

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：12608
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K21789
研究課題名（和文）低遅延システムの実現に向けた不完全なネットワーク伝送とコンピューティングの融合

研究課題名（英文）Integration of Imperfect Network Transfer and Computing Towards Low-Latency Systems

研究代表者
原 祐子（Yuko, Hara）
東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：20640999
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：Internet of Things (IoT)では、コストや消費電力の制約からネットワークや計算リソースが限定される。近年、ネットワーク接続されたIoTシステムで、若干の誤りを許容し高速処理する新たな計算手法として「近似計算」が注目されている。本研究は、低遅延IoTシステム実現に向け、ネットワークを越えた近似計算の基本技術の確立に取り組んだ。受信データが誤りを含むことを許容し、IoT全体でアプリケーションを近似化することで、高いリアルタイム性（低遅延性）を有するIoTシステムの実現が可能になる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り組んだACoNは、ネットワーク上の伝送誤りをアプリケーションに応じた水準で許容して低遅延化を実現する技術である。ネットワークとコンピューティングの2つの異なる技術を統合的に扱うことで初めて実現するコンセプトであり、新規性・挑戦性は高い。異分野研究領域からの大局的取り組みは、既存研究の前提・方向性を大きく転換する可能性を有する。本研究では、機械学習を用いた画像伝送システム等へACoNを適用し、その有効性を評価した。IoTにおいて機械学習ベースのアプリケーションは年々増大していることから、本研究成果はIoT社会における様々なアプリケーションを低遅延で実現できる可能性を実証したと言える。

研究成果の概要（英文）：Internet of Things (IoT) systems have limited resources for networks and computations due to the design cost and power/energy consumption constraints. Recently, for such IoT systems, "approximate computing", which is a new computing paradigm, has been attractive to accelerate applications while accepting some errors. This research has addressed the fundamental studies on integrate imperfect network transfer and computing. By allowing the received data to include errors and approximating the applications all over the IoT system, low-latency IoT systems designs are enabled.

研究分野： 計算機システム

キーワード： 近似計算 低遅延システム ネットワーク伝送

1. 研究開始当初の背景

Internet of Things (IoT)/組込みシステムでは CMOS 微細化の限界に伴い、アプリケーション処理の高速化の新たな手法として Approximate Computing (AC) 計算手法が広く研究されている。研究代表者（原）は組込みソフトウェア・ハードウェアの両面で画期的な AC 研究に取り組み、高い評価を得てきた。既存研究ではネットワークから得られるデータは正しく、IoT/組込みシステム内で初めて AC 計算を導入することを前提としている。原は、AC を許容できるアプリケーションでは「IoT 全体のどこで AC を適用するか」は問題ではないことに着目した。

一方、IoT の根幹技術であるネットワークでは、低遅延なデータ転送について近年様々な研究開発が行われている。代表的な手法として Time Sensitive Networking (TSN) や DetNet, IEEE802.1CM 等があり、研究分担者（中山）もこれらの研究に取り組み、高い業績を挙げてきた。ただし既存研究は、低遅延性と信頼性の両立を前提としていた。中山は、この前提を取り外し信頼性の低下を許容することで、更なる低遅延化が期待されることに着目した。

ネットワークに繋がる IoT/組込みシステムの増加に伴い、伝送データ量増加しており、更にはネットワーク帯域切迫の問題は不可避である。これを解決するためには、ネットワーク上のデータ伝送自体を抑制し、伝送データが誤りを含む可能性を考慮したアプリケーション処理 (IoT/組込みシステムのコンピューティング) という新たな研究の取り組みが必要である。本研究は上述の2つの異なる研究分野での着眼点から、「ネットワークと IoT/組込みシステムでの包括的な AC 適用は IoT 全体の課題を効果的に解決できる」という根本的かつ新たな気づきを得て、IoT 社会での現実的かつ挑戦的な問題に取り組もうとするものである。

2. 研究の目的

リアルタイム性が高い Internet of Things (IoT) システムの実現は重要な研究課題である。特に IoT ではコストや消費電力の制約からネットワークやコンピューティングのリソースが限定されるため、限られたリソースを用いて様々なデバイスから取得したデータを集約・処理・制御するシーケンスを短時間で完了させる低遅延化技術に関する研究は、学術・産業的価値が高い。

Approximate Computing (AC) は、ネットワーク接続された IoT/組込みシステムで若干の誤りを許容し高速処理する新たな計算手法として注目されている。既存手法はネットワークから受信するデータは正しいという前提の下、コンピューティングリソース（演算器やメモリ）を AC 設計していた。一方、従来ネットワークでは誤り訂正符号や再送により誤り率を下げてデータ転送を高信頼化するが、符号処理の計算負荷や再送回数の増大に伴う転送効率低下・遅延増大が課題だった。上述の低遅延化技術の実現のため、ネットワークと IoT/組込みシステムの両者に包括的に AC 適用を検討する意義は大きい。

本研究は低遅延 IoT システム実現に向け、ネットワークを越えた AC 計算 “AC over Network (ACoN)” の基本技術確立を目的とする。従来 AC と異なり、ACoN は受信データが誤りを含むことを許容し IoT 全体でアプリケーションを AC 計算する点が挑戦的な課題であると言える。

3. 研究の方法

ACoN ではネットワーク上の誤りを一定水準まで許容して、処理負荷や再送を減らし低遅延性を向上させる。アプリケーションの処理手法およびネットワークの制御の両面から、データ欠損を適切に補完する低遅延 IoT システムの実現に向けた基盤技術の構築に取り組んだ。

・低遅延 IoT システム実現に向けた AC 計算（担当：原）

主に画像データ伝送を対象に、処理性能（遅延）とクオリティ（復元画像のノイズや推論精度）をトレードオフする計算手法の確立に取り組んだ。画像データ転送においては、機械学習を活用して画像の圧縮・復元システムを構築し、通信路のノイズを考慮して学習させることで、画像圧縮および復元にかかる処理の複雑さを軽減しても（AC を適用しても）復元画像のクオリティを一定のレベル以上に保つことを目指した。また、FPGA を用いて、開発した画像データ伝送向けのハードウェアアクセラレータ設計を行った。

また、画像データ伝送の圧縮システムにおいて圧縮率と低遅延化の効果を定量的に評価し、最適な圧縮・復元システムを構築する手法を構築した。

その他、FPGA を用いた自動運転システムの経路探索や障害物検出への応用を検討した。

・伝送誤りを許容した画像データ転送法（担当：中山）

画像データを無線通信などで伝送し、何らかの観測対象を遠隔モニタリングするシステムに着目し、特に水中をはじめとした超高遅延・ロス環境での非再送処理に取り組んだ。このような環境では、通常の再送処理ではデータ転送効率が著しく低下する。この課題を解消するアプローチ

の一つとして、超高遅延・ロス環境に向けた確率的画像転送法を検討した。また深層学習ベースの画像認識システムにおいて、画像認識精度を維持したまま、データの再送を抑制しトラフィックを削減する、画像圧縮およびプログレッシブ再送信法を検討した。さらに、特に水中での音響通信において誤りへの頑健性を高める、深層学習による一括符号化方式を開発した。

4. 研究成果

・低遅延 IoT システム実現に向けた AC 計算 (担当: 原)

通信路のノイズの影響を考慮した画像データ伝送システム (圧縮システムおよび復元システム) を機械学習の Attention 機構を活用して構築することで、計算効率改善と低遅延化の両立を実現した。さらに、開発した画像データ伝送システム向けに、画像をストリーム式に処理することで更に効率化するハードウェアアクセラレータ設計を FPGA 上に実現した。GPU より低消費電力・低消費エネルギーで実現でき、本研究の有効性を実証した。研究成果は以下の学会で発表済みである。

*Shohei Fujimaki, Yoshiaki Inoue, Daisuke Hisano, Kazuki Maruta, Yu Nakayama, and Yuko Hara-Azumi, "A Self-Attention Network for Deep JSCCM: The Design and FPGA Implementation," IEEE Global Communications Conference, pp.6390-6395, 2022.

更に画像データ伝送システムの低遅延化を推し進めるため、最適なデータ圧縮手法 (AC 適用度) を探索するフレームワークを、Neural Architecture Search (NAS) を用いて構築した。最適な圧縮率を定めることで、推論精度にほとんど影響を与えることなく低遅延化を実現できることを実証した。さらに、本提案システムだけでなく、ACoN に基づく IoT アプリケーションに広く応用可能な学習方法についても検討し、得られた知見を国際会議の Work in Progress で発表した。

*永松 直樹, 原 祐子, "Neural Architecture Search による Split Inference の効率化," 第 199 回システムと LSI の設計技術研究発表会, 2022 年.

*Asato Yamazaki, Takayuki Nishio, and Yuko Hara-Azumi, "Skip & Swap: Efficient Weight Spreading for Decentralized Machine Learning with Non-IID Data," Work-in-Progress of Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS), pp.91-92, 2022.

また、機械学習以外のアプリケーションへの応用についても検討を進めた。本研究では、FPGA ベースの自動運転の経路探索および障害物検出を対象に、遅延と精度 (探索経路の最適性や障害物検出率) のトレードオフを定量的に評価し、デモ機を実装・評価した。本研究終了時点では、細かなパラメータ調整は人手で行う必要があったものの、国際会議のデザインコンテストで 3 位に入賞し、開発したシステムの有効性を実証した。

*Yusuke Inuma and Yuko Hara-Azumi, "Hardware SAT Solver-based Area-efficient Accelerator for Autonomous Driving," Design Contest, International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT), pp.1-4, 2022.

・伝送誤りを許容した画像データ転送法 (担当: 中山)

データの誤りを許容して処理を行う通信方式の一つとして、超高遅延・ロス環境に向けた確率的画像転送法を提案した。提案手法により、画像をブロックに分割し、重要度の高いブロックを高確率で複数回転送することで、少ないデータ量で高い認識率を達成できることを確認した。提案手法について、シミュレーションおよび実データを用いて有効性を確認し、国際会議のワークショップで発表した。

Erina Takeshita, Asahi Sakaguchi, Daisuke Hisano, Yoshiaki Inoue, Kazuki Maruta, Yuko Hara-Azumi, Yu Nakayama, "Stochastic Image Transmission with CoAP for Extreme Environments", IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring) Workshop on ICA, Helsinki, Finland, Jun. 2022.

また深層学習ベースの画像認識システムにおける送信データ量削減のため、深層学習モデルの出力層からの事後確率から算出されるエントロピーに着目した。エントロピーは、深層学習モデルの分類ラベル数に依存しない指標として利用できるため、有効な指標となる。エントロピーに閾値を設定することで、画像認識精度を維持したまま、再送データ量を低減するデータ伝送法を開発した。シミュレーション評価により、データ圧縮と認識精度の関係を明らかにし、有効なパラメータなどを明確化した。本成果については、論文誌で発表した。

Mutsuki Nakahara, Mai Nishimura, Yoshitaka Ushiku, Takayuki Nishio, Kazuki Maruta, Yu Nakayama, Daisuke Hisano, "Edge Computing-assisted DNN Image Recognition System with Progressive Image Retransmission", IEEE Access, vol. 10, pp. 91253--91262, 2022.

さらに、水中音響通信における高遅延・高エラー率といった制約を解決するアプローチとして、深層学習による情報源通信路一括符号化方式 (DpJSCC) を開発した。深層学習モデルによるエンコーダとデコーダの構造を検討した。従来のステップバイステップの符号化方式とは異なり、画像ピクセル値を変調シンボルに直接符号化/復号化する。高エラー環境を模したシミュレーションにより、従来方式と比較して高い伝送効率を達成可能なことを確認した。本成果について、国際会議にて発表した。

Yoshiaki Inoue, Daisuke Hisano, Kazuki Murata, Yuko Hara-Azumi, Yu Nakayama, "Deep Joint Source-Channel Coding and Modulation for Underwater Acoustic Communication", IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Madrid, Spain, 2021, pp. 1-7.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 坂口朝陽, 丸田一輝, 井上文彰, 中原睦貴, 久野大介, 原祐子, 中山悠
2. 発表標題 超高遅延・ロス環境での遠隔物体検出のための確率的画像転送法
3. 学会等名 FIT2021 第20回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mutsuki Nakahara, Daisuke Hisano, Mai Nishimura, Yoshitaka Ushiku, Kazuki Maruta, Yu Nakayama
2. 発表標題 Retransmission Edge Computing System Conducting Adaptive Image Compression Based on Image Recognition Accuracy
3. 学会等名 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Weiran Yuan, Kazuki Maruta, Yu Nakayama, Daisuke Hisano, Kei Sakaguchi
2. 発表標題 Image Size Reduction by Road-Side Edge Computing for Wireless Relay Transmission and Object Detection
3. 学会等名 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiaki Inoue, Daisuke Hisano, Kazuki Murata, Yuko Hara-Azumi, Yu Nakayama
2. 発表標題 Deep Joint Source-Channel Coding and Modulation for Underwater Acoustic Communication
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井沼 佑亮, 原 祐子
2. 発表標題 AmoebaSATを用いた効率的な自動運転アクセラレータ
3. 学会等名 VLSI設計技術研究会 (VLD)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中山 悠 (Nakayama Yu) (80802058)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (12605)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------