

研究終了報告書

「捕食者模倣型 AI によるチョウ擬態形質の解析」

研究期間：2021 年 10 月～2024 年 3 月

研究者：網野 海

1. 研究のねらい

動物の「擬態」は、捕食という自然選択が進化させた興味深い現象であり、研究者にとどまらず多くの人々を魅了してきた。しかし、その研究においては「擬態の完成度を定量化するのが難しい」という極めて根本的な問題が存在している。というのも擬態は、生物全体の形状や色、模様さらには動きなど様々な特徴から成り立っており、それらを実験者の恣意的な判断なしに抽出し、定量化するのは困難な上、擬態をしている相手である捕食者(主に鳥類などが想定される)と人間の視覚は、色覚において大きく異なることから、最終的な擬態の完成度を知るにはコストの高い捕食実験を実施する必要があるためである。

こうした状況において、深層学習による画像認識は擬態形質の解析ツールとして極めて強力であることが予想される。すなわち、深層学習では人間による恣意的な特徴量抽出を用いないことから形質間距離を客観的に算出することが容易である上、ヒトには見えない紫外光(捕食者には見える)の情報も入力画像を 3 チャンネルではなく 4 チャンネルとするだけで簡単に取り入れることができるからである。

そこで、本研究では、捕食者の色覚を模倣した画像分類ネットワークを作成するとともに、鳥類の色覚を模倣した AI によるチョウ標本画像間類似度と実際の鳥を用いた弁別実験の結果を比較解析することで、AI による捕食者の模倣の可能性を探究する。

2. 研究成果

(1) 概要

当初の計画として、研究テーマ A「捕食者の色覚を模倣した AI の開発」および研究テーマ B「捕食者の色覚を模倣した AI の妥当性評価」を掲げていた。テーマ A に関しては、捕食者の色覚が 4 色型色覚であることから、3 チャンネル画像を元に事前学習された既存の CNN モデルが適用できないという問題があった。これを解決すべく一年次～二年次にかけて、CNN の学習過程に着目した類似度評価指標を開発し、CNN を事前学習する必要のない新規類似度評価指標を提案した。二年次後半において、4 色型色覚の捕食者を模倣すべく、可視光(RGB)画像と UV 画像が一つのカメラで撮影可能な装置を入手し、4 チャンネル(RGB+UV)のチョウ類標本画像を入手した。CNN の学習過程に基づく類似度評価を 4 チャンネル画像に対して適用し、3 チャンネルの場合と比較したところ、一部のペアにおいて UV を考慮することによって擬態の完成度に変化が生じる可能性が示唆された。これまで、画像間類似度の比較によって生物の擬態の完成度を評価した事例において、UV の影響を考慮した研究はなく、本研究は UV を考慮することで画像間類似度に変化が生じうることを示した初めての研究といえる。

テーマ B は、テーマ A にて 3 チャンネルおよび 4 チャンネルの際の類似度の違いが、実際に人間と捕食者にとっての見え方の違いと一致しているか、捕食者を用いた実験によって確かめることを目的としていた。しかしながら、4 チャンネル画像の入手に想定外の時間を要したこと、捕食

者の反応をアッセイするための実験系構築が困難であったことから、3 年次前半までに本格的な捕食実験を行うことはできなかった。3 年次後半(2024 年 1 月～3 月)に捕食実験を予定しているが、規模の大きなデータの入手は期待できず、今後のためのプレ実験となることが予想される。

(2) 詳細

研究テーマ A「捕食者の色覚を模倣した AI の開発」

チョウ類の主要な捕食者である鳥類は、我々ヒトとは異なり 4 色型色覚をもっているほか、一部の種は UV の反射を感受することが可能である。ゆえに、チョウ類の擬態の完成度を評価する上で、可視光だけでなく UV を考慮することが必要である。従来手法では、色彩パッチ間でスペクトルの比較をおこなうことで UV の考慮がおこなわれてきた。しかしながら、色彩パッチのスペクトルは色彩斑紋のうちの一部の特徴に過ぎず、色彩パッチの空間分布も同時に考慮した上で類似度評価をしなければならない。一方、CNN は画像そのものを入力とするため、色彩パッチのスペクトルおよびその空間分布まで同時に考慮できる点で、従来手法よりも網羅的な類似度評価が可能になると期待されるが、これまで CNN を用いて擬態の完成度評価をした各事例(Cuthill et al., 2019; Puissant et al., 2023)において、UV が考慮されたことはなかった。

A-1. 事前学習 CNN を必要としない類似度評価手法の開発

まず、4 チャネル画像において類似度評価が可能なシステムの構築を試みた。CNN を用いた従来の類似度評価手法は、大規模教師データ ImageNet を用いた 1000 クラス分類によって特徴表現を獲得済みの CNN を用いるもの(LPIPS; Zhang et al., 2018)、自前のデータセットによって学習をおこないその中間出力を元に類似度評価をおこなう手法(Cuthill et al., 2019)、擬態の解析など、行動生態学分野においては、様々な分類群の生物が対象となり、時に

大規模なデータセットが用意できないこともあるため、LPIPS のように学習済みモデルを用いた手法は汎用性が高い。しかしながら、ImageNet が 3 チャネル画像によるデータセットであるため、4 チャネル画像の類似度評価に LPIPS を用いることができない。そこで、本項目では大規模なデータセットが必要なく、なおかつデータ形式を制限しない類似度評価手法を開発すべく、未学習 CNN の学習過程に着目した。類似度の低い 2 クラス間の分類では、類似度の高いクラス間の分類に比べて CNN の学習がより早く進み過学習も起きにくいと考えられる。このことを利用し、2 クラス分類における学習が完了するまでの時間および学習曲線の下面積

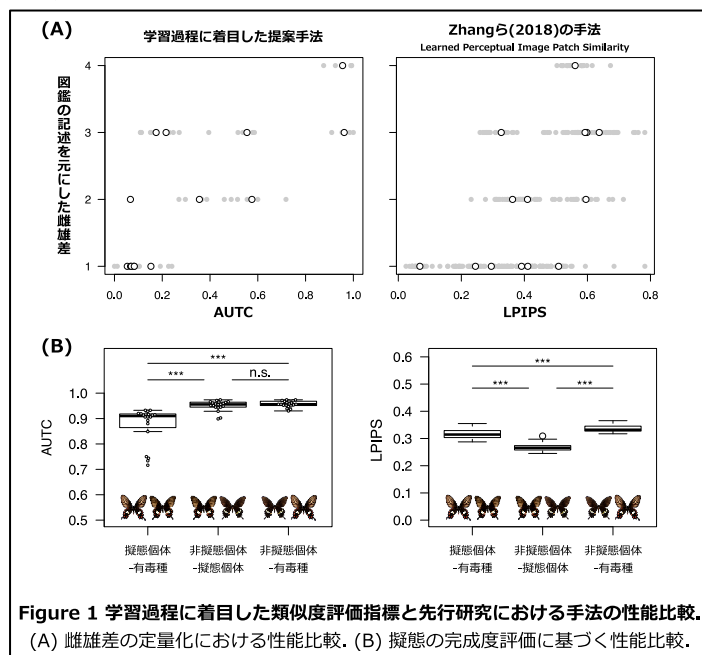


Figure 1 学習過程に着目した類似度評価指標と先行研究における手法の性能比較。
(A) 雌雄差の定量化における性能比較。(B) 擬態の完成度評価に基づく性能比較。

(AUTC)を2クラス間の類似度の指標とできるのではないかと考えた。

東京大学博物館で収集したチョウ類標本画像(3チャンネル画像)を用いて、1クラス10枚の小規模な2クラス分類をおこない、提案手法によって雌雄差を正確に定量化できているかを検証した。その結果、図鑑の記述を元にした雌雄差の正解データと照らし合わせて、学習過程に基づく類似度評価は既存手法 LPIPS と比べても十分な精度で雌雄差を定量化できていることが判明した(Fig. 1A)。さらに、擬態の完成度評価をおこない、有毒種と擬態個体の距離、有毒種と非擬態個体(擬態種と同種)の距離、擬態個体と非擬態個体の距離を比べた。すると提案手法では有毒種と擬態個体の距離が最も短く算出されていたのに対し、LPIPS では擬態個体と非擬態個体の距離が最も短く算出されており、提案手法は LPIPS よりも高い精度で擬態の完成度評価も行えていることが示唆された(Fig. 1B)。以上から、LPIPS よりも汎用性が高く、なおかつ小規模なデータセット(類似度評価をおこないたいクラスにつき10枚のサンプル)で類似度評価が可能な本手法は、生態学分野において有用であると考えられる。

A-2. 4 チャンネル画像を用いた類似度評価

4チャンネル画像を入手すべく、可視光およびUVを一度に撮影できるカメラの購入を試みた。ところが、研究開始当初計画していたUV波長域に対応した既製品のマルチスペクトルカメラは国内で入手不可能であったことから、カメラの入手に難航した。最終的に、2年次前半～後半にかけて、波長解像度の高いCMOSセンサー・レンズの開発を手がけている国内メーカーからオーダーメイドにて入手した。本撮影装置は、単一のカメラを用いてUV照射下、可視光下において、可視光波長およびUV波長を選択的に撮影可能で、同じ角度から異なる波長で撮影した画像を入手することができる。

本撮影装置を用いて、東京大学博物館で可視光画像およびUV画像を収集した。A-1にて開発した類似度評価指標を用いて3チャンネルおよび4チャンネルの場合で類似度評価をおこなったところ、幾つかのペアでチャンネル数の違いによる類似関係の変化がみられた。この結果は、擬態の完成度を評価する上でこれまで通り3チャンネル画像を用いていると誤った結論が導かれる可能性を示唆している。

研究テーマB「捕食者の色覚を模倣したAIの妥当性評価」

テーマAにて開発した捕食者模倣型AIが実際に捕食者の反応を推定するのに役立つかどうか、捕食者を用いた実験などで検討する必要がある。そこで、2年次後半～3年次前半にかけて野外で捕食者の反応を見るための実験を実施すべく、野外(キャンパス内および実験圃場)に取り付けたエサ台に野鳥を集める実験系の構築を試みた。しかしながら、採択者自身にも初の試みであったこともあり、実験には至らず、野鳥が多く集まる場所、エサの種類といった条件の絞り込みにとどまった。3年次後半の冬-春(2024年1-3月)に再度実験を実施予定である。

その他、研究計画外の成果

★ CNN の特徴抽出を利用した「捕食者に識別(不)可能な特徴量の探索」

CNNの畳み込み層では、人間ではなく機械が学習した膨大・豊かな特徴(deep feature)が抽出される。このことを利用して、過去の捕食実験データを元に、捕食者が識別可能なペアと識

別不可能なペアの間で deep feature がどのように異なるかを算出し、識別可能/識別不可能な deep feature の探索をおこなった。その結果、斑紋の有無や濃さ、黒色領域の広さ、翅の形状、といった解釈可能な特徴が見つかり、これらを元に捕食者がどのような特徴を元に識別をおこなっているのかを調べる新たな捕食実験計画がデザイン可能であると考えられた。

★ 領域内の他研究者との連携

本研究領域 2 期生である森田亮助教(大阪大学)は動物行動データを活用しており、生物学と AI を結びつけるそのアプローチは、採択者自身の研究・興味とも深く関連があった。そこで、採択者が企画・運営する進化学若手の会にて企画中のシンポジウム「考える AI と共存する生物研究者」において森田助教に登壇して頂く運びとなった。本シンポジウムは 2024 年 2-3 月に開催予定である。

3. 今後の展開

色覚模倣 AI の妥当性評価が必要であり、本研究期間内に判明した「ヒトと捕食者との類似度の評価が異なる事例」について捕食実験により AI の判断が捕食者に近いかどうかを検証する。捕食実験データの収集には 1-2 年を要するものと思われるが、AI を用いて、捕食者の(ヒトとは異なる)行動を推定できていた場合、これまでにそのような事例は報告がないため、学術的インパクトが期待できる。さらには、「これまで人間が想像し得なかった生き物の行動を AI 出あれば予測できる」という知見は、社会における AI のポテンシャルへの認知度の上昇に、(生成 AI とは違った)新たな角度から寄与すると期待される。

また、捕食者のサンプリング行動を模倣した深層強化学習手法の開発は、有毒種・無毒種の頻度に依存する捕食率を再現する新手法として、野外での生息密度・捕食率の推定や、捕食圧に応じた分布パターンのモデリングなど、群集生態学分野での応用が期待できる。

4. 自己評価

本研究で 2 つ掲げた研究目的(項目 2 参照)のうち、前者の「捕食者の色覚模倣」に関しては、当初の計画通りデータの収集・解析を実施することができた一方で、後者の「捕食実験による AI の妥当性評価」に関しては研究期間内に結果を出すことができなかった。また、査読ありジャーナルでの成果発表を、研究期間内におこなうことができなかった。そのほか、複数の国際・国内学会で受賞したほか、学会のみならず区民を対象とした展示会や展覧会にて AI の生物学研究における意義を紹介するなど、周辺分野や社会への波及効果は期待できる。以上踏まえ、本研究課題は失敗ではないものの、未達成であると考えている。

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: 0件

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 件(特許公開前のは件数にのみ含む)

(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

・網野 海・平川 翼・矢後 勝也・松尾 隆嗣. 捕食者の反応を考慮した CNN によるベイツ型・ミ

ムラ型擬態の定量化. 第 25 回日本進化学会年大会, 沖縄, 2023 年 9 月, ポスター.

・網野 海・平川 翼・矢後 勝也・松尾 隆嗣. 深層学習を利用したチョウ類擬態形質の定量化-捕食者の反応を模倣する試みについて-. 日本蝶類学会 2023 年度総会, 東京, 2023 年 12 月, 口頭.

受賞

・網野 海・平川 翼・矢後 勝也・松尾 隆嗣. 深層学習の特徴抽出過程を利用したチョウ翅模様の形質間距離の解析. 第 69 回日本生態学会大会, オンライン, 2022 年 3 月, 進化・数理部門ポスター優秀賞.

・網野 海・平川 翼・矢後 勝也・松尾 隆嗣. 深層ニューラルネットワークによる特徴抽出を利用したチョウ翅模様の類似度定量化. 第 24 回日本進化学会年大会, 沼津, 2022 年 8 月, 学生部門最優秀口頭発表賞.

・Kai Amino, Tsubasa Hirakawa, Masaya Yago & Takashi Matsuo. Quantification of mimicry resemblance in butterflies using feature extractor of deep neural network. Congresses of the European Society for Evolutionary Biology (ESEB), Czech Republic, August, 2022, Outstanding Student Poster.