

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「イノベーション創発に資する人工知能
基盤技術の創出と統合化」
研究課題「完全自動運転における危険と
異常の予測」

研究終了報告書

研究期間 2019年4月～2022年3月

研究代表者:加藤真平
(東京大学 情報理工学系研究科准教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究では、完全自動運転中の危険と異常を予測する技術、並びにその予測能力を持続的に発展させるためのデータ収集・解析・配信の方法論について、理論と実践の両面から実用的課題に取り組んだ。本研究の提案時に、我々は危険と異常を以下のように定義した。

危険(Risk): 死角からの飛出しや見通しの悪い交差点での出会い頭を含む環境側の危険および自動運転システムによる自車の運転の危険

異常(Anomaly): アルゴリズムの失敗による異常、およびその処理の遅れや外部環境から得られる情報の誤りを含むシステムの異常

昨今の自動運転システムの主流は、人間並みの判断を可能にする機械学習技術にあるが、我々は、高度な判断によって複雑なケースを自動運転で乗り切ることよりも、致命的な事故を未然に防ぐために適切なタイミングで自動運転をあきらめる(停止する)ことのほうが社会的価値は高いという着想のもと、危険と異常の予測に焦点を絞って研究を進めてきた。

チーム全体の成果として、**運行設計領域(ODD: Operational Design Domain)を定義することによって、限りなく100%に近い精度で危険と異常を予測**し、そこから最小限の移動量によって安全に停止できる自動運転システムのプロトタイプを完成させた。現在の課題は運行設計領域が極めて限定的であることであり、今後、一般市街地のような広域環境において多種多様な天候や交通流に対応するためには、データセットの拡充、シミュレーション検証の効率化、そしてセンサーや車両といったハードウェア側の高性能化も求められる。また、本研究では危険と異常という課題に対して実時間性と不確実性の観点からアプローチしたが、今後は脆弱性に対する研究も進め、外部からの攻撃に備える必要もある。

具体的な研究内容は「走れば走るほど賢くなる自動運転システム」の構想提案から要素技術の研究、概念実証まで進め、**研究成果をクラウドサービスおよびオープンソースとして公開**した。ここでいう「賢い」とは自律的な認知・判断・操作を人間並みに行うにとどまらず、周囲の危険や自車システムの異常を予測する能力を含むことをいう。研究成果の一部は、工場内での自動搬送カート(ヤマハ発動機)や東京オリンピックの選手村での自動運転バス(トヨタ自動車)にも実装された。また、その他にもAI教習所の設立や自動運転オンライン講座の開設、自動運転AIチャレンジコンテストの実施など、多方面に研究成果を活用した社会貢献を行った。また、**本研究成果をもとに保険会社と自動運転専用保険を設計し、認可まで獲得**した。この保険は本研究が生み出した最大の社会的価値ともいえる。それぞれの研究グループの取り組みは以下のとおりである。

課題1. 危険と異常の予測に対応した自動運転システム(東大)

課題2. 特定の目的・状況に特化したデータ駆動型の自動運転AI(東大・名大)

課題3. オンラインの大規模データ解析機能を有した自動運転クラウド(東大・慶大)

特に貢献度の高い研究成果として、まずは不特定多数のコンポーネントから構成される自動運転システムの時間的異常の予測のために、システムを有向巡回グラフ(DAG)でモデル化したことにある。また、個別のコンポーネントに着目すると、物体検出アルゴリズムにおける深層学習ベースの推論の誤検出に対して、アクティベーションベクトルやキャリブレーションを組み合わせることで、平均約10%の推論失敗の予測を行えるようになったが、未検出への対応が課題として残っている。さらに時系列の映像データからトランスフォーマーを用いた汎用的な特徴量を抽出できることがわかった。これらの学習基盤(アノテーションを含む)をクラウド上に実装し、ワークロードに合わせたインスタンススケジューラを導入することで、費用対効果の高いオープンサービス(automan.ai)として公開することができた。

次いで、研究ビジョンとその達成状況について述べる。当該課題の研究ビジョンのステートメントは以下の通りである。

研究ビジョンは、「走れば走るほど賢くなる完全自動運転システムの創発により、世界中の人々が

いつでもどこでも価値ある時間と空間を最大限に享受できる社会を実現する。」である。

達成状況は、本研究成果とオープンソースの自動運転ソフトウェアを組み合わせることで、民間企業の開発チームでも完全自動運転システムを構築することが可能となり、工場内の自動搬送や東京オリンピック・パラリンピックの自動運転バスでは日に日に連続走行距離が改善していき最終的には実用のサービスに足る水準に至った。

将来、本研究成果はさらに汎用化され、2025年までには国内40箇所以上の地域の無人自動運転サービスに寄与する見込みである。また、オープンサービスとして世界10か国以上でも導入が進んでおり、様々な自動運転システム開発者の支えとなっていくものと確信する。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 有向巡回グラフ(DAG)を用いたシステム異常の予測可能な自動運転タスクモデルの確立

概要:

自動運転システム全体を有向グラフ(DAG)で表現することでシステムの時間的な異常検出を可能にできるという思想のもと、本研究では機能モジュール間のメッセージによるデータフローをDAGでモデル化し、モデル化されたタスク(DAGタスク)のリアルタイムスケジューリングアルゴリズムを提案し、その設計と実装、評価を行った。具体的には、デッドラインミス早期検知/阻止を目的としてLatest Release Time(LRT)という概念の導入し、LRTを優先度とするスケジューラLRTを提案した。また、LRTによるデッドラインミス検知/阻止の手法も提案し、理論評価とシミュレータ評価、さらにはLinux上での実機評価まで実施した。

2. 特定ワークロードに特化した適応的なクラウド資源管理手法

概要:

現状のクラウド計算資源スケジューラは、クラウドの利用者がこれまでの経験に基づいて計算資源の選択と予約を行う必要があり、必ずしも期待した効果が得られない。本研究では、学習精度と学習時間に対するクラウド課金のトレードオフを制御可能にするクラウド計算資源スケジューラの研究を行った。自動運転専用のクラウドサービスでは、試行錯誤のために類似したワークロードを繰り返し実行することが多いという点に着目し、過去の実行履歴および投機的な事前実行の結果から、利用する計算資源と実行時間の関係を統計的に割り出しておくという方針をとった。クラウド環境そのものを提供するプラットフォームは、特定のワークロードに最適化した計算資源スケジューラを提供することは原理的に不可能であるのに対し、特定のワークロードに特化した形で計算資源スケジューラを実現している点に特徴がある。

3. 走行映像データから汎用的な特徴量抽出が可能なTransformer AutoEncoder

概要:

機械学習を用いた異常検知手法の1つであるAutoEncoderは、入力した信号を情報圧縮した後、復元した信号との誤差を異常度合いのスコアとして扱う。正常な信号のみを用いてAutoEncoderを学習することにより、学習していない異常な信号に対する再構成が難しくなるという仮定に基づく。本研究では、自然言語処理や音声処理で有効性が示されている時系列を考慮したattention機構を含むTransformerをAutoEncoderに適用し、マルチメディア信号に拡張するとともに、Bidirectional Encoder Representations from Transformers(BERT)型学習の一種であるword2vec2.0を学習手法として活用することで、自動運転という新たな応用領域に展開した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 自動運転 AI 学習基盤「Automan」のクラウドサービス化とそのオープンソース公開

概要:

本研究の成果である自動運転 AI (物体認識、危険予測、異常予測等) の学習に必要なデータの取得から管理、ラベル付け、訓練までを世界に先駆けてサービス化し、ウェブブラウザから誰でも簡単に本研究成果を利用できるような環境を整えた。自動運転 AI に関しては、学習アルゴリズムも発展途上であるが、それ以前に学習データとラベル付けツールが普及していない。Automan はこれらの課題を一体的に解決し、自動運転 AI の産業化を飛躍的に促進させるオープンプラットフォームとして期待できる。本プラットフォームを活用した自動運転オンライン講座や自動運転チャレンジコンテスト等の開設も促し、誰もが自動運転 AI の研究に取り組める環境を整備した。

2. 自動運転専用保険の開発

概要:

完全自動運転機能付きの自動車の走行責任を「自動運転システム提供者」と設定できる保険商品を損保ジャパンと共同開発した。自動運転車の事故責任をシステム責任として保険対応を進めることで、被害者救済を優先することが可能となる。保険会社は、事故原因判明後に原因者に対し求償権を行使し、被保険者(自動運転システム提供者)には求償しない。自動運転システム提供者が導入事業者に提供するアフターサポートに、「補償+安心」(リスクアセスメント+サポート窓口+保険)を包含したサブスクリプションモデルを適用し、自動車保険料とリスクアセスメント費用をサブスクリプション代に包含させた。損保ジャパンの事業の中で自動運転専用 24 時間 365 日対応の事故・トラブルサポート窓口を新たに開設し、実務拠点として秋田コールセンター内に新設し、要員体制を構築。サポート業務の拡大も視野にしている。

3. 自動運転技術を用いた AI 教習システムの製品化と株式会社 AI 教習所の設立

概要:

自動運転に必要なとされる模範的運転モデル対象として自動車教習所の教習指導員に着目し、その運転行動をルール化した運転モデルを開発した。また、自動運転技術を用いてリアルタイムに得られる位置推定や障害物検知の結果を評価指標とすることで、開発した運転モデルを使い、ドライバーの運転行動の定量的な評価および評価に基づく危険予測を可能とさせた。この予測に応じて自動でブレーキ制御を行うことで危険を回避する手法を確立し、これら評価手法と危険回避手法をシステム化することで AI 教習システムを製品化した。自動車運転教習所は教習指導員の高齢化や採用難による人材不足により、新規免許取得者や、高齢者講習の予約待ち(平均 2~3 ヵ月)が問題となっている。製品化したシステムを自動車教習所に適用することは、教習指導員の業務負荷軽減のみならず、新規免許取得者や高齢運転者の受け入れ拡大につながると期待される。

< 代表的な論文 >

1. Vision-Based Sensing Systems for Autonomous Driving: Centralized or Decentralized?, M. Hirabayashi, Y. Saito, K. Murakami, A. Ohsato, S. Kato, M. Edahiro, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 3, pp. 686-697, 2021.

概要: 自動運転のセンシングシステムに関して、DAG タスクモデルに基づくシステムアーキテクチャを複数のコンピュータ上で分散化するかどうかを定量評価した論文であり、自動運転の実用化に際してシステム異常に対する耐性を例示した。

2. A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies, E Yurtsever,

J Lambert, A Carballo, and K Takeda, IEEE Access, Vol. 8, pp. 58443–58469, 2020.

概要:自動運転に必要な基本技術について、信号処理の分野を中心に、センサやデータベースを含めた最新の研究動向を網羅したサーベイ論文であり、1年6か月で290回参照されるなど研究コミュニティから高く評価されている。

3. An Open Multi-Sensor Fusion Toolbox for Autonomous Vehicles, A. Monrroy, E. Takeuchi, S. Kato, M. Edahiro, IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci. Vol. 103, No. A(1), pp.252–264, 2020.

概要:自動運転に必要となるデータ処理とカメラ・レーザースキャナのセンサフュージョン技術について、ソフトウェアフレームワークの設計と合わせて開発し、大規模データセットを用いた評価を行った。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 東大グループ

研究代表者: 加藤 真平 (東京大学 情報理工学系研究科 准教授)

研究項目: 危険と異常の予測に対応した自動運転システム

- ・有向グラフ(DAG)を用いたシステム異常の予測
- ・Activation Vectors と Calibration を用いたアルゴリズム異常の予測
- ・危険予測と異常予測に関する処理の組み込みシステム化
- ・クラウドを用いた学習用データ管理機構(慶大と連携)

② 名大グループ

主たる共同研究者: 武田 一哉 (名古屋大学 未来社会創造機構 教授)

研究項目: 特定の目的・状況に特化したデータ駆動型の自動運転知能

- ・センサデータのボトムアップ分節化と言語化
- ・センサ信号からの特徴量抽出と自己写像による特異性検出

③ 慶大グループ

主たる共同研究者: 河野 健二 (慶應義塾大学理工学部 教授)

研究項目: オンラインの大規模データ解析機能を有した自動運転クラウド

- ・マルチテナントクラウドにおけるプライバシー保証
- ・クラウド価格対性能を最大化する機械学習スケジューラ
- ・深層学習を用いた画像 SLAM(東大と連携)

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

研究代表者の加藤らを中心として自動運転システムのオープンプラットフォームを促進する国際業界団体「Autoware Foundation」を設立、国内外の半導体メーカーやテック企業、スタートアップなど 60 社以上が参加しており、本研究成果のグローバル展開が期待できる。

加藤らの共同研究先や加藤らが創業したベンチャー企業「ティアフォー」の提携先とも実証実験などで連携している。以下、公開されてる範囲での代表的な取り組み:

- ・トヨタ自動車との自動運転バスの開発(東京オリンピック・パラリンピックで 24 時間運行を実施)
- ・ヤマハ発動機との自動搬送カートの開発(合弁会社を設立し、24 時間サービスとして商用化)
- ・損保ジャパンとの自動運転専用保険の開発(世界で初めて自動運転専用保険として認可獲得)
- ・ミナミホールディングとの AI 教習システムの開発(合弁会社を設立し、AI による教習を商用化)

上記以外の連携についても、主に国外の大学や研究所が本研究成果の一部を利用して自動運転システムの開発および実証実験を展開している。以下、把握できてる範囲での利用国:

日本、中国、台湾、香港、アメリカ、カナダ、イギリス、イタリア、スウェーデン、エストニアなど

また、研究代表者の加藤は行政や業界団体が主宰する数多くの委員会やワーキンググループにも有識者として参加しており、特定の企業ではなく産業界全体と連携をとりながら、本研究成果の社会実装、産業展開を進めるリーダーも務めている。以下、主な取り組み:

自動車技術会主宰の自動運転 AI チャレンジ(委員長)

経済産業省主宰の AI エッジコンテスト(委員長)

経済産業省主宰の自動走行ビジネス検討会 次期プロジェクト(座長)