

## 研究終了報告書

### 「モデルベース制御による理論保証を伴う深層学習ロボットの研究」

研究期間：2019年10月～2022年3月

研究者：鈴木 彼方

加速フェーズ期間：2022年4月～2023年3月

#### 1. 研究のねらい

ロボットの実応用が期待される現代において、タスク遂行能力と未定義動作の補償能力が重要である。近年、深層学習を用いた学習ベースの制御手法により、高度なロボットタスクの遂行が可能になっている。ロボットの感覚運動情報に基づく複数のモーダルの統合的な学習は、従来の制御手法では困難であった柔軟物操作などの複雑な作業への有望なアプローチであるが、訓練データの領域外の動作に対応することが困難であるという課題があった。これは訓練データに依存した現在の深層学習技術の本質的な課題でもあり、ロボットタスクにおいては事故を引き起こすなど致命的な問題になりうる。

本研究では上記の課題に対し、安定した動作が保証されているモデルベース制御器を、学習ベース制御器のふるまいに組み込むことを目指す。特性の異なる2つの制御器をロボットタスク中に適切に切替えることで、ロボットに高度なタスク遂行能力と未定義動作の補償能力を両立させる。

加速フェーズでは、上記の開発技術で対応できていなかった2点：(1)ロボット姿勢のみが対象であり、高次元のセンサ入力の特徴量として抽出(予測)できる深層学習の利点を生かしていない。実際の未定義動作は多岐にわたるため、特徴量誤差に基づく切替え手法が必要である。(2)加えて、モデルベース制御器の収束先の姿勢が限定されており、タスクによっては自然な動作生成が実現できない。これはRNN内部のアトラクタ表現における切替え状態が一意に設計されていたためである。上記の技術的課題に対し、ロボット姿勢に限らない未定義動作での、インタラクティブな制御器切替えを実現する。

#### 2. 研究成果

##### (1) 概要

本研究ではロボットタスク中の未定義動作補償のための学習ベース制御器とモデルベース制御器の切替えの実現を目指し、提案手法における基盤技術の開発(研究テーマA)とその検証タスクの拡張(研究テーマB)に取り組んだ。

研究テーマA: 学習ベース制御器の内部ダイナミクスに基づく制御器切替え技術の研究開発に取り組んだ。データドリブンな手法である深層学習は高度な汎化性能を示す一方、訓練データの外挿を正しく予測することが難しい。我々は学習ベース制御器とモデルベース制御器をロボットタスク中に切り替えることにより、未定義動作を補正する方法を提案した。提案手法では、メインタスクを学習したRNNの内部状態に応じて過去軌道を再予測・実際の軌道と比較して未定義動作の判定を行う。提案手法を物理的な外乱を伴うピックアンドプレース

タスクに適用し評価したところ、その有効性が確認された。この成果はロボティクス分野のトップ会議である ICRA、及び、学術誌である RA-L に採択された。

前述の未定義動作判定方法はロボットの関節角度情報のみに基づいていたため、これを画像特徴量に拡張する必要がある。我々は深層強化学習を対象に、特徴量の顕在化するための注意機構の検討を行った。深層強化学習は様々なタスクで性能を示す一方、実際のハードウェアセンサーを介して得られる報酬には、ノイズや観察の失敗などが起こりうる。我々は報酬信号に含まれる分散を直接推定するサブタスクを追加し、Value ネットワークの注意マップを Policy ネットワークに組み込んだ、ノイズの影響に対してロバストな学習手法を提案した。報酬信号にノイズを含む Atari ゲームで実験を行い、提案手法が安定的に収束可能なことを確認した。この成果は機械学習分野のトップ会議である ICONIP に採択された。

研究テーマ B: 提案手法を適用するためのロボットタスクの拡張を目指し、我々は双腕二指ロボットによる空中紐結びタスクに取り組んだ。動作中の紐の状態は常に変化するため、モデルはそれらに動的に対応する必要がある。我々はイアンノット法に基づいて設計した止め結び・蝶結び動作を訓練データに、視覚センサと近接センサを含む感覚運動情報を用いて CAE-RNN を訓練した。いくつかの実験設定でタスク成功率を評価したところ、提案手法が高精度にタスク遂行が可能なことが確認された。この成果はロボティクス分野のトップ会議である IROS に採択され、SICE International Young Authors Award を受賞した。

加速フェーズでは、前年までに取り組んだ研究テーマ A・B をそれぞれ技術的・タスク的に拡張することに取り組んだ。研究テーマ A では、CAE の特徴量顕在化のための注意機構に関する検討を行い、冗長になりがちだった特徴量表現を注目座標とした。特に画像中の座標情報を考慮した GoodConv/Spatial Transformer/Spatial Softmax を導入することで、ロバストな環境下での認識性能が向上した。加えて、RNN の内部状態からクエリを生成し、関節角度と統合した特徴量に注意フィルタをかけあわせることで、各センサ・関節に適切に注意が集まっていることが確認された。研究テーマ B では、全てのサブタスクを結合したボタンかけタスクを対象に、空間注意モデルに両腕のトルクセンサをモデルの入出力に含めた。今後はモデルの改良・さらなるデータ収集を行い、加えてエラーリカバリー機構の導入も行う予定である。

## (2) 詳細

本研究ではロボットタスク中の未定義動作補償のための学習ベース制御器とモデルベース制御器の切替えの実現を目指し、提案手法における基盤技術の開発(研究テーマ A)とその適検証タスクの拡張(研究テーマ B)に取り組んだ。これらの研究を通し、査読付き論文誌 2 件、査読付き国際会議発表 6 件、国内会議発表 5 件、受賞 1 件の成果を発表した

### 研究テーマ A 「RNN の内部ダイナミクスに基づく制御器切替え」

制御器切替えのための未定義動作判定技術の開発を行った。我々の手法はメインのロボットタスクを対象とする学習ベース制御器と、数学的に出力結果が保証されたモデルベース制御器から構成される。本研究はモデルベース制御器により訓練データに含まれない未定義動作を補償するアプローチをとり、各研究テーマでは、制御器切替えの方法や基準に焦点

をあてた。

テーマ A-1)はじめに、学習ベース制御器の内部ダイナミクスに基づく制御器切替え技術の研究開発に取り組んだ。データドリブンな手法である深層学習は高度な汎化性能を示す一方、訓練データの外挿を正しく予測することが難しい。我々は学習ベース制御器とモデルベース制御器をロボットタスク中に切り替えることにより、未定義動作を補正する方法を提案した。提案手法では、メインタスクを学習した RNN の内部状態を入力として過去軌道を再予測するサブネットワークを追加する。動作生成時に実際の軌道と比較して未定義動作の判定を行う。RNN の内部ダイナミクスを直接利用するため、外部に別の判定器を用意する必要がない。これにより未定義動作領域ではモデルベース制御器に切り替わり、安定的なエラーリカバリーを実現する。また、リカバリー後のもう一つの切替え戦略として、RNN の内部状態がサブタスクごとにアトラクタ構造を持つように訓練を行う。各アトラクタがモデルベース制御器の収束姿勢となる共通の内部状態を持つように設計することで、リカバリー動作後に再び RNN による制御に切り替わる。実験では提案手法を物理的な外乱を伴うピックアンドプレースタスクに適用し評価した。複数種類の RNN で性能を比較したところ、RNN の構成に関わらず安定してエラーリカバリーが可能なが確認できた。また、動作生成時の RNN の内部状態を可視化したところ、アトラクタ上の切替え状態でリカバリー後に適切な動作を選択していることが示された。この成果はロボティクス分野のトップ会議である ICRA、及び、学術誌である RA-L に採択された(業績 5-(1)-1)。

テーマ A-2)前述の未定義動作判定方法はロボットの関節角度情報のみに基づいていたため適用範囲が狭い。現実の未定義動作はロボット姿勢に限らず、環境状態によるものも多い。ただし、テーマ A-1 で判定した手法をそのままセンサ特徴量に拡張すると、タスクに適切な値に注目できず、うまく判定できないという技術的な課題があった。我々は深層強化学習を対象に、特徴量の顕在化するための注意機構の基礎検討を行った。深層強化学習は様々なタスクで性能を示す一方、実際のハードウェアセンサーを介して得られる報酬には、ノイズや観察の失敗などが起こりうる。我々は報酬信号に含まれる分散を直接推定するサブタスクを追加し、サブタスクで得られた注意マップを、行動を出力するネットワークに組み込んだ。ノイズの影響に対してロバストな学習手法を提案した。具体的には、Actor-Critic 型の深層強化学習手法である A3C をベースに、特徴抽出器から抽出した特徴量からブランチネットワークを派生させる。分散を予測するネットワークは、Value ネットワークの目標値(環境から与えられる報酬)にガウス分布を仮定し、その平均と分散をそれぞれ出力とし、負の対数尤度を最小化するように学習が行う。出力誤差を不確実性の予測で割った、重み付き予測誤差を最小化することに相当し、状態価値の学習が安定化する。また状態価値の予測安定化を行動予測にも反映させるため、Value ネットワークの出力の注意マップを Policy ネットワークの入力に Residual 機構に基づき足し合わせる。これにより環境における状態価値を行動に反映し、かつ、元の特徴マップの消失を抑制する。3 段階の大きさの分散を持つ正規分布に基づくノイズを報酬信号に加えた Atari ゲームで実験を行い、提案手法が安定的に収束可能なことを確認した。この成果は機械学習分野のトップ会議である ICONIP に採択された(業績 5-(1)-2)。今後はこの手法をテーマ A-1 に拡張していくことを検討している。

テーマ A-3)提案手法の拡張・適用のための評価実験を、より実タスクに近い逐次的な分類

学習の問題設定で検証した。タスク状態の評価方法の拡張を目的に、距離学習による物体把持状態の評価を実施した。テーマ A-1 で提案された未定義動作の判定は関節角度の二乗誤差で評価していたが、タスクによっては様々な評価指標がありうる。我々は特徴空間上の距離で判定できると考え、物体把持状態を距離学習によりクラスタライズされた特徴量のアンカーで評価する手法を提案した。ロボットによる逐次的な分類タスクで評価したところ、把持状態を特徴空間上に表現できていることが確認された。この成果はロボティクス分野の国際会議である SII に採択された(業績 5-(3)-2)。

加速フェーズでは、特徴量顕在化手法を学習ベース制御器に組み込んだ。具体的には画像情報を対象に、CAE のモデル構成を変更した。CAE 内部の畳み込み層を(1)GoodConv 層、及び、(2)Spatial Transformer 層に変更することで、画像中の空間情報を考慮できるようになった。GoodConv 層をエンコーダの一層目に導入することで座標情報を入力に含め、続く Spatial Transformer 層の自己注意機構によって再構成に重要な領域を強調する。提案モデルでは加えて、(3)中間表現に注目座標を出力するように Spatial Softmax 処理を行い、冗長な表現になりがちだった CAE が抽出する画像特徴量を顕在化した。ロボットタスクにおける画像データの自己教師学習で検証した結果、(1-3)の全てが揃ったモデル構成が最も良い性能を示した。RNN と特徴抽出器を統合する際には、前時刻の MTRNN の Slow Context からクエリを生成し、関節角度と統合した特徴量に注意フィルタをかけあわせる。RNN の内部状態にはタスクダイナミクスの情報が埋め込まれているため、適切に注意を操作可能なことが期待される。ロボット実験の結果、各センサ・関節に適切に注意が集まっていることが確認された。

また、モデルベース制御器から RNN への切替えが可能な姿勢を増やすために、動作中の同じ状況で RNN 内部状態が一致するような学習制約に関する検討を行った。従来研究 [K.Kase+2018]を参考に、別サブタスクのロボット姿勢が同じ状態間で RNN 内部状態に関する二乗誤差を設計した。提案手法は停止したロボット姿勢では期待した結果が得られた一方、動作スピードが早いパートでは上手く作動しなかった。今後はパラメータ調整を行い、手法を改良していく予定である。

#### 研究テーマ B 「検証ロボットタスクの拡張」

ロボット動作学習の研究において、検証タスクの拡張は重要なトピックの一つである。我々の提案手法においても、テーマ A で検証したロボットタスクはいずれも単純なものに限定されており、学習ベース制御器がどこまで適用可能かを検証する必要がある。我々はロボティクスにおいて最も困難なタスクの一つである柔軟物体操作タスクを対象に、複数のタスク・複数のロボットで実装し、共通して実行可能なシステム基盤を構築した。

テーマ B-1)はじめに、我々は双腕二指ロボットによる空中紐結びタスクに取り組んだ。柔軟物体操作におけるモデルベースアプローチでは、物体の幾何学的情報を推定し目的の動作を決定している。しかし、紐の状態はロボットとの接触中に多様に変化するため、形状変化やロボット動作を全て観察して記述することは難しい。加えて、モデルはそれらに動的に対応する必要がある。一方、機械学習ベース、特に深層学習を用いたアプローチでは、対象物体の物理モデルを必要としないため適用範囲が広い。中でもロボットの動作経験に基づいた我々のアプローチは、複雑な報酬設計をせずに少ないデータ数で学習可能であるため、柔軟物体

操作タスクに適している。我々はイアンノットと呼ばれる、止め結び・蝶結び動作をより少ない手順で実現できる手法に着目し、ロボットによる紐結び動作を設計した。イアンノットでは作業途中、輪を残した状態で締めることで蝶結び、紐の端点を引き抜くことで止め結びの作成がそれぞれ可能である。これにより紐の持ち替えなどの複雑な作業をロボットにさせることなく、蝶結び動作と止め結び動作を空中で実現できる。上記で設計した作りこみの動作を訓練データとして収集し、視覚センサと近接センサを含む感覚運動情報の動作シーケンスを用いて CAE-RNN を訓練した。また、上記の紐結びタスクはロボットミドルウェア上で実装されており、いくつかのコンポーネントを再利用することで別ロボットや別タスクに適用することが可能である。「複数の結び方の学習」「紐のかかり方に応じた動作切替え」「未学習の紐に対する動作生成」を検証する 3 種類の評価実験を行い、それぞれでタスク成功率を評価したところ、提案手法が高精度にタスク遂行が可能なが確認された。特に、未学習に紐においても提案手法はタスク遂行が可能なが確認され、モデルは視覚から得られる情報だけでなく、紐の状態や近接センサの情報を汎化しロボット動作を予測していることが示唆された。この成果はロボティクス分野の学術誌である *Sensors* (業績 5-(3)-4)、及び、トップ会議である IROS に採択され(業績 5-(1)-3)、SICE International Young Authors Award を受賞した(業績 5-(3)-5)。

テーマ B-2) 上記に加えて、双腕ロボットを使用したボタン付けタスクを実装した。ボタン付けタスクは柔軟物(服)と剛体(ボタン)を同時に処理する必要があるため、従来研究で取り組まれた例はない。我々はロボットにボタンエイドを装着し、一連の動作をサブタスクに分割することでロボットによるボタン付け動作の検討を行った。加えて、モデルの汎用性を向上させるために、疑似リハーサル動作を伴う CAE-RNN の学習を行った。疑似リハーサル動作は、はじめに訓練されたモデルを用いて生成した疑似的な訓練動作を指し、これらを次の学習に利用することで破滅的忘却の回避や、モデル性能を向上が可能である。提案手法においては、シャツにマーカーが貼付された環境で取得した動作データをモデルのはじめの訓練に使用し、疑似リハーサル動作を後の学習に加えることで、マーカー無しのシャツでの動作生成を可能にした。この成果はロボティクス分野の国際会議である SII に採択された(業績 5-(3)-3)。テーマ B-1 と合わせ、我々が用いる学習ベース制御器が、より広範なタスクを専用のハードウェアを用いずに学習・実行可能であることが示された。

テーマ B-3) より発展的な拡張として、より実タスクに近い逐次的な分類学習の問題設定で拡張のための基礎実験を行った。製品分類タスクへの適用を検討し、能動学習を用いた協働アノテーションシステムを構築した。これは接触を伴わない人間-協働タスクともいえる。ロボットが収集する弱ラベル付きデータで自己教師あり学習をサポートすることで、アノテートコストを削減する効果が確認された。この能動学習の枠組みは未定義動作の探索に拡張していきたいと考えている。この成果はロボティクス分野のトップ会議である IROS に採択された(業績 5-(3)-1)。

加速フェーズではボタンかけタスクを対象に、タスクをより長期時系列に拡張した。ACT-X 期間中に取り組んだボタンかけタスクは一連のサブタスク中の一部のみを深層学習で置き換えていたが、加速フェーズでは全てのサブタスクをまとめて学習を行う。また、学習ベース制御器である CAE-RNN を SARNN[H.Ichiwara+2021]に置き換え、学習の安定性を向上させた。またボタンをかける際に重要となる「ボタンエイドを服に押し付ける」作業を検知するために、

両腕のトルクセンサをモデルの入出力に含めた。上記の拡張を行うことでモデルのタスク成功率が向上することが確認された。タスク自体の成功率はいまだ高くないが、今後はモデルの改良・さらなるデータ収集を行うことで実験を進めていく予定である。また、本来の目標であるエラーリカバリー機構の導入も行う。

### 3. 今後の展開

本研究では、RNN の内部ダイナミクスに基づいた未定義動作判定を行うことで、特性の異なる2つの制御器をロボットタスク中に適切に切替える技術開発に取り組んだ。テーマAの成果によって、物理的な外乱を伴うロボットタスクでの安定的なエラーリカバリーに成功し、テーマBの成果によって、様々なロボットでのより高度なロボットタスクでの検討が可能になった。今後はACT-X期間で発表した成果をもとに、多様なセンサ情報に基づいたよりインタラクティブな制御器の切替え機構や、学習ベース制御器の力学設計に基づく任意の姿勢へのエラーリカバリー作業の実現に取り組む。

本研究で開発した技術はロボットに限定されておらず、例えば自動運転では訓練データ領域から外れそうな状態の際には安定状態へ戻す処理が必要となる。深層学習技術の産業応用にはまだ高い壁があると感じているが、今後も現場への技術導入障壁を下げることを目的に、研究を進めていきたい。

加速フェーズでは、ACT-X研究期間中に開発した技術をベースに、①注意機構と②内部状態制約の導入による拡張に取り組んだ。テーマ①の検討により、事前に学習した特徴抽出器であるCAEはより重要な特徴量を抽出することが可能となり、また、テーマ②の検討により、感覚運動情報を学習する後段のRNNは複数の姿勢での動作切替えが可能となった。今度はこれらの技術を論文化するとともに、ボタン付けなどのより高難度なタスクに応用していきたいと考えている。

本研究で開発した技術は、主にロバスト性の向上を目的としていた。実環境での使用が想定されるロボティクスにおいて、ロバスト性は重要な評価観点である。今年度に取り組んだ研究をもとに、将来の社会実装に向けて引き続き研究を進めていきたい。

### 4. 自己評価

2年6カ月のACT-X研究期間において、当初に計画にあげた2つの研究項目に取り組んだ。いずれも学術誌(RA-L, Sensors)やトップ会議(ICRA, IROS, ICONIPなど)で成果発表を行い、学術的に大きな貢献ができた。また、発表したテーマでSICE International Young Authors Awardを受賞するなど国内外から評価された。このことから、当初の研究目的はおおむね達成できたといえる。また、一部については拡張事項の検討も行うことができた。ただし提案手法は適用先に制限があり、かつ、部分的なタスクでの検討に留まっているため、これらの点に関しては今後取り組んでいきたいと考えている。

本研究は早稲田大学の尾形哲也研究室と産学連携しながら、実機実験やアルゴリズム構築を行った。コロナウィルス流行の影響でハードウェアを使用した実験が制限されるなど影響が出たが、アルゴリズムの検討を先に進めるなど研究計画を見直すことで、安全に配慮しながら研究を遂行できた。また研究費執行についても同様に、出張費が想定していた

よりも大幅に余剰分が出るなどの影響が出た。ただしその分多くの論文発表費に充てることができた。結果的には、多少執行状況に変更があったが、当初の計画通りに研究費を執行できたと考えている。

以上より、ACT-X 研究期間は例外的な年となり障壁も多かったが、当初の計画以上に研究は発展したといえる。また、社内外で独立したテーマを持ち計画立案から予算執行まで主導的に実施できたことは、若手の研究者の個の確立という点でも成果があったといえる。

加速フェーズでは、当初に挙げた2つの研究項目に取り組んだ。年度後半は育児休職による中断もあり、いずれのテーマも今年度内での論文化という目に見える成果には間に合わなかったが、実験的な検討は十分に行うことができたと考えている。特にテーマ①に関しては、当初予定していた一時刻前の予測からの生成ではなく、内部状態からクエリを予測するという方式に変更するなど、大きく開発内容を変更した。また、特徴抽出器には表現学習・基盤モデルの活用など今後の発展も見据えた形での機能拡張ができたと考えている。

以上をまとめると、今年度は育児休職により当初の計画より実質的な作業時間がかなり限定されてしまったが、当初予定していた検討を行うことができたといえる。これらはライブイベントにかなりの配慮が行われているACT-Xこそであり、このサポートを受けて研究を推進できたことは、今後も女性男性問わず若手研究者が積極的に育児休職を取れるようになるための環境構築に少しながら貢献できたと考えている。

## 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: 7件

1. Kanata Suzuki, Hiroki Mori, Tetsuya Ogata, "Compensation for undefined behaviors during robot task execution by switching controllers depending on embedded dynamics in RNN," IEEE Robotics and Automation Letters, vol.6, no.2, pp.3475-3482, 2021 (with ICRA'21 option).

ロボット動作にはタスク性能と安定性の両立が求められている。深層学習は高度なタスクを実行するための有望な手法だが、訓練データに反映されていない未定義な動作への対応は難しい。本論文では、学習ベース制御器とモデルベース制御器を切り替えることにより、未定義動作を補正する方法を提案する。メインタスクを学習した RNN の内部状態に応じて過去軌道を再予測・実際の軌道と比較して未定義動作の判定を行う。提案手法を物理的な外乱を伴うタスクで評価し、その有効性が確認された。

2. Kanata Suzuki, Tetsuya Ogata, "Stable Deep Reinforcement Learning Method by Predicting Uncertainty in Rewards as a Subtask," In Neural Information Processing, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol.12533, pp.651-662, Proceedings of 27th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP'20), acceptance rate 29.9%, 2020.

深層強化学習は様々なタスクで性能を示す一方、実際のハードウェアセンサーを介して得られる報酬には、ノイズや観察の失敗などが起こりうる。本論文では、報酬信号に含まれる分散を直接推定するサブタスクを追加し、Value ネットワークの注意マップを Policy ネットワークに組み込んだ、ノイズの影響に対してロバストな学習手法を提案する。報酬信号にノイズを



含む Atari ゲームで実験を行い、提案手法が安定的に収束可能なことを確認した。

3. Kanata Suzuki, Momomi Kanamura, Yuki Suga, Hiroki Mori, Tetsuya Ogata, "In-air Knotting of Rope using Dual-Arm Robot based on Deep Learning," Proceedings of 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'21), 2021.

柔軟物操作はロボティクスの困難なタスクの一つであり、本研究では双腕二指ロボットによる空中結びタスクに取り組んだ。動作中の紐の状態は常に変化するため、モデルはそれらに動的に対応する必要がある。我々はイアンノット法に基づいて設計した止め結び・蝶結び動作を訓練データに、視覚センサと近接センサを含む感覚運動情報を用いて CAE-RNN を訓練した。いくつかの実験設定でタスク成功率を評価したところ、提案手法が高精度にタスク遂行が可能なが確認された。

## (2)特許出願

研究期間全出願件数:0 件

## (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)

### 主要な学会発表

1. Kanata Suzuki, Taro Sunagawa, Tomotake Sasaki, Takashi Katoh, "Annotation Cost Reduction of Stream-based Active Learning by Automated Weak Labeling using a Robot Arm," Proceedings of 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'21), acceptance rate 45%, Prague, Czech Republic, Online, September 27- October 1, 2021.
2. Kanata Suzuki, Yasuto Yokota, Yuzi Kanazawa, Tomoyoshi Takebayashi, "Online Self-Supervised Learning for Object Picking: Detecting Optimum Grasping Position using a Metric Learning Approach," Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII'20), pp.205-212, Honolulu, USA, January 12-15, 2020.
3. Wakana Fujii, Kanata Suzuki, Tomoki Ando, Ai Tateishi, Hiroki Mori, Tetsuya Ogata, "Buttoning Task with a Dual-Arm Robot: An Exploratory Study on a Marker-based Algorithmic Method and Marker-less Machine Learning Methods," Proceedings of 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII'22), Narvik, Norway, January 8-12, 2022, accepted.
4. Momomi Kanamura, Kanata Suzuki, Yuki Suga, Tetsuya Ogata, "Development of a Basic Educational Kit for Robotic System with Deep Neural Networks," Sensors (2019-2020 JCR IF: 3.275), vol.21, no.11, pp.3804-3824, 2021.

### 受賞

5. Kanata Suzuki, SICE International Young Authors Award (SIYA-IROS2021), October 24, 2021.

### 解説記事

6. 鈴木彼方, 伊藤洋, 山田竜郎, 加瀬敬唯, 尾形哲也, "深層予測学習を用いたロボット



動作の複合生成,” 日本ロボット学会誌, vol.40, no.9, pp.772-777, 2022.