

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

情報ネットワークを利用した列車運行



寺田 夏樹
Natsuki Terada

信号・情報技術研究部
信号システム研究室 室長

[専門分野] 信号システム, 軌道回路

近年導入が始まっている無線式列車制御システムでは、列車の詳細な位置や速度の情報を把握することで個々の列車の制御を実現していますが、列車全体の運行を管理するシステムでは、各列車の位置が区間単位であるため細かい柔軟な運行管理が難しいという課題があります。そこで、運行管理と保安制御のシステムを融合し、リアルタイムに各列車の位置や速度を制御し、柔軟な運行を可能とするシステムを検討し、提案しました。ここでは、システムの概要と、システムの実現に必要な情報ネットワークや遅延予測などの要素技術について紹介します。

現在の列車運行のシステム

現在、列車運行を行うために、保安装置と運行管理装置の2種類の装置が使用されています(図1)。保安装置は列車どうしが衝突や追突しないように使用され、列車の在線状態や取扱者の指示に基づき、信号機や転てつ機(分岐器の方向を転換・固定する装置)を制御します。また、列車では許容される速度を超過した場合は自動でブレーキをかけます。現在では指令所の運行管理装置から集中的に線区全体の保安装置を遠隔制御し、線区全体の列車の動きを管理しています。

従来、列車の位置は地上の軌道回路とよばれる装置を使って数十m~数kmの区間の単位で検知していましたが、車上で詳細な列車位置を認識し、その位置情報を地上の装置に無線伝送して制御を行う無線式列車制御システムが開発され、日本では2011年以降導入が始まっています。このシステムでは地上の多くを占めていた列車検知の機能がなくなるなど、装置の仕組みは大きく変わっていますが、保安装置と運行管理装置という2種類の装置からなる構成は変わっていません。

これからの列車運行のシステム

列車の安全・安定輸送を支えるシステムが、保安装置と運行管理装置とで2種類になっているのは、高い安全性が必要とされる範囲を明確にするためです。保安装置は列車の安全を担保する部分を担うことから、柔軟性や処理能力の高さよりも、安全性が重視され、実績のある鉄道固有の装置が用いられます。運行管理装置に関しては、最新の情報処理技術を導入して、柔軟な運行管理を目指すことが可能になっています。一方、ダイヤ乱れや一時的な運行停止があった場合に、個々の列車に対して細かい速度指示を与えることで、

より遅延を小さくできることがわかっています。個々の列車に細かい指示を行うことを考えた場合、装置が2つに分かれていると遅れが生じるため、保安装置と運行管理装置を一体化した方が有利ですし、装置の数も少なくできます。また、運行管理において個々の列車の速度を利用することで、列車への走行指示もより高精度にできます。

そこで、鉄道総研では保安装置と運行管理装置を一体化した制御方式(図2)を検討しました。さらに、装置を一体化した効果を有効に活用するため、その時々混雑率や遅延といった情報をリアルタイムで集め、それによ

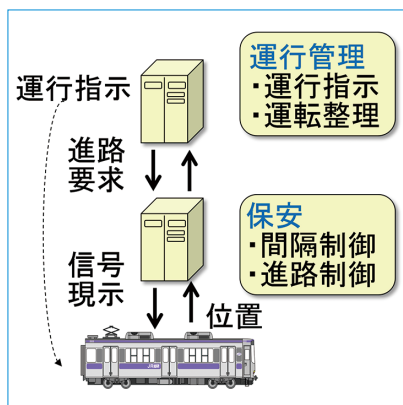


図1 現在の列車運行の仕組み

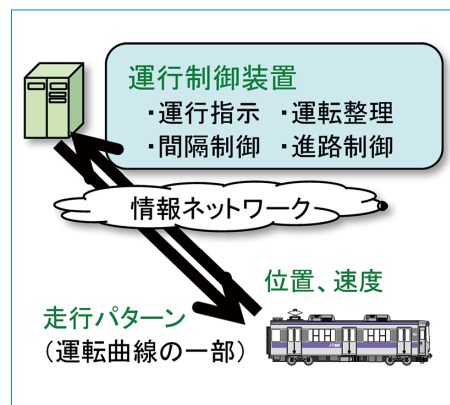


図2 提案する列車運行の仕組み

りダイヤを臨機応変に変更することを考えます。この場合の列車運行の基本的な考え方を図3に示します。図3では以下の3つの機能を組み合わせていますが、各列車は運行制御装置の指示に従い、自動的に運転される前提となります。

- ①現在の運転状況などから、列車の遅延を予測する。
- ②予測された遅延や沿線の障害発生状況を元に、ダイヤを変更する。
- ③ダイヤを元に、各列車の運転曲線(☞参照)を計算し、それを元に加減速を含めて列車を制御する。

ここでは①と③に関する研究成果を紹介します。

リアルタイム情報に基づく、列車遅延や乗車率の予測

ラッシュ時などでは、列車の乗降に時間がかかり、遅延が発生しやすい状況にあります。このとき、遅延が拡大するか、収束するかによって、運行管理を行う指令員の指示が変わりますが、遅延の変化は指令員が経験をもとに予測していました。今回5分以内の小規模遅延を対象に、遅延の予測をコンピュータで行う研究を行いました。

過去のデータに基づいて遅延や乗車率を予測する手法として、画像認識のほか、時系列データの分析にも利用されているニューラルネットワーク(☞参照)を利用しました。これは、過去のデータを用いてあらかじめ学習させると、新たなデータに対しても学習したデータと同様の判断を行ってくれるものです。

20駅ほどの通勤路線を対象に、ラッシュ時の2時間における予測を行いました。70日分の実績データを学習に用いました。そして、現在のデータとして、対象となる列車およびその前後列車の5駅分の遅延状況および乗車率

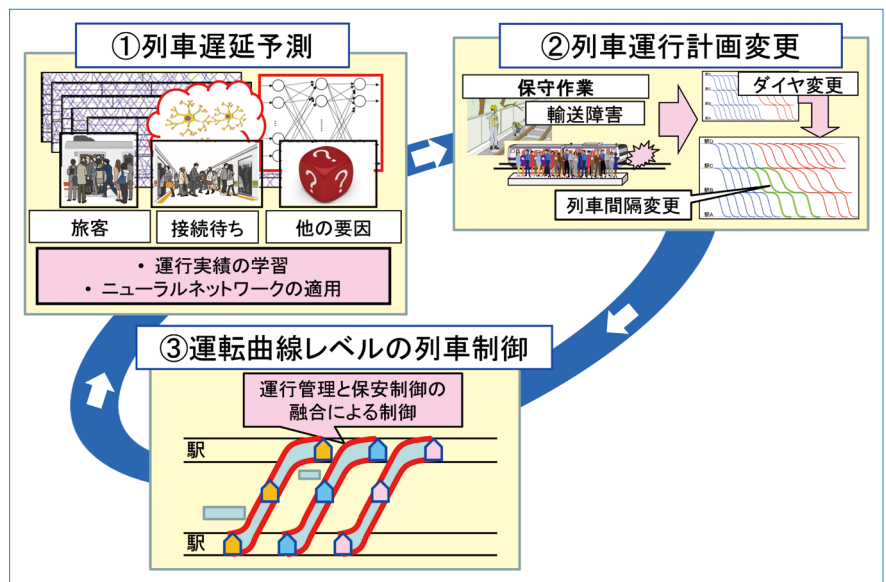


図3 リアルタイムの運行状況に合わせた列車運行の仕組み

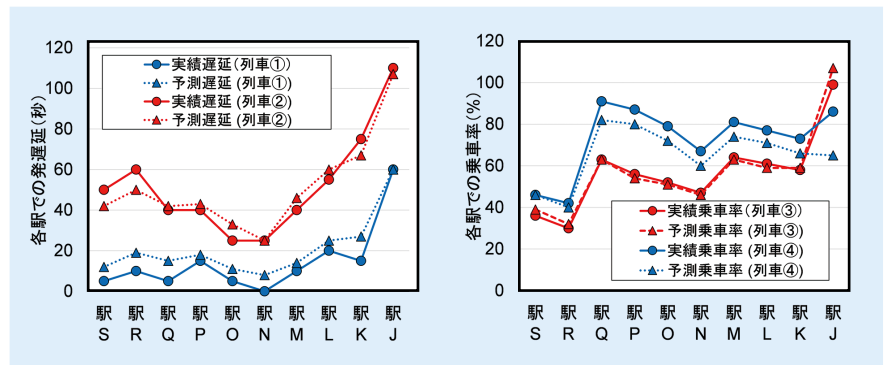


図4 列車ごとの遅延(左)および乗車率(右)の予測と実績の比較

を用いて、これから数駅分の遅延および乗車率の推定を行いました。推定にあたっては、学習を繰り返す回数や、新しいデータに対してどの程度学習を反映させるかについての調整を行います。調整を行った結果を用いて、

列車ごとに遅延と乗車率を10駅分について予測した結果と、実際の値との比較を図4に示します。よく一致していることがわかるかと思えます。今後は大規模遅延時についての予測が研究課題となります。

☞ 運転曲線

列車の位置、速度の状況を示すとともに、走行時間を検討するために作成されるもので、横軸を位置とし、縦軸を速度として描く速度曲線、同様に縦軸を時間として描く時間曲線の2種類からなります。速度曲線図では、曲線や勾配などの設備の位置とそれに対応する速度制限が合わせて示されます。

☞ ニューラルネットワーク

人間の脳では、神経細胞の間でシナプスとよばれる伝達物質をやりとりしていますが、刺激によりシナプスの発生量に違いが生じることで情報処理が行われます。これを計算機上で模擬したのがニューラルネットワークです。神経細胞の代わりにパーセプトロンとよばれる素子により情報を処理します。このパーセプトロンの振る舞いを決めるため、手本となるデータを用意し、学習とよばれる作業を行います。

運転曲線に基づいた列車運行

列車の運行状態や沿線設備の状態などに応じてリアルタイムに列車に走行のしかたを指示する列車制御システムの検討を行いました¹⁾。

現行のダイヤグラムでは、駅間の列車の動きは、両駅の通過時刻を結んだ直線で表現されています。これに対して、列車の動きを運転曲線に基づいた曲線で表すことにします。列車には長さがあるので、それに応じて曲線に幅ができますが、この幅に余裕を考慮します。具体的には、前端に非常時のブレーキ距離、後端に位置情報の伝送遅れに相当する距離を加えます。こうしてできた図5に示されるような幅のある曲線を「列車オビ」と名付けました。ダイヤグラム上で列車オビどうしを重ねないようにすることで、列車どうしの安全な間隔が確保できます。

また、分岐器が開通していない状態は図6の青(「非開通」)や赤(「転換中」)の長方形のような形で示されます。列車が進む方向に分岐器が開通すると、この長方形が消え、この分岐器を通過する列車オビを設定できます。一方、転換不良が発生した場合は、長方形が残るため、列車オビ先端のブレーキ余裕の範囲内で列車を非常停止させます。このような長方形の支障の考え方は踏切や保守作業の設定にも応用できます。

この列車オビは周期的に更新する必要がありますが、1秒ごとの更新であってもネットワーク上で混雑なく伝送できることを確認しました。また、沿線の各装置と中央装置との間の無線通信が途絶えた場合などでも安全性が確保できることを確認しました。

フレキシブルな運行を可能にする分岐構造

列車運行システムだけでなく、線路や電車線の構造に関してもフレキシ

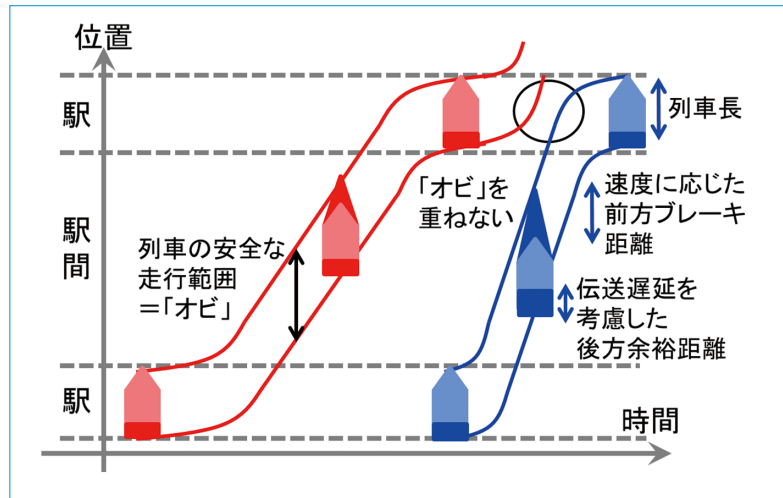


図5 列車オビの概念

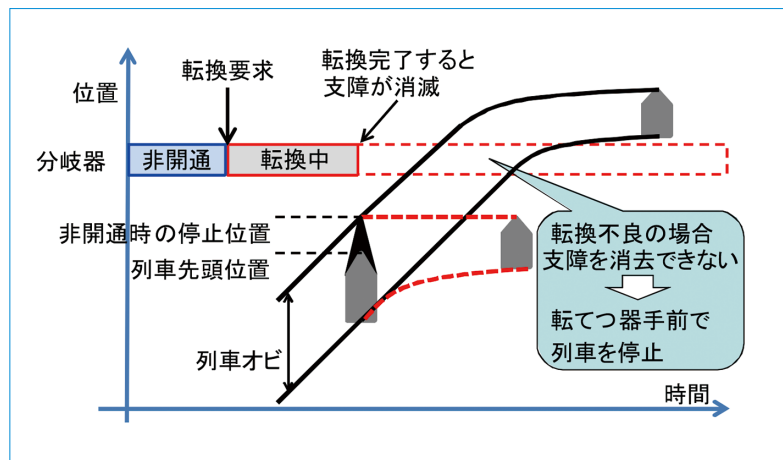


図6 列車オビに基づく駅構内制御

ルな運行を可能にする設備の研究を行いました。通常分岐器を線路に導入する場合はレールの交換が必要ですが、導入後は全体を保守する必要があります。導入時にレールを交換する必要がなく、通常時の保守も必要ないものの、保守間合いを拡大する時などに限って渡り線として利用可能な簡易渡り線構造を開発しました。既存のレールの上に分岐用のレールがかぶさることで分岐を実現しています。また、これに対応する電車線構造も開発しました。アルミ材に支持されたトロリー線を張り、既存電車線に接続しますが、新たな柱を建てる必要はありません。異常時などの運行維持が目的であることから、通過速度は15km/hを目標として

開発しました。製作した分岐器構造や電車線構造に対して、検証試験を実施し、15km/hの走行に対応可能であることを確認しました。

リアルタイム列車運行システムによる遅延や利便性の効果

前述したリアルタイム列車運行システムのシミュレーターを作成しました。このシミュレーターでは1秒おきに列車と運行制御システムとの間で情報をやり取りし、各列車の運転操作を模擬します。

このシミュレーター上で、簡易渡り線設備により単線運転を行い、保守間合いを拡大した場合の利便性を検討しました。図7は終日の運転本数が1000

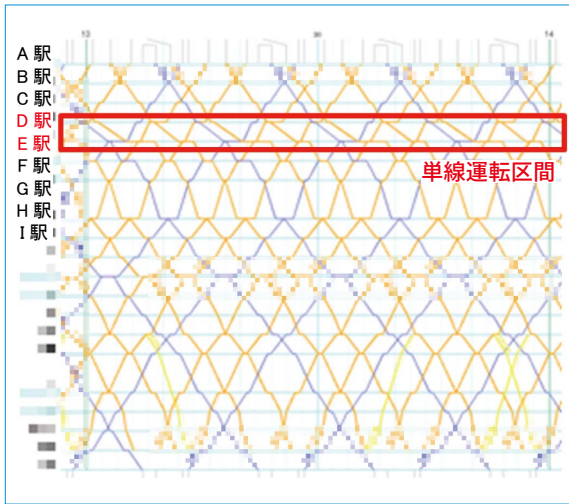


図7 簡易な渡り線を用いて単線運転をした例

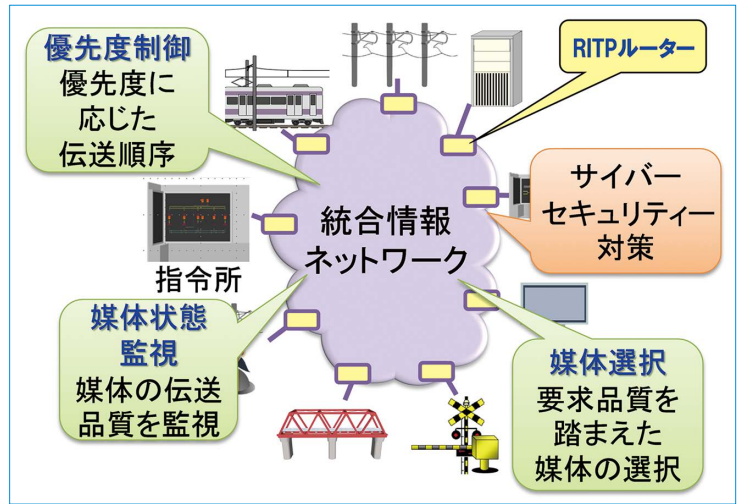


図8 鉄道向け統合情報ネットワーク

本程度の複線の通勤路線を対象に昼間に単線運転を行った例で、赤枠部分で単線運転を行っています。続行運転により前後の区間と同様の列車本数を確保しています。保守時間を4時間から9.5時間に延ばしても、乗客の所要時間は平常時933秒、単線運転時955秒と21秒程度の伸びにとどまり、利便性が損なわれないことを確認しました。

鉄道運行向け統合情報ネットワーク

リアルタイム情報に基づいた列車運行を行うためには、運行にかかる情報を分野横断で共有できるネットワークインフラが必要になります。現在の鉄道システム内での情報のやり取りは、運輸、車両、施設、電力、信号、通信といった組織系統ごとに構築されたネットワークにより行われていますが、この形態では、系統をまたがる情報の共有が難しくなります。

そこで、系統ごとに分かれているネットワークを統合する仕組みを検討しました。また、ユーザーが伝送経路や伝送媒体（携帯電話、自営無線網など）を意識することなく使用できる仕組みを整えて、将来的に通信技術の進歩により新しい伝送媒体に更新されても、対応できる仕組みが必要です。そ

の結果として鉄道運行向け統合情報ネットワーク（図8）と、そのネットワークを実現するための伝送プロトコル（伝送の手順）を提案しました。

統合情報ネットワークに接続される機器上のアプリケーションは、統合情報ネットワークに対して、情報をその品質や重要度を指定して送信するだけでなく、ネットワーク側で伝送路の状態、また、送信する情報の重要度に応じて、伝送媒体や伝送経路の選択を行います。伝送媒体が更新された場合は、その部分の状態を更新するだけで利用できます。また、列車の制御情報などの重要な情報は他の情報に優先させて伝送するなど、鉄道の運行を意識した機能をもっており、系統を超えて情報を同時に処理できます。

鉄道総研では、開発した仕様にRITP (Railway Information Transfer Protocol) という名称をつけました²⁾。RITPの機能について、ネットワークシミュレーターおよび所内試験線での実証試験を実施し、優先度の制御や、伝送媒体の選択といった機能が仕様どおりに動作することを検証し、その実現性を確認しました。

一方、ネットワークが統合された場合に、ネットワークに対するサイバー攻撃がより大きな影響を与えることを

防ぐための対策が必須となります。このとき鉄道のネットワークでは、単に危険な事象を防ぐだけでなく、安定輸送を維持する必要があります。そこで、RITPに備えるべきサイバーセキュリティ確保のための要件についても検討を行い、鉄道運行向けネットワークにおけるセキュリティのガイドラインの草案を作成しました。

これらの検討で得られた知見は、今後鉄道における情報インフラの構築に生かしていきたいと考えます。

まとめ

保安と運行管理とを一体化し、リアルタイムに列車の走行を制御するシステムとその実現のための要素技術について紹介しました。これらの技術の実用化を通じ、鉄道システムの変革につなげていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 杉山陽一, 岩田浩司, 山本春生: 情報ネットワークを利用した列車運行制御の仕組み, RRR, Vol.75, No.8, pp.12-15, 2018
- 2) 中村一城, 川崎邦弘, 竹内恵一, 流王智子: 運行に関わる情報を共有する統合情報ネットワーク, RRR, Vol.75, No.8, pp.8-11, 2018