

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属		役 職
		やぎぬまひでき 柳沼秀樹	東京理科大学		准教授
②研究 テーマ	名称	カメラ画像および複数の観測データを融合した次世代交通計測手法に関する研究開発			
	政策 テーマ	[主テーマ] 新たな行政システムの創造	分科会／ 公募タイプ	タイプⅣ	
		[副テーマ] 新たな情報サービスと利用者満足度の向上			
③研究経費（単位：万円）		令和3年度	令和4年度	令和5年度	総 合 計
※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせることに		4,799	4,354	4,066	13,219
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏 名		所 属 ・ 役 職（※令和6年3月31日現在）			
石垣綾		東京理科大学創域理工学部経営システム工学科・教授			
西山裕之		東京理科大学創域理工学部経営システム工学科・教授			
谷口行信		東京理科大学工学部情報工学科・教授			
石坂哲弘		日本大学理工学部・准教授			
小嶋文		埼玉大学大学院理工学研究科・准教授			
原祐輔		東北大学大学院情報科学研究科・准教授			
和田健太郎		筑波大学システム情報系・准教授			
瀬尾亨		東京工業大学環境・社会理工学院・准教授			
⑤研究の目的（提案書に記載した研究の目的を簡潔に記入下さい。）					
本研究は、既設のCCTVカメラを利活用した常時交通計測体制の実現と実務への速やかな展開を念頭に「AI画解析技術に基づく高精度な移動体検知手法」と「複数の観測データを融合した交通量等データの生成・補正手法」をコアとする次世代交通計測システムの構築を目的とする。本研究の目的を達成するために、以下に示す3つの具体的なテーマを設定して研究開発を推進する。 テーマ1：次世代型交通計測による道路DX推進に向けたデータ利活用の検討・検討 テーマ2：AI解析とカメラ画像を活用した交通移動体の高精度検知手法の開発 テーマ3：複数の観測データを融合した交通量等データの生成・補正手法の開発					

⑥これまでの研究経過、目標の達成状況

- ・研究の進捗や、研究の目的に沿って研究期間内に目指した目標の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等（外注を実施している場合は、その役割等も含めて）について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。）
- ・研究期間内に目指した目標、実施方法等に当初の提案書から変更があれば、その理由を含めて記入下さい。

【研究過程・目標の達成状況】

本研究開発では、初年度に新型コロナの影響により実務者ヒアリング調査に遅延が生じたが、当初設定した3つのテーマを軸に研究を遂行した。また、研究期間内にAI技術の社会実装が大きく進展し、道路交通センサスや災害時交通状況の把握等に本研究での成果を早期に導入することが関係各所から要望された。これを踏まえて、テーマ3の研究項目を一部縮小し、交通量および速度を高精度に取得可能とする研究開発および早期に実務展開可能なシステム実装を重点的に取り組んだ。研究内容に若干の変更が生じたものの、以下に示すように当初の目的を概ね達成したと判断する。

【テーマ1】次世代型交通計測による道路DX推進に向けたデータ利活用の検討・検証

全国の実務者（行政、道路管理者、コンサルタント、学識者等）を対象に、研究期間内に延べ40回以上の意見交換会を実施し、本研究課題が提案する次世代交通計測システムが具備すべきシーズとニーズを把握・整理した。また、道路DXにおけるシステムプロダクトの設計思想として、人間中心設計（HCD）やペインリリーバ/ゲインクリエイタの概念を導入し、下記の2つのテーマでの成果を踏まえて、実務者の計算機性能や通信環境に依存しないクラウド型サービスとして次世代交通計測システムのプロトタイプシステムを実装した。

【テーマ2】AI解析とカメラ画像を活用した交通移動体の高精度検知手法の開発

道路上の既設CCTVカメラでの利用を想定した交通計測特化型AIモデルを構築し、交通移動体の検知性能を交通量カウント精度で評価した。提案したAIモデルは、[テーマ1]で明らかになった実務での要求性能を担保すべく、精度低下が著しい交通・環境・設置条件への対応、多様なモード（二輪車や歩行者）、詳細な自動車車種分類に拡張した。さらに実適用上の課題である学習データセット構築とモデル学習に対して、新たな3つの手法、(1)説明可能なAI（XAI）を活用した戦略的転移学習手法、(2)ドメイン適応に基づく自己学習手法、(3)デジタルツインを活用した仮想学習手法を提案し、性能を評価した。

【テーマ3】複数の観測データを融合した交通量等データの生成・補正手法の開発

テーマ[2]での移動体検知結果やセンサスやトラカン、ETC2.0プローブ等から多様な交通データを生成・補正モデルを構築し、現況再現精度を評価した。カメラ画像内レベルでのミクロデータとして、衛星画像や航空写真を用いた実空間距離（実空間座標）推定やカウントライン自動最適化を開発し、可能な限り人手を介することなく車線別車種別交通量と速度、車両軌跡データの取得を実現した。また、ネットワークレベルでのマクロデータとして、時系列AIモデルであるLSTMとガウス過程回帰を融合した時間帯別リンク・OD交通量生成モデルを構築し、性能を評価した。さらに、敵対的生成学習を活用した個人属性別のアクティビティデータ（終日の交通行動）生成モデルを構築し、これまでに取得が困難であったドライバーの個人属性を付加した交通量データの生成を試行した。

各研究者の役割・責任分担

各テーマについて担当した研究者は図1に示すとおりである。また、実務ニーズの把握や手法の精度検証等では、国総研や国土交通省本省、各地方整備局と協力を得て実施し、地域道路経済戦略研究会（関東）のメンバーをはじめ多くの学識者、実務者からの助言を得た。全国でのニーズ調査やモデル学習用データセットの構築の補助業務を外注しており、研究代表者および共同研究者はAIモデルや学習アルゴリズムの開発、実フィールドでの精度検証などに時間を割くことができた。

テーマ	研究者(所属・役職)	専門分野	実施内容
主査	柳沼秀樹(理科大・講師)	交通行動分析	全体統括
テーマ1 実務ニーズ把握とDX	小嶋文(埼玉大・准教授)	地域交通計画	- 実務者や開発者へのヒアリング - シーズ・ニーズの把握 - 社会実装に向けたDX検討 - 交通計測システム設計・実装 - ケーススタディ分析
	石坂哲弘(日大・准教授)	交通システム	
	石垣綾(理科大・准教授) ※理工・経営工学科所属	社会工学, DX	
テーマ2 交通検知AI検討	西山裕之(理科大・准教授) ※理工・経営工学科所属	機械学習	- 交通検知AIモデル構築, - 車種・環境に対応した拡張 - AIモデルの学習・高精度化 - 高速演算アルゴリズム構築
	谷口行信(理科大・教授) ※工・情報工学科所属	画像解析	
テーマ3 データ生成・補正検討	原祐輔(東北大・准教授)	交通行動分析	- ミクロ挙動モデル構築, - マクロ移動モデル構築 - データ拡大・補正モデル構築, - 交通エミュレーション構築 - モデル統合検討・検証
	和田健太郎(筑波大・准教授)	交通流理論	
	瀬尾亨(東工大・准教授)	交通流理論	

図1. 研究体制

⑦中間・F S評価で指摘を受けた事項への対応状況

・中間・F S評価で示された「修正内容」「指摘事項」等を記載するとともに、それへの対応状況を記入下さい。

令和4年度の「中間評価結果」における指摘事項を踏まえた対応状況を以下に示す。具体的な対応については、下記⑦の記述を合わせて確認頂きたい。

1. 最終年度に向けて、実務的に有用な結論に着地できる内容に重点化し、取捨選択して取り組まれない。

→ データ生成・補正手法の開発（テーマ3）について、実務者との意見交換からニーズの高い優先検討項目を設定し、これを重点的に取り組んだ。具体的には、カメラ画像から交通量や速度、車両軌跡データを取得する研究に焦点を当てて実施した。その結果として、実務ニーズを反映したCCTVカメラ画像とAI技術を活用した交通量計測システムが構築できた。

2. テーマ 2（AIによる車両検知手法）については、以下を実施していただき、交通量観測等の実務で活用可能な成果となるようとりまとめていただきたい。

- AIの改良の効果、即ち、交通量観測精度がどの程度向上しているのかを具体的に数値で示す。

→ 過年度においても精度検証は実施していたが、その成果を分かりやすく示すことが出来ていなかった。そのため、AIモデルの改良と並行して複数地点での精度検証を実施した。その結果、全時間帯を通じて概ね±10%の交通量計測精度を有し、夜間では最大50ポイント以上の改善が確認された。

- 計測結果だけではなく、【研究状況報告書】(P. 4)の図4のような、バウンダリボックスや交通量の計測ラインなどを表示したAI解析動画を閲覧する機能を実装する。(計測結果を視覚的に確認でき、システムの信頼性の向上やカメラ設置位置の改善等につながる。ぜひ実現していただきたい。)
→ 次世代交通計測システムにおいて、AI解析により得られる移動体のバウンダリボックス(座標)や計測ラインを可視化し、さらに動画として出力・保存・閲覧する機能を実装し、視覚的に分かりやすく扱いやすいユーザーインターフェースをシステム内に実装した。
 - 計測ラインの自動最適化手法については、15分間値や1時間値の計測中に画角が変化した場合、どのように上り・下りを判断し、集計するのか明らかにする。
→ 国土交通省が管理する既設CCTVの画角を変化させて実験することは日常業務の妨げとなるため、画角が異なる複数台のビデオカメラで同時観測実験を実施した。これにより、画角変化が生じたとしても計測ラインが最適化されることを検証し、その有効性を確認した。
 - 開発したAIの特徴(精度、計算速度等)と利用者のニーズを踏まえ、適用範囲(どのような場面で活用可能か)を整理する。
→ 国土交通省各地方整備局の実務者とのヒアリング結果から得られた利活用ニーズを整理し、これに対応したAIモデルのブラッシュアップとシステム実装に取り組んだ。また、複数箇所での精度検証から画角などの設置条件、日照変化(特に夜間)などの環境条件で検知性能に限界があることを明らかにした。
3. テーマ 1(実務者ニーズに基づく交通計測クラウドシステムの設計・実装)については、抽象的な内容にとどまらないよう、テーマ 2、テーマ 3(交通量データの生成・補正方法)の成果も踏まえて、さらなる具体的な検討を実施していただきたい。
→ 過年度までに得られた実務者ニーズおよびモデル構築の成果を踏まえ、かつ指摘事項1にある捨取選択を行なった上で、次世代交通計測システムの具体的な要件定義を行い、実務者が使いやすいユーザーインターフェースを有するシステムをクラウド上に実装した。さらに、実務者からの使用感などの意見を踏まえて、実装したシステムをさらにブラッシュアップした。
4. 競争の激しい分野であるので、積極的かつ迅速な論文等の発表(特に国際誌)を実施していただきたい。
→ 令和5年度は、画像解析およびAI技術に関連する内容を中心に学術論文発表(国内10本、海外3本)を実施して、積極的に研究成果の公表を行なった。また、本研究開発の成果を行政やコンサルタント等の実務者に知って頂くために、シンポジウム・セミナー等でも積極的に講演等を実施した。

⑧研究成果

・本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。

本研究課題のテーマ別に得られた成果の概要を以下に示す。

[テーマ1] 次世代型交通計測による道路DX推進に向けたデータ利活用の検討・検証

1-1 次世代交通計測システムに関する実務者ニーズの把握

本研究開発が目指す「次世代交通計測システム」が具備すべき実務的なニーズの把握を目的として、システムのユーザーとなる行政や道路管理者、コンサルタントの実務者を中心にインタビュー調査を実施した。研究期間内の3年間で継続的に延べ40回以上の調査を実施し、全体的なフィードバックを繰り返し行いながら、協働でシステムを作り上げた。以下に調査から得られた知見を整理する。

(1) CCTVとAI技術を活用した交通量調査に関するニーズと性能要件

初年度からの継続調査で大きく以下の3点が挙げられた。整理した要件は[テーマ2]で構築する交通計測特化型AIモデルの仕様に反映している。

- ・ 観測精度は、日交通量で±10%かつバラツキが小さいことが求められる。実務者が安心してデータを利用するためには昼夜で安定した精度（＝信頼性）の確保が必要。
- ・ 観測対象は、現行の調査体系と整合した車種分類（大きさ、用途、利用形態）への対応が業務遂行上求められており、さらに自転車と歩行者に関するニーズが高い。
- ・ 道路監視ではCCTVカメラを旋回させることが多く、カメラ画角が常に同じとは限らない。デフォルト画角（プリセット）に依存しない計測AIが必要。

(2) システムに求める実務での利活用シーン

利活用シーンは、大きく「平常時・災害時における交通状態のモニタリング」と「渋滞対策や整備効果評価のための分析」に分類された（図1）。前者はリアルタイム性が求められるため、簡易であること、高速処理であることが要件となる。一方、後者はデータを蓄積して各種分析に活用するため、高精度・高品質であること、時間的・空間的分解能が高いことが要件となる。システムではこれらに可能な限り対応した実装を行う。

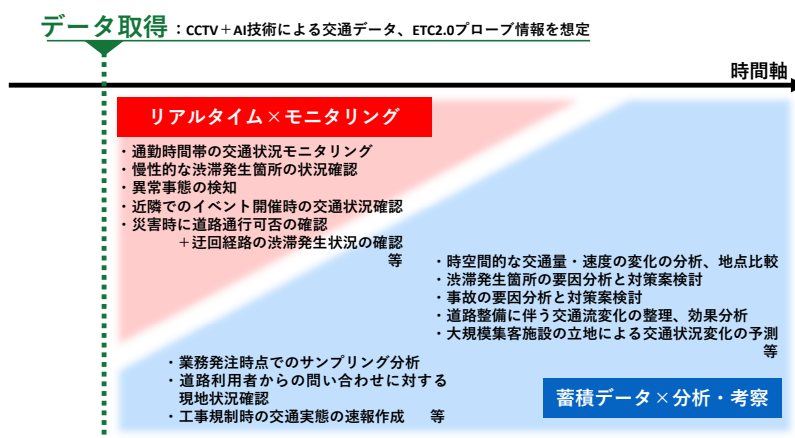


図1 本システムに求められる利活用シーン

(3) システムに求める具体的な要件

実務面でのデータ取得における課題と障害から次世代交通計測システムが備えるべき要件を以下の通り整理した。なお、現時点での未対応要件は継続して開発に取り組む。

- 各局・各事務所で捜査可能であり、不慣れな人でも利用できて、作業時間の高速化・効率化が図られる：クラウド型でユーザーインターフェースを備えた仕様
- データ形式が統一されており、資料にそのまま活用できる多様なグラフ描画や任意のファイルに出力できる：複数のグラフによる可視化とcsvでのデータ出力に対応
- 交通量データの過去・別地点での比較や気象情報や事故などのイベント情報の他のデータが表示できる：API経由で他のデータを取得・表示（データ権利関係で未対応）

以上の整理は、今後の施策展開におけるデータ利活用に関する体系的な知見として、有益な情報であり、本研究課題の大きな成果の1つに位置付けられる。

1-2 道路DXに資する次世代交通計測システムの基本設計・実装

国土交通省道路局では、道路DXの一環として道路データプラットフォーム「xROAD」の構築が進められており、本研究も最終的にはxROADとの連携を想定して開発を進めた。本研究では、交通計測およびデータ生成におけるDX化を念頭に、以下の2点をシステム設計方針として提案・実践した。

- ユーザーニーズに基づく人間中心設計（Human Centered Design: HCD）の適用
- ペインリリーバーによるユーザー体験（User eXperience: UX）の改善

すなわち、前者の要求事項を実務者ニーズから明らかにするアプローチ、後者のユーザーが直面している障害（ペイン）を取り除くことでプロダクトの価値向上とUXを向上させるアプローチを融合して、現場の実務者に寄り添ったシステム設計と実装を行なった。なお、このような設計思想は他のDX検討にも応用可能な一般的なフレームワークであり、この考え方自体も本研究の成果と言える。

1-3 次世代交通計測システムの実装と評価

上記での検討を踏まえて、実務者が利用可能なシステムを実装した（図2）。システム実装においては、CCTVカメラ画像とAI解析による交通量および速度計測（テーマ2とテーマ3の一部）を実現することを目指した。本システムの特徴を下記に示す。

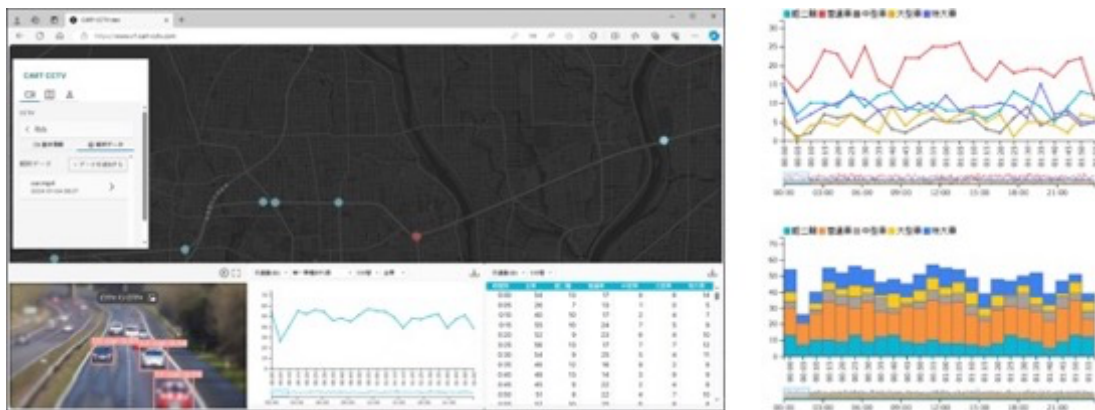


図2 実装したシステムの実行画面とデータ可視化例

- 利用者が視覚的にわかりやすい地図ベースとして、直感的な操作でグラフでの可視化を実現するユーザーインターフェースを導入
- CCTVカメラデータをアップロードするだけで数分後には計測結果が閲覧可能なクラウド型システムとして実装
- 交通量や速度の解析結果は統一フォーマットでダウンロード可能

このシステムにより、従前では時間と費用を要していた作業が大幅に効率化されることで、業務量や業務時間の削減に資するシステムを実装することができた。本研究課題の成果を速やかに実務に展開可能とする大きな成果である。

[テーマ2] AI解析とカメラ画像を活用した交通移動体の高精度検知手法の開発

2-1 交通計測特化型AIモデルの開発

国土交通省が運用しているCCTVカメラでの利用を前提とする「交通計測特化型AIモデル」を開発した。既存の一般物体検出モデルを拡張する形で交通移動体計測に特化した改良を行なった。モデルは「検知」と「追跡」の2つの手法で構成されている。テーマ2では「検知」に関する高度化に取り組んでおり、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を下敷きとするYOLO（You Look Only Once）を活用した。なお「追跡」は後述するテーマ3で検討した。本モデルの特徴は下記の通りである。

- 観測誤差±10%以内かつ時間帯で安定した検知性能を確保
- 精度低下要因となる環境条件（夜間、影などの日照条件、雨天などの気象条件）、交通条件（渋滞時の車両の重なり、車線数などの道路構造、複数の車種混入）、設置条件（カメラ画角、映り込み）に対応
- 多様な自動車車種（既存の料金体系や調査体系を考慮した7車種）に対応
- 自動車以外のモードとして二輪車（自転車、自動二輪車）および歩行者に対応

その結果、本研究では図3に示すように、これまで困難であった多様なモードと車種に対応した交通移動体の検知に成功した。

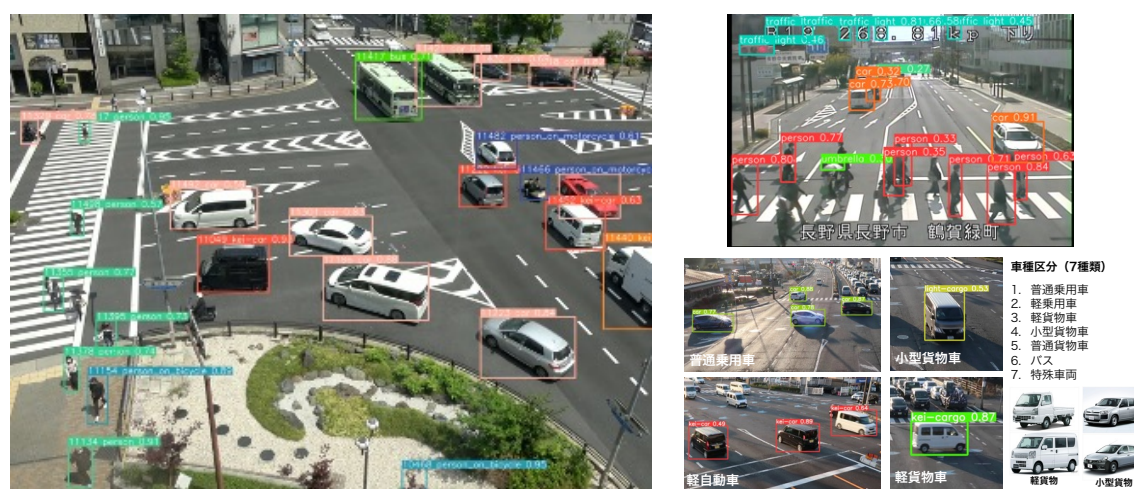


図3 交通計測特化型AIモデルによる検知結果

2-2 AIモデルの効果的学習アルゴリズムの提案と精度検証

AIモデルはデータを大量に学習することで検知精度を改善することが可能である。一方、学習データを作成するアノテーション作業は未だ手作業で多くの労力と時間を要しており、AI開発におけるボトルネックとなっている。さらに、各種条件が異なる複数地点のCCTV画像に対して、安定した精度を確保した汎化性能が高いAIモデルを開発することは困難であり、数千箇所のCCTVを個別に学習させることは現実的ではない。本研究課題では、交通計測特化型AIモデルに効果的な学習アルゴリズムを提案する。具体的には以下の3つである。

(a) XAI（説明可能なAI）を活用した戦略的転移学習

XAIを活用して精度低下要因を特定し、効率的かつ効果的な学習データセットを構築する方法を提案した。具体的には、Grad-CAMから得られるCNNモデルの判断根拠を類型化し、検知精度が低いターゲットのみを対象に戦略的に学習する。環境・交通・設置の3条件や車種別検知の精度向上に有効であることを確認した。

(b) ドメイン適応型自己学習アルゴリズム

自己学習（self-learning）や半教師あり学習（semi-supervised learning）の一種であり、「正解ラベル付き学習データの自動生成」と「生成データによる転移学習」を精度が改善するまで繰り返す手法を提案した。人手を介することなく地点別学習が自動で可能となり、車両の平均検知率が64.8%から81.7%に改善した（図4左）。

(c) デジタルツイン型自己学習アルゴリズム

上記(b)の手法を拡張した手法であり、ゲームエンジンを利用してCCTVカメラ画像を再現して自己学習する方法を提案した。取得が難しい画角変化や気象変化、日照変化に対応することが可能となり、試算では30ポイント以上の改善が確認された（図4右）。

これら3つの手法をCCTVカメラ動画に適用した精度検証結果を図5に示す。カメラ画質が悪く、検知精度が低い地点を対象に12時間分の解析結果を示している。なお、人手によりカウントした結果を真値とし、画面手前から奥に移動する方向をgoing、奥から手前に移動する方向をcomingとしていることに注意したい。



図4 提案した自己学習アルゴリズムの概要

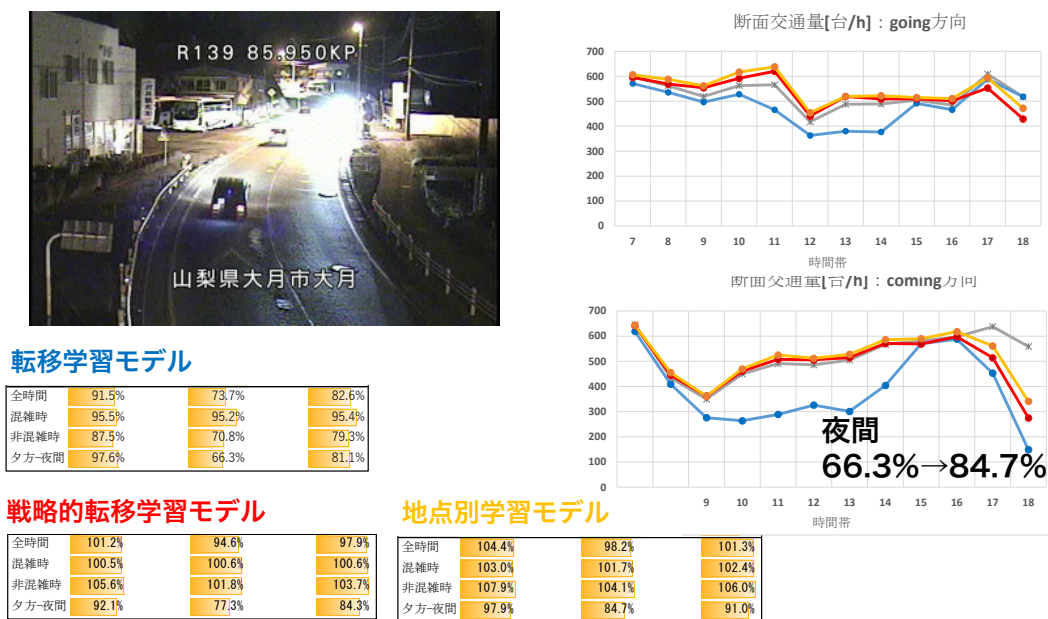


図5 学習による精度改善の例

通常の転移学習では、両方向で影によって昼間の精度が低く、coming方向では車両ライトによる白飛びで大きく精度が低下している。戦略的転移学習の結果、真値近い学習が行われており、夜間を除いてはほぼ100%の検知精度であることが確認できる。さらに自己学習アルゴリズムは、人手を必要しない方法であるにも関わらず戦略的転移学習を超える精度が得られた。これにより、従前よりも効果的かつ効率的な手法であると示唆される。

以上より、従来よりも高性能・高精度、さらに地点別学習にも対応した交通計測特化型AIモデルおよび学習アルゴリズムを提案することに成功した。今後の研究開発や実務展開に大きなインパクトを与える成果である。

[テーマ3] 複数の観測データを融合した交通量等データの生成・補正手法の開発

3-1 複数の観測データを融合したミクロ交通データの生成・補正手法の開発と検証

カメラ画角内におけるミクロスケールでのデータを生成・補正する手法を開発し、その精度を検証した。ここでは[テーマ2]で構築したAIモデルから取得した移動体検知結果を活用し、複数のデータと融合することで交通量や速度、車両軌跡を効率的に生成する。

(1) 衛星および航空写真画像を活用した実空間距離の推定

移動体の移動距離や速度を算出するためには、AIによる検知したカメラ画像内の位置座標を実空間における位置座標（緯度・経度）に変換する必要がある。古くから射影変換が使われているが、実空間の位置座標を現地測量等から取得する必要がある、非常にコストが高い状況にある。そこで、googleが無償提供している衛星画像と民間企業が有償提供している航空写真（5cmおよび25cm解像度）を活用した効率的な変換手法を提案した。複数地点のCCTVカメラ画像に対して検証した結果、距離推定の誤差率は衛星画像で1.9%、航空写真の5cmと25cm解像度で3.4%と4.4%であり、現地測量に頼らずに高い精度を確保した。

(2) カメラ画角の変化に対応した計測ラインの自動最適化

交通量や速度は、カメラ画像内に計測ラインを設定して計測を行うが、実務では手作業で設定しており、画角が変化すると再設定が必要となる。また、計測ラインの設定位置によって交通量カウント結果が変化することが過年度の検討より明らかになっている。そこで、カウントラインを自動最適化する手法を構築した。具体的には、Byte Track等の追跡アルゴリズムから取得し車両軌跡データを先述の射影変換による実空間座標に変換し、車両軌跡をクラスタリングによって車線を特定する。その上で、車線別に車両軌跡の密度が最大となる計測ラインを最適化問題として探索することで、最適な計測ラインを自動で取得可能とした。画角変化に対する検証を実施した結果、最適化による更新なしでは画角の変化により計測ラインがずれるため交通量カウントが0となるが、更新ありでは画角変化に追従して計測ラインが最適化されるため適切に交通量カウントが実行された(図6)。また、複数のCCTVカメラ画角で最適化を実施した結果、手動設定よりも計測誤差が低いことが明らかとなった。

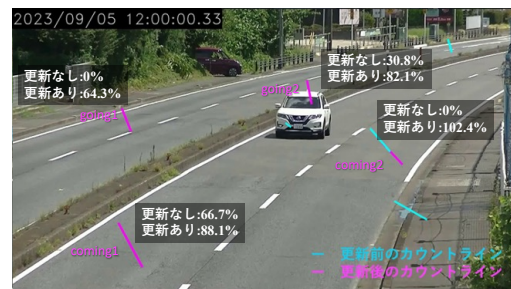


図6 計測ライン自動最適化の検証

(3) ミクロ交通データ生成の高度化と検証

これまでの研究成果を統合して、カメラ画像から交通量、速度および車両軌跡データの生成を行なった。車両単位での車両軌跡を生成し、車線別の計測ラインを設定した上で、通過判定と速度算出を同時に行うロジックを構築した。その結果を任意の時間単位(5分や1時間など)、車線別および車種別での交通量と速度を取得可能とした。速度の計測精度は、人手観測と比較して $\pm 4\text{km}$ 以内の精度であることを確認した(図7)。

以上より、実空間座標への変換、車線判別および計測ラインの自動化を導入したCCTVカメラ画像とAI技術による高精度な交通計測手法を確立した。さらに、人手によるマニュアル設定を極力排除したことで、合理化と効率化を実現し、現場負担の低減に大きく貢献することに成功したと考える。

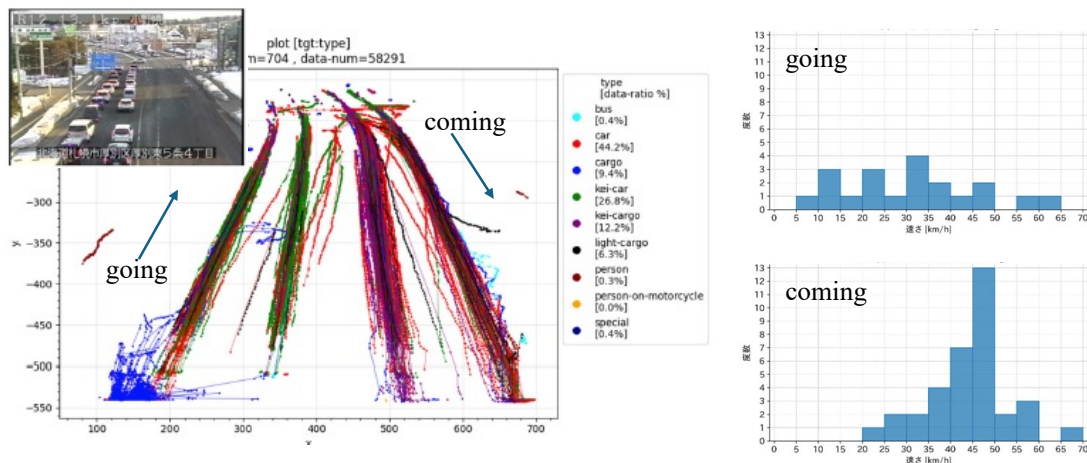


図7 車線別車種別移動軌跡と速度分布の計測例

3-2 複数の観測データを融合したマクロ交通データの生成・補正手法の開発と検証

ネットワークレベルにおけるマクロスケールでのデータを生成・補正する手法を開発し、その精度を検証した。ここでは生成したミクロスケールの固定点観測データとETC2.0プローブやセンサ調査でデータ等を融合することで時間帯別リンク交通量およびOD交通量、アクティビティデータを生成するAIモデルを構築した。なお、項目⑥にて記述したとおり、研究計画を一部変更しているため、本節の内容は当初の予定とは若干異なることにご留意頂きたい。

(1) 時系列AIモデルを活用した時間帯別リンク交通量生成モデルの構築と検証

対象領域における時間帯別リンク交通量は、時系列AIモデルであるLSTM (Long Short Term Memory) を活用してモデルを構築した。モデルアーキテクチャやグラフ畳み込み演算 (GCN) を活用した道路ネットワーク構造の特徴量、気象データ等を考慮した精度改善を試みた。首都圏を対象とした検証の結果、決定係数0.94, RMSE13.8[car/h]と高い精度が得られたが、一部に系統的なズレを確認した。また、LSTMに代わりにリザーバーコンピューティング手法のEcho State Network (ESN) を適用して計算コスト改善を試みた。ESNはLSTMよりも数百倍高速で推論可能であるが、予測精度が若干劣ることを確認した。

(2) ガウス過程回帰を活用した時間帯別OD交通量生成モデルの構築と検証

対象領域における時間帯別OD交通量は、ガウス過程回帰 (GPR) を活用して、上記にて生成したリンク交通量からOD交通量を推定する学習モデルを構築した。GPRを多層化するアプローチやカーネル関数の最適化を実施して精度改善を試みた。東京都市圏を対象とした検証の結果、複数モデルの中でDeep multi-task GPRとMatern5/2カーネルによる生成モデルが決定係数0.75と良好な結果が得られた。

以上の(1)と(2)の成果は、これまで日単位でのリンク交通量に基づく各種評価分析が実施されてきた状況において、評価分析対象期間のプローブデータ等が入手できれば、時間分解能の高い交通量データを生成可能とした。さらに、これまでデータ取得に労力を要した時間帯別OD交通量を生成可能としたことは、実務的にも大きな成果である。

(3) 敵対的生成学習を活用したアクティビティデータ生成モデル構築と検証

多様な施策評価に対応すべく、個人の属性や移動目的などのアクティビティ (生活行動) データに関するニーズが見られた。本研究では、生成モデルの一種である敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network: GAN) を活用したデータ生成手法を提案した。具体的には、データセットに含まれる変数の分布を学習して仮想的なデータテーブルを生成する手法であり、CTGAN (Conditional Table GAN) とTVAE (Table Variational Auto Encoder) のアルゴリズムを東京都市圏パーソントリップ調査データに適用した。その結果、概ね観測分布と一致するデータを生成することに成功した。

今後はこれらの成果を活用して、上記の(1)から(3)のデータをフュージョンすることで属性情報等を付与した交通データの生成を試みたい。

⑨研究成の発表状況

・本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く）、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。

本研究課題での学術的な成果は下記に示すとおりである。研究期間終了後も継続して成果を公表していく。

【査読付き論文・発表】

- [1] Ishijima, Y., Yaginuma, H., Terabe, S., Uno, H., Suzuki, Y., Interpretability of machine-learning based travel behavior models using XAI, *16th International Conference on Travel Behavior Research (IATBR)*, 2022.
- [2] Yamashita, S., Yaginuma, H., Terabe, S., Uno, H., Suzuki, Y.: Combining Multivariate LSTM and Gaussian Process Regression OD Traffic Generation by Time of Day, *Proceedings of the 15th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.15, 2023.
- [3] Haga, Y., Yaginuma, H., Terabe, S., Uno, H., Suzuki, Y.: Proposing an Accurate Counting Method for Moving Objects by Optimizing Count-line Placement, *Proceedings of the 15th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.15, 2023.
- [4] Obara, K., Yaginuma, H., Terabe, S., Uno, H., Suzuki, Y.: Development of Traffic Measurement AI for Bicycles and Pedestrians, *Proceedings of the 15th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.15, 2023.
- [5] 芳賀柚希, 梶月健吾, 柳沼秀樹: CCTV カメラを活用した交通量計測 AI モデルの高度化, 第 35 回日本道路会議, 2023.
- [6] 山下聖太郎, 山田健登, 柳沼秀樹: 複数の観測データを融合した交通データ生成 AI の構築, 第 35 回日本道路会議, 2023. 【奨励賞受賞】
- [7] Obara, K., Yaginuma, H., Terabe, S., Uno, H., Suzuki, Y., Proposal of Self-Learning Algorithm Based on Domain Adaptation for Vehicle-Specific Traffic Measurement AI, *Transportation Research Board 103rd Annual Meeting*, No.24-21013, 2024.
- [8] 尾原健太郎, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: 二輪車および歩行者に対応した交通計測 AI の開発および地点別自己学習手法の提案, 土木学会論文集 (土木計画学), Vol.79, No.20, 2024.

【査読なし論文・発表】

- [9] 石嶋悠嗣, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香: Explainable AI を活用した機械学習型交通行動モデルの解釈可能性, 第 65 回土木計画学発表会・講演集, 2022.
- [10] 芳賀柚希, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: 説明可能な AI を活用した CNN 型交通計測モデルの戦略的高度化, 第 66 回土木計画学発表会・講演集, 2022.
- [11] 山下聖太郎, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: 多変量 LSTM とガウス過程回帰を融合した時間帯別 OD 交通量生成, 第 66 回土木計画学発表会・講演集, 2022.
- [12] 石嶋悠嗣, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: CTGAN と TVAE を活用したアクティビティデータ生成手法の構築, 第 66 回土木計画学発表会・講演集, 2022.
- [13] 岩尾優和, 岡田梨伊奈, 山本洋太, 谷口行信: カウントラインの自動設定による交通量計測の高精度化, 第 51 回画像電子学会年次大会, PO-5, 2023.
- [14] 目黒圭峻, コウ ゼイリン, 山本洋太, 谷口行信: 車の流れに着目した遮蔽に頑健な交通量計測, 第 51 回画像電子学会年次大会, PO-6, 2023.
- [15] 尾原健太郎, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: 二輪車および歩行者に対応した交通計測 AI の開発および地点別自己学習手法の提案, 第 67 回土木計画学発表会・講演集, 2023.
- [16] 尾原健太郎, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: 車種別交通量計測 AI を対象としたドメイン適応に基づく自己学習アルゴリズムの提案, 第 68 回土木計画学発表会・講演集, 2023.

- [17] 芳賀柚希, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: カウントライン自動最適化による車線別交通量計測 AI モデルの構築, 第 68 回土木計画学発表会・講演集, 2023.
- [18] 椎名昂, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: エッジコンピューティングを用いた交通量計測システムの性能評価, 第 68 回土木計画学発表会・講演集, 2023.
- [19] 皐月健吾, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 鈴木雄, 海野遥香: ゲームエンジンを活用したデジタルツイン上における交通量計測 AI 学習データの生成, 第 68 回土木計画学発表会・講演集, 2023.
- [20] 山田健登, 山下聖太郎, 柳沼秀樹, 寺部慎太郎, 海野遥香, 鈴木雄: リザーバコンピューティングを活用した時系列リンク交通量推定的高速化, 第 68 回土木計画学発表会・講演集, 2023.
- [21] 目黒圭峻, 山本洋太, 谷口行信: 交通流に基づく位置予測を用いた遮蔽に頑健な交通量計測, 2024 年電子情報通信学会総合大会, D-11B-07, 2024.

⑩研究成果の社会への情報発信

・ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。

本研究課題が社会実装を強く意識したテーマであるため、実務者に向けてセミナー等を中心に研究成果を積極的に情報発信した。下記に比較的規模の大きいものを中心に示す。

- [1] 第 4 回 JSTE シンポジウム (2022 年 11 月 24 日~25 日), A-2 (株) 道路計画セッション「交通マネジメントへの画像解析技術実装への道」, 研究成果に関する話題提供
- [2] 新道路合同セミナー (2023 年 2 月 27 日), 新道路研究課題 3 テーマ合同での研究成果報告および情報交換会, 研究成果に関する報告
- [3] 京都大学 DARUMA プロジェクト国際セミナー (2023 年 5 月 17 日), 「AI based Traffic Observation System and Activity Simulation for Tokyo Metropolitan Area」, 研究成果に関する話題提供
- [4] 立命館大学知能化社会デザイン研究センターセミナー (2023 年 9 月 22 日), 「AI 技術を活用した次世代交通計測手法の構築」, 研究成果に関する話題提供
- [5] 第 35 回日本道路会議 (2023 年 11 月 2 日), 基調講演・パネルディスカッション「道路計画論の再構築 ～整備済み区間に偏在する課題への対応～」, パネリスト登壇
- [6] 第 5 回 JSTE シンポジウム (2023 年 11 月 29 日~30 日), B-1 国土交通省セッション「道路行政に関わる最近の話題」, 研究成果に関する話題提供とパネリスト
- [7] 第 5 回 JSTE シンポジウム (2023 年 11 月 29 日~30 日), C-2 (株) 道路計画セッション「道路システムの DX に向けて」, 研究成果に関する話題提供とパネリスト
- [8] 第 5 回 JSTE シンポジウム (2023 年 11 月 29 日~30 日), D-2 (株) 福山コンサルタントセッション「工事中交通マネジメントのこれから」, パネリスト
- [9] 建設通信新聞, 「世界に誇れる道路サービス構築へ」, 2023 年 12 月 18 日 12 面 (第 35 回日本道路会議に関する記事)
- [10] 令和 5 年度東北国道協議会担当者研修会 (2024 年 2 月 5 日), 「2050 年に向けた新たな道路空間の価値創出」, 研究成果に関する話題提供
- [11] 新道路研究プロジェクト合同報告会 道路 DX に向けた最新の取り組み (2024 年 3 月 8 日), 塩見教授と共同で成果報告会およびパネルディスカッションを実施

⑪研究の今後の課題・展望等

・研究の目的に沿って研究期間内に目指した目標の達成状況や、得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。

本研究では、全国の実務者を対象にニーズを調査し、AIを活用した交通計測に特化した画像解析技術および交通データの生成・補正技術を開発し、実務での速やかな利活用を実現すべくクラウド上に次世代交通計測システムを実装した。概ね要件を満たす成果となっているが、研究開発を通じて明らかになった課題や今後の展望を以下に示す。

(1) 交通計測特化型AIモデルの更なる精度向上

- 本研究で構築した交通計測特化型AIモデルは、実務ニーズを網羅した要件を備えているが、夜間（特に照明が少ない地点）の交通量計測精度に課題がある。生成AIによる夜間画像の鮮明化やマルチモード学習などの新たな技術を導入した改良が必要であり、継続して研究開発を実施している。
- 設置カメラの画角がAI交通計測に不向きなケースが散見されたため、AIモデル本体の改善と並行して、計測精度を最大にするように画角を最適化する手法の開発が求められる。すでにデジタルツインを活用した計測画角最適化手法の開発に着手している。

(2) 政策ニーズに対応したデータの更なる充実

- 実務ニーズ調査において、整備効果計測や渋滞対策評価に利活用可能なデータが求められていたが、今後はWISNET2050で示されているように、従前とは異なるサービスレベルの評価に資する新たなデータが求められる。データ生成・補正技術のさらなる研究開発が必要となるが、その際には継続的に実務ニーズを把握する体制を構築して研究と実務のギャップやミスマッチを防ぐ仕組みが重要となる。
- AI技術を活用したデータの品質管理・保証は十分に議論されておらず、産官学が連携してV&V（Verification & Validation：検証と妥当性確認）に関する検討体制を構築することが適切な運用・管理を実施する上で求められる。これらについては、本研究で作成したベンチマークデータや検証方法の公開、さらには土木学会や交通工学研究会にタスクフォースを設置することを検討している。

(3) システムの継続的開発と既存システムとの連携による更なる改善

- 本研究開発で構築したクラウド型システムは、実務での速やかな利活用を念頭に構築しているが、解析結果の可視化方法や定型フォーマットでの出力機能など、実務者からの改善要望を頂いている。これらは可能な限りシステムに反映して、より使いやすい実務サポートツールとして改善をしていく。さらに、国交省のデータプラットフォームであるxROADとの連携を進めて、強固なデータ基盤を構築したい。
- 研究終了後においても構築したシステムを維持・更新管理する運用体制が求められる。AI技術は日進月歩であり、陳腐化を防ぐためにも大学が方法論の研究開発を継続して進める。くわえて、国土交通省を中心に本システムを積極的に業務内に利活用して頂き、ケーススタディを重ねることで改善点を明らかにし、システムの改良や維持・保守管理する体制を構築したい。

⑫研究成果の道路行政への反映

・本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。

本研究課題は、当初より実務的な利用を想定した開発を実施しており、理論面と実務面の双方から取り組んできた。実務者の強力を得ながら、可能な限り現場の意見を反映させたAI技術の開発とシステム実装に成功している。その結果、本システムは道路交通センサスでの活用や平常時・災害時の常時交通状態モニタリング体制の構築などの道路行政の現場に早期に反映可能な成果となっている。本研究成果を速やかに国土交通省内で活用できる体制を構築し、多くの工数を要しているデータ取得を容易にすることで、本来時間を割くべき本質的な分析検討や施策検討に注力できる環境を整備できれば、業務の効率化と高度化に大きく寄与する。さらに、国土交通省のデータプラットフォームであるxROADとの連携を行うことで、より強力なデータ基盤となり、本格的な道路DXの推進に貢献する。

⑬自己評価

・研究の目的に沿って研究期間内に目指した目標の達成状況、研究成果、今後の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値について、自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

【研究目的の達成度・研究成果】

本研究課題で設定したテーマを概ね達成し、学術面と実務面の双方を意識した研究開発ができた判断する。特に、全国の実務者の多大な協力により、現場の実態を踏まえた「研究と実務のギャップ」を埋める実用性の高い研究開発が実施できたと自負している。

【道路政策の質の向上への寄与】

本研究課題の成果は、国土交通省道路局内で検討が進められてきたAIによる交通量計測を後押しするものであり、道路DXを強力に推進する一助となる。また、研究成果を実装したシステムは、道路交通センサスでの交通量計測や災害時交通状況のモニタリングなど現場でその威力を発揮し、道路政策の質を向上させることに大きく寄与する。

【研究費の投資価値】

実務の現場で利用可能なクラウド型システムとして実装したことは、従前よりも高精度な交通ビックデータを金銭的・時間的なコストを大幅に抑え、かつ現場のPCや通信回線スペックに左右されることなく、全国同一の品質で取得可能とした。さらに、xROADと連携することで、より付加価値の高いデータプラットフォームの構築が可能となる。