

氏名	有岡 献
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博 1 2 1 0 号
学位授与の日付	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	Studies on Improving Motion Prediction, Appearance Feature Learning and Adaptive Similarity Fusion for Multi-Object Tracking (複数物体追跡のための動作予測の改善、外観特徴学習および適応的類似度統合に関する研究)
審査委員	(主査) 教授 澤田 祐一 准教授 飯間 等 教授 射場 大輔

論文内容の要旨

Multi-Object Tracking (MOT) は、映像中に存在する複数の対象を検出・追跡し、それらの位置をバウンディングボックスによって推定するとともに、時間的に一貫した個別物体対応付けを行うコンピュータビジョンにおける基盤的課題である。MOT は、自動運転、ロボティクス、映像監視など、さまざまな実応用において重要な役割を担っている。近年の MOT 研究では、Track-by-Detection (TBD) と呼ばれる枠組みが主流となっている。TBD では、問題をフレームごとの物体検出と、フレーム間のデータアソシエーションという二段階に分けて扱う。第一段階である物体検出は、深層学習の導入により高い精度を達成している。一方で、第二段階のデータアソシエーションにおいては、対象の同一性を長時間にわたって維持することが依然として課題である。特に、遮蔽や高密度な群集環境といった複雑なシナリオ、計算リソースが制限された環境における処理速度低下、およびドメインシフトの影響下では、追跡精度の劣化が顕著となる。

本論文では、Multi-Object Tracking (MOT) は、映像中に存在する複数の対象を検出・追跡し、それらの位置をバウンディングボックスによって推定するとともに、時間的に一貫した個別物体対応付けを行うコンピュータビジョンにおける基盤的技術において、TBD におけるデータアソシエーションに焦点を当て、物体の運動予測精度の向上と、フレーム間における同一物体の特定精度を高める新たな手法について述べており、5 章から構成される論文である。第 1 章は序論、第 2 章ではカルマンフィルタを用いた追跡対象の運動予測精度の向上について、第 3 章は Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) の導入による事前訓練を要しない外観特徴に着目した追跡方法を述べ、第 4 章で新たな幾何学的類似度を導入し低フレームレートに対応した手法について記述し、第 5 章で結論を述べている。

本研究においては、第一に TBD の基盤技術であるカルマンフィルタに基づく運動予測の精度向上を目的として、観測モデルの再検討を行い、直前フレームからの位置変位を用いて従来は直接観測できなかった移動速度を観測データとして導入した。さらに、物体検出器が出力する信頼度スコアを観測ノイズに反映させることで、観測の不確かさに関するモデルを改善した。

第二に、Histogram of Oriented Gradients (HOG) および色ヒストグラムから得られる高次元特徴ベクトルを過去数フレームにわたって蓄積し、(UMAP)によって次元削減を行うことにより、物体ごとの外観特徴を効率的に抽出・比較する処理手順を構築したことで、事前学習を必要としないオンライン外観特徴抽出フレームワークを確立した。

さらに、予測トラックと検出候補のバウンディングボックスの空間的關係を頑健に評価する新たな幾何学的類似度指標を Smaller Box over Enclosing (SBoE) を開発し導入し、これに加えて、幾何学的類似度および外観類似度など複数の指標を統合する適応的類似度融合戦略を提案し、データアソシエーション性能のさらなる向上を図り、低フレームレート映像に対して追跡精度、追跡 ID の一貫性、および遮蔽や大きな物体移動に対する頑健性の観点において、既存の最先端手法を一貫して上回る性能を示すことを確認した。

論文審査の結果の要旨

本論文では、動画中の物体追跡を行うにあたり、画像フレーム中の複数のバウンディングボックスの位置情報から悪環境においても物体追跡を継続できるアルゴリズムを、カルマンフィルタによる運動追跡性能向上や対象物体画像の外観特徴の特徴量圧縮法の導入、幾何学的類似度の新たな指標の設計と導入を行うことにより、低フレームレート映像における物体追跡において極めて高い性能を引き出せる研究成果を示した。

カルマンフィルタによる物体追跡において、従来、観測量として位置情報しか使われていないところを、移動速度情報を疑似的に生成して新たに導入することで、追跡対象の次フレームでの位置を高精度で予測できるようにしたことが、性能向上につながったことが、この分野で国際的に使われているベンチマークデータセットを用いた正の検証で示された。

また、追跡物体のバウンディングボックス内の画像情報から、Histogram of Oriented Gradients (HOG) や色ヒストグラムの特徴量を抽出するが、極めて高次元の特徴ベクトルであることから、これを低次元化して扱いやすい特徴量ベクトルとすることで、事前学習を必要としないオンライン外観特徴抽出フレームワークを確立した。

さらに特筆すべきは、新たな幾何学的類似度を示す Smaller Box over Enclosing を確立し、これを導入することで、低フレームレート映像中の物体追跡に高い精度での追跡を可能としたことである。また、既に提案されている他手法との比較検証も丁寧に行われ、他手法を大きく上回る追跡性能であることを標準的に用いられている映像データセットに基づき示した。

本論文は、下記 3 編の査読付き論文および国際会議論文に基づいており、すべて筆頭著者である。

査読付き国際会議論文：

K. Arioka and Y. Sawada, "Improved Kalman filter and matching strategy for multi-object tracking system," Proceeding of Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE), pp. 772-777, 2023.

査読付き論文：

K. Arioka and Y. Sawada, “Enhanced multi-object tracking via appearance feature gating using

UMAP,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 18, no. 1, p. 2507984, 2025.

K. Arioka and Y. Sawada, “Adaptive Similarity Fusion and Novel Positional Similarity for Multi-object Tracking in Low-Frame-Rates,” IEEE Access. (参考論文として挙げていたが、2月3日時点で採択)