式 1 により、元のスケジュールからの変更量の最適値に対して、評価値の乖離が約 1.6%以内の実行可能解を数十分のオーダーの計算時間で算出できることを示した。さらに、

方式 2 により、元のスケジュールからの変更量に加え、非線形な評価指標である全車両の折り返し時間の標準偏差と各車両の走行距離の差分の総和について、従来手法と比較して前者は約 52%、後者は約 33%、改善できることを示した。

最後に、異なる特徴を持つ 2 つの提案方式を組み合わせることで、デペンダビリティをさらに向上する可能性を議論する。

第 5 章 車両基地運用整理のためのリアクティブスケジューリング技術

本章では、課題 2 に対処するための車両基地運用整理向けリアクティブスケジューリング技術について明らかにする。車両基地のレイアウトを作業に使用する資源と捉えることで、本問題は生産分野におけるフレキシブルジョブショップスケジューリング問題 (FJSSP) の類似問題とみなすことができる。ただし、(1)車両基地の入区から出区までの時間枠が固定されるため、レイアウトを構成する資源 (進路、番線) が車両の移動・配置の際に競合しやすい、(2)移動と配置を矛盾無く繰り返す上で、必要な資源の組合せがレイアウトに強い制約を受ける、(3)レイアウト上で時間軸に沿って移動と配置を連続的に実行する必要がある、等の制約から、配置時間の延長といった部分的な変更が他へ連鎖的に影響しやすいという特徴を持つ。

これらの制約を記述可能な制約充足最適化問題としての定式化とそれにもとづく段階的なスケジュール作成のアーキテクチャを提案する。制約充足最適化問題の定式化は FJSSP を基本としつつ、(1)レイアウトの扱いを一般化した制約式を定義し、(2)実行可能性を判断するため競合を考えない特別な資源 (バッファ資源) を導入し、(3)スケジュールの質を評価するため、「使用番線」と「移動の実施順序」に着目して最適化の評価指標である元のスケジュールからの変更量を定義する。

次に、定式化に基づいたスケジューリング方式として、制約プログラミング (CP) を用いた方式を提案する。CP に探索効率化と元のスケジュールからの変更量最小化に寄与するヒューリスティクスを組み合わせることで方式を構成する。

提案方式を組み込んだプロトタイプシステムを実装し、レイアウト形状が異なる 3 種類の車両基地を対象として数値実験を実施した。3 通りの運用乱れケースを表す 1080 個の運用データを生成し実験をおこない、(1)秒単位の時間オーダー (0.02~1.59 秒) で運用計画の再作成が可能であり、(2)全データの約 98% についてバッファ資源を使用しない実行可能解が得られ、(3)番線変更回数は全データの 96.9% が 0 回、(4)移動順序変更回数は平均値が 1.57 回で全移動回数の 2.7% に相当し、その 3 倍以内のものが全データの 91.1% を占め、(5)時刻の修正のみで再作成に成功したものが全データの 42% であることを示した。

第 6 章 結論

本論文で提案したアイデア、および有効性を検証した実験結果について総括し、さらに、鉄道輸送サービスのデペンダビリティのさらなる向上にむけた将来課題について考察する。