

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03409

研究課題名（和文）未来予測技術で切り拓く疑似ゼロレイテンシ・テレグジスタンス

研究課題名（英文）Pioneering Near-Zero Latency Tele-Existence with Future Prediction Technology

研究代表者

栗野 皓光（Awano, Hiromitsu）

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：10799448

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：遠隔操作ロボットの操作性向上を目指し、機械学習を用いて感覚情報や操作の意図を予測するシステムを開発した。具体的には、AIの推論結果に対する“自信”に基づき、人に提示するガイダンスの強度を動的に変化させ、人の操作を阻害しない自然なガイダンス提示を可能とした。開発システムは、上半身人型ロボット、力触覚デバイス、人の操作を模倣できるように学習されたニューラルネットワークから構成される。実験の結果、不確実性を加味したガイダンス提示により、タオル折り畳みに要する時間を16.2%削減できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：AIの推論結果に対する“自信”に応じて人に提示する操作ガイダンスの強度を動的に変化させる枠組みを構築・有効性を実証したこと。

社会的意義：遠隔操作ロボットが必要とされる多くの分野において、その操作性・効率性改善に向けた方策を示したこと。また柔軟物操作というロボットにとってはチャレンジングなタスクでタスク遂行時間を有意に削減できることを実証したこと。

研究成果の概要（英文）：To enhance the usability of remote-controlled robots, a system was engineered that employs machine learning to anticipate sensory data and operator intentions. The system adjusts the strength of the guidance it provides to the user dynamically, based on the AI's level of “confidence” in its predictions, thus ensuring the guidance feels natural and does not obstruct the user's actions. The system is composed of an upper-body humanoid robot, a force-sensing device, and a neural network trained to mimic human actions. Experimental results demonstrated that by incorporating uncertainty into the guidance, the time taken to fold a towel could be reduced by 16.2%.

研究分野：知能ロボット

キーワード：知能ロボット 推論の不確実性 模倣学習

## 1. 研究開始当初の背景

コロナ禍を経験し、経済活動を維持しつつも人対人の物理接触削減が求められる中で、遠隔操作によって自らの身体のように操作可能な分身ロボットを介した共同作業基盤（テレグジスタンス）技術が注目されている。ロボットを介した遠隔操作研究は1949年に米国のアルゴンヌ国立研究所で放射性物質を離れた場所から安全に取り扱う目的で実施された「Master slave manipulation」に端を発する。1980年代に入ると、遠隔地にあるロボットの感覚信号（触覚・聴覚等）を操作者にフィードバックすることで、まるで実際に遠隔地に移動して作業しているかのような“現実感”を持たせられないかとの検討が進み、東大の舘氏らを中心にテレグジスタンス概念が提唱された。テレグジスタンスによって、感覚フィードバックがもたらす現実感が細やかな操作を可能とし、その応用はサービス産業へも広がりつつある。例えば、ファミリーマートはテレグジスタンス社と共同で、遠隔制御で商品を陳列するロボットの実証実験を始めており、この傾向はコロナ禍を経験して加速度的に進行すると予想される。

急速な広がりを見せる遠隔操作技術ではあるが、通信レイテンシの存在や、オペレータに提示される感覚信号が劣化してしまうこと、人とロボットの関節構造が一致しないために、ロボットの動きを直感的に予測できないこと等により操作性が低下してしまうという課題を抱えていた。これを解消するべく、オペレータの意図や行動をAIを用いて予測し、支援する半自律型ロボットが研究されてきた。半自律型ロボットでは、ロボットに搭載されたセンサ情報とオペレータの過去の指示からオペレータの意図をAIが推測し、力触覚デバイス等を介してオペレータの操作を補助することで作業効率を向上させる。しかし、あからさまな補助はオペレータに却ってフラストレーションを感じさせかねない。また、オペレータから見て、AIがどのようなセンサ情報に基づいて補助しているのかといった“AIの意図”が隠蔽されてしまっており、システムに対する不信感を招いていた。

## 2. 研究の目的

前述の背景のもと、本研究では、人の意図を推定し操作ガイダンスを提示する際に、推論の“信頼度”に応じてガイダンスの提示強度を調整することが可能な共有制御システムを構築し、“信頼度”を加味することで遠隔操作における作業タスクを向上させられることを実証する。また、オペレータもAIの意図を汲み取れるよう、AIが操作ガイダンスを生成する際に、どういったセンサ情報に注目したのかを可視化できるような技術を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) “AIの意図”の見える化

オペレータがAIの意図を把握できるよう、AIがセンサ情報のどの部分に基づいて推論を行ったのかを可視化できる技術を開発する。ニューラルネットワークの高性能化に伴い、自動運転などのミッションクリティカルシステムへの応用が広がりつつある。このようなシステムでは推論誤りが財産や人命を直接的に脅かす危険性が高く、ニューラルネットワークが推論を導く過程を解析し、推論誤りを未然に防ぐ方法が求められている。しかし、現代のニューラルネットワークは膨大なパラメータから構成されており、推論過程を人間が追跡することは殆ど不可能である。そこで、ニューラルネットワーク自身に、入力情報から注視している領域を出力させる方法（自己注意機構）が考案され、自動運転タスクを例に、有効性が検証されつつある。しかし、既存の自己注意機構では、依然として推論に寄与しない領域をも抜き出してしまうことが問題であった。そこで、本年度は、活性化値の符号のみにアテンションを付加する符号アテンションを考案し、数値実験により有効性を実証する。

### (2) 推論の不確実性を加味した共有制御システムの開発

AIから力触覚フィードバック等を介して操作ガイダンスを受けながらオペレータが遠隔でロボットを制御する系を構築する。この際、AIの推論結果に対する信頼度を評価できるように、力触覚ガイダンスを確率分布として予測させ、確率分布の広がりに応じてガイダンスの提示強度を調整する。これによりオペレータの操作を阻害することなく、さり気ない操作補助を目指す。システムの有効性は、柔軟物操作タスクで評価する。

## 4. 研究成果

### (1) 離散化に着目した高精細なアテンション

図1に自動運転を例にして構築した提案手法を示す。自車の前方を映したカメラ画像を入力にとり、畳み込みニューラルネットワークによって特徴量を抽出する。抽出された特徴量は符号と絶対値に分離され、符号部分にのみアテンションを掛け合わせる。次に分離された絶対値と符号を掛け合わせることで、最終的なステアリング操舵角を構成する。符号分離操作は原点において微分不可能であり、そのままでは誤差逆伝播法による学習が適用できない。そこで、2値化ニューラルネットワークの学習に用いられるStraight Through Estimator (STE) 法を用いることでこの問題の解決を図った。

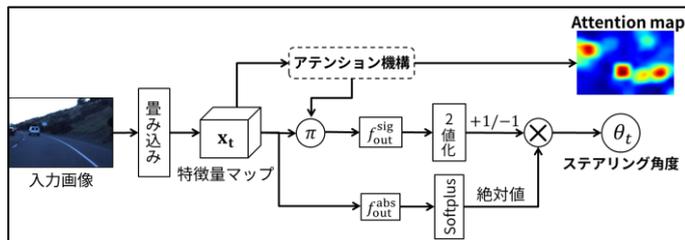


図1：活性化値の符号に限定したアテンション

提案手法の有効性を示すために、Udacity から提供されているデータセットを用いた数値実験を実施した。実験では高いアテンションが割り当てられている画素から順番にマスキングした際に、ステアリング操舵角が本来あるべき値とどの程度乖離するかを調査した (図2)。この結果から、提案手法はマスキングによる推論精度劣化が大きいことがわかり、入力画像内で推論に寄与する重要な箇所適切に重みを割り当てられていることが確認できた。

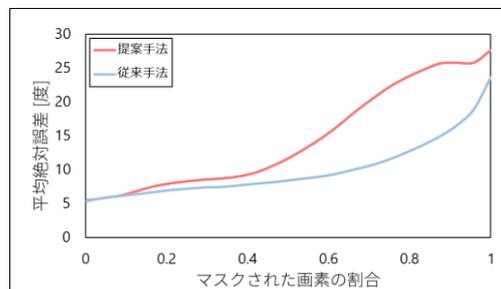


図2：符号アテンションの有効性 (曲線が上にあるほど、推論に寄与するピクセルを正確に抜き出せている)

(2) 確率的回帰に基づくオペレータの操作を阻害しない自然な共有制御システム

AI の推論結果に対する“自信”に応じて人に提示するガイダンスの強度を動的に変化させることで、オペレータの操作を阻害しない自然なガイダンス提示を可能とするシステムを開発した (図3)。開発システムは、上半身人型ロボット、力触覚デバイス、人の操作を模倣できるように学習されたニューラルネットワークから構成される。力触覚デバイスとロボットのグリップ位置は連動しており、人は力触覚デバイスを介してロボットを操作できる。ニューラルネットワークは時々刻々変化するロボット頭部カメラ画像を入力として、次時刻にロボットが取るであろう姿勢を予測し、その姿勢へと近づくようなガイダンスを力触覚デバイスに提示することで人の操作を補助する。この際、力触覚ガイダンスを、不確実性を伴ったガウス分布として予測することで、推論に対する不確実性を加味したガイダンス提示 (つまり、AI が自らの推論結果に自信があるときは強いガイダンスを提示し、自信がないときは弱いガイダンスを提示する) を実現する (図4)。実験の結果、不確実性を加味しない場合と比較して、タオル折り畳みに要する時間を、16.2%削減できることが示された。

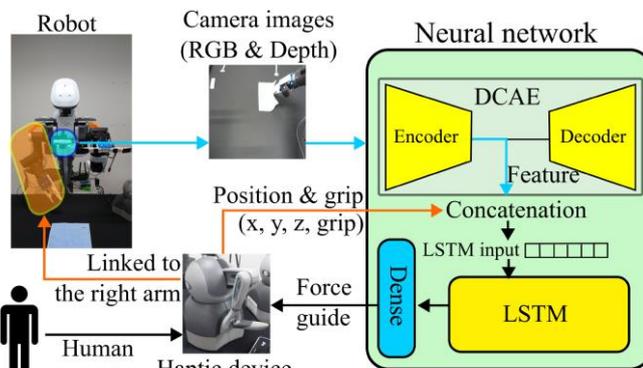


図3：開発システム

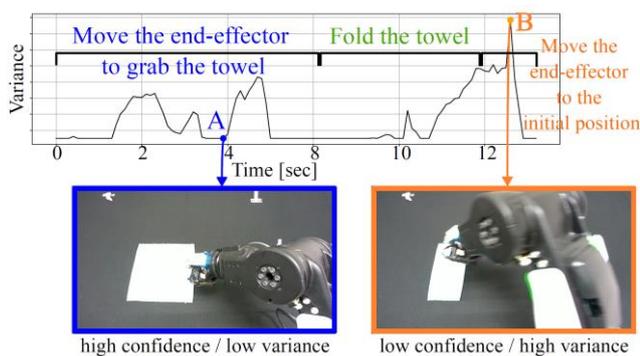


図4：推論不確実性の変化 (グリップでタオルが隠れると不確実性が増加する)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuma Tashiro, Hiromitsu Awano	4. 巻 -
2. 論文標題 Pay Attention via Quantization: Enhancing Explainability of Neural Networks via Quantized Activation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3264855	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hara Takumi, Sato Takashi, Ogata Tetsuya, Awano Hiromitsu	4. 巻 8
2. 論文標題 Uncertainty-Aware Haptic Shared Control With Humanoid Robots for Flexible Object Manipulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6435 ~ 6442
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2023.3306668	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 羽原丈博, 佐藤高史, 粟野皓光
2. 発表標題 適応的閾値制御に基づくスパイクングニューラルネットワークの推論エネルギー削減
3. 学会等名 情報処理学会DAシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田形寛斗, 佐藤高史, 粟野皓光
2. 発表標題 8T-SRAMを用いた同時2入力対応な2値化ニューラルネットワーク用インメモリアクセラレータ
3. 学会等名 情報処理学会DAシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽原文博, 粟野皓光
2. 発表標題 スパイクングニューラルネットワークの高速低エネルギー推論に向けた動的閾値調整手法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田形寛斗, 粟野皓光
2. 発表標題 8T-SRAMを用いた高スループットな2値化ニューラルネットワーク用インメモリアクセラレータ
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯田智子, 粟野皓光
2. 発表標題 遠隔ロボットによる円滑な柔軟物操作のための力触覚ガイドつき制御システム
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuma Tashiro, Hiromitsu Awano
2. 発表標題 Pay Attention via Binarization: Enhancing Explainability of Neural Networks via Binarization of Activation
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------