

研究終了報告書

「深層学習の「見える化」で切り拓く安全な人間・機械協調社会」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：粟野 皓光

1. 研究のねらい

深層学習 (Deep Learning; DL) を初めとする AI 技術は、驚異的な性能向上を遂げており、特定のタスクにおいては人間に迫る性能を実現している。一方、現在の AI 技術は、推論過程がブラックボックス化されており、人間が、その過程を追うことは非常に困難である。この“推論過程の不透明さ”によって、AI が何を認識し、どのように行動するつもりかといった“AI の意図”が覆い隠されてしまい、スムーズな人間・機械協調が妨げられてしまう恐れがある。また、推論結果の不確かさが評価出来ないため、AI の誤判断を見分けられず、自動運転支援システムにおける衝突事故や Google Photo の誤分類に伴う人種差別問題など、人の生命や財産、企業の信頼に関わる重大な問題が引き起こされている。ブラックボックス化された推論過程を「見える化」する技術は、過当な性能競争の中で見過ごされがちであったが、DL の社会実装が真剣に議論され始めた今、その重要性が再認識され、DARPA を初めとした研究プロジェクトが立ち上がっている。

国内に目を向けると、世界に類を見ない超高齢化社会が目前に到来しており、AI が物理世界に働きかけ直接的な労働力を提供できるように、人間と同じ空間で働くロボットへの AI 実装が盛んに検討されている。しかし、自動運転中の事故例のように、ひとたび AI が推論を誤ってしまうと、人間の生命を直接脅かす危険性があるため、AI の「安全性」を担保する技術が必要不可欠である。また、ロボットの限られた筐体に AI を実装するためには組み込み実装を指向したアルゴリズムの開発も求められるだろう。そこで、本研究では、AI の安全性向上に向けて、推論結果の不確かさを数学的に評価できるアルゴリズムの開発とそのハードウェアアクセラレータ実装に取り組むことで AI の安全性担保を目指すとともに、直接的な労働力を提供できるように、組み込み AI によるロボット制御システムを構築・技術実証する。さらに、人間が制御に割り込むことで推論誤りをリカバリできるようにシステムを拡充し、人間と AI のスムーズな協調作業を実現する。

2. 研究成果

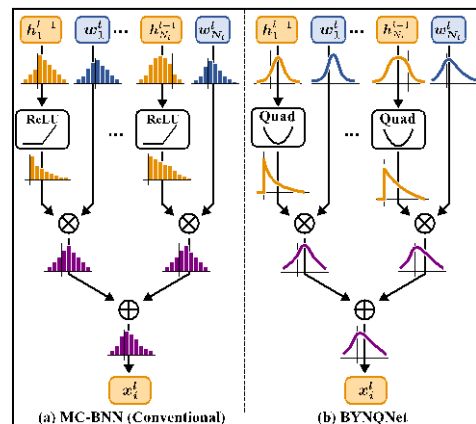
(1) 概要

本研究では、推論結果の不確かさを評価するアルゴリズムである BNN の高速化、組み込み実装を指向した FPGA による知能ロボット制御システムを開発した。また、これらをもとに、人間と AI が互いの制御に対する信頼度に応じて動的に主従を切り替えながら遠隔ロボットを制御できるシステムを実装し、人間や AI が単独で操作するよりも作業効率が向上することを実証した。

BNN は、ベイズ統計を導入することで推論結果の不確実性を考慮できるように拡張された NN の一種である。学習時点でニューロン間の結合重み等のパラメータが一意に決定される従来の NN に対し、BNN ではモデルパラメータを確率変数として扱うことで、不確実性を含んだ推論を実現している。しかし、従来の BNN 推論アルゴリズムでは、モンテカルロ法によって

推論結果の分散を評価していたため、乱数生成や、推論の繰り返しに伴う面積・時間オーバーヘッドが非常に大きいという課題があった。確率変数のモーメントを伝播させるサンプリングフリーBNN が知られていたが、ReLU 等の活性化関数によるモーメント変化を追跡するために、正規分布の累積分布関数等、複雑な演算が必要であり、依然として計算コストは高かった。そこで、活性化関数を二次関数で置き換えることで演算モーメント伝播の軽量化を実現した(右図)。開発技術によりサンプリングフリーBNN の離散化が可能となり、FPGA の様な専用回路のみならず、Edge TPU 等の市販アクセラレータの活用が可能となった。数値実験により、推論精度を損なうことなく、既存手法と比較して10倍程度の高速化が可能であることを確認した。

次に、家事などの日常タスク自動化を題材に、組み込み機器による智能ロボット制御に取り組んだ。具体的には FPGA に NN を実装できるように、重みが2値化された特殊なNNの利用を検討した。ロボット制御タスクでは関節角度という連続量の回帰が求



められるため、全ての層を2値化してしまうと、学習が収束しないという問題が顕在化したため、画像特徴抽出モジュールのエンコーダ部分のみを2値化した部分2値化オートエンコーダを開発することで問題の解決を図った。実ロボットで取得された学習データを用いた数値実験の結果、提案手法により、推論精度を殆ど損なうことなくモデルサイズを95.7%削減できることを明らかにした。

最後に人とAIが互いの確信度をもとに動的に主従を切り替えつつロボットを制御するシステムを開発した。具体的には、ロボットと力触覚提示デバイスが連動して動作するように設定しておき、AIの制御コマンドを力触覚提示デバイスを通して人に提示する。このとき、提示トルクの大きさをAIの予測信頼度におうじて動的に変化させることで、AIと人の主従が動的に切り替えられる構成とした。柔軟物折り畳みタスクを対象とした実験の結果、人もしくはAIが単独で制御する場合と比較して、タスク実行時間をそれぞれ、38%及び12%程度削減できることを明らかにした。

(2) 詳細

研究テーマ「サンプリングフリーBNNとFPGAアクセラレータ」

BNNでは重み・バイアスを確率変数として取り扱うことで、モデルの不確実性を考慮した推論を実現できる。一方で、確率分布を取り扱う必要性からBNNの推論は非常に計算コストが高い。具体的にはモンテカルロ(MC)法に基づき、重み・バイアスをサンプリングした上で、NN推論を繰り返すことで出力ニューロンの確率分布を近似的に求めていた。MC法では乱数生成の効率化が推論効率を大きく左右するため、既存のBNN推論アクセラレータでは、乱数生成器の改良に焦点が当てられていた。しかし、乱数生成を効率化したとしても、サンプリングされた各々のネットワークに対して推論を繰り返す必要があるため、依然としてリアルタイム性を要求されるアプリケーションへのBNN応用は困難である。そこで、Lyapunovの中心極限定理と重みパラメータの独立性を利用することで、MC法に依存しないBNN推論アルゴリズム

ムを開発した。

研究テーマ「組み込み機械学習による柔軟物操作ロボット」

NN とロボティクス技術の組み合わせにより、家事などの日常タスクを代替させる試みが進んでいるが、依然として推論には GPU を使用しており、筐体サイズが限られているロボット本体への DNN 推論器の組み込みは困難であった。そこで、小型かつ低消費電力で動作できる FPGA の応用可能性を検討する。具体的には、限られた演算・記憶資源を効率よく活用できるよう、重み・活性化値が 2 値化された Binarized Neural Network (BNN) の利用を検討する。しかし、ロボット制御タスクでは関節角度という連続量の回帰が求められるため、全ての層を 2 値化してしまうと、学習が収束しないという問題が顕在化した。そこで、画像特徴抽出モジュールのエンコーダ部分のみを 2 値化した部分 2 値化オートエンコーダを開発した。デコーダ部分を浮動小数点として学習することで、発散を防ぎ、安定した学習が可能となる。一方で、推論時にはデコーダを取り除いてしまうため、推論に必要なモデルサイズは全体を 2 値化した場合と遜色ない。実ロボットで取得された学習データを用いた数値実験の結果、提案手法により、推論精度を殆ど損なうことなくモデルサイズを 95.7%削減できることが明らかとなった。

研究テーマ「確信度に応じた主従切り替えに基づくスムーズな人・機械協調」

高齢化に伴う働き手の不足やコロナ禍の影響を受けて、遠隔操作ロボットが注目を集めている。しかし、遠隔操作者は奥行き認知が難しいことや、回転・並進運動の同時制御が困難でありスムーズなロボット制御ができないことが問題視されている。

そこで遠隔操作者をロボット組み込み AI が補助する人・AI 協調システムを考案した。提案システムはロボットから送られるカメラ画像から次時刻で取るべきロボットの関節角度を予測するニューラルネットワーク(制御 NN)と、制御 NN の予測に応じて触覚ガイドを提示する触覚デバイスから構成される。触覚デバイスとロボットの動作は連動しており、人が触覚デバイスを操作することで、制御 NN に割り込み制御権を取ることが出来る。制御 NN は関節角度に加えて、予測する関節角度の確からしさを出力するようになっており、この確からしさによって触覚ガイドの提示量を制御する。つまり、制御 NN が高い確信度を持っている場面では、強いトルクで触覚ガイドが提示され、確信度が低い、つまり推論が誤っている可能性が高い場面では弱いトルクで触覚ガイドを提示することで人に制御の主導権を渡す。

柔軟物折り畳みタスクを例に、開発システムの有効性を評価した。具体的には(1)触覚ガイド無しに人間が単独で制御する場合、(2)人間は触覚デバイスに手を触れず、制御 NN が単独でタスクを実行する場合、そして(3)随時人間が触覚デバイスを操作し、人間と制御 NN が協調してタスクを実行する場合の 3 パターンで、卓上に置かれたタオルの折り畳みに要する時間を測定した。その結果、人間の単独制御では 24 秒、制御 NN の単独制御では 17 秒程度要したタスク実行時間が、人間・制御 NN の協調制御によって 15 秒程度まで短縮された。

3. 今後の展開

小売業等で低遅延ネットワークを活かした遠隔操作ロボットによる商品陳列の技術実証が開始される等、コロナ禍と働き手不足から、遠隔操作ロボットの需要が高まっている。しかし、人と身体構造が大きく異なるロボットをスムーズに操作することは依然として難しく、通信遅延に伴う操

作性悪化も課題である。これを解消すべく、AIをロボットに組み込むことで人の介入を無くす技術も提案されているが、完全自動化が可能なタスクは物体のピック・プレースといった単純な動作に限定されており、応用可能場面は狭いと考える。そこで、AIが判断に迷った場合は遠隔地の人の判断を仰ぐことが出来、通信遅延等が重視されるプリミティブなタスクはAIが主となって制御できるような人・AIの協調システムが重要であろう。

本研究の社会実装に向けては、まずは遠隔操作ロボットを半自動化(例えば、遠隔の人の操作意図を汲み取って、手近にあるものをピックアップするなど)し、人の操作負担を減らすとともに、1人が複数の遠隔ロボットを受け持てるようなシステムを構築することが考えられる。既に遠隔操作ロボットが製品レベルで存在することを考えると、半自動化機能の実装は5年程度の期間で実装できるであろう。次に半自動化ロボットを介して、AIが自律動作困難な場面での人の操作コマンドを大量に取得し、AIを逐次学習させることで自律動作可能な場面を拡充することが考えられる。これにはタスクの難易度もあるが、商品陳列と言った定型動作の多いタスクであれば同じく5年程度で技術実証まで進めることが出来るであろう。その後は、人の介入を低減させる代わりに一人の人が複数の遠隔ロボットを担当できるようにシステムを拡充することで、労働力の大幅な創出を実現する。

4. 自己評価

コロナ禍を受けて社会環境が大きく変容したことを受けて、本研究も社会が本質的に抱える問題の解決へと繋がるよう、最終年度の統合実装を工夫した。具体的には、AIの予測信頼度を評価する枠組みを利用することで、人間とAIのスムーズな協調が可能となることを具体例で示し、今後も高まることが予想される遠隔操作ロボット、及び、完全自動ロボットと人間との協調作業実現に向けた基礎技術を検討した。本技術は世界が直面する課題の解決に繋がりを基盤技術になると確信しており、社会・経済への波及効果は非常に高いと考える。以上から、研究者は、要素研究に終始するだけでなく、社会情勢を加味して、産業・経済の更なる発展に資する研究を実施できたと考える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:2件

1. Lukas Nakamura, et al., "Temporal Ensemble SSDLite: Exploiting Temporal Correlation in Video for Accurate Object Detection," IEICE Trans. on Fundamentals, 2022 (submitted).

ビデオオブジェクト検出のための新しい手法として、検出速度と消費電力を維持したまま認識精度を向上させる"Temporal Ensemble SSDLite"を提案した。複数の異なるモデルの予測を統合するアンサンブル手法に着目し、連続するフレームを異なるモデルで推論するTemporal Ensemble 技術を開発した。Edge TPUを用いた実験の結果、リアルタイム検出速度を維持したまま認識精度を4.9%向上させた。

2. Dehua Liang, et al., "A Hardware Efficient Reservoir Computing System Using Cellular

Automata and Ensemble Bloom Filter,” IEICE Trans. on Fundamentals, 2022 (submitted).

セルオートマトンとブルームフィルタからなるリザーバーである BloomCA を提案した。特徴抽出器にセルオートマトンを用いることで、既存リザーバーが必要とした実数計算を排除し、大幅な効率化を達成した。ハードウェア実装の結果、既存手法と比較して電力効率を 8.5 倍向上させられることを確認した。

(2)特許出願

研究期間全出願件数: 1 件 (特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	栗野皓光
	発 明 の 名 称	情報処理装置、学習装置、情報処理方法、学習方法、情報処理プログラム、および学習プログラム
	出 願 人	大阪大学
	出 願 日	2020/3/5
	出 願 番 号	2020-038058
	概 要	多項式活性化関数とモーメント伝播アルゴリズムから成るハードウェア実装に適したサンプリングフリー-BNN の推論アルゴリズムを開発した。

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[1] Dehua Liang, Jun Shiomi, Noriyuki Miura, Hiromitsu Awano: “DistriHD: A Memory Efficient Distributed Binary Hyperdimensional Computing Architecture for Image Classification,” Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), Jan. 2022, accepted.

[2] Satoshi Ohara, Tetsuya Ogata, Hiromitsu Awano: “Binary Neural Network in Robotic Manipulation: Flexible Object Manipulation for Humanoid Robot Using Partially Binarized Auto-Encoder on FPGA,” International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 6010-6015, Sept. 2021. (Best RoboCup Paper Award Finalist)

[3] Dehua Liang, Masanori Hashimoto, Hiromitsu Awano: “BloomCA: A Memory Efficient Reservoir Computing Hardware Implementation Using Cellular Automata and Ensemble Bloom Filter,” Design, Automation, and Test in Europe (DATE), pp. 587-590, Feb. 2021.

[4] Hiromitsu Awano, Masanori Hashimoto: “BYNQNet: Bayesian Neural Network with Quadratic Activations for Sampling-Free Uncertainty Estimation on FPGA,” Design, Automation, and Test in Europe (DATE), pp. 1402-1407, Mar. 2020.