

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 2016年12月～2019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における危険と異常の予測という課題に対して、まずはスモールフェーズの目標として図 1-1 に示す枠組みのプロトタイプ設計・実装を行った。また、研究成果の実用化に向けて、データ取得から管理、ラベル付け、学習の訓練までを統合的にオンライン利用可能にしたウェブサービス「Automan」を一般公開した<sup>(注1)</sup>。

(注1) <https://automan.ai>

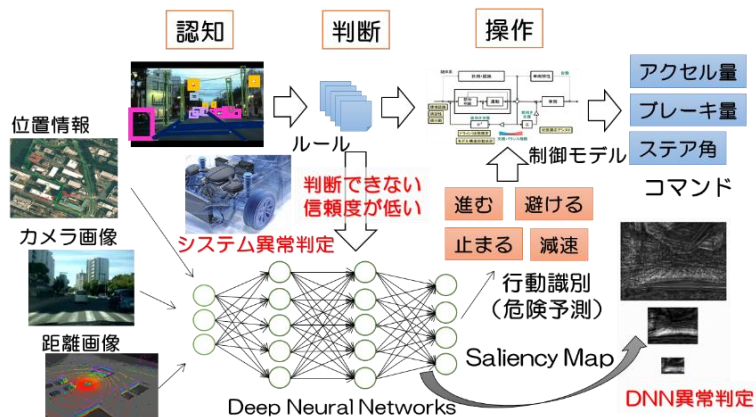


図 1-1 データ駆動型の危険予測および異常予測の枠組み  
(スモールフェーズの目標)

### 【アルゴリズム研究 (東大グループ・名大グループ)】

完全自動運転用の危険予測と異常予測には運転データの学習が必要不可欠である。運転データは、単純にアクセル、ブレーキ、ステアリングの値を収集すればよいというわけではなく、その時の周囲環境の画像や 3 次元点群も同期して収集しないと効果をもたない。しかしながら、画像や 3 次元点群は毎フレーム数 MB のサイズになり、リアルタイムに解析するどころかオンラインでデータ収集することすら困難であるのが現状である。本研究では、まずこのデータ収集を効率的に実施できる仕組みと点群圧縮アルゴリズムを構築した。画像圧縮については多くの先行研究が存在するが、本研究では 3 次元点群に対して既存の動画画像圧縮の応用と位置推定技術を組み合わせ、点群の圧縮誤差を 15cm 以下に抑えつつ、データ転送量を 100 倍以上改善できる新しいアルゴリズムを考案した。

次に、このように収集したデータを用いて危険予測に関する研究を行った。実用の多くの危険予測はルールベースシステムに基づいているが、本研究ではノンパラメトリックなベイズ法により、複数のセンサデータの時系列をボトムアップに分割・分節化して得られた記号系列に対して潜在意味分析を行うことで、危険な車線変更シーン等を検出する方法を提案した。また、他車や歩行者を点群情報から 3 次元空間的に認識し、非線形カルマンフィルタ等のトラッキングにより従来よりも 4 倍以上少ない情報量で他車両の衝突を予測できるアルゴリズムを考案した。

異常予測については、データ駆動型の自動運転 AI を逐次的に学習するに当たり、センサやデータ収集システムの不調あるいは運転者の運転誤りなどに起因する不適切なデータを取り除くために、複数のセンサモダリティで取得された空間・時系列情報を統合的に表現する特徴空間を見出し、当該空間上での Outlier として異常状態を検出する方法に関して研究を行った。今後、異常予測精度の定量評価を行い、更なる改善を目指す。

### 【システム研究 (東大グループ・慶大グループ)】

本研究で構築する完全自動運転システムは、車両側のエッジと AI サービス側のクラウドから構成される。エッジ側は、実時間での認知、判断、操作にかかる多数のタスクが互いに入出力関係を持ちながら構成されている。これは有向グラフ (DAG) として表現することが可能であり、各々のノードが正しい順序とタイミングで実行されていれば、システムとして異常なしと判定できる。本研究では、その判定の瞬時的な出力を可能にする時間付き DAG 解析の研究を行った。具体的には、1%程度の判定ミスを許容することで解析の悲観性を減らすことができ、実時間の事象に限りなく近い精度でのタイミング判定を可能にした。

これらの成果は自動運転ソフトウェア「Autoware」の一部としてオープンソース化する。

一方、クラウド側のデータ管理や深層学習に関する研究成果は本研究で新たに構築した自動運転 AI サービス「Automan」に集約している。クラウド側はハイエンド GPU やメニーコアを用いた高性能計算システムになっており、サービスに必要となる性能を維持しつつ、クラウド利用費用（計算時間とデータ量）を抑えられるリソース管理技術の研究を進めた。本研究全体としては図 1-2 に示す車載側エッジとサービス側クラウドの統合も行った。

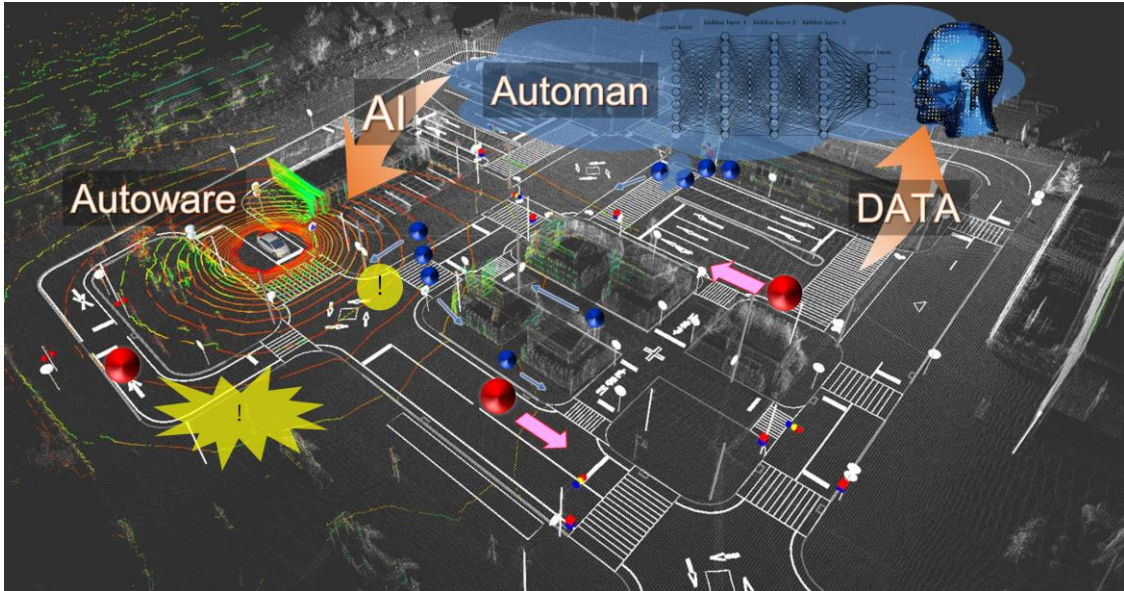


図 1-2 本研究全体のシステムイメージ (Autoware と Automan の関係)

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. 完全自動運転ソフトウェアの組込みシステム実装

概要: 完全自動運転には高度な認知、判断、操作が必要になるが、これらを実時間で処理するために従来は高性能なコンピュータが必要であった。本研究では、GPU やメニーコアといった並列計算技術を用い、計算負荷の高い特定の処理を制御用の CPU コアからオフロードすることで高負荷な計算を実時間処理できるシステムを実現した。本研究成果は、研究代表者の加藤らが中心となって開発を進めているオープンソースの自動運転ソフトウェア「Autoware」に導入され、GitHub 上では 2500 以上のスター数を獲得している。

### 2. クラウド上でのマルチテナント向け GPGPU 環境

概要: 自動運転クラウド環境において GPU による高性能計算の恩恵を享受するには、複数の GPU プログラムの同時稼働とともに各プログラム(セッション)の隔離性を保証する必要がある。本研究では、マルチテナント向け GPGPU 環境に対してイベントドリブンプログラミングモデルおよび実行ランタイムを提供し、GPU プログラム実行で発生する各イベントをスケジューリングポイントとして GPU 処理のスケジューラビリティと隔離性を確保することを実現した。本成果はクラウドコンピューティングに関するトップ会議である ACM SoCC'17 に採録された。

### 3. 学習データ圧縮と車線変更時の危険予測

概要: 自動運転 AI の学習に不可欠な3次元点群データの高能率圧縮方法を世界に先駆けて研究し、時空間的予測符号化を用いることで、精度誤差を 15cm 程度に抑えつつ、転送量を 1/100 に圧縮可能なことを示した。また、複数のセンサデータを統合する際にノンパラメトリックなベイズ法によるボトムアップの分割・分節化を適用することで、記号系列の潜在意味分析を

行い、危険な車線変更シーンの検出を可能にした。

< 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 サービス「Automan」の開発

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になった。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。

#### 2. 自動運転 AI サービス「Automan」を利用したベンチャービジネス

概要:本研究成果である Automan のサービス化を促進させるために、本研究プロジェクトからのスピンアウトという形でベンチャー企業「株式会社セキュアエンジン」を設立した。主に本研究プロジェクトに参画した学生を中心とした組織で、Automan のサービスとしての設計から研究成果をサービスの機能として実装する技術開発、またサービス普及のためのインタフェース開発などを手掛けている。CREST の研究とベンチャーの企業経営を同時並行で進める枠組みが出来つつある。

#### 3. 完全自動運転のための遠隔監視システムの開発と実用化

概要:完全自動運転の社会実装は、研究技術の発展だけでは実現できず、法規制の基準緩和とそれを満たすシステムの開発が不可欠である。本研究では、2017 年 12 月に全国で初めて運転席無人の自動運転(レベル 4)を一般公道で実現したが、そこに至るまでには経産省や国交省、そして警察庁との長い協議があった。その結果を踏まえてレベル 4 の基準を満たす遠隔監視システムの開発を行い、損保ジャパン日本興亜と共同で専用施設「コネクテッドサポートセンター」の運用を開始した。

< 代表的な論文 >

1. E. Yurtsever, S. Yamazaki, C. Miyajima, K. Takeda, M. Mori, K. Hitomi, M. Egawa, Integrating Driving Behavior and Traffic Context Through Signal Symbolization for Data Reduction and Risky Lane Change Detection. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 3, No. 3, pp. 242-253, 2018.
2. S. Kato, S. Tokunaga, Y. Maruyama, S. Maeda, M. Hirabayashi, Y. Kitsukawa, A. Monroy, T. Ando, Y. Fujii, T. Azumi, Autoware on Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems. In Proceedings of ACM International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS), pp. 287-296, 2018.
3. Y. Suzuki, H. Yamada, S. Kato, K. Kono, GLoop: An Event-driven Runtime for Consolidating GPGPU Applications. In Proceedings of ACM Symposium on Cloud Computing (SoCC), pp. 80-93, 2017.

## § 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) を用いたシステム解析
- ・深層学習処理の中間データの可視化
- ・GPU とメニーコアを用いたスケーラブルな深層学習基盤
- ・システム異常の予測
- ・クラウドを用いた学習用データ管理機構

### ②名大グループ

主たる共同研究者: 武田 一哉 (名古屋大学大学院未来社会創造機構 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

- ・運転データの圧縮
- ・学習における特異データの除去
- ・未学習データの検出
- ・特定シーンの危険予測
- ・アルゴリズム異常の予測

### 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

- ・GPU 仮想化
- ・メニーコア仮想化
- ・マルチテナントなクラウド学習基盤
- ・クラウド上の学習データに対するセキュリティ機構
- ・深層学習を用いた画像 SLAM

## (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。

Arm, Intel, Xilinx, LG Electronics, HiSilicon, TRI-AD, Velodyne, Apex.AI, Linaro, Tier IV など

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企業:

NVIDIA, NTTドコモ, KDDI, 損保ジャパン日本興亜, Japan Taxi, アイサンテクノロジーなど

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

経済産業省主宰の AI エッジコンテスト

経済産業省主宰の人材戦略 WG