

フィジカルAIシステムとしての鉄道・モビリティ (柏の葉地域での自動運転バス社会実装事業等を通じての考察)

東京大学生産技術研究所
ハーモニック・モビリティ研究センター長 教授
中野 公彦



1. はじめに

フィジカルAI (Artificial Intelligence) が明確に定義された文献は見当たらないが、物理法則を理解したAIを指し、NVIDIA 社長ジェン・スン・フアン (Jensen Huang) 氏により広く知られるようになった用語と言える¹⁾。国内でも、科学技術振興機構からフィジカルAIシステム開発が戦略プロポーサルとして出されるなど注目されている²⁾。ヒューマノイドなどのように自律で動くロボットを指すことが多いが、自動運転などにより自律走行を行うモビリティも含まれると考えられる。情報を処理するだけでなく、物理世界の情報を認識し、判断を行い、実際に作用するAIを指す。鉄道においては、自動運転はもちろんであるが、保守・保全、運行最適化の知能化も、AIが判断を行うのであれば、フィジカルAIに含まれる。前述のジェン・スン・フアン氏はフィジカルAIを次のAIの波と言及しており、鉄道にとっても、今後のコア技術になると考えられる。

一方、著者が所属する東京大学生産技術研究所ハーモニック・モビリティ研究センター (当時: 次世代モビリティ研究センター) では、2016年頃から、柏キャンパスがある柏市柏の葉地区での自動運転バスの技術開発およびその社会実装を目指した活動を行ってきた³⁾。現在は、経済産業省・国土交通省事業の下、柏の葉地区での2025年度中のレベル4自動運転 (道路交通法において運転者が不要の自動運転) によるバスサービスを実現させることを計画している。道路交通の話ではあるが、関係省庁の許認可取得活動も含めた自動運転バスサービスの実装活動からは、フィジカルAIシステムの今後の社会実装を考える上で、重要な示唆が得られることが期待できる。

本稿では、柏の葉での自動運転バス社会実装事業の内容を紹介し、課題に触れる。また、機械学習を用いた鉄道関連研究を紹介し、フィジカルAIとしての鉄道技術の将来を議論する。

2. 柏の葉地区自動運転バスサービス社会実装

2.1 自動運転バス (レベル2) 長期営業運行実証実験

東京大学は、平日は柏キャンパスと柏の葉キャンパス駅間 (片道2.6km) に朝晩は10分間隔、日中は60分間隔でシャトルバスを運行しているが、2019年11月1日より、実施主体を柏ITS推進協議会として、同ルートにおいて、図1に示す自動運転バス (レベル2運用) を、毎日3-4往復運行 (バス改造: 先進モビリティ株式会社、運用: 東武バスセントラル株式会社) させている。1日の走行は25.8kmとなり、他のシャトルバスと同



図1 柏ITS推進協議会を実施主体とした自動運転バス (レベル2運用) サービスに用いられているバス

様に、東京大学教職員学生、来訪者は乗ることができる。また、インフラ協調型自動運転を実施できるように、柏ITS推進協議会に所属する信号機・センサメーカーが、交差点を中心に路側器・送信器を設置している（図2）。GNSS信号を受信しにくい箇所には自己位置同定を行うための磁気マーカーを設置している。

開始当時、既に全国各地で自動運転バス（レベル2運用）の実証実験は行われていたが、1年以上の長期にわたって行われるものは、ほとんど実施されていなかった。1年を通じて行うことにより、実運用上の課題を見つけることができるようになった。

2.2 法改正

長期営業運行実証実験が開始された時は、自動運転（レベル3以上）を行うことは法的に認められていなかった。自動運転バスの実証実験は、運転席に運転者がおり、自動運転機能を運転支援装置として利用する形（レベル2運用）で行われていた。2020年に施行された改正道路運送車両法により、自動運行装置が保安基準対象装置に追加され、法的に自動運転を行う装置の存在が認められた。同年に施行された改正道路交通法により、システムの要請により人間が運転を引き継ぐ必要があるレベル3の自動運転が認められた。さらに、2023年施行の改正道路交通法により、特定自動運行許可制度が創設され、都道府県公安委員会から許可を得れば、定められた条件の下であれば運転者が不要である自動運転（レベル4）を行うことができるようになった。これらの法改正により、2023年5月より、福井県永平寺町にて、歩行者自転車が入り込める遊歩道を走行するカートを使ったレベル4自動運転サービスが開始された。カートは2023年3月30日に道路運送車両法の自動運転車として認可され、2023年5月

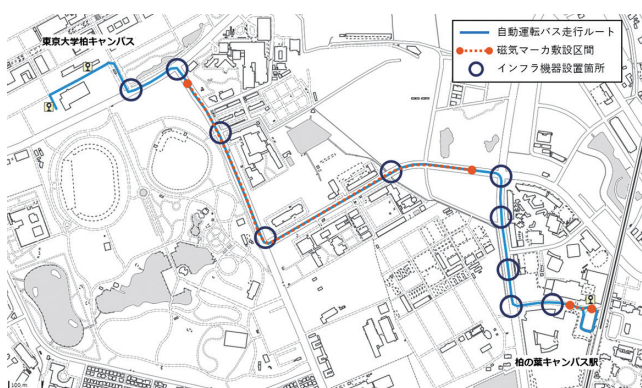


図2 シャトルバスルートと路側器および磁気マーカー設置位置

11日に道路交通法の自動運転許可が下りている。それ以降、東京都大田区、北海道土幌町、三重県多気町、茨城県日立市、長野県塩尻市等で、特定自動運行が許可され、レベル4自動運転サービスが始められた。今後も増えていくことが予想される。

2.3 RoAD to the L4事業

2021年9月より、経済産業省・国土交通省による自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト（RoAD to the L4）が始まった。4つのテーマが設定され、テーマ1は永平寺町でのレベル4モビリティサービスの実現に関するものであり、2022年度末に終了した。テーマ2は茨城県日立市のバス専用道でのレベル4自動運転バスサービスに関するものである。2024年度に乗務員乗車型での特定自動運行を実施済みであり、最終年度である2025年度は、遠隔監視のみでの自動走行実現を目指している。テーマ3は、第2東名での物流トラックのレベル4自動運転サービスを実現するものである。2025年度以降の実装を目指している。テーマ4は千葉県柏市柏の葉地区において、一般道（混在交通）での特定自動運行を目指すものであり、協調型システムの開発を含んでいる。2019年から実施しているレベル2運用の自動運転バスサービスを特定自動運行（レベル4運用）にするものである。テーマ2から4は2025年度で終了することになっており、その成果は他地域に展開されることが期待されている。

2.4 Cool4概要

RoAD to the L4のテーマ4は、Cool4 (Cooperative Level 4 Automated Mobility Service) と呼ばれ、柏市柏の葉地域にインフラ協調型のレベル4自動運転バスサービスを2025年度までに実装することを目的にしている。国立大学法人東京大学を幹事組織として、国立大学法人東海国立大学機構（名古屋大学）、国立研究開発法人産業技術総合研究所、株式会社三菱総合研究所、一般財団法人日本自動車研究所、先進モビリティ株式会社によって構成されるコンソーシアム形式で受託し、著者がリーダーを務めている。本稿の執筆時点（2025年9月11日）での事業スケジュールは図3に示す通りである。柏ITS推進協議会による自動運転バスの長期営業運行実証実験は継続するが、特定自動運行を行うことを想定したバスの開発を新たに行い、2023年度からは、シャトルバスルートで公道走行試験（レベル2運用）を行っている。1年以上の試験期間



図3 Cool4事業のスケジュール

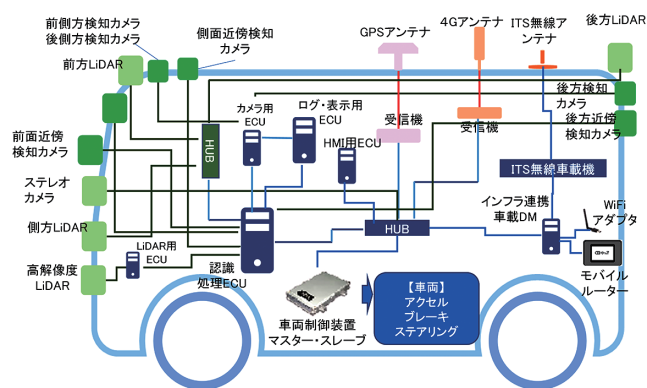


図4 協調型レベル4自動運転車両の概要

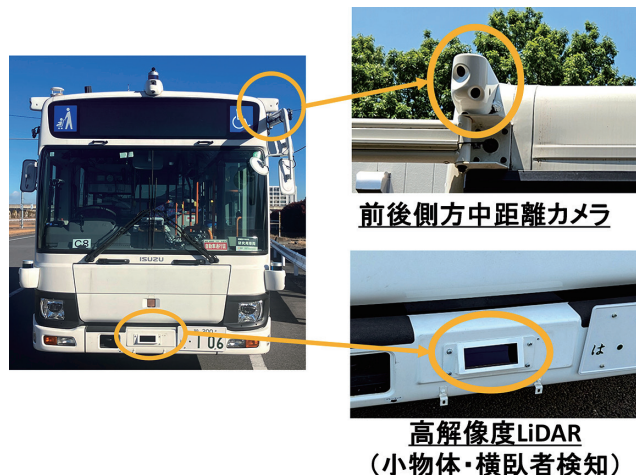


図5 前後側方中距離カメラと高解像度LiDAR

中に走行実験の結果をフィードバックして改良を行い、関東運輸局に対して自動運行装置の走行環境条件付与申請を行い、2025年8月29日に認可された⁴⁾。今後は、千葉県警に対して特定自動運行許可申請を行い、千葉県公安委員会からの許可を得てから、レベル4自動運転の試験走行を行い、2026年1月から特定自動運行によるシャトルバスサービスを実施する予定である。

2.5 協調型自動運転システム

協調型自動運転車両の概要を図4に示す。カメラ、LiDARによって全方位(360°)の環境認識を行っている。LiDARは距離計測に優れているため、主に形状認識に用いられ、物体認識はカメラによって主に行われる。自車位置同定は、あらかじめ作成した3次元地図とセンサ出力のマッチングで行うが、GNSS (GPS) による同定も行っている。特定自動運行に向けて、左

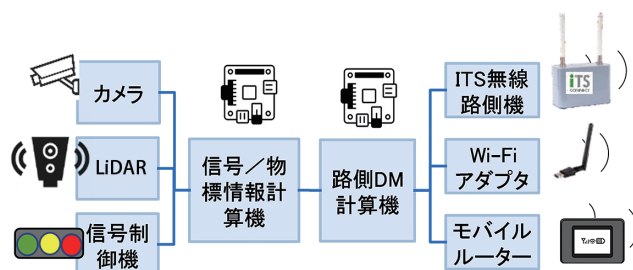


図6 協調型システムの基本構成

右方向の環境認識性能強化のための前後側方中距離カメラと、路上の小物体と横臥者の検知のための高解像度LiDARを設置した(図5)。また、図4には描かれていないが、緊急車両検知用のマイクも設置してい

る。協調型システムにおいて、信号制御器および路側センサと車両間で利用する協調型システムの基本構成を図6に示す。路側の情報は、信号／物標情報計算機および路側データ連携モジュール(DM)を介して、送信される。データの送受信には、計算機路車間のITS周波数帯(760MHz)を利用した直接通信(Vehicle-to-Infrastructure Communication)と携帯電話回線(LTE/5G通信)を用いた通信(Vehicle-to-Network Communication)が用いられる。また、Wi-Fiも使うことが可能である。

2.6 特定自動運行の計画

2025年度特定自動運行（レベル4自動運転）は、科警研西交差点を含むL字区間（図7赤線）（片道700m程度）で行い、他の区間は、レベル2運用で行う。シャトルバスルート全区間において、自動運転機能は動作しているが、特定自動運行を行う時は、運転士による運転介入を行うことができないようになっている。対向車が存在する交差点での右折においては、対向車に加えて、横断歩道上および進入の可能性がある歩行者および自転車を検知することが必要であるため、自動運行装置による安全確認に時間を要してしまう。周囲の交通の円滑性に影響を与えることが懸念される。特定自動運行区間においては、科警研西交差点は、駅から柏キャンパスに向かう時は右折になるが、丁字路であるため、対向車が存在しない。交通円滑性への影響を考えて、特定自動運行区間を上記のように定めた。インフラ協調型システムは、交差点を中心に図7に示す位置に設置している。ルート上の全ての信号交差点で、信号連携による信号サイクル情報の送信が行われる。なお、一部区間のみの特定自動運行であること、また、自動運転が続行不能となり車両が停止した場合は、周りの交通への影響を考えて、速やかに車両を移動させる必要があることから、当面は、運転士が車内に乗車する。

2.7 インフラ情報活用

道路交通は、混在空間であっても運転者が安全に責任をもつことを前提としているため、自動走行装置が搭載されている車両側で安全を担保することを前提とする考えが支配的である。CoO4においても、車載センサのみでは取得不可能な情報を路側器から受信し、活用することにより、交通の円滑性向上を図ることをインフラ協調型システムの目的としている。インフラからは、信号情報と物標（障害物）情報の提供を受ける。

信号情報は信号サイクル情報であり、青信号残秒数を受信することにより、交差点進入直前で黄信号に変わった際の急減速を回避することができる。特定自動運行区間である科警研西交差点においても、青信号残秒数を用いた信号連携は行われる予定である。それ以外には、時差式信号交差点右折時において、対向車方路側の信号サイクル情報を受信することにより、右折発進判断の円滑化を図ることも検討されている。当該時差式信号は特定自動運行区間には存在しないので、実施したとしても、レベル2での運用となる。なお、信号情報は、警察庁の方針により補完情報として扱うことになっている⁵⁾。すなわち、車載カメラによって実際の信号灯色を認識し、信号情報に誤りがあった場合にも道路交通法に従った走行ができなければならない。青信号残秒数は、インフラ情報によって、早めの減速を行うものであり、それにより事故リスクを上げることはないと考えられる。ただし、対向車方路側の信号サイクル情報は、早めの出発判断を促すものであり、レベル4自動運転で用いる是非については、今後も議論が必要である。

物標情報は、路側センサが検知した、車載センサからの死角に存在する障害物の情報を指す。運転者が安全に責任を持つ運転支援（レベル2以下）においては、障害物の存在情報を送信する意義はあるが、運転者が存在しないレベル4においては、障害物が存在しないというフリースペース情報が求められる。インフラ情報に対して要求される信頼性は格段に高くなり、事故発生時の車両とインフラの責任分界の議論が必要となる。CooL4では、前述の通り、車両側で安全を担保することを前提にして、物標情報は走行の円滑化を目的に用いる方針を出している。ただし、交通の円滑化

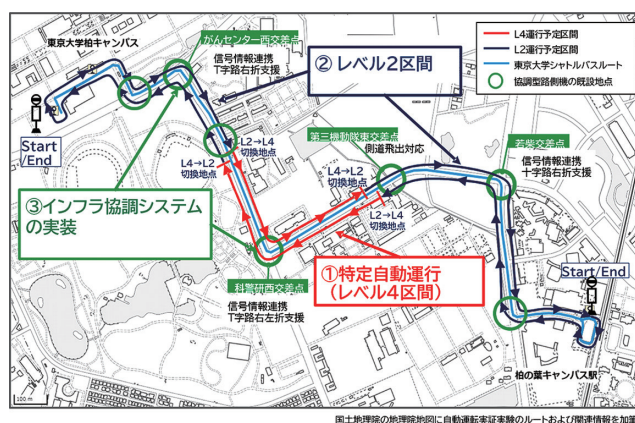


図7 2025年度公道実証実験のルート

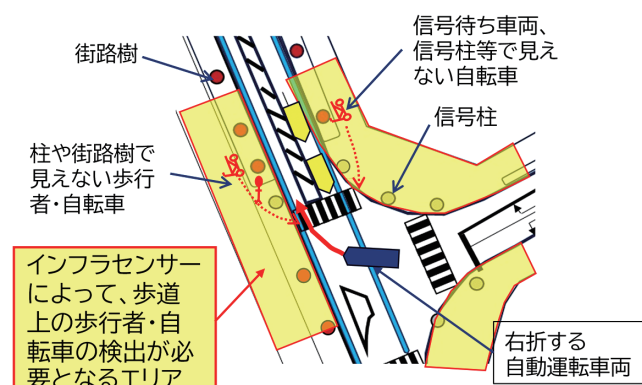


図8 路側センサの検知範囲

は発進判断を早める、もしくは走行速度を上げることを意味し、事故リスクを高めることになる。その実装の是非については、まだ議論が必要である。

Cool4においては、物標情報を用いた特定自動運行は行わない。物標情報は、データの送受信の試験に留めるか、レベル2運用において活用する予定である。

2.8 路側センサの設置

物標情報は特定自動運行には用いないが、将来の活用可能性を検討するために、路側センサの設置は行っている。図8に科警研西交差点において、路側センサが検知する範囲を示す。具体的な数値は示していないが、自動運転バスが交差点通過を行う時間内に、横断歩道に進入する可能性のある歩道上の歩行者および自転車を検知することを目的に、検知範囲をカバーするように複数個所にLiDARとカメラを設置している。

2.9 データ連携プラットフォーム

協調型システムにおいては、多岐にわたる通信パスが存在し、開発が複雑になるため、将来の他地域展開を視野に入れて、プラットフォーム化を行っており、それをデータ連携プラットフォームと呼んでいる。図9に名古屋大学が中心になって開発しているCool4のデータ連携プラットフォームのアーキテクチャを示す。協調型自動運転に必要な機能を開発済みであり、性能評価を実施し、現時点では満足できる性能を達成している。今後は、複数の路側センサの出力のデータ融合（フュージョン）アルゴリズムの開発、安全分析、セキュリティ・プライバシー確保機構の組み込みなどを行う予定である。

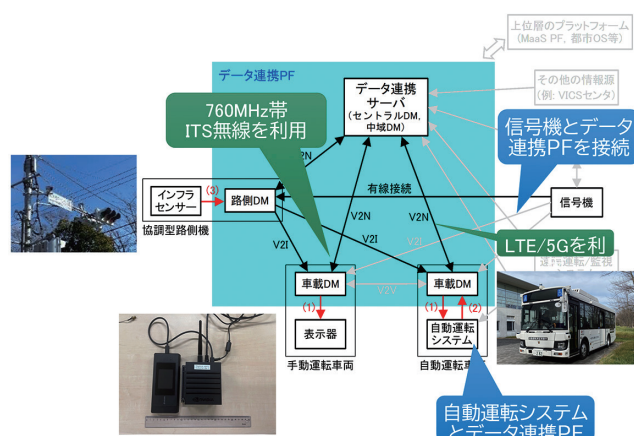


図9 Cool4で開発したデータ連携プラットフォームのアーキテクチャ

2.10 レベル4自動運転運行の課題

インフラ協調型レベル4自動運転の開発状況を述べたが、安全性確保、交通円滑性確保、道路交通法への適合に関して以下の課題が挙げられる。

・安全性確保

安全性を確率で示すだけでなく、リスクを洗い出し、それらに対する対処方法を決めておくことが求められる。ただし、その作業は膨大になり、完全であることを示すことはできない。

・交通円滑性確保

混在空間の走行では、他の道路利用者の走行の障害になることは極力避けることが求められる。安全性を確保した上で、発進判断を適切に行うことが必要である。ただし、発進判断に必要な情報は、障害物がないという情報（フリースペース情報）であり、その確認には時間がかかる。

・道路交通法への適合

法律においては、数値が規定されていないため、その解釈が困難なことが多い。不必要に保守的な解釈を行えば、円滑性を阻害する。なお、道路交通法の第一条には、道路における危険を防止し、その他交通の安全と円滑を図ることを目的とすると記されており、円滑な走行は、自動運転車両に求められる性能と考えられる。

なお、今まで運転タスクの自動化のみを議論してきたが、運転士が行う業務は、運転のみでない。点検業務、乗客対応、安全確保（事故・故障時の応急対応）等の運転以外の業務の方が、自動化は難しい。道路交通において車内無人を実現するためには、人間が、遠隔でどこまで、これらの業務ができるかが課題となる。

3. 鉄道におけるAI活用研究の紹介

3.1 機械学習を用いた車輪とレール間の接触状態の推定

著者が行っている、鉄道におけるAIを用いた研究を紹介する。鉄道総合技術研究所で開発されたPQ輪軸（図10）は、垂直荷重P、横荷重Q、前後接線力Tが計測可能である。脱線係数（Q/P）より、脱線に対する走行安全性を評価できるが、車輪とレール間のアタック角、左右接触位置、摩擦係数等により、安全といえるQ/P（限界脱線係数）は変わる。計測したP、Q、Tから、機械学習（LightGBM、1D-CNN）により、アタック角、接触位置、摩擦係数を推定することを試みる研



図10 PQ輪軸（写真提供：鉄道総合技術研究所）

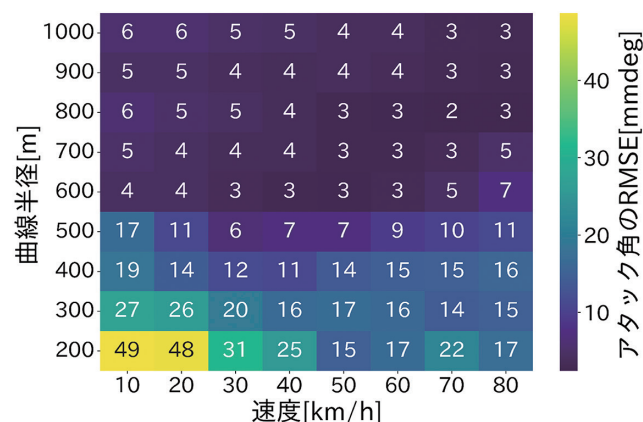


図11 機械学習によるアタック角の推定精度

究である。将来は、指標の閾値のみを用いた判定ではなく、ベテランの技術の判断を模擬できるシステムを構築することを目指している。数値計算結果を教師データおよび評価データとして用いた。LightGBMを用いて推定したアタック角の精度を図11に示す。速度の小さい急曲線で精度が低下する傾向がある⁶⁾。

3.2 携帯電話回線を利用した鉄道車両と自動車の統合型交通制御システム

携帯電話のLTE通信を利用して、鉄道踏切と自動運転車両を統合して制御するシステムを提案した。列車車上装置がGNSSで取得した自己位置を、携帯回線を使ってセンターに送信し、センターは列車の最短到達時間を計算し、それに基づき、踏切警報機と遮断機の動作開始時間を計算し、踏切制御装置に送信する。車上装置は、踏切通過後に警報終止情報をセンターに、センターはその情報を踏切制御装置に送信する。このようにして無線による踏切制御を行う。これらの信号は、交通信号機、自動車、スマートフォン等にも送信可能であるため、統合した交通制御が可能になる（図12）。本システムの動作確認を、鉄道試験線と試験用踏切が存在する東京大学柏キャンパスITS実験フィールドにて行った⁷⁾。また、鉄道車両の踏切通過時刻がわかり、車両の位置情報を取得可能であれば、待ち時間、平均速度、旅行時間を指標に加えた報酬関数を用いた深層強化学習を行うことによって、最も効率的な交通制御（信号制御）方法を導くことができる（図13）。これにより交通信号が固定サイクルであっ

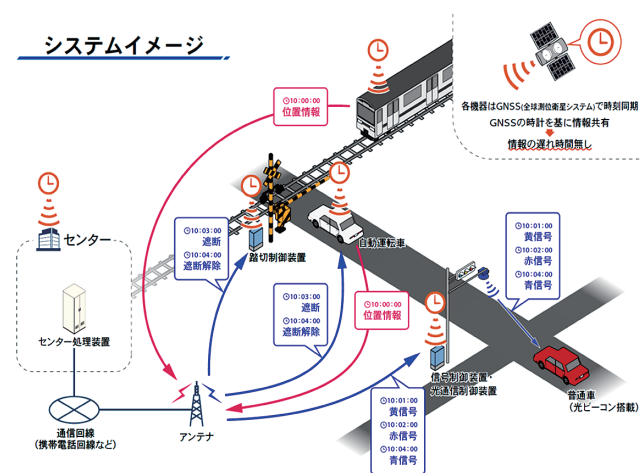


図12 鉄道車両と自動車の統合型交通制御システム概念図⁷⁾

た時に比べて、待ち時間、旅行時間を短縮し、平均速度を向上させることができることを数値計算により示した⁸⁾。

なお、車載カメラとレーダーにより踏切警標の認識と前方車両との距離の計測を行い、踏切の発進判断を支援するシステムの研究開発も行われている⁹⁾。

4. フィジカルAIとしての鉄道・モビリティの将来像

鉄道を含むモビリティにおけるAI活用の成果と課題を述べてきた。認識モジュールだけでなく、判断においてAIをモビリティで活用することに関しては、以下の利点と課題が存在する。

- AIは発進時等に、人間に近い判断を行うことができ、安全性に加えて円滑性を求められる場面では、その活用が期待される。人間よりも膨大なデータを学習することができるが、法律・ルールへの遵守や安全運転を行うことを保証することはできない。
- 運転時に求められるような高度な判断は、人間の良心（道徳）と社会的常識（社会規範）に基づいて行われるところが多い。AIにそれを行わせるためには、技術だけの学習では不十分で、良識ある人間の知能をAIで模擬する必要がある。
- 自動車の走行時は、運転者が法的責任をとることが一般的である。ただし、現状では、AIが法的責任主体になることはできない。

人間と同等以上の知能を持つAIができることが理想であるが、現実的なタイムスパンでの実装を考えると、以下に示す対応を行うことも求められる。

- 法律・ルール、環境の変更
AIが法的責任主体となるには、法律の専門家を含めた多くの議論が必要であり、現実的な時間で議論が収束することは望めない。自動運転システムのようなフィジカルAIシステムが現実社会で動作しやすいような法律・ルール、環境を整備する方が近道である。
- 高度な判断は、人間がアシストする余地が必要。
特定自動運行においては、運転タスク以外の判断は、車内乗務員か、遠隔監視者が行うことが想定されている。システム主体で動作しながら、高度な判断が必要になった際には、人間がアシストできるようなシステムにすることも検討したほうが良い。判断のミスにより事故が起きた際のシステ

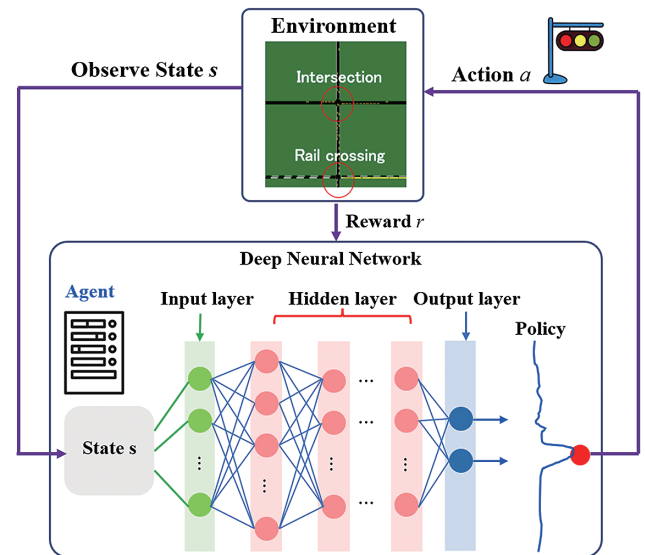


図13 深層強化学習を用いた鉄道と自動車の統合的交通制御⁸⁾

ムと人間の責任分界など議論が必要である。また、フィジカルAIの実装には、ELSI (Ethical Legal, Social Issues) と呼ばれるような、技術的課題以外の課題に取り組む必要もある。著者は、国立研究開発法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター(RISTEX)の助成を受け、明治大学および筑波大学とともに、2020-2023年度にわたり、ELSIを踏まえた自動運転技術の現場に即した社会実装手法の構築という事業を行った¹⁰⁾。

5. まとめ

- 柏市柏の葉地区において、2025年度にレベル4自動運転を実施する予定で、自動運行装置の走行環境条件付与を受けている。今後は、特定自動運行許可を得る必要がある。
- レベル4自動運転の運行範囲を広げるためには、法律に適合させながら、安全性と円滑性を両立させる技術の開発が求められる。
- 人間の運転を模倣した自動運転を行うためには、判断までをAIが行う必要があると言われているが、AIは法的責任主体になれないという課題がある。
- 高度な判断を行うAIの実装のためには、法律・ルール・環境の変更など、技術以外の課題(ELSI)も含めて考える必要がある。

参考文献

- 1) Kolawole Samuel Adebayo, What Is ‘Physical AI’ ? Inside The Push To Make AI Understand The Real World, Forbes published Jun 13, 2025, 07:01am EDT, updated Jun 13, 2025, 04:48pm EDT, <https://www.forbes.com/sites/kolawolesamueladebayo/2025/06/13/what-is-physical-ai-inside-the-push-to-make-ai-understand-the-real-world/>, (参照 2025-09-11)
- 2) 戦略プロポーサル フィジカル AI システムの研究開発～身体性を備えた AI とロボティクスの融合～, 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 2025年5月, <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2025-SP-01.html>, (参照 2025-09-11)
- 3) 中野公彦：テーマ4：混在空間でインフラ協調を活用したレベル4自動運転サービスの実現に向けた取り組み, RoAD to the L4プロジェクト成果報告会, 2025年2月27日, https://www.road-to-the-l4.go.jp/publication/pdf/20250227_theme04.pdf, (参照 2025-09-11)
- 4) 関東運輸局プレスリリース, 千葉県初！自動運転車（レベル4）の認可を行いました～運転者を必要としない自動運転車（レベル4）～, 国土交通省, 2025年8月29日, <https://www.tb.mlit.go.jp/kanto/content/000356771.pdf>, (参照 2025-09-11)
- 5) 協調型自動運転システムへの情報提供等の在り方に関する検討報告書, 協調型自動運転システムへの情報提供等の在り方に関する検討会, 警察庁, 2023年3月, https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/council/r4_kyoutyou_houkokusho.pdf, (参照 2025-09-11)
- 6) 藪内皓太郎, 國行翔哉, 本堂貴敏, 飯田浩平, 宮本岳史, 中野公彦：機械学習を用いた車輪とレール間の接触状態の推定, Dynamics and Design Conference 2025, OS9-1-1-03, 日本機械学会, 2025
- 7) 中野公彦, 浅野晃, 長澤弘之, 高田哲也, 貝塚勉, 楊波：携帯電話回線を利用した鉄道車両と自動車の統合型交通制御システム, 第17回 ITS シンポジウム2019, ITS Japan, 2019
- 8) Xutao Mei, Nijiro Fukushima, Bo Yang, Zheng Wang, Tetsuya Takata, Hiroyuki Nagasawa, Kimihiko Nakano, “Reinforcement Learning-Based Intelligent Traffic Signal Control Considering Sensing Information of Railway,” IEEE Sensors Journal, vol.23, no.24, pp.31125-31136, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3327696.
- 9) 中野公彦, 福島虹郎, 楊波, 王正, 梅旭濤, 高田哲也, 長澤弘之：携帯電話回線を利用した鉄道踏切制御と自動車の踏切通過支援システム, 自動車技術会2023秋季大会, 自動車技術会, 2023
- 10) ELSIを踏まえた自動運転技術の現場に即した社会実装手法の構築, RInCA事業ウェブページ, 国立研究開発法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター(RISTEX), <https://www.jst.go.jp/ristex/rinca/projects/jpmjrrx20j4.html>, (参照 2025-09-11)