

## ERATO 蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト中間評価②概要書

【研究総括】蓮尾 一郎（国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系 教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

川本 雅之（株式会社 アイ・モビリティプラットフォーム 代表取締役）

國府 寛司（京都大学 理事・副学長／大学院 理学研究科 教授）

高田 広章（名古屋大学 未来社会創造機構 教授）

徳田 英幸（委員長；情報通信研究機構 理事長）

山本 里枝子（科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー）

### 【プロジェクトの概要】

ERATO 蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクトは、Society 5.0 を実現していく上で鍵となる、多様なサイバーフィジカルシステムの安全性や信頼性を保証することを目的に、数学的に記述・解明するモデルを確立する手法を研究し、その成果を産業界に還元することを目指している。なかでも、自動運転車の安全性保証の手法の確立を研究の中心に据えている。自動運転は交通状況による稼働条件が膨大かつ複雑で、数理モデル化には難しさがある。そこへ現代数学を活用して汎用性のある安全性保証の方法論を考案し、高い説明可能性を持って、実際の交通状況に適応して安全運転ができる数理モデルの構築を進めている。

2022 年 4 月より開始された追加支援期間（機関継承型）<sup>1</sup>では、自動運転の安全性保証に軸足を置いて、本研究期間（2016～2021 年度）中に構築したサイバーフィジカルシステムの安全性保証の論理に立脚した基本的な考え方を整理し、自動運転の安全性を保証する数理的手法を開発、かつ社会実装を可能とするアルゴリズムも開発している。また、これらの成果を IEEE2486（自動運転車の安全性の論理的検証規格）の世界標準化に貢献すべく、企業連携等の活動も推進している。さらには、自動運転車の安全性保証技術を開発するスタートアップの設立も視野に入れている。

### 【研究プロジェクト（領域）の設定および運営に対して】

複雑に稼働するサイバーフィジカルシステムが内包する安全性の不確かさの検証について、数理的なアプローチから方法論を提唱することで、システムの安全性に対する社会的信頼を獲得するための新しい基盤の構築を目指している点がユニークで、挑戦的である。本研究期間の開始まもなく、ホワイトボックスモデル（システムの構造が細部まで明らかになっているモデル）による形式検証の限界を認識し、研究理念・目標を柔軟に見直して、社会における支配原理・法則が明確でないシステムの論理的枠組みの確立を重要なテーマとして加えた。特に自動運転の安全性保証では、説明可能な数理的バックボーンを構築し、海外研究機関や産業界と協働し、自動運転の安全性保証の標準化に向けて積極的に成果を発信していると高く評価できる。

追加支援期間のプロジェクトの運営においては、本研究期間中の体制を再構成して、追加支援期間の目的にマッチした体制でプロジェクトが運営されている。研究総括の強いリーダーシップのもと、専門性が異なる優秀な若手研究者を世界から結集させ、自由度を与えつつ、プロジェクトの目標に沿った研究がなされている点は高く評価できる。若手研究者の中には学術的に高い成果を上げて新たなポストを

---

<sup>1</sup> 追加支援期間（機関継承型）：ERATO で構築した研究体制の発展・継承のために、研究機関が ERATO 本研究期間（2016 年～2021 年度、以下「本研究期間」という）中からプロジェクトに具体的な支援を実施し、本研究期間終了後も研究機関主導でプロジェクトを核とした恒久的な枠組みが計画され、JST の補完的な支援によってその枠組みが創造的に進展すると認められる場合に最長 3 年間支援期間を延長する。

得てプロジェクトを卒業したが、現在もプロジェクトとの連携を継続している者もあり、研究体制の多様性が増したことで、今後の継続的成果が期待できる。

自動運転の安全性においては、今後、自動運転システムに関連する企業群を巻き込んだコンソーシアムの発足に期待すると共に、研究成果のさらなるわかりやすい発信の強化も期待する。

#### 【研究の達成状況および得られた研究成果】

自動運転の安全性保証の方法のひとつに、「責任感知型安全論 (Responsibility Sensitive Safety: RSS)」がある。RSS は数学的証明の形で、安全性を保証・説明し、自動運転車が安全に責任の持てる動作環境を明示して、自動運転車の安全性における各種責任の所在を明らかにする技術で、米国モビルアイ社が提唱した。プロジェクトは、数学的証明を使って RSS ルールを拡張することで、自動運転車が安全責任を保持する動作環境を拡張できると考え、RSS を発展させた「ゴール指向責任感知型安全論 (Goal-Aware Responsibility Sensitive Safety: GA-RSS)」を見出し、提唱した。これにより検証可能な論理規則を使用して、人間が理解できる自動運転のさまざまな安全シナリオを形式化することを可能とした<sup>2</sup>。これは、自動運転の安全性の文脈を実際的な問題に限定して、システムの不確かさを社会契約に押し込めるブレークスルーを実現したといえ、産業界が関心を寄せる実効的効果に展開する有益な成果をもたらした。GA-RSS は社会の課題に数学を適用した先駆的な成功例として高く評価できる。GA-RSS は実効的な技術であり、今後、より複雑な自動運転シナリオへ拡大し、検証可能なケースが増加すること、さらにはルール体系化の見通しが早期に示されることを期待する。

また関連して、サイバーフィジカルシステムの安全性保証のためのスケーラブルな手法として、圏論的モデル検査アルゴリズムを開発した。既存手法よりも 6000 倍高速に実行でき、最適なプログラミング言語 Haskell を利用することでコーディング量を 1/6 程度に低減できることを達成しており、顕著な成果であると認められる。

研究成果の発表は、本研究期間からこれまで 325 報の論文を発表、そのうち 108 報が世界トップクラスの国際会議 (CORE RANK<sup>3</sup> A\*、および A) に採択されており、極めて優れた学術成果を挙げている。知財は工業所有権情報・研修館の知財プロデューサーと協調し、これまで、国内 10 件、海外 6 件の特許出願を行っており、コアとなる技術が権利化されたと評価できる。アウトリーチ活動にも積極的であり、「日経ロボティクス(2022 年 10 月号)」、「岩波科学(2023 年 3 月号)」など一般読者向けの記事も出しており、研究発信力はめざましいものがある。

追加支援期間において、本研究期間中に行われていたカナダの Waterloo 大学との協働は、互いの研究スコープが変化して縮小しているが、情報交換等は継続している。本研究期間中に Waterloo 大学のチームが開発していた自動運転ソフトウェアの具体技術は、プロジェクトの数理的アプローチによる、説明可能な安全性保証を提供できる基盤を構築する上で重要な役割を果たした。同大学の研究チームは人工知能を利用した自動運転の知覚ユニットの安全性に研究がシフトしており、将来、プロジェクトの研究アプローチと融合する新たな協働が期待される。

研究の新たな展開としては、JST のスタートアップ設立を支援する「研究成果展開事業 大学新産業創出プログラム: START」に採択され、プロジェクト成果の社会実装と持続的な研究開発体制作りを目指している。

#### 【研究成果の科学技術、社会・経済への貢献】

<sup>2</sup> プレスリリース(2022 年 7 月 7 日)「自動運転車の安全性に数学的証明を与える新手法を開発 ～論理的安全ルールの効率的導出により自動運転の社会受容を加速～」

<sup>3</sup> コンピュータ分野の主要な国際会議ランキング。A\*: 上位 7%、A: 上位 7~16%

科学技術への貢献としては、今後の情報通信技術の社会的信頼の基盤を構築する点が挙げられる。自動運転のような不確かさを含むサイバーフィジカルシステムに対して、論理学の観点から安全性保証の基礎付けを与え説明可能とした研究は、世界的にも独創的なアプローチによるものである。これにより、実効性のある展望と先駆的な成果を上げたことは高く評価できる。また、GA-RSS 以外にも、機械学習モジュールを組み込んだ自動運転の安全性保証技術や、多くのサイバーフィジカルシステムの解析の道筋を拓いている点が評価できる。

社会・経済への貢献としては、数学的証明によって自動運転の安全性を説明できるメリットが挙げられる。GA-RSS によって安全性を保証できるシナリオや、自動運転車が責任を持てる安全動作環境が明示化された。この技術が社会実装されれば、社会に大きなインパクトを与えると期待される。ただし、社会システムに取り入れられるかは、今後の標準化活動の取り組みにかかる課題と言える。企業とも協力して実用化への加速を図っていただきたい。

#### 【追加支援期間(機関継承型)による研究体制の定着・発展と研究成果】

国立情報学研究所(研究所)がプロジェクトの意義や重要性を理解し、将来を展望して所内に「数理的高信頼ソフトウェアシステム研究センター」を組成し、研究の継続・発展のために体制が整えられている。研究所内の関連の深い研究プロジェクトと連携が図られており、研究の相乗効果が期待できる。国際的にも有力な研究拠点に育っていることから、研究所からのさらなる支援と今後の発展に期待する。GA-RSS と関連する検証システムはプロジェクトの本研究期間の集大成といえ、この成果をさらに技術的に洗練しながら、社会発信、産業界との協働、標準化活動にも本格的に取り組んでおり、追加支援期間は有効であるといえる。

#### 【その他特記すべき事項】

従来の数理的かつ理論的研究は、ややもするとトイ・プロブレムを対象に洗練された解を求める場合もあったのに対して、数理的理論研究を自動運転システムという実問題の領域へ適応させ、産業界と連携し、社会的インパクトのある成果へと発展させる姿勢を多くの若手研究者へ示した点は、特筆すべき点である。

以上を総合すると、本プロジェクトは全体に順調な進捗にあり、戦略目標「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」の達成に資する十分な成果が得られていると評価できる。

#### 〔総合評価〕

A+(十分な成果が得られている)

以上