

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

Temporal Mapping and Temporal Prediction
based Ultra-low Delay Object Tracking
Computing Architecture
for Visual Feedback System

申 請 者

Tingting HU

情報生産システム工学専攻
画像情報システム研究

2023年 6月

リアル空間の情報を画像センサによりセンシングし、計算機上のバーチャル空間にてビジュアル処理を行い、再び得られた分析結果をリアル空間に戻してアクチュエータを駆動させるビジュアルフィードバックシステムは、両空間の融合を可能とし、FA (Factory Automation)、ロボティクスやエンタテインメントなど幅広い分野で注目されている。種々のビジュアル処理の中で、高精度な物体の位置取得を可能とする物体追跡は、これらの応用におけるコア技術として重要な役割を果たしている。リアル空間とバーチャル空間をシームレスに融合させるためには、センシングからフィードバックまでの処理を超低遅延に抑えることが重要になる。種々の計算機プラットフォームの中で、FPGA (Field Programmable Gate Array) に基づくストリーム型のコンピューティングアーキテクチャは、複雑な空間処理と低遅延化の両方を実現することが可能であり、ビジュアルフィードバックシステム実現の有力候補になる。よって、FGPA に基づく超低遅延な物体追跡のアルゴリズムとそれに基づくハードウェアアーキテクチャの実現が強く期待されている。

物体追跡は対象物体の検出と追跡から構成される。従来の代表的な検出アルゴリズムとして、多くの選択肢の中から最適な候補を導出するマルチ探索処理が提案されている。この手法は、スケール変化等の検出において高いロバスト性が期待できる一方で、最適解を得るために、空間上の探索処理に大きな演算量が生じ、大量な計算リソースが必要となるという課題がある。また、従来の追跡アルゴリズムとしては、空間上の依存関係がある2つ以上の処理を逐次的に行う従属逐次処理や、逐次処理の繰り返しによって最適解を得る繰り返し処理が提案されている。前者は、依存関係に応じた中間処理が必要となるため、計算リソースが多く必要となるだけでなく、大きな遅延も生じるという課題がある。また、後者は、サブピクセルレベルの高精度な追跡位置に収束させるため、空間上で多くの繰り返し演算が必要となり、計算リソース、遅延共に大きくなる。一方、実際の応用シーンにおいては、バーチャル空間上で物体追跡が処理されている間に、リアル空間上では、対象物体の運動は継続し、常に位置を変えている。フィードバックシステムでは外乱に対するロバスト性が求められるが、従来のビデオレートでのビジュアル処理ではバーチャル空間上での遅延は大きく、高々重力加速度程度の外乱でミリメートル単位の誤差を引き起こす。これは最新の高精度なFA装置で求められる水準に達していない。実用的な応用のためには、センシングからフィードバックまで1ミリ秒以下で処理可能な超低遅延化が重要課題となる。そのためには、画像センサからのデータをフレームメモリに蓄えることなく適宜処理していく、ストリーム型の物体追跡アルゴリズム、およびFPGA実装向きのハードウェアアーキテクチャの実現が必須となる。

本論文は、上記の課題を解決するため、多様なビジュアルフィードバックシステム応用実現の鍵となる、対象物体の検出と追跡を含む物体追跡を対象として、超高速カメラを用いたセンシングからフィードバックまで1ミリ秒の超低遅延で処理可能なアルゴリズムと、ハードウェアアーキテクチャの実現のために取り組んだ研究成果についてまとめたものである。リアル空間とバーチャル空間の差を最小化するため、空間分解能だけではなく、超高速カ

メラ特有の細かな時間分解能の特徴を利用した、時間マッピング (Temporal mapping) と時間予測 (Temporal prediction) に着目した手法を提案している。時間マッピングでは、高速カメラの高い時間分解能でとられた連続フレームの差が小さい特徴を利用して、空間ドメインの中で行われる大量の処理を時間ドメインにマッピングすることによって、空間ドメインの処理をハードウェア向きかつ低演算量にすることを可能としている。一方、時間予測は、高い時間分解能の中で、より詳細な動きの情報がとれる特徴を利用して予測モデルを作成し、時間ドメイン上での状態の変化を予測することによって、時間的な動きによる変化を補正し、高精度な追跡を可能としている。

以下に各章毎の概略を述べ、評価を加えることとする。

第1章では、ビジュアルフィールドバックシステムの現状、超高速低遅延システムの重要性、従来の物体検出と追跡手法の課題など研究の背景を述べた後、本論文の着眼点や目標を述べている。

第2章では、スケール変化に対応可能な超低遅延物体検出を対象に、時間テンプレート予測に基づく特徴点マッチング手法を提案している。特徴点マッチングはロバストな検出手法として幅広い実用システムに用いられており、特徴点抽出とマッチングから構成されている。スケール変化に対応可能な従来手法としては、マルチテンプレート探索手法 [IEICE 2013] が知られている。これは、複数サイズの対象物体のテンプレートとマッチング処理を行い、最もよくマッチングしているサイズのテンプレートを探査する手法であるが、空間ドメイン上で、多くのマッチング処理が必要なため、大きな計算リソースが必要となる課題がある。提案手法では、超高速カメラ映像はスケール変化が微少かつ連続になる特性を利用し、空間上における複数サイズのテンプレートのマッチング処理を時間ドメインにマッピングしている。具体的には、対象物体のサイズ変化に連続したテンプレートの候補リストを事前に用意し、過去の特徴マッチングの結果を基に現在のシーンに一番合うテンプレートを予測し、予測したテンプレートに対し特徴マッチングを行っている。これにより、予測したテンプレートとのマッチング処理に絞ることが可能となり、計算リソースを大幅に削減している。提案手法を FPGA へ実装した結果、11個のテンプレートを用いたスケール変化において、従来技術と比較して3倍のリソース削減が図れている。また、 640×360 画素、1000fps (フレーム/秒) の高速度カメラ (BASLER acA2000-340km) と FPGA (Xilinx XCZU7EV) を用いたプロトタイプ上に実現し、80%未満のリソースコストで、各フレームを 0.97 ミリ秒の遅延で処理可能な事を実証している。

第3章では、サブピクセルレベルの高精度な超低遅延物体追跡を対象に、時間予測ベースの並列動き推定と時間反復追跡を提案している。高精度な追跡の従来技術としては、画像強度の導関数に基づいて2つの画像パッチ間の動きを推定する微分法があり、LK (Lucas Kanade) 法などが広く用いられている。FPGA を用いた LK 法の高速度化手法 [IJASS 2019] が提案されているが、回転する対象物体を高精度・低遅延で追跡できていない。実応用では、平行移動と回転の両方を推定することが強く求められているが、従来のアルゴリズム [CVIM 2003] では、まず平行移動を推定し、推定した結果に合わ

せて歪ませた画像パッチを用いて回転を推定している。このため、画像パッチを更新するための中間処理が必要となり、計算リソースが多く必要となるだけでなく、大きな遅延も生じるという問題がある。提案手法では、前に推定された平行移動に基づく予測を回転の推定に用いることにより、平行移動と回転推定の間のデータ依存性をなくし、前述の問題を回避している。一方、高精度で対象物体を追跡するため、従来アルゴリズム[CVPR 1994]は、ニュートン・ラフソン法に基づいた反復処理を行っている。しかし、空間ドメイン上で反復処理を繰り返し行う必要があり、大きな計算機リソースと遅延を必要とする。一方、追跡処理を行っている最中に、対象物体は外乱影響を受けながら移動するため、追跡誤差は処理の遅延にも大きく依存する。提案手法では、空間上の反復モーション推定を時間領域にマッピングして空間処理を削減し、さらに追跡処理を行なっている際に発生する動きを予測することにより、遅延によって引き起こされる追跡エラーを削減している。平行移動や回転を含むテスト画像を用いて評価した結果、1画素/ミリ秒で移動する物体に対し、従来手法ではロストしているが、提案手法はサブピクセル精度で追跡可能な事を確認している。また、高速度カメラ(acA2000-340km)とFPGA(Xilinx ZCZU9EG)を用いたプロトタイプ上に実現し、30%未満のリソースコストで、各フレームを0.94ミリ秒の遅延で処理可能な事を実証している。

第4章は、結論として、本論文のまとめと今後の課題について述べている。

以上本論文の評価の概要であるが、要約すれば、多様なビジュアルフィードバックシステム応用実現の鍵となる対象物体の検出と追跡を含む物体追跡を対象として、1ミリ秒の超低遅延で処理可能なアルゴリズムとFPGA実装向きハードウェアアーキテクチャを提案している。空間分解能だけではなく、超高速カメラ特有の細かな時間分解能の特徴を利用した、時間マッピングと時間予測により、ストリーム型の処理を可能とし、超遅延処理を実現している。提案アルゴリズムが、実応用を想定した回転やサイズ変化を含む対象物体の検出や、回転変化含む対象物体の追跡を高精度に処理できる事を示すと共に、超高速カメラとFPGAから構成されるプロトタイプ上に実装し、1ミリ秒以下で処理可能な事を実証している。本成果は、今後、様々なビジュアルフィードバックシステム応用の実現に大きく寄与していくと考えられ、実用面で高く評価できる。また、時間マッピングと時間予測に基づく手法が、超低遅延なアルゴリズムとハードウェアアーキテクチャに好適であることを示した点において、学術面でも高く評価できる。よって本論文は、博士(工学)学位論文として価値のあるものと認める。

2023年 6月1日

審査員

主査	早稲田大学 教授 博士(情報科学) (早稲田大学)	池永 剛
	早稲田大学 教授 博士(工学) (東北大学)	牧野 昭二
	早稲田大学 教授 博士(工学) (京都大学)	山崎 慎太郎