

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04458

研究課題名（和文）省エネルギーと輸送品質とを考慮した鉄道システムの知的リアルタイム制御技術

研究課題名（英文）Smart Real-time Control for Railway Systems Considering Energy Efficiency and Quality of Transportation

研究代表者

宮武 昌史（MIYATAKE, Masafumi）

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：30318216

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：物理現象を良く理解した機電系の研究者と人工知能を新たに制御に取り入れる情報系の研究者とが協調し、物理現象をきちんと考慮したうえで、人工知能技術を適用し鉄道システムの省エネルギー及び旅客サービスを高いレベルで実現した。具体的には、強化学習を用いた新しい制御手法を進展させ、地上設備の電力機器の制御方法へ応用し、その定量的な効果実証をきちんと行ったことが最も大きな成果として挙げられる。これに付随して、より精緻な制御や効果評価を実現するために、地上・車上の回路モデル等の深度化も継続して検討した。これにより、省エネルギー効果をより正確に評価することができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンニュートラル社会のモビリティに鉄道の利用拡大は欠かせないが、鉄道自体の省エネルギー化も強力に推し進めなくてはならない。本研究課題では、物理モデルに基づいた電気鉄道の車両や蓄電装置等の知的設計制御手法の開発を行った。この成果により、少ない設備投資金額で、鉄道の輸送サービスの質を保ちながら省エネルギーを実現できるようになる。今後の我が国の鉄道業界の発展や国際展開に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Researchers in mechanical and electrical engineering, who have a good understanding of physical phenomena, and researchers in the field of information engineering, who are newly incorporating artificial intelligence into control, have collaborated in this research. As a result, we achieve a high level of energy conservation and passenger service in railway systems by applying artificial intelligence technology with proper consideration of physical phenomena. Specifically, the most significant achievement was developing a new control method using reinforcement learning, its application to the control of power equipment in ground facilities, and the demonstration of its quantitative effectiveness. In addition, we also continued to study the development of more in-depth ground and on-vehicle circuit models, etc., to achieve more precise control and effect evaluation for a more accurate evaluation of energy-saving effects.

研究分野：電力変換制御

キーワード：電気鉄道 省エネルギー 輸送サービス 知的制御 強化学習

1. 研究開始当初の背景

環境負荷が低く、安全な交通インフラである鉄道システムの利用は、地球温暖化問題や大気汚染等の軽減だけでなく、安心な社会実現の鍵を握っている。その地位を獲得した要因として、電化及び列車制御技術の向上が挙げられる。これは、電力と情報通信技術が学術的な支えとなり、今日の我が国の優れた鉄道システム技術が出来上がっている。

しかし、我が国の鉄道システムの将来は必ずしも安泰ではない。海外（欧州と中国）では国や自治体等の支援もあり、情報通信技術等を利用して省エネとサービス向上を図るプロジェクトが盛んである。その一方で、我が国の鉄道システムは、有能な「プロ」のスキルに頼って発展してきていて、地に足の付いた技術が確立されているが、数理モデルを用いた学術的なアプローチは十分でなく、今後の世界の自動化の流れに取り残されることが懸念される。

近年の内外での先進的な鉄道システムの研究開発では、人工知能（Artificial Intelligence: AI）の関連技術がしばしば利用されている。例えば、クラスタリング技術により複雑な鉄道システムのシミュレーション時間を大幅に圧縮する、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm: GA）や粒子群最適化（Particle Swarm Optimization: PSO）などのメタヒューリスティックにより複雑かつ非線形なシステム設計の最適化を計る、深層学習により過去の膨大な走行データから省エネな運転方法を見出す事例が見られる。

しかしながら、情報系の専門家みでの開発だと、実際の物理現象からなる相関関係や因果関係を無視してブラックボックス化するきらいがあり、その弊害に警鐘を鳴らすことが当初の背景にあった。このようなシステムの技術開発においては、電気や車両運動などの物理現象に根ざした制御を志向し、情報系と工学系（機電系）が協調し、場合によっては両方で折り合いを付けていくことが必要と考える。その中で、強化学習は、設計手法によってはモデル内部の可読性を高くできるため、本課題での適用性を考えることとした。

このような鉄道システムの研究開発を行うことで、「複合知」による研究開発の方法論を構築することを試みることを、学術的「問い」として挙げた。

2. 研究の目的

本研究課題では、物理現象をきちんと考慮したうえで、人工知能技術を適用し、鉄道システムの省エネ及びサービス（所要時間と定時性）を高いレベルで実現する方法論を構築することを目的とした。特に、鉄道の運行と制御に焦点を当て、電力機器や列車の制御によりこれを実現することに主眼を置いた。

そのなかで、本研究課題における学術的独自性及び創造性を次のように定めた。

- 物理モデルに根ざした制御則と人工知能による制御との比較、特に双方の効果と限界を、複雑かつ非線形な特性を持つ鉄道システムに適用しつつ検討する。
- システムのどこまでを厳密にモデル化し、どこからをブラックボックス化するかを折り合いを付ける。
- 物理モデルの範囲で検証可能な最適解答を学習に用い、人工知能による制御則を最適なものに近付けていく。
- 厳密な物理モデルを元に導かれた制御則と人工知能による制御とを比較して有効性を評価し、さらに複雑なシステムでの強化学習による制御の適用可能性を検討する。
- 既知の外乱に対してはロバスト的に、未知の外乱に対してはある程度適応的に対応できることを検証する。
- 物理モデルで生じるスケーラビリティ（大規模システムへの適用性）の問題に対し、人工知能による制御則が役立つことを検証する。

このような検討を小規模な研究チームで密に協調を取りながら行うことで、技術の縦割を打破した創造性を担保することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、鉄道システムの計画及び制御を先進的なものとするに加え、それを例として、物理的なモデルを意識したうえで人工知能技術を適用する方法論を明らかにしようとした。人工知能技術の中でも、研究者が既に知見を持っている強化学習の適用を念頭に研究の方法を定めた。

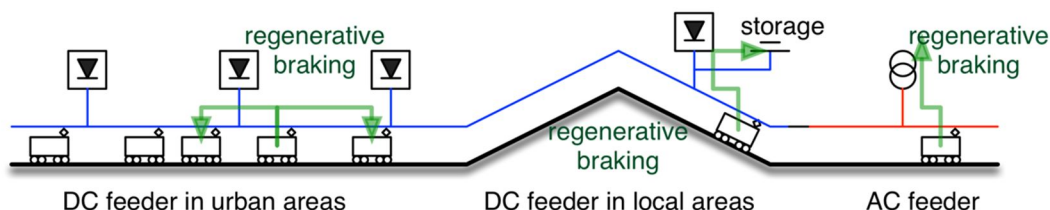


図1 対象とする路線条件

本研究で対象とした路線条件は、図1の通りである。直流き電システムにおいては、列車密度が比較的多い所で回生ブレーキにより発生した電力を他列車にうまく供給できるような加減速のタイミングを図り、列車密度が少ない所では蓄電装置を利用して回生電力を貯蔵することを対象とした。また、交流き電システムについてもそのモデル化を検討するようにした。

年度毎に計画された研究方法は次の通りである。

[2019 年度]

まずは既に予備的な検討が行われている地上設備の制御から検討を開始する。蓄電装置の充放電や変電所の送出電圧制御などを想定し、省エネと機器（蓄電池等）寿命の二面的評価を考えた制御方法を検討する。評価のための物理モデルの構築と強化学習による制御方法の改善を並行して実施し、電圧をベースにした従来の制御方法との比較を行う。

[2020 年度]

次に、車両側の制御として、加減速制御により加速する電車と減速する電車のタイミングを合わせ、回生電力の有効利用を図るリアルタイムの制御則を考える。車両側でどのような情報を利用するかを考慮し、強化学習による制御方法を検討しつつ、電圧をベースにした簡易な制御方法と比較を行う。

[2021 年度]

2年間の検討を踏まえ、地上側と車両側の制御を総合的に組み合わせ、列車の運行に関わる部分に踏み込む。省エネに加え、瞬時の電力デマンド、旅行時間、遅延リスクなどの多面的評価を考えた制御及び運行計画（ダイヤ）について検討を進める。

さらに、アドバンストな将来の鉄道システムをも見据える。例えば、海外の一部地下鉄のようにダイヤのない運行を想定し、フレキシブルに省エネ、輸送力と所要時間のバランスを高度に取る制御を考える。遅延の概念が存在しない際のサービスの考え方を検討する。

ターゲットとした技術像は図2の通りである。これらの検討を通じて、最終的に、我が国の強みである鉄道システムの優位性を高め、国際競争力を増すための学術及び技術基盤を与えることを目指した。明らかになった成果については、国内外の学会等で論文や口頭発表の形で積極的に社会に広め、フィードバックを得るようにした。

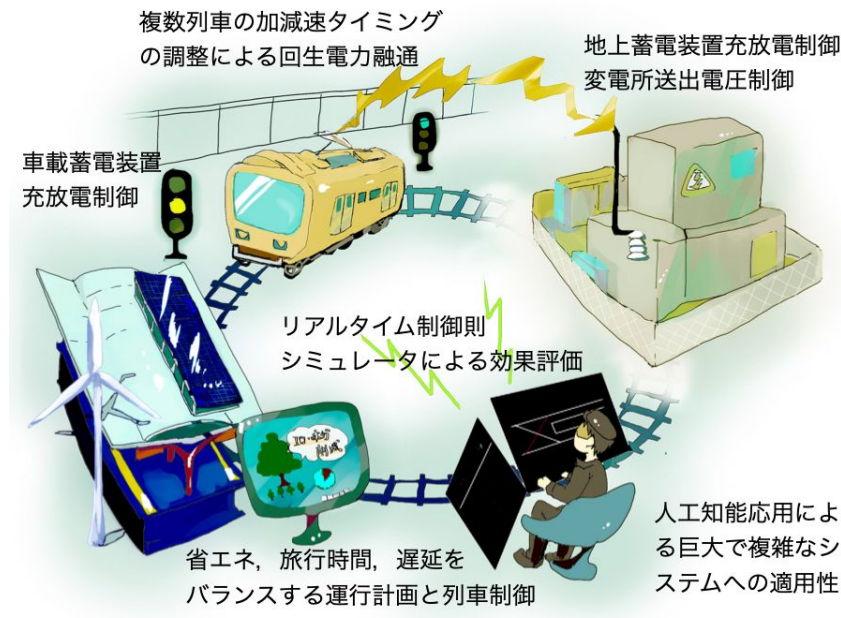


図2 ターゲットとした技術像

4. 研究成果

本研究課題で得られた成果を年度ごとに次の通りまとめる。

[2019 年度]

まず、対象とする鉄道地上設備の物理モデル構築を行った。具体的には、列車の衝突を防ぐ信号保安システムや回生電力を考慮して列車を最小エネルギーで走行させるための解析モデルを検討し、省エネルギー性を評価した結果を論文として発表した。また、より正確な電力やエネルギー評価のための電力回路モデルについても検討を進めた。

次に、蓄電装置の充放電などを想定し、省エネルギーと機器（蓄電池等）寿命の二面的評価を考えた制御方法を検討した。具体的には、電圧によるルールベースの従来型蓄電池充放電制御方式に対し、今回新たに深層強化学習による制御方法を提案・改善し、双方の比較検討を行い、提案方式が省エネルギー及び充電状態の安定性において優位であることを確認し、その成果を学会で発表した。また、複数機器の制御について、自律分散的な考え方を導入する方法論の基礎についても検討し、その内容を学会で発表した。関連技術として蓄電池搭載電車についても検討を行い、蓄電池の充電状態によって電車の性能が変化することを考慮した複数駅間の走行時間配分を最適に決定する方法を構築して、省エネ効果を得られたため、その結果を論文として発表した。

さらに、回生電力の有効利用に関して、加速する電車と減速する電車のタイミングを合わせるための運行計画(ダイヤ)を遺伝的アルゴリズムで導出する方法論も確立し、省エネルギー効果及び小遅延に対するロバスト性を得たため、その成果も学会で発表した。

[2020 年度]

当該年度として最も大きな実績は、地上設備の電力機器の制御方法として強化学習を用いた新しい手法を進展させたことにある。また、それだけではなく、その効果の実証に不可欠となる定量的な評価にも取り組んだ。評価においては、直流電化区間における地上蓄電装置の充放電制御を実例として使い、本研究課題で提案する強化学習ベースの制御法と、電圧をベースにした従来の簡易な制御法と同条件下でシミュレーションにより比較検証し、提案手法が従来手法より有意に蓄電装置の充電率を安定に制御できることを確認した。今後の研究の進展につながる課題として、ピーク電力抑制への対応、学習のロバスト性の検証、マルチエージェント環境への拡張などがあり得ることを明らかとした。

これらに関連し、回生電力を有効に融通するための電車の加減速のタイミングを合わせる方法、地上側の駅設備等で回生電力を有効利用する方法などを、遺伝的アルゴリズムや混合

整数計画法を用いて解析することで、一定の省エネルギー及びピーク電力抑制効果が得られることを明らかとした。また、直流電化区間だけでなく、新たな対象として、交流電化区間における電力回路のモデル化などにも取り組んだ。

これらの成果をもとに、査読付論文誌及び国際学会にて3件、学会発表にて4件の成果公表を実施し、また次年度にも当該年度で得られた成果の発表を予定している。

[2021年度]

本課題の最終年度は、回路等のモデルの精緻化や列車の運行計画に関わる部分に踏み込んだ検討、及び、逆強化学習の導入を行った。

前者では、中国やインドの例も含め、電力供給システムをより正確にモデル化する検討を進めた。そのモデルを実装したうえで、フレキシビリティの高い条件のもとでの複雑なダイヤ最適化を行い、旅客サービスレベルを維持したままで省エネを実現した。また、カーボンニュートラル化という課題を見据え、太陽光発電で列車を駆動する場合の回路方式とそのモデル化に加え、単相交流き電方式への適用時の波形歪みの問題についても検討を行った。さらに、中周波交流が介在した新しい車両主回路のような、将来のトレンドとなる方式のモデル化手法等についても検討を行った。

後者では、これまでの強化学習応用の検討で報酬の設計の難しさがあったことから、手本となる既知の最適解から報酬を設計する逆強化学習の導入を検討した。自動運転への適用により、その基本的有効性を実証できた。

最後に、本課題全体の成果を振り返る。計画では、物理現象を良く理解した機電系の研究者と人工知能を新たに制御に取り入れる情報系の研究者とが協調し、物理現象をきちんと考慮したうえで、人工知能技術を適用し鉄道システムの省エネルギー及び旅客サービスを高いレベルで実現する方法論を構築するという目的を掲げていた。補助事業期間全体を通じ、強化学習を用いた新しい制御手法を進展させ、地上設備の電力機器の制御方法へ応用し、その定量的な効果実証をきちんと行ったことが最も大きな成果として挙げられる。これに付随して、より精緻な制御や効果評価を実現するために、地上・車上の回路モデル等の深度化も継続して検討した。これにより、省エネルギー効果、さらには強化学習による制御の妥当性をより正確に評価することができるようになった。

本課題で達成が十分でない点は、海外の一部地下鉄のようなダイヤのない運行での考慮に至らなかった点である。ダイヤがない場合、列車運行にランダム性が出るが、それに対する電力や旅客サービスの評価が難しかったのが大きな理由である。その一方で、地上・車上の回路モデル等の深度化について、当初よりも研究を進めることができた。

当初の計画とはやや異なる方向性の成果を得た部分もあるものの、成果の総量として見れば、当初の目標を概ね達成するに至ったと評価する。

研究成果は、次頁以降の通り、これまで学術論文、査読付国際会議や、学会における口頭発表などで積極的に公開を行ってきた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 吉田 賢央, 荒井 幸代, 小林 宏泰, 近藤 圭一郎	4. 巻 140
2. 論文標題 電気鉄道システムの省エネルギー実現に向けた強化学習による地上蓄電装置の充放電制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D (産業応用部門誌)	6. 最初と最後の頁 807 ~ 816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.807	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kong Deshi, Miyatake Masafumi	4. 巻 23
2. 論文標題 Energy Management of Superconducting Magnetic Energy Storage Applied to Urban Rail Transit for Regenerative Energy Recovery	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020)	6. 最初と最後の頁 2073-2077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ICEMS50442.2020.9290891	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 吉田 賢央, 荒井 幸代	4. 巻 J103-D
2. 論文標題 深層強化学習による電気鉄道システム地上蓄電装置の充放電制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 788 ~ 799
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2019SGP0012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐藤 拓哉, 宮武 昌史	4. 巻 85
2. 論文標題 蓄電池駆動列車を用いた架線レス鉄道における省エネルギーダイヤ生成法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shun Ichikawa, Masafumi Miyatake	4. 巻 8
2. 論文標題 Energy Efficient Train Trajectory in the Railway System with Moving Block Signaling Scheme	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 586-591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejia.8.586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Sato, Masafumi Miyatake	4. 巻 8
2. 論文標題 A Method of Generating Energy-efficient Train Timetable Including Charging Strategy for Catenary-free Railways with Battery Trains	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 the 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailNorrköping 2019)	6. 最初と最後の頁 1015-1030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Daiko Kishikawa, Sachiyo Arai	4. 巻 4
2. 論文標題 Comfortable Driving by Using Deep Inverse Reinforcement Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The 4th IEEE International Conference on Agents (ICA 2019)	6. 最初と最後の頁 18-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/AGENTS.2019.8929214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 J. Zhao, M. Miyatake
2. 発表標題 Energy Saving Effect of Catenary Free Light Rail Transit with Onboard Supercapacitors
3. 学会等名 令和3年 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤井 秀行, 宮武 昌史
2. 発表標題 電力貯蔵, 太陽光発電, 余剰回生電力を併用する駅負荷の長期的な省エネ効果の検討
3. 学会等名 第27回 鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西山 陸, 宮武 昌史
2. 発表標題 変電所一部脱落時におけるレジリエントな列車運転法
3. 学会等名 電気学会 交通・電気鉄道研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大内 悠河, 小林 宏泰, 近藤 圭一郎
2. 発表標題 交流電気鉄道システムにおける地上車上双方による電圧補償の負担配分に関する検討
3. 学会等名 電気学会 ITS / 交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市川 湧希, 野村 航司, 宮武 昌史
2. 発表標題 力行電力量と消費電力量とを削減する省エネ列車ダイヤの生成法
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 拓哉, 宮武 昌史
2. 発表標題 電圧変動を考慮した蓄電池電車で最適省エネダイヤと路線条件による効果検証
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒井 幸代
2. 発表標題 実践に学ぶ！深層学習を用いた自動運転・ナビゲーションの最前線
3. 学会等名 日本機械学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 賢央, 荒井 幸代
2. 発表標題 深層強化学習による鉄道システムの回生電力活用
3. 学会等名 合同エージェントワークショップ&シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村 聖人, 近藤 圭一郎, 小林 宏泰
2. 発表標題 直流電気鉄道システムにおける省エネルギー化を目指した分散型地上蓄電システムの提案とその制御法
3. 学会等名 電気学会 交通・電気鉄道/リニアドライブ 合同研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

上智大学 宮武研究室 Webサイト http://miyatake.main.jp 千葉大学 荒井研究室 Webサイト https://sites.google.com/site/undnkn/wwwyctcuyoshizaki.com 早稲田大学 近藤研究室 Webサイト http://www.kondolab.eb.waseda.ac.jp 上智大学 宮武研究室 Webサイト http://miyatake.main.jp
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	荒井 幸代 (Arai Sachiyo) (10372575)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	
研究分担者	近藤 圭一郎 (Kondo Keiichiro) (10425895)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------