

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19424

研究課題名（和文）動物コミュニケーションシグナルのリアルタイムフィードバック提示

研究課題名（英文）Real-time feedback system for studying animal communication

研究代表者

安部 健太郎（Abe, Kentaro）

東北大学・生命科学研究科・教授

研究者番号：70462653

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：鳥類の一類、鳴禽類も「歌」や「さえずり」と呼ばれる音素を複雑に組み合わせたシーケンスを用いてコミュニケーションを取得し、状況に応じて多彩なシーケンスからなる「さえずり」を発するため、ヒトの「ことば」の発声や理解の一部の神経機構を解析する動物モデルとして使用できる。本計画では、鳴禽類を防音箱中に隔離し、被験個体が発するさえずりをリアルタイムで解読するとともに液晶モニタ上のバーチャル個体を介して人工的に応答さえずりを提示するシステムを開発した。これにより音声シーケンスによるコミュニケーションを動物モデルにおいて実験室内で再現することを可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鳴禽類はさえずりと呼ばれる音素を複雑に組み合わせた音声シーケンスを用いて他個体とコミュニケーションをとり、この際に多彩なシーケンスが使用されるため、同様に複雑なヒトの「ことば」の生成と認識の神経機構の生物学的基盤を解析する動物モデルとして使用される。一方で実験室環境で自然なコミュニケーションを取らせることは困難であった。本研究では、鳴禽類個体が発するさえずりをリアルタイムで解読するとともに液晶モニタ上のバーチャル個体を介して人工的に応答シグナルを提示する実験システムを開発した。これにより音声シーケンスによるコミュニケーションを動物モデルにおいて実験室内で再現することを可能にした。

研究成果の概要（英文）：Songbirds employ a sophisticated system of vocal communication via songs which consists from sound elements intricately combined. These features enables them to serve as effective animal models for analyzing the neural mechanism underpinning human speech production and perception. However, reproducing the natural process of vocal communication in controlled laboratory setting poses significant challenges. In this project, we have developed a system that isolates songbirds in a soundproof box, enabling the complex syllabic structures of their song to be decoded in a nearly real time manner, and provides artificial feedback signals through an LCD monitor. This innovative system has thus bridged a critical gap in the field, allowing for the replication of vocal sequence-based communication within an animal model in a laboratory setting. This represents a significant advancement in our capacity to study and understand the neural mechanisms of vocal communication.

研究分野：神経科学

キーワード：バーチャル コミュニケーション 鳴禽類

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトは音素を複雑に組み合わせた音声言語である「ことば」を使用し、他個体と意思疎通を図る。このように複雑な音声を使用する動物種は少なく、「ことば」による意思疎通はヒト固有の能力とされることも多い。一方、ジュウシマツ (*Lonchura striata domestica*) 等、鳥類の一類、鳴禽類も「歌」や「さえずり」と呼ばれる音素を複雑に組み合わせたシーケンスを用いてコミュニケーションを取得し、多彩なシーケンスからなる「さえずり」を発するが、「さえずり」にどのような意味があるのか人類は理解できておらず、さえずりの発信者である個体が意図をもって特定の音素シーケンスを発することができるのかについても現在のところ定かでない。近年、鳴禽類はヒトの言語コミュニケーションに類するコミュニケーションを取得する点が注目され、その神経科学的な機構を解明のためのモデル動物として世界的に使用されているが、鳴禽類コミュニケーション能力の詳細を理解することでその理解は深まる。

## 2. 研究の目的

一般的に、動物が自然界において自発的に行う生理的なコミュニケーションを人工的な実験室環境において再現することは困難である。特に、個体間コミュニケーションは複数の動物個体が自由に行動する条件において成立する性質のあるものであるため、シグナルを発する個体や、そのシグナルの実験的な操作は、生理的な要因を毀損することが多く、難しい。本研究の目的は、鳴禽類の自然なさえずりによる個体間コミュニケーションを研究室環境の下において実験的に解析・研究する実験系を確立するというものである。このため、本研究では非現実情報(バーチャル情報)に対して生体にコミュニケーションを取らせるための実験系を確立することを目的とした。この実現のために、ジュウシマツを防音箱中に隔離し、被験個体が発するさえずりを遅延なく、リアルタイムで解読する技術を開発する。さらに、その音声解析結果とともに液晶モニタ上のバーチャル個体を介して人工的に応答さえずりを提示することを実行する。

## 3. 研究の方法

ジュウシマツ成体雄個体を防音飼育区画中のケージに単独で隔離し、その発声をマイクロフォンで集音するとともに、カメラを用いてその行動を随時記録する。収録した音声からさえずりを検出し、その部分の録音ファイルをコンピュータ上に保存する。独自に録音した音声ファイルの解析プログラムを作成し、さえずりを構成する各音素を検出し、その並びを文字列として変換する。このさえずり文字列変換解析を録音と同時にリアルタイム環境において実行する。リアルタイム文字列変換解析により、特定の音声シーケンスを発声したことが検出された際に迅速にフィードバックシグナルを液晶モニタを介して動物に提示する。以上のプログラム実行を迅速に行い、ジュウシマツや鳴禽類の生理的なコミュニケーションシグナルに対する応答と遜色なくフィードバックを提示することができるように実施する。また、フィードバックとして提示するシグナルを探索し、生理的なコミュニケーションに類する解析個体の応答が観察できるように実験系を改善する。

## 4. 研究成果

本研究では、ジュウシマツのさえずり音声を大規模に収集し、その中に含まれる音素を高精度に同定し、その音素の並びをテキストシーケンスとして出力するジュウシマツ音素解読プログラムの作成を行った。これまでの鳴禽類のさえずり音声解析においては熟練した研究者のスペクトログラムの目視による音素の手動ラベリングで実施されることが多いが、この手法では正確性および実行時間の面どちらにおいても迅速なフィードバック提示には適さない。そのため、本研究では新規の音素ラベリング法の確立を行った。ジュウシマツ音素解読は個体ごとに実施し、2段階のプロセスで実施した。まず、解読機として使用する畳み込みニューラルネットワークのトレーニング段階においては、当該個体のさえずり音声ファイルを多量に習得し、それらから無音時間を指標にさえずりを構成する各音素情報を切り分ける。次に、各音素の音響特性をもとに t-SNE(t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding)による次元圧縮および Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN)によってクラスタリングを実施する。この手法を取ることで、実験者による目視や音素判断を経ることなしにジュウシマツの発するさえずり中の音素の自動検出と自動クラスタリングを実施することを可能にした。次に、実際のリアルタイムの音素ラベリングのためには、以上のプロセスによって作成・学習した識別機にオンラインで記録中の音声ファイルを入力することで、迅速なラベリングを実施することを実現した。本研究で使用したコンピュータ性能環境において、ジュウシマツのさえずり中の音素の終了 10 ミリ秒以下でその音素のラベリングすることに成功した。これは、鳴禽類の

生理的なコミュニケーション応答として報告されている、キンカチョウさえずりに対する地鳴きのなき返し行動の潜時数百ミリ秒よりも迅速であるため、速度の面において生理的なコミュニケーションシグナルの検出とフィードバックの提示が可能になった。

次に、以上の迅速な音素検出によって個体に提示するフィードバックシグナルの最適化を行った。本研究では、フィードバック提示によって生理的なコミュニケーションを模倣することを目的とするため、フィードバックとして、音声情報としてのコミュニケーションシグナル提示または、他個体の画像や動画からなる視覚情報としてのコミュニケーションシグナルの提示を目指した。音声フィードバックによって有意に発声個体の行動が変化することはこれまでに確認されているため、上記のリアルタイム音素検出器とスピーカーを組み合わせることで音声コミュニケーションシグナルのフィードバックは実現した。次に、視覚情報のフィードバックを確立するため、画像や動画を提示するための適切な液晶モニタを選定し、モニタ上に画像や動画を提示した際の応答をビデオ録画し、行動解析に供した。その結果、他個体の画像を提示した際に行動変化することを確認し、また、画像提示後にさえずりを発した場合、そのさえずりは生体に対するさえずりと音響学的な違いが見られないものが含まれることを観察した。また、画像と動画の効果の違いを解析したところ、画像より動画のほうが行動誘起には適することを明らかにした。また、フィードバック提示中に発せられる地鳴き発声の音響学的な特性を6個体に関して解析したところ、生個体に対する応答とフィードバック画像に対する応答には音響学的な違いは認められず、フィードバック画像中の個体を黒く塗りつぶした画像提示では有意な音響特性の違いが認められることを明らかにした。これは、フィードバックとして使用する画像や動画が、生体に対する応答と遜色なく機能していることを示している。

フィードバックシグナルを動物がどのように認識しているのかは動物の主観に関わる事象であるため、動物の行動や発声のみからはそれを正確に理解することはできないと考えられる。そのため、本研究では動物の行動や発声の変化の解析だけでなく、動物の脳内の反応を定量評価することによってフィードバックシグナルを動物がどのように認識しているのかを客観的に評価する指標を得ることを目指した。これまでに研究代表者らはウイルスベクターを用いて鳴禽類脳内の CREB 転写因子の活性を定量計測することを実現している (Abe et al., PNAS 2015)。転写因子は動物が情報を認識した後の脳内の可塑性を誘発する際に重要な役割を果たすことが知られるため、動物が提示された情報をどのように認識したかの測定に適している。本研究では、ウイルスベクターに新規の改変を施すことにより、脳内で内在に発現する 50 種類程度の転写因子の脳内活性を評価するウイルスベクターシステムを新たに作成した (Abe and Abe, iScience 2022)。本実験系を用いることで、動物に提示するフィードバックシグナルと実際の生理的なコミュニケーションでの相手の反応の違いを客観的・定量的に評価することが可能になった。

本研究では、鳴禽類の音声コミュニケーションを実験室環境において詳細に解析するために、リアルタイムの音声の検出とそのシーケンス識別と迅速な生理的フィードバックシグナルとしてバーチャルシグナルの提示を目指し、それを実現した。また、動物の主観に基づくシグナルの認識を脳内転写因子活性の定量計測によって客観的に評価する手法を開発した。本研究によって確立したリアルタイムフィードバック提示システムは、鳴禽類の生理的な個体間コミュニケーション行動の詳細を明らかにするとともにそれらを生み出す脳神経機構やそのような能力の発達機構を解明する研究の進捗に貢献する。

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 2件）

1. 著者名 Abe Hitomi, Abe Kentaro	4. 巻 25
2. 論文標題 PCR-based profiling of transcription factor activity in vivo by a virus-based reporter battery	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 103927 ~ 103927
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isci.2022.103927	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 Yamamoto Hajime, Abe Kentaro	4. 巻 3
2. 論文標題 Protocol for viral vector-mediated measurement of transcription factor activity of mouse brain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 STAR Protocols	6. 最初と最後の頁 101633 ~ 101633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.xpro.2022.101633	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Mizuki Fujibayashi, Takuto Kawaji and Kentaro Abe
2. 発表標題 Analyzing the context-dependent change of song structure in Bengalese Finch
3. 学会等名 第45回日本神経科学大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hajime Yamamoto, Ryoichiro Hara, Kentaro Abe
2. 発表標題 Comparison of the activity profiles of transcription factors in the brains of mice experienced different stressors
3. 学会等名 第45回日本神経科学大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mizuki Fujibayashi and Kentaro Abe
2. 発表標題 Social interaction mediated through modification of song structure in songbird
3. 学会等名 ACC International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hajime Yamamoto, Satomi Araki and Kentaro Abe
2. 発表標題 Identification of Transcription Factors Associated with Depressive Behavior with Transcription Factor Activity Profiling
3. 学会等名 ACC International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuto Kawaji and Kentaro Abe
2. 発表標題 Synthesizing Bengalese finch songs from text data
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会CJK第1回国際会議 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mai Sasaki and Kentaro Abe
2. 発表標題 The effect of feedback with adult zebra finch pictures on the song learning in juvenile zebra finches
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会CJK第1回国際会議 (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究協力者	河路 琢函  (Kawaji Takuto)	東北大学・大学院生命科学研究科・大学院生  (11301)	
研究協力者	佐々木 眞生  (Sasaki Mai)	東北大学・大学院生命科学研究科・大学院生  (11301)	
研究協力者	藤林 瑞季  (Fujibayashi Mizuki)	東北大学・大学院生命科学研究科・大学院生  (11301)	

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