

列車運行制御の自律化がもたらす安全性の向上

信号・情報技術研究部長
川崎 邦弘



1. はじめに

最新のICTの活用により、従来は実現が困難であった線路内の支障物の自動検知や運転パターンの自動生成が可能となれば、運転に係る負担が軽減でき、更なる安全性の向上が期待できる。画像による線路内の異常検知や機械学習の技術を用いた列車運行予測、列車・設備の位置情報の一元管理など、運行制御の自動化に資する技術の開発状況を紹介します。さらに、通信ネットワークを活用して情報の流れを変えることによって、地上設備にできるだけ依存しない自律型列車運行システムの将来像を描き、考え方と研究開発の方向を述べる。

は保安制御装置等により、列車の安全確保を担っている。両システムとも、その時代の最先端のICTを活用して列車の運行制御の高度化を進め、人間の負担を軽減することによって、安全で安心して利用できる鉄道へと発展してきた。

1964年に東海道新幹線で車内信号式が実用化された自動列車制御装置(ATC)¹⁾は、先行列車との間隔などから決定される速度を指示し、速度が指示速度を超過している時には自動的にその速度以下になるようブレーキを制御する装置で、当時実用化間もなかったトランジスタや地上～車上間伝送の技術を活用して実現したものである。現在はデジタル化され、車上で速度パターンを演算し、速度を滑らかに制御する方式が新幹線や首都圏の在来線で使われている。

このほか、コンピュータの登場や、通信ネットワーク技術などの発展によって、運行管理や進路の設定の自動化が行われ、1977年には列車走行を自動で制御する自動列車運転装置(ATO)が営業線で実用化された²⁾。また、フェールセーフ性を確保したマイコンの開発により、1985年に電子連動装置が実用化され、初めてコンピュータが保安制御に適用された³⁾。最近ではデジタル移動体通信技術を活用し、移動閉そくを実現する無線式列車制御が2011年に営業線に導入⁴⁾されるなど、安全・安心な鉄道を支えるシステムの多くがICTによって実現されている。

2. ICTによる列車運行制御の高度化

2.1 列車の運行制御におけるICT活用

現在の鉄道では、運行管理システムと信号保安システムの2つのシステムが列車の安全・安定運行を支えている。運行管理システムはダイヤに基づく列車の定時運行と遅延時の運転整理を担う。信号保安システム

2.2 さらに列車運行制御の高度化に向けた課題

列車運行制御におけるICT活用の代表的な実用化の例は、無線式列車制御システム⁵⁾である。

無線式列車制御は、列車位置を連続的に把握できること、個々の列車に対して直接的に制御情報を与えられる点が、従来の保安装置とは大きく異なる。このような長を、より積極的に活用し、自動運転と組み合

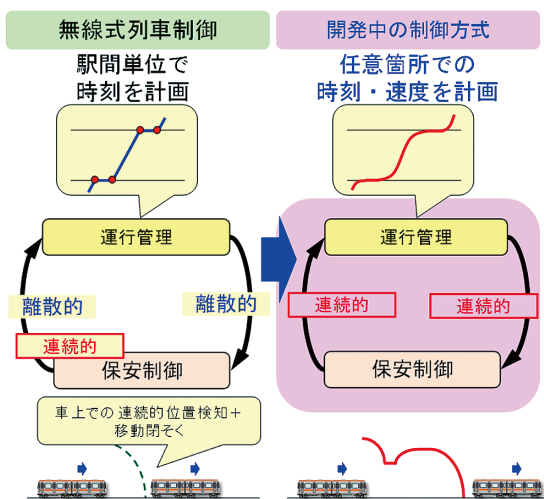


図1 リアルタイム列車運行制御システム

わせることで、列車運行に様々な革新をもたらすことが期待される。

鉄道総研では、現在、無線式列車制御の技術で得られる詳細な情報を運行管理にも活用することで、様々な状況に適応して運転曲線のレベルで列車をきめ細かく制御するリアルタイム列車運行制御システムの開発に取り組んでいる(図1)⁶⁾。

例えば、列車運行の安全に関しては、リアルタイムハザードマップ⁷⁾を活用した自然災害時の運行判断、あるいは、4.1節で述べる線路内監視技術による線路内の異常検知の結果をリアルタイムに反映し、列車を停止させたり、徐行させたりすることができる。また、これも鉄道総研で開発を進めている機械学習などを使った列車運行予測⁸⁾などに基づいて、列車をきめ細かく制御することで、特に高密度線区などで遅延拡大の抑制や、早期の遅延回復が可能となり、安心して利用できる鉄道の実現に寄与するものと考えられる。

ところで、このようなシステムを構築する際、地上側で様々な情報を集約、判断して指示を出す形態が一般的であると思われる。この場合、地上の制御システムがもつ制御アルゴリズムは複雑になり、システム規模が大きくなる。また、安全に関わる様々な情報を常に地上～車上で伝送する必要があるため、通信ネットワークのセキュリティ対策が大規模になる。

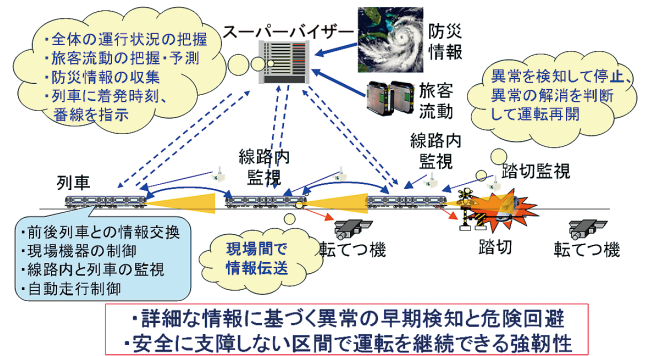
つまり、現在の無線式列車制御の技術をベースに、さらに高度な列車運行制御システムを構築し、列車を安全に制御することは十分にできるが、概してシステムとしては規模が大きく、地上側におかれる設備が必然的に多くなり、故障リスクや脆弱性が増加してしまう懸念がある。

3. 列車運行制御の自律化による安全・安心

3.1 自律化とは

大辞林第3版によれば、自律(Autonomous)とは、「自分の行動を自分の立てた規律に従って正しく規制すること」と定義されている。ある制御システムを自律化するということは、デジタル化された情報に基づいてシステムが自ら手順や判断基準を見出し、人間が介在しなくても制御を行えること、と言える。

列車の運行制御に照らせば、自律化とは、いつ起こるかわからない異常を列車自身が検知し、安全か否かを判断して対処できる能力をもたせること、と考えることができる。すなわち、危険を回避するために減速・



停止の判断を行うだけでなく、異常解消後の運転再開や、旅客の流動や気象情報など運行に関する情報に基づいて列車自らが判断して走行できる機能を持たせることが、自律化と考える。

自律化された列車は、前後列車の状態情報と沿線の状態情報、そして転てつ機・踏切などの状態情報に基づいて、進路と走行パターンを自ら設定して転てつ機・踏切を自ら制御し、進路の確保と線路内の安全監視を行いながら自動で走行する。列車が自律化できれば、自列車の周辺の詳細な情報を使って迅速に異常を検知できるだけでなく、異常解消後の安全確認も早くでき、必要に応じて退行することも容易である。また、一部の列車の周辺で異常が発生して減速・停止が必要となっても、安全に支障しない区間の列車には波及しないという効果も期待できる。

3.2 鉄道総研が提案する自律型列車運行制御システム

列車を自律化するためには、これまで地上の装置が持っていた停止目標位置を判断する機能を車上に移し、線路内の監視情報に基づいて停止目標位置を再設定するアルゴリズムが必要となる。また、踏切内と線路内の異常の有無を自動で検知する技術が必須となるほか、列車の運行に必要な情報を構成要素間で共有するためのネットワークも必要である。

なお、特に首都圏のように列車密度が高い線区、あるいは支線や列車種別が多く運行パターンが複雑な線区があるエリアでは、複数の列車が相互に動けなくなってしまうデッドロックや、他の列車の運行を阻害してしまうことが懸念される。そこで、線区全体の列車の動きや、旅客の流れ、またリアルタイムハザードマップ、メンテナンスなどの情報を集約し、列車に対して発車のタイミングや駅の番線などをアドバイスするスーパーバイザー的な役割を果たすシステムが必要と考えている。

すなわち、自律型列車運行制御システムとは、周辺の状況に基づいて自ら安全を確保しながら走行する列車と、線区全体の状況を見て安心を提供するために管理を行う地上のスーパーバイザーが、それぞれ自律的に動作することで、安全・安心な輸送を提供するシステムである(図2)。

このシステムでは、列車から地上のスーパーバイザーへは状態情報だけを伝えればよく、またスーパーバイザーから列車へは、常時は「システムが正常」である旨のメッセージを流しておき、必要に応じて運行上のアドバイスを与えればよい。すなわち、列車を自律化させることによって、安全に関わる情報の伝送を列車周辺だけに限定でき、安全確保に必要な最低限の情報は列車内でクローズできるため、情報セキュリティ対策上も有利と考えられる(図3)。

4. 自律化に向けた要素技術に関する研究開発

4.1 踏切内・線路内の監視に関する研究開発

近年、カメラやレーダー等のセンシング技術、画像処理や機械学習による状態の判断・予測技術の急速な高度化により、従来は困難であった、走行中の列車の進路上の異常を自動で検知するシステムを実現できる可能性が高まっている。鉄道総研では、乗務員の負担軽減と、将来の自動運転の実現に資するため、最新のICTを活用して踏切内や線路内の異常を自動で検知する技術の研究開発に取り組んでいる。

これらの技術は、自動運転には必須であるばかりでなく、非自動運転システムにおいても運転士の支援システムとして安全性を向上するうえで有効であるため、早期に実用化すべき最優先課題と認識している。

(1) 画像処理による線路内の異常検知

踏切内の異常検知については、従来は自動車の検知を目的として、レーザービームを踏切道内に照射するシステムや、レーザーレーダ等を使用するシステムが導入されてきた。しかし、これらのシステムでは、ある一定以上の大きさがなければ検知できない、あるいは検知できない範囲があるなどの制約があった。そこで、鉄道総研では、遠赤外線カメラでとらえた温度映像から、画像処理によって踏切内の異常を検知するシステムの開発を進めている⁹⁾。このシステムでは、図4に示すように、機械学習の技術を活用することによって踏切内の異常を認識でき、かつ2系統で同じ処理を行って結果を照合することで信頼性を高めている。2017年度までに降雨や降雪など各種気象条件下で検知性能の確認試験を実施し、検出すべき対象が検出できない時間が700ms以上継続しないことを確認した。この方式では、温度差から対象を検知するため、路面温度と検知対象物の温度が近いと未検知もしくは誤検知となる可能性がある。温度差が小さい場合でも検知できるアルゴリズムへと改良を行い、今年度から、複数の実際の踏切においてフィールド試験を行って検知性能の確認を行い、2020年度までに実用レベルに到達することを目指している。

(2) 複数センサーを統合した列車前方の異常検知

列車上から前方の異常を検知する技術については、2016年度までに、運転台に設置したカメラの映像から、30cm×30cm大の物体を最遠で230m先から検知でき、150m以内では80%以上の検知率で検知できる技術を開発した。これは、映像の時間的・空間的な差分をとることによって、異常の有無を判定する技術を応用したものである。機械学習の技術を活用した人物の検知手法についても検討を行い、照明の条件にもよるが、最遠で250m先から検知しはじめ、180m以内では90%以上の検知率で検知できることを確認した¹⁰⁾。

しかし、現在の画像処理技術だけでは遠方の異常を検知することは困難であることから、2018年度からはセンサーフュージョン技術によってカメラと

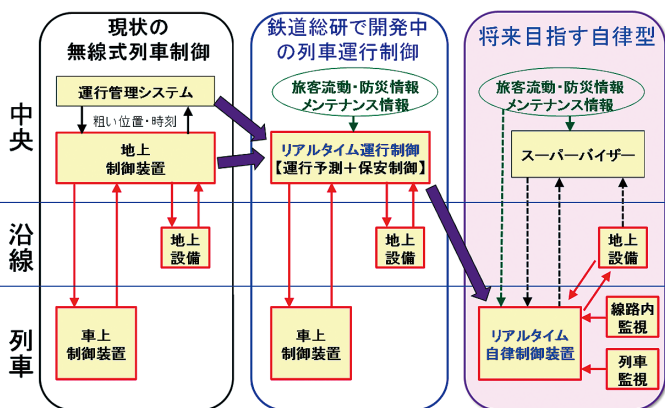


図3 従来型と自律型の比較

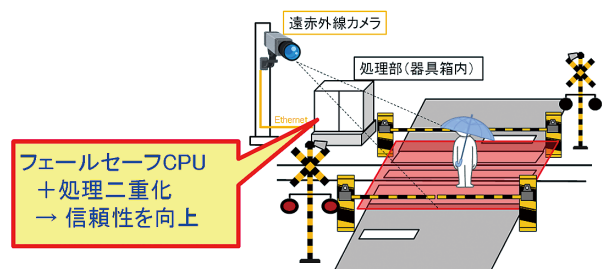


図4 画像処理による踏切内の異常検知

距離センサーを組み合わせ、誤検出を抑制した異常検知アルゴリズムの開発に取り組んでいる(図5)。

さらに、車上からの監視だけでは、曲線や山間部など見通しのきかない区間での異常が検知できないなど限界があるため、2015年度までに開発した90GHz帯レーダーの技術¹¹⁾も活用することで、2020年度までに300m先の異常を検知できる技術を開発したいと考えている。さらには、2023年度までに600m先の異常が検知できる技術の確立を目指している。

なお、画像処理と機械学習の組合せによる状態監視の技術は、急速に高度化しており、線路内監視に適用できる可能性がある。しかし、現状の機械学習の技術では、学習していない事象が発生した場合の検知出力が予測できない、検知結果に至る判断プロセスが見えないなど、安全に直結する監視システムに適用するには解決すべき課題が多い。将来、これらの課題が解決される可能性はあるが、線路内監視も含め、鉄道の安全に直結する判断や予測に機械学習の技術を適用する際には、慎重な検討と検証が必要である。

4.2 鉄道運行向け情報ネットワーク基盤

自律化するうえでは、列車や沿線の各種設備などの間でやりとりされる情報への依存性が高まるため、分野横断で情報を共有するための情報ネットワークと大容量で高信頼の伝送路が必要となる。さらには、異なる分野間で列車の位置や設備の位置を相互に認識するための仕組みも必要となる。そこで、鉄道総研では、鉄道運行向けの統合情報ネットワークと、位置情報を一元的に扱うためのフレームワークの開発を進めている。

(1) 分野横断での情報共有のための通信ネットワーク

現在、列車の運行に必要な情報の伝送は、車両、信号、運転といった業務分野ごとに個別に行われており、データの形式や伝送方法が様々である。このため、自律化を行おうとした場合、必要な情報をリアルタイムで得ることが困難となっている。そこで、分野間で情報の相互利用ができるよう、データ形式を統一し、共通して使える通信手順(プロトコル)の開発を進めている¹²⁾。

従来のネットワークでは、ユーザーが情報を得ようとした場合、その情報を保有する相手先を指定して通信を行い、情報を取得している。これに対し、ユーザーが必要とする情報を指定すれば、その情報の場所を知らなくても所望の情報を取得できるネットワーク技術が開発されている。これは、情報指向型ネットワーク(Information Centric Network: ICN)もしくはコンテンツ指向型ネットワーク(Contents Centric Network:

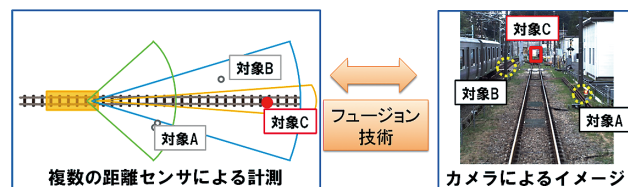


図5 画像処理による踏切内の異常検知

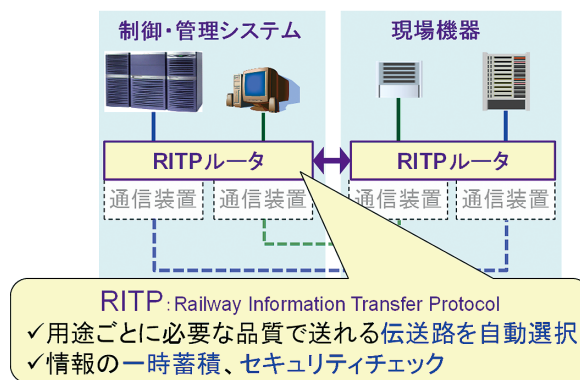


図6 鉄道運行向け統合情報ネットワークと専用プロトコルRITP

CCN) と呼ばれる技術である。鉄道総研が開発している統合情報ネットワークは、このICN/CCNの考え方に、ネットワークを流れる情報の優先度に応じてデータの流れを制御するQoS(Quality of Service)技術を組み合わせることで、アプリケーションが伝送路や情報の場所を意識することなく、鉄道運行に必要な情報を取得できるネットワークを目指している。

また、列車の運行に係る情報を扱うネットワークであるため、鉄道における保安情報の伝送に関する国際規格IEC 62280や情報セキュリティ規格IEC 27000シリーズ等を参照しながら、鉄道用の情報ネットワークとして具備すべきセキュリティ機能の考え方や、異常時に安全を確保しながら運行を継続するための情報伝送のあり方についても検討を行っている。

2016年度までに基本的なデータ形式と通信手順をRITP(Railway Information Transfer Protocol)として定義し、シミュレーションによって一部の機能が所定の動作を行うことを確認した(図6)。2019年度には伝送媒体路の状態を自動計測して伝送経路を選択する機能とセキュリティチェック機能の一部を実装し、鉄道総研の所内試験線に実際にネットワークを構成して機能確認試験を行う予定である。2020年度以降は、所内試験線で実務に活用して実用性を検証しながら、プロトコル標準化に向けて提案を行う予定である。

(2) 第5世代移動体通信システム(5G)の活用

前節で述べたRITPによる情報ネットワークを実際

に稼働させるためには、実際に情報を伝送する通信システムが必要である。これまで鉄道事業者が構築してきた自営の通信網を活用するほか、近年信頼性と通信速度の向上が著しい汎用の移動体通信技術を活用することも検討している。

特に、2019年度から部分的なサービス開始が予定されている第5世代移動体通信（“5G”と呼ばれる）は、現在利用されているLTE携帯電話網の100倍以上となる10Gbpsの伝送容量が実現される見込みである。これにより、大量のデータを伝送するアプリケーションだけでなく、IoTのようにデータ量は少ないものの膨大な数のセンサーや端末を接続するようなアプリケーションにも対応可能となることが期待されている。鉄道においては、この5Gの特徴を利用することにより、大容量伝送を活かした地上～車上間の画像・データの伝送や、低遅延伝送を活かした制御情報の伝送、また多数の現場機器やセンサーを収容できるモニタリングシステムの実現などが期待できる（図7）。5Gが利用可能となり次第、前節で述べたRITPとの組み合わせにより、鉄道として求められるセキュリティを考慮した情報ネットワークを構築する手法の研究開発に取り組むと考えている。

4.3 設備位置の一元管理化

現在、列車の位置や地上設備の位置は、分野によって異なる方法で計測、表現されている。自律型列車運行制御システムを実現するためには、列車や様々な設備の位置を一元的に管理する必要がある。位置管理を一元化する方法としては、統一的な位置指標を定義し、全ての分野の位置表現を変換する方法が考えられるが、これまで蓄積されてきた管理台帳や状態情報のデータとの親和性を確保することが難しいという課題があった。そこで、鉄道総研では、図8に示すように、従来の位置表現を地理座標表現（緯度・経度・高度）とリンクすることにより、設備ごとの位置表現を相互変換することで、従来の位置表現を活かしながら、分野間での位置情報を共通化するフレームワークを開発している。このフレームワークは、位置表現を変換するためのデータベースの定

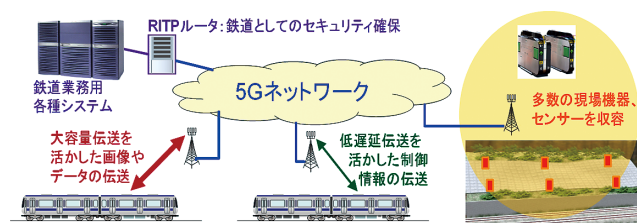


図7 第5世代移動体通信技術(5G)の活用

義と、変換を行うミドルウェアから構成される。2019年度にプロトタイプを開発し、所内試験線に適用して沿線設備と試験車両の位置の相互変換ができることを確認する予定である。なお、この設備位置の一元管理手法は、メンテナンスの高度化にも必要な基盤技術である。

5. 自律型列車運行制御システムの姿

前章までに述べてきた列車運行制御の自律化の考え方と、現在研究開発に取り組んでいる技術を組み合わせることにより、将来、図9に示すような自律型列車運行制御システムを実現できると考えている。なお、通常運行時の旅客への案内や、異常時の対応を行うため、運転資格を持たない係員が乗務している形態を想定している。

この自律型列車制御システムでは、以下のような運行が可能となる。

(1) 正常時

列車と転てつ機・踏切が相互に通信し、列車の進行に応じて、各列車が転てつ機・踏切を制御し、前方の安全を監視しながら進行する。

(2) 踏切で異常が発生した場合

踏切内に留まった自動車や人を地上のセンサーで検知し、列車に伝送する。列車は前方監視も行いながら自律的に減速し、踏切の手前で停止する。自動車や人が踏切から脱出し、踏切を安全に進行できる状態になった時点で、列車が踏切の状態を確認し、安全を確認しながら運転を再開する。

(3) 列車の進路上で斜面崩壊等が発生した場合

地上のレーダーセンサーで斜面崩壊を検知し、現場に進行してくる列車に情報を伝達、列車は自律的に減速し、停車する。沿線の画像やセンサー情報から、復旧に時間がかかることを判断し、運転方向を切り替え、後続列車と情報交換をしながら、前駅に戻る。

このような列車運行制御が可能となれば、様々な形態

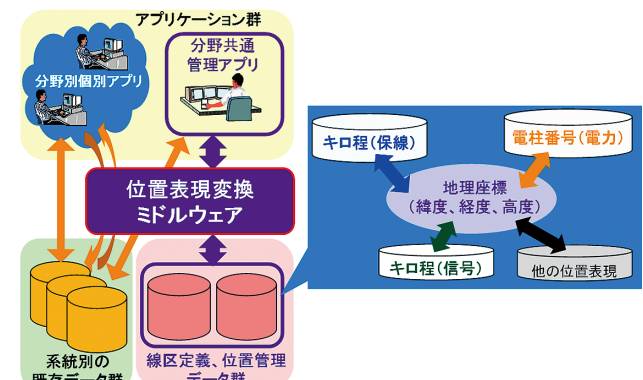


図8 鉄道設備の位置情報の一元管理

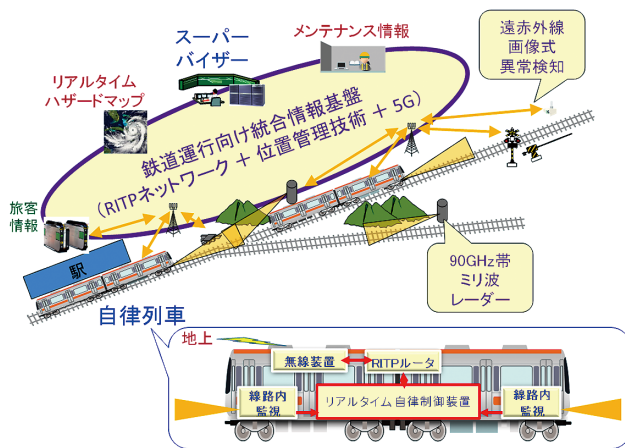


図9 自律型列車運行制御システムの姿

の自動運転の実現も可能となる。自動運転システムは、人が担っていた役割をどこまでシステムに持たせるかによって、幾つかの種類がある。鉄道の列車運行に関する自動化の程度の分け方は、都市鉄道の指令／制御システムの要件を定めた国際規格 IEC62290-1 (JIS E 3802) によって定義されている GoA (Grade of Automation) が用いられる。運転士が乗務して出発操作を行う GoA2 や、運転資格を持たない係員が搭乗して運行する GoA3 については、乗務員と自律列車制御システムの双方が協働することでさらに安全性を高めることが可能となる。さらには、現在は導入されていないオープンな環境にある一般線区への展開も期待できる。また、無人運転の形態である GoA4 の安全性向上にも活用可能である。

6. おわりに

本発表では、列車運行制御の自律化がもたらす安全性の向上について、列車の安全運行を支えるための線路内の異常を検知する技術の研究開発状況を紹介し、自律型列車運行制御システムの考え方と効果について述べ、自律化に不可欠な技術のうち、線路内の監視と情報共有化技術の研究開発状況と今後の取り組みを紹介した。

列車運行制御を自律化することにより、詳細な情報に基づく異常の早期検知と、現場での危険回避が可能となり、異常時でも、安全に支障しない区間は運転を継続できる強靱性をも備えることが期待される。自律型列車運行制御システムが安全を確保することで、指令・乗務員双方の負担を軽減でき、人間は安心を提供するための人間的な活動に注力できる。様々な異常に対して人間とシステムとが協調して対応することが可能となれば、将来、自動運転を一般線区に展開することも期待できる。

ただし、自律型列車運行制御システムの実現には、検知漏れがなく誤検知を抑えた線路内監視の技術と、情報ネットワーク上でのセキュリティ確保の技術が必須となる。非常に難易度の高い課題と認識しているが、今後もさらに高度化する ICT を活用しながら、課題解決に挑み、新しい列車運行制御システムの開発を通じて、安心して利用できる鉄道システムの実現に貢献していきたい。

なお、本稿に記載した内容の一部には、総務省の「電波資源拡大のための研究開発」による研究が含まれている。

参考文献

- 1) 水野寿洋：ATS・ATCの導入経緯と今後の展開，JREA, Vol.49, No.5, pp.31602-31605, 2006
- 2) 水間 毅：鉄道における自動運転の歴史と今後，計測と技術，第56巻，第2号，pp.93-98, 2017
- 3) 秋田雄志：電子連動装置スマイル，RRR, 第69巻，第3号，pp.40-41, 2012
- 4) 黒岩 篤：無線による列車制御システム「ATACS」の使用開始，JRガゼット，2012年4月号，2012
- 5) 渡辺郁夫：無線式列車制御の動向，鉄道総研報告，Vol.25, No.5, pp.1-4, 2011
- 6) 杉山陽一，岩田浩司，山本春生：運行管理と保安制御を融合した列車運行制御システムの基礎検討，鉄道総研報告，Vol.32, No.5, pp.35-40, 2018
- 7) 太田岳洋：気象災害ハザードマップのリアルタイム化による鉄道防災ネットワークの構築，第28回鉄道総研講演会要旨集，pp.16-21, 2015
- 8) 辰井大祐，中挾晃介，國松武俊：ニューラルネットワークによる列車運行予測手法，鉄道総研報告，Vol.31, No.10, pp.29-34, 2017
- 9) 中曾根隆太，新井英樹，長峯望，竜本ジョ，大森達也：遠赤外線画像を用いた踏切障害物検知装置の開発，平成30年電気学会全国大会講演論文集，pp.344-345, 2018
- 10) 中曾根隆太，長峯望，鷗飼正人，向嶋宏記，出口大輔，村瀬洋：画像処理技術を用いた前方障害物検知装置の開発，鉄道総研報告，Vol.31, No.3, pp.11-16, 2017
- 11) 川崎邦弘，中村一城：ミリ波技術の鉄道応用に関する動向，鉄道総研報告，Vol.30, No.1, p.54, 2016
- 12) 中村一城，川崎邦弘，竹内恵一，流王智子：列車運行向け情報統合ネットワークの提案，鉄道総研報告，Vol.32, No.5, pp.41-46, 2018