

適応能力を備えたりザーブコンピューティングが拓く 次世代触覚インターフェース —なぞり方を最適化する自律探索システム—

1. 背景

触覚情報は対象物体との相互作用を通じて得られる情報であり、紙をめくるような柔軟な操作、コネクタの挿入、トマトや豆腐等の柔軟物体の把持といった、接触状態や滑り・力加減の調整を伴う作業で重要な役割を担う。製造現場等で汎用的かつ繊細な作業をロボットに担わせ、自動化・省人化をさらに進めるには、触覚情報の利活用が鍵となる。

一方で、触覚 AI の実用化は視覚・聴覚に比べて相対的に遅れている。触覚信号は接触に伴う力・摩擦などが時間的に変化する時系列情報であり、静的データ処理のみでは扱いにくい。また、触覚 AI はリアルタイム処理が要求されることに加え、大規模データ収集の難しさや高精度触覚センサの普及の遅れも障壁となる。さらに多くのロボットは「見る」「聴く」を中心に設計されており、「触れて感じる」能力が十分でないため、触覚に基づいて状況を理解し、行動を変化させる適応能力の実装が難しい。

2. 目的

本プロジェクトの目的は、触覚情報に基づいてロボットが状況に応じた振る舞いへ更新できるよう、適応能力を備えた触覚 AI の枠組みを構築することである。ここでいう適応能力とは、未知の環境や環境変化に対して、得られた経験をもとに振る舞いを変化させる能力を指す。

この目的に対し、本プロジェクトでは、時系列データ処理に適したりザーブコンピューティング (RC) を中核として、触覚時系列から対象の判定とその確信度を推定し、確信度が不足する場合にはロボットが触れ方 (なぞり方) を更新して追加計測するという、能動的な触察の枠組みを実装する。RC は少量データでも学習可能であり、触覚のような時系列信号に適用しやすい。加えて、他手法との組合せにより触覚認識の高精度化を図る。さらに、RC をハードウェアへ実装してモジュール化することで、低消費電力かつリアルタイムに動作する触覚 AI モジュールの実現を目指す。将来的には介護・産業・医療等を含む幅広いロボットへの搭載を見据え、汎用的な触覚モジュール開発につなげる (図 1)。

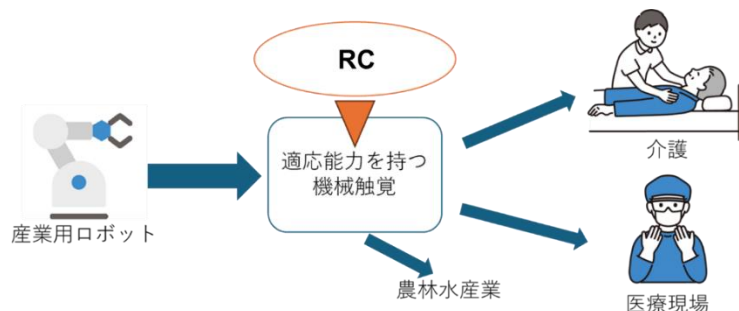


図 1 本研究の背景

3. ソフトウェア開発内容

本プロジェクトが解決する課題は、触覚センサで取得した時系列信号に基づく素材識別において、判定が不確かな場合にロボットの「なぞり方」をリアルタイムに更新し、追加計測によって確信度を高めながら識別を安定化させることである。従来は、対象ごとに「触り方(方向・速度・距離)」を手作業で調整する必要があり、運用・導入コストが高くなりやすい。本プロジェクトでは、確信度を運用指標として導入し、確信度が不足する場合に自律的に再計測して判断を安定化する触覚認識システムを構築した(図2)。

実際に構築したシステムを図3に示す。本システムは、PC上でPythonにより動作する。ロボットアーム(DexArm)はPCからシリアル経由で制御し、触覚センサ(3チャンネル)および6軸力覚センサ(ロードセル)の値を取得して記録する。触覚センサのサンプリングレートは600Hzとした。取得ログはタイムスタンプ付きのCSVとして保存した。

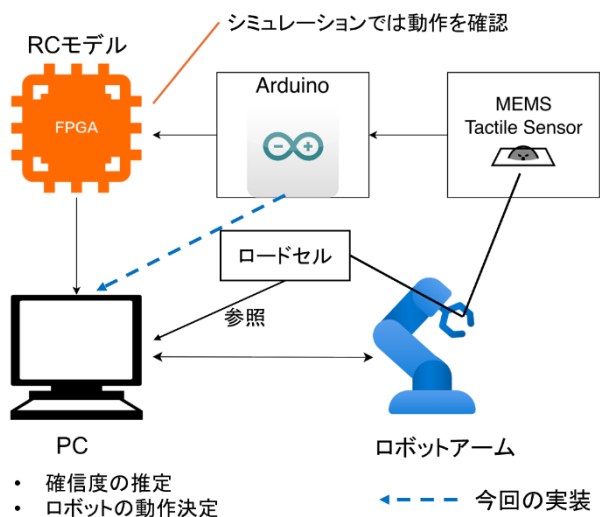


図2 本システムの全体図

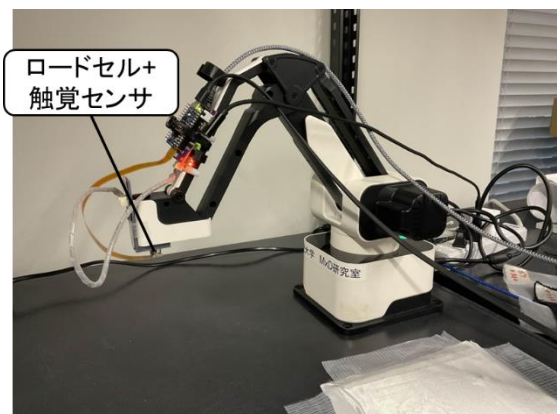


図3 構築した計測システム

次に、今回作成したソフトウェアによる処理の流れを図4に示す。本システムは、学習フェーズと推論(最適化)フェーズの2段階から構成される。

学習フェーズでは、構築した計測環境により4種類の素材の表面情報(触覚時系列)を取得し、RCモデルの学習を行う。具体的には、ノード数・リーク率・入力重み等の設定を変更しながら学習を繰り返し、分類精度が最も良いモデルを選定する。

推論(最適化)フェーズでは、学習で得られた候補のうち最良モデルをロードし、以降はモデルを固定して推論に用いる。まずロボットアームにランダムななぞり動作を行わせて新たな触覚時系列を取得し、RCで推論する。ここで、推論結果の確信度指標として正規化エントロピー(0~1)を算出し、あらかじめ設定した閾値を満たすかを判定する。閾値を満たさない場合は当該の分類結果を採用せず、連続値最適化(ベイズ最適化)により次のなぞり動作パラメータ(方向・速度・距離)を決定する。以

降、「なぞり→推論→最適化」のループを繰り返し、確信度が閾値を満たした時点で最終的な分類結果を確定する。

本システムの動作結果の例を図5に示す。図5は、最適化を継続して実行した場合の確信度（エントロピー）の推移例であり、確信度が閾値を満たす局面では正しい素材に分類できることを確認した。

図4 本システムの処理の流れ

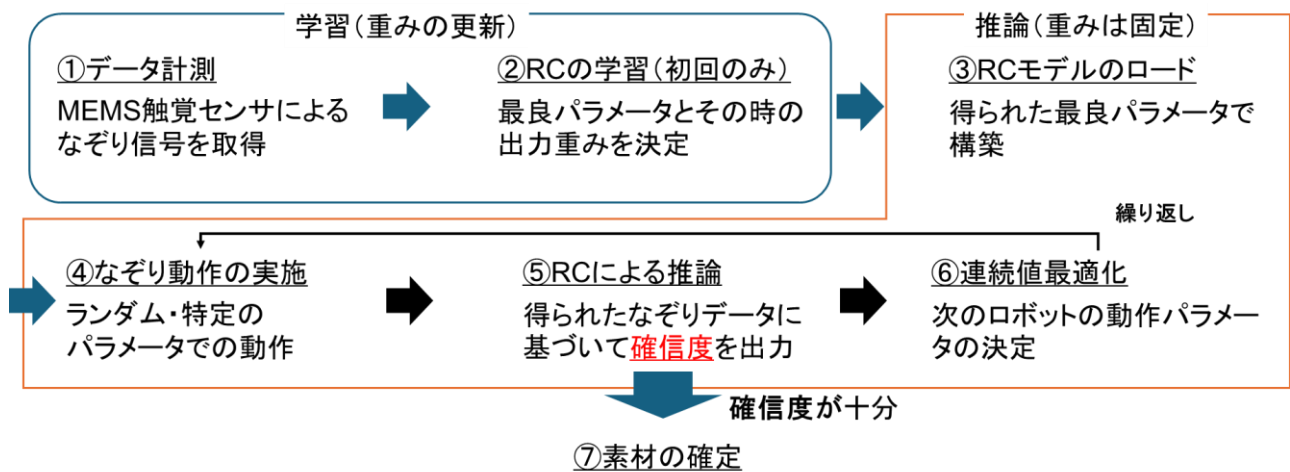
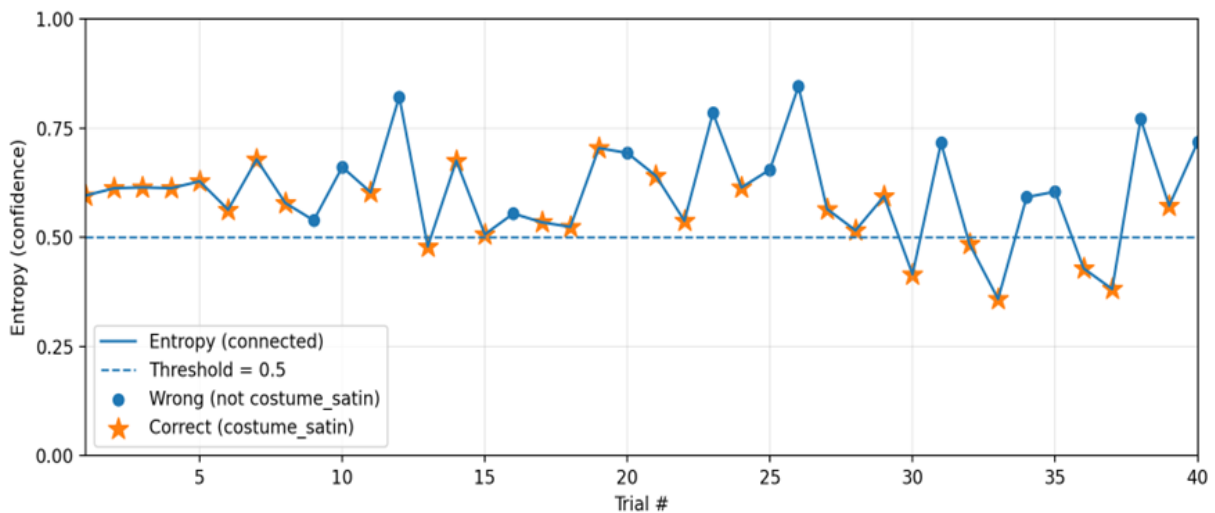


図5 本システムによる動作結果（星印は正しく分類されたことを示す）



最後に、RC のモジュール化に向けて、RC リザー層を FPGA 上に実装した。現時点では Vivado シミュレーション上での検証であるが、FPGA 実装の RC がソフトウェア実装と同様の挙動（入力に対する内部状態の変化と減衰、ならびに読出し出力の整合）を示すことを確認した。さらに、1 サンプル当たりの演算時間は 1.2 ms であり、触覚センサのサンプリング周期(600Hz)に対して十分に短いことから、リアルタイム推論が可能であることを示した。

4. 新規性・優位性

本成果は、触覚による素材識別を「一度の計測で当てる」問題としてではなく、確信度を運用指標として扱い、不確実なら触り直して情報を追加取得するという運用まで含めて設計・実装した。この「判定の棄却→再計測」という運用設計により、単に分類結果を出すだけでなく、ロボットが次工程へ進む前に「判断が十分か」を自律的に判断できる枠組みとなった。

また、再計測の方法として、ロボットのなぞり動作パラメータを連続値最適化により自律探索する処理系を統合した点に優位性がある。すなわち、触覚認識を高精度化するために「触り方そのもの」を最適化対象として扱い、なぞり→推論→最適化のループを停止条件まで回す一連の枠組みを、システムとして実装した。

さらに、エッジ化に向けて、RC リザー層を FPGA 上に実装し、ソフトウェア実装と同様の挙動を確認した。加えて、1 サンプル当たりの演算時間は 1.2 ms であり、触覚センサのサンプリング (600 Hz) に対してリアルタイム推論が可能な速度であることを示した。これにより、本成果は PC 上での動作に留まらず、現場導入を見据えた触覚 AI モジュールへ接続できる見通しを得ている。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

本成果は、触覚を用いた識別において、ロボットが「触れ方」を自律的に調整し、対象の識別や状態把握に必要な情報を効率よく獲得できる点にある。現場では、柔軟物や表面状態が多様な対象に対して、同じ動作を繰り返すだけでは失敗が生じやすく、対象ごとに条件出しを手作業で調整する負担が大きい。本成果は、確信度を運用指標として導入し、確信度が不足する場合に判定を棄却して追加計測へ移行する枠組みを持つため、「判断が不十分なまま工程を進める」リスクを下げつつ、必要な情報が得られるまで触察を継続できる。

また、確信度が不足した場合の再計測では、最適化により次の動作を、確信度が高まる触り方を自律的に獲得する。これにより、運用者が経験則に依存して試行錯誤する工程を減らし、触覚を必要とする作業へ展開するための基盤を提供する。

そして社会へのインパクトとして、触覚を伴う作業の自動化・省人化を前提としたロボット適用範囲の拡張が挙げられる。触覚は対象との相互作用を通じて情報を得るため、環境変化や対象差が避けられず、不確実さを扱う仕組みが重要となる。本成果が示した「確信度を運用指標として扱い、不確実なら触り直して確信度を上げる」枠組みは、触覚 AI を現場へ導入する際の設計指針として機能し得る。さらに、FPGA 実装により、計算資源が限られる現場環境でもリアルタイム推論を行う触覚 AI モジュールとして組み込みやすい。今後、前処理を含む処理のエッジ統合や対象拡張を進めることで、介護・産業・医療等の接触作業が不可欠な領域へ触覚 AI を導入するための汎用モジュールとして展開していく。

6. 氏名 (所属)

武貞 一樹 (立命館大学 情報理工学研究科 情報理工学専攻)

三木 克人 (立命館大学 情報理工学研究科 情報理工学専攻)