

論文の内容の要旨

氏名：齊 藤 嘉 久

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：階層化による統合型列車制御システムの開発に関する研究

申請者が本研究論文で提案する『統合型列車制御システム UTCS: Unified Train Control System』は、列車保安制御の根幹とされる閉そく装置や連動装置を廃止して、列車制御を成立させるという先進的技術開発に関係するものである。『UTCS』は、システムの構成要素が情報交換を行う中で、既存の制御装置が無くとも保安制御を可能とする IoT 時代の新たな列車制御システムを志向している。

本論文では、提案する『UTCS』と既存列車制御システムとの関係や基本的な構成概念、そして非機能要件を含めたシステムの評価、応用事例について論じるものであるが、研究の成果を本研究論文の構成に沿って、その内容について示す。

第 1 章「序論」では、本研究実施に際しての背景を明確にするとともに、列車制御システムの大系を整理する。列車制御システムにおける保安制御は鉄道信号システムとして論じられるが、今日の列車制御は安全制御のみに止まらず、安定・安全・効率的輸送を担うリアルタイム制御が重要となっており、この処理部分は列車運行管理系と呼ばれている。本論文では、鉄道信号システムと列車運行管理系を、併せて列車制御システムと位置づけ、論文の扱う範囲を明確化している。本章では、さらに本論文を構成する第 2 章から第 7 章について、各章における主要な内容について述べている。

第 2 章「既存列車制御装置・システムの特徴と分析」では、既存列車制御システムの中で、特に列車の安全運転を目的とした列車保安制御を担う信号保安を中心に、その特徴を分析する。信号機と転てつ機の連査により、安全な駅構内の列車運転を行おうとした機械式信号から始まった信号保安システムは、百数十年をかけてデジタル情報処理のコンピュータ制御まで進化していった。その進化は、運転士をバックアップする停止信号の冒進防護、速度照査と情報伝送の連続制御化、運転士に代わって安全性を確保する車内信号化、そして列車自体の位置検知による円滑な高密度運転化へと辿っていったことを述べている。

さらに、これら保安制御と併せて、年間の鉄道運転事故件数の多くを占める踏切部分の安全性確保も重要な課題となっていることを示すとともに、これら既存の信号保安装置として、閉そく装置・連動装置・ATS/ATC 装置・踏切保安装置について述べ、その役割と現状、そして課題と共に、これからのあるべき姿を展望する。

第 3 章「階層化による既存列車制御システムの再構築」では、第 2 章で抽出された課題を解決する方法について検討する。この中で、今日最も進んだ列車制御システムと言われる無線式列車制御システム: CBTC についても分析し、処理部を沿線に分散配置するのではなく、センターに一元化することの有効性を明らかにする。

そして CBTC を含め、既存列車制御システムが、それぞれ抱える課題を分析し、連動装置や閉そく装置、ATS/ATC といった制御装置を、現場に設備・配置する従前の考えではなく、システムの安定稼働を保証するアシュアランス技術に則した鉄道システムとして、転てつ機、踏切、そして列車を I/F する“端末層”と、センターの中央処理である“機能層”そして、その間をつなぐ“ネットワーク層”からなる階層化の新たな概念について示すと共に、現場の情報が“機能層”へ、リアルタイムで一元的に収集・フィードバックされるシステムが、より高度な列車制御システム実現に適していることを示す。

第 4 章「統合型列車制御システムの提案」では、前章で得た既存列車制御システムに対して、無線通信により接続する『UTCS』が課題解決に有効との見通しのもとに、本章では『UTCS』の具体的な検討を行った。まず、列車制御システムを階層的に再構築するための前提を明らかにし、『UTCS』の“機能層”・“ネットワーク層”・“端末層”のあるべき姿を論じる。

この中で、機能層に位置する統合型処理部では、列車に対する転てつ制御、踏切制御、前方列車位置探索等を一元処理するために、“支障点”という概念を導入し、踏切や転てつ機を含んだ経路の安全運転を駅中間と同様に実施する“走行路”として定める。その結果、論理を現場からセンターに集約することに成功すると共に、論理を有した“機能層”と、現場機器とのインタフェースを司る“端末層”、そして両者をつなぐ“ネットワーク層”から成る“横割りの 3 階層構造”で統整合理できることを示す。

これにより“機能層”のセンター統合処理部による列車に対する支障点の探索処理により、走行路を確定し、“ネットワーク層”を介して、“端末層”に位置する車上制御装置に送信制御する新しい概念で支障点を探索し、走行可能地点を車上に送信すれば ATC/ATS 装置は不要となる。また駅構内においても支障点探索が連動の位置づけとなることから、従来の駅連動装置は不要となり、駅構内も駅中間も同様の保安制御が実現可能となることを明らかにする。

さらに、本章では、『UTCS』の安全性を、既存の自動閉そくによる信号方式及びデジタル ATC と比較して評価する。評価は概念設計レベルの FTA 解析で行うが、自動閉そくやデジタル ATC が、現場機器の故障により、危険側に遷移する可能性があるのに対し『UTCS』は、多くの処理がメッセージ交換が進むため、通信上の適切な対策を施すことにより、高い安全性が確保されることを明らかにする。

また、本章では『UTCS』の導入効果を分析し、8 項目の効果が期待できることを明確に示す。これらの効果は現在の鉄道システムが抱える根本的な課題解消に結びつくものであり、『UTCS』の早期実現が望まれるとの結論を示す。

第 5 章「統合型列車制御システムの検討とケーススタディ」では、『UTCS』の応用に関する検討成果を論じる。この中でユーザである鉄道事業者が、デジタル ATC や既存 CBTC を指向した場合でも、『UTCS』を用いることで、デジタル ATC の地上設備が大幅に削減できる他、将来的に CBTC への移行を考慮した場合もスムーズに移行・実現できることを示す。さらに、『UTCS』と他の既存列車制御システムとの関係も明らかにする。

また、『UTCS』の持つ駅構内の柔軟な走行（移動閉そく）を実現する方法として、走行路探索に用いる“新連動表の開発”と、その概念を明らかにする。駅構内を走行する列車の安全を守る連動装置の中で、安全の確保に重要な意味を持つのが各種の鎖錠機能であった。本論文では、様々な鎖錠機能が果たしている役割を分析し、その結果、進路設定・進路復位の要求および処理を一元化することで、多くの鎖錠機能が等価的に実現されていることを明らかにする。さらに、これまでの一つの進路には、1 列車しか存在できないという限界も、走行路探索を用いることで、CBTC の駅間における間隔制御と同様に、駅構内にも“移動閉そく”が導入できるとの結論を導く。そして、これを実現する連動表について検討・検証し、走行路探索に用いるブロックの情報を“行”とする“新たな連動表”を提案するとともに、そのもとでの列車制御の方法について明確にする。この新たな制御処理は、転てつ機、車上装置、踏切装置といった本質的に削除できない要素が、センターの統合型処理装置とネットワークを介して接続することで成立するものであり、申請者が提言する『UTCS』の処理に符合する、“次世代の連動の姿”であると言える。

さらに、そのケーススタディとして、実フィールドでの実車試験も完了し、実用の域に達した『ATP 閉そくシステム』についても論じる。『ATP 閉そくシステム』の導入は、地方交通線区の老朽更新期を迎えた電子閉そく装置の後継機種システムとしても最適であり、現状維持や延命ではなく、汎用の情報・通信技術を利用した廉価な『ATP 閉そくシステム』の導入が、安全性の高い運行制御と効率的な保全を提供できることを示す。これにより、『ATP 閉そくシステム』が支える低コストで、効率的な運転により地方鉄道の競争力を高め、鉄道交通を核とした新しい地域の再生に有効であることを示す。

第 6 章「システム論から見た統合型列車制御システム」では、『UTCS』を鉄道システムに留まらず、一般的なシステム論から見た位置づけについて検討する。検討には、今日の ICT 利用システム技術の説明が合理的に可能な「Safety2.0」の視点から評価する。Safety2.0 は、産業機械や装置・システムの安全性への配慮が、従事者の注意力に委ねていた Safety0.0 の時代から、安全を司るインターロックや保護装置などを駆使して従事者の注意力欠如が事故に至ることを防止する Safety1.0、そして ICT の時代に可能となった協調安全を特徴とする Safety2.0 に遷移する過程を説明する。

そして、Safety2.0 は、システムを構成する要素が情報交換を行う中で、より高度な安全を確保しようというもので、まさに IoT 時代のシステムアーキテクチャでもある。この点で見ると『UTCS』は Safety2.0 の中でも最も進んだ“本質制御の概念”に基づくシステムであることを確認する。

さらに、システム論としては交通システムで重要視されている“MaaS”を取り上げ、『UTCS』が MaaS に大きく寄与できるだけでなく、『UTCS』の概念を MaaS に持ち込むことにより、交通システムの発展にも貢献できることを示す。

第 7 章は「結論」として、本論文の各章の目的と各章の結論について整理して述べている。併せて、今後の課題についても論じる。

本申請論文の内容の“先駆性と新規性”は、すでに多くの評価を得ており海外論文誌に掲載された本申請論文のベースとなる論文のダウンロード数の多さが出版社から報告された他、国内では本申請論文のベースとなる論文が、平成 30 年の電気学会における「論文賞」に選ばれている。

鉄道事業者においても、本申請論文の提案する機能の一部実用化を目指した技術開発が行われているほか、地方鉄道向けのシステムは、鉄道経営改善の技術的な方策として注目されるなど、一日も早い実用化を目指した取り組みが求められている。本申請者は、引き続き『UTCS』の実用化に向けて、今後も奮闘する覚悟である。