

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00568

研究課題名（和文）コウモリ類の音声モニタリングの汎用化に向けた音声データベースと識別方法の構築

研究課題名（英文）Construction of acoustic library and species classifier of Japanese bats for acoustic monitoring

研究代表者

福井 大 (Fukui, Dai)

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・助教

研究者番号：60706670

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：日本産コウモリ類の参照音声30種1,400個体分を収集し、データベースを構築した。これらの音声ファイルをspectrogram画像に変換し、Convolutional Neural Network (CNN) を用いることで、特徴量を自動抽出し、高精度かつコールの変異性やノイズに頑健な種判別法の開発を目指した結果、10分割交差検証での評価で平均正答率98.1%を達成した。試験音声モニタリングを行った結果、6月は169,240個、7月には296,730個のコウモリ類のコールを検出した。コールの数が予想以上に膨大であり、これらに上記で開発した識別器を適用する作業は現在進行中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果から、これまで非効率な捕獲調査に頼らざるを得なかったり、音声モニタリングを行っても種識別が不可能であった地域でも、コウモリ類の種ごとの音声モニタリングが可能になる。これにより、コウモリ類の利用環境調査の効率が飛躍的に向上すると同時に、その情報量も格段と増える。例えば、風力発電施設建設に伴う環境影響評価など、調査の効率化と高精度化が求められているような領域にブレークスルーをもたらし、ひいては野生動物保全と人間活動の共生という、社会的課題の解決に大きな貢献をすることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：A bat echolocation call library was constructed by collecting 1,400 reference calls from 30 species. These call files were converted into spectrogram images. By using the Convolutional Neural Network (CNN), we aimed to develop a species classifier that is highly accurate and robust against call variability and noise. The mean correct answer rate was 98.1% in the 10-fold cross validation. As results of test acoustic monitoring conducted in Hokkaido, 169,240 bat calls were detected in June and 296,730 bats in July. The sample size is huge, applying the classifier developed above to these is still in progress.

研究分野：哺乳類生態学

キーワード：コウモリ エコーロケーション 種判別 音声モニタリング 音声データベース

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本産陸生哺乳類の1/3を占めるコウモリ類は、森林から水域まで様々な生息場所を広く利用するうえに環境変化に対する感受性が高い。したがって、多くの種が環境改変に伴う生息地の劣化によって個体数を減少させていると考えられ(環境省レッドリスト 2014)、利用環境特性の解明と、それを基にした早急な生息環境保全対策が求められる。また、近年においては、風力発電施設の増加に伴って、コウモリが風車に衝突して死亡するケース(バットストライク)が報告され問題となっており、適切な風力発電施設設置箇所の選定のためにもコウモリ類の飛翔ルート(利用環境特性)に関する情報が求められている。

以上のような課題の解決のためには、各種コウモリ類の利用環境特性に関する情報が必須である。一般的にコウモリ類の利用環境特性は、様々な環境における生息種を捕獲によって明らかにし、環境特性との関連性を解析することで調べられてきた。一方、最近10年で、コウモリ類の最大の特徴である超音波音声をバットディテクターで感知しながら行う音声モニタリングを用いた研究が増えてきた(Fukui et al. J. Anim. Ecol. 2006, For. Ecol. Manage. 2011)。音声モニタリングは、同時に複数箇所でも長期間の調査が可能であったり、捕獲が困難な高高度を飛翔する種の活動も把握できるため、従来の捕獲調査に比べて極めて効率性が高いという利点を持つ。

ただし、音声モニタリングの実施には課題もある。まず、音声によって種を識別するためには、その根拠となる参照音声が多数必要である。参照音声の収集は、種同定が確実な個体の飛翔時の音声を録音しておくのが、エコーロケーションを行わないオオコウモリ属2種を除く日本産コウモリ類33種のうち、半数以上の種の参照音声が存在しない、あるいは不足している。次に、音声による種識別方法の構築が必要となる。コウモリ類の音声は、種内あるいは個体内変異が大きい上に、近縁種同士では音声構造が極めて似通う場合がある。そのため、音声による種識別を行うためには、対象種数が多ければ多いほど高度で複雑な分析と解析が要求される。

研究代表者はこれまで、北海道南部に生息するコウモリ類7種を対象とした音声による種識別方法を、線形判別分析を用いて構築した(Fukui et al. Zool. Sci. 2004)。その後、研究代表者と研究分担者との共同研究で、群馬県に生息するコウモリ類12種の、機械学習アルゴリズムを用いた音声種識別方法を構築することに成功した(Matsui et al. 投稿準備中)。これらの方法は国内でも先進的であるが、生息するコウモリ類の種構成は地域によって大きく異なるため、利用できる地域に限られるという制約もある。

日本産コウモリ全種の参照音声を収集してデータベース化し、さらに地域ごとの音声種識別方法を構築できれば、国内どこでも音声モニタリングが実施可能になる。その結果、コウモリ類の利用環境特性に関する調査・研究の効率が飛躍的に向上し、保全やバットストライクといった人間活動に関わる各種問題の解決に大きく貢献できる。

2. 研究の目的

上記の背景およびこれまでの研究成果をもとに、コウモリ類の利用環境特性解明に向けた音声モニタリングを日本国内どこでも可能とするための基盤研究を行う。研究期間内には以下のことを明らかにする。

1. 日本産コウモリ類全種の飛翔時の音声(エコーロケーションコール)を全国各地で録音・収集・計測する。
2. 「1」で収集した音声ファイルや計測値、種情報といったデータをデータベースに格納し、一元管理できるようにする。
3. 「1」で収集した音声ファイルとその計測値をもとに、機械学習アルゴリズムを用いた種識別方法を構築する。
4. 自動録音装置を用いた試験音声モニタリングを実施し、「3」によって構築された種識別方法を適用することで、種ごとの利用環境特性を調べる。

3. 研究の方法

①日本産コウモリ類の参照音声の収集

日本産コウモリ類全種の音声を録音するため、研究開始時点で十分な参照音声の数が集まっていない種が生息する地域を重点的に対象とした。具体的には、2016年は富良野地方(北海道)と南西諸島(八重山諸島)と中部地方(長野県)、2017年は富良野地方(北海道)と南西諸島(奄美大島)、2018年は富良野地方(北海道)と南西諸島(沖縄島)、2019年は北海道東部である。対象調査地域内に既知のねぐら(洞窟や家屋等)がある場合、日没前後にねぐらから飛び出すコウモリの飛翔時音声を録音した。また、ねぐらがわからない場合は、森林や河川上でHarp Trapやかすみ網を用いてコウモリ類を捕獲した。捕獲された個体の種同定や計測、標識を行い、放逐後の飛翔時音声を録音した。捕獲の際には環境省ならびに都道府県知事より鳥獣捕獲許可を取得した。上記録音の際には、Time Expansion式バットディテクター(Pettersson D240x)と、それに接続したリニアPCMレコーダー(Rolland R-05)を用い、wav方式で記録した。タイムエキスパンションは10倍、サンプリング周波数は44.1kHzである。

②種識別方法(識別器)の構築

上記①で収集した音声ファイルおよび、既存の音声ファイルから、20ms前と比較して音圧レベルが10dB上昇した地点を自動検出し、検出した音声を中心に時間軸方向は左右100msずつ、周波数方向は1kHz-22kHzの範囲に対して短時間フーリエ変換を行い224 pixel四方のスペクト

ログラムに変換した。このとき条件を満たす全ての音が検出されるため、コウモリのエコーロケーションコールに加えノイズも検出されてしまう。そこでコール以外の音声はノイズクラスとして定義し、データベースを作成した。

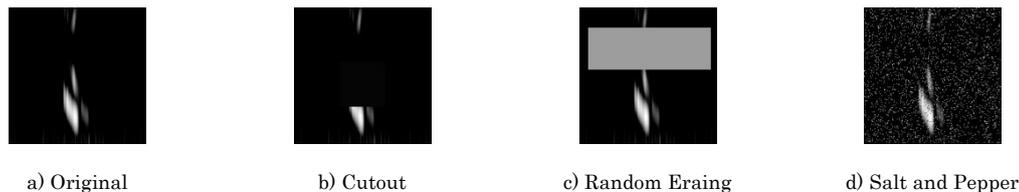


図 1. *Pipistrellus abramus* のコールに data augmentation を適用したイメージ

上記で生成したスペクトログラムが種で異なるので画像分類のタスクで種判別を行なった。画像分類では CNN (Convolutional Neural Networks) が実績を残していることから、CNN に基づく識別器を構築した。スペクトログラムを入力すると識別器は各クラスの予測確率を出力する。最適なハイパーパラメータの組み合わせで学習を行い、期待される性能を評価するため入れ子式交差検証を行なった。CNN のアーキテクチャには予測精度と計算速度の両立が可能である MobileNetV1 を使用した。入れ子式交差検証の学習時には図 1 に示す data augmentation と呼ばれる画像の水増し技術を適用した。使用した data augmentation は 1) Cutout, 2) Random Erasing, 3) Salt and Pepper の 3 種類である。これらの手法により学習時に意図的なノイズを含むスペクトログラムを追加することで汎化性能を高める狙いがある。data augmentation によってデータベースのスペクトログラム数は 4 倍になった。

入れ子式交差検証での最適なハイパーパラメータの組み合わせの探索ではベイズ最適化を用いた。なお入れ子式交差検証は外側のクロスバリデーション (以下 outer cv) が 10-fold cross-validation で、内側のクロスバリデーション (以下 inner cv) は 5-fold cross-validation である。各 inner cv で 8 回のベイズ最適化を行い、最適なハイパーパラメータの組み合わせを算出した。これらを平均したハイパーパラメータを使用して outer cv で validation に対して予測を行い精度を算出した。10 回の outer cv で算出した精度の平均を最終的な識別器の識別精度とした。ベイズ最適化は Optuna (0.18.1 version) を用いて行なった。

識別器の性能は Overall Accuracy, Precision, Recall, F-value で評価した。Overall Accuracy は正しく識別された割合、Precision_i は種 i に予測されたうち、実際に種 i であった割合、Recall_i は実際に種 i のうち正しく予測された割合、F-value_i は種 i の Precision_i と Recall_i から算出される統合指標である。10 回の outer cv で算出された平均を求め、最終的な識別器の性能とした。

③試験音声モニタリングの実施

ここまでで完成した種識別器を使用し、実際に野外で音声モニタリングを行う。調査地は東京大学北海道演習林とした。各調査地に 12 箇所のモニタリング定点を設定し、自動超音波録音装置 (SM3-BAT, Wildlife Acoustics 社) を、コウモリ類の活動量が最も多い 6~7 月にかけて約 10 日間連続で設置する。録音された音声ファイルを音声解析ソフトウェア SonoBat でソナグラム化し特徴量の計測を行った後、種識別器を用いて音声の持ち主 (種) を識別する。種ごとの録音回数と、定点周辺の環境パラメータ (土地利用形態、植生、標高、気温) から、各種コウモリ類の利用環境特性を明示する。

表 1. 各クラスのコールタイプ、音声ファイル・スペクトログラム数

Class	Species	Call type	Audio files	Spectrograms
S01	<i>Barbastella pacifica</i>	FM	5	192
S02	<i>Eptesicus japonensis</i>	FM/QCF, QCF	40	968
S03	<i>Eptesicus nilssonii</i>	FM/QCF, QCF	15	475
S04	<i>Hipposideros turpis</i>	CF/FM	20	242
S05	<i>Hypsugo alaschanicus</i>	FM/QCF, QCF	15	407
S06	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	FM/QCF, QCF	40	1,148
S07	<i>Miniopterus fuscus</i>	FM/QCF, QCF	23	409
S08	<i>Murina hilgendorfi</i>	FM	71	1,357
S09	<i>Murina ryukyuana</i>	FM	41	773
S10	<i>Murina ussuriensis</i>	FM	297	5,013
S11	<i>Myotis bombinus</i>	FM	22	412
S12	<i>Myotis frater</i>	FM	46	1,277
S13	<i>Myotis gracilis</i>	FM	1	60
S14	<i>Myotis ikonnikovi</i>	FM	148	3,714
S15	<i>Myotis macrodactylus</i>	FM	164	9,071
S16	<i>Myotis petax</i>	FM	10	43
S17	<i>Myotis pruinosus</i>	FM	8	166
S18	<i>Myotis rufoniger</i>	FM	3	98
S19	<i>Myotis yanbarensis</i>	FM	20	771
S20	<i>Nyctalus aviator</i>	FM/QCF, QCF	34	632
S21	<i>Pipistrellus abramus</i>	FM/QCF, QCF	97	2,317
S22	<i>Plecotus sacrimontis</i>	FM	41	1,493
S23	<i>Rhinolophus cornutus cornutus</i>	FM/CF/FM	62	597
S24	<i>Rhinolophus cornutus orii</i>	FM/CF/FM	6	61
S25	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	FM/CF/FM	66	1,593
S26	<i>Rhinolophus pumillus</i>	FM/CF/FM	22	322
S27	<i>Rhinolophus perditus</i>	FM/CF/FM	21	473
S28	<i>Tadarida latouchei</i>	FM/QCF, QCF	8	100
S29	<i>Vespertilio murinus</i>	FM/QCF, QCF	16	322
S30	<i>Vespertilio sinensis</i>	FM/QCF, QCF	38	773
S31	Noise	—	—	19,246
Total	—	—	1400	54,525

Call type: FM: Frequency Modulated, CF: Constant Frequency, QCF: Quasi Constant Frequency, -: unknown

4. 研究成果

①日本産コウモリ類の参照音声の収集

本研究期間内に、24種363個体分の参照音声を新たに収集できた。この中には、これまでに収集できていなかった種を10種含む。それ以前に収集していたものと合わせ、合計30種1,400個体分の音声についてデータベース化することができた。

②種識別方法（識別器）の構築

表1に各クラスのコールタイプ、録音された音声ファイル数及び生成されたスペクトログラム数を示す。また、入れ子式交差検証の結果の混同行列を図2に示す。縦軸が実測、横軸が予測を示している。なおセル内の数値は実測のうち、どのくらいの割合（%）で各クラスに予測されたかを示しており、値が1%以上のセルに限って記載した。

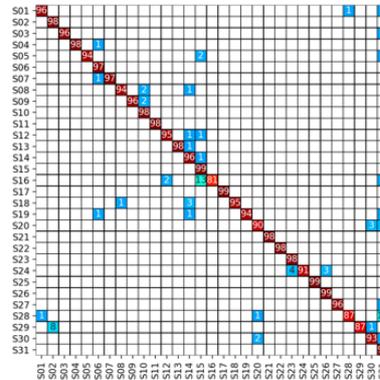


図2. 入れ子式交差検証による混同行列

Overall Accuracy が $98.1 \pm 0.05\%$, Precision が $96.9 \pm 0.9\%$, Recall が $95.8 \pm 1.0\%$, F-value が $96.2 \pm 0.7\%$ であった。F-value が 2σ を超えており深層学習ベースの識別器の性能は高いと言える。いずれの指標も先行研究と比較して対象種数が多かったにもかかわらず同等かそれ以上であった。しかし *Myotis petax* と *Tadarida latouchei* はF-value が $86.5 \pm 3.0\%$ と $84.5 \pm 2.9\%$ と他種(91.4 to 99.3%)と比較して低かった。これはスペクトログラムの数が各々43枚、100枚と少なく識別器が特徴を学習するのに十分でなかったことや、outer cvのvalidationに対する予測精度の分散が大きかったことが原因と考えられる。

本研究はコウモリ類のコールを録音した音声ファイルからコールを自動検出し、短時間フーリエ変換により検出したコールのスペクトログラムを生成しデータベースとした(3.1節, 3.2節)。そのデータベースに対して深層学習を用いた識別器を構築し、画像分類のタスクで入れ子式交差検証を用いて種判別を行なった(3.3節)。結果としてOverall accuracyで98.1%を達成し、対象種数を考慮すると先行研究と比較しても高い性能を誇ることがわかった。

今後の課題は誤判別削減及び汎化性能を高めることである。ここでの汎化性能とは未知の音声データに対する識別精度を表す。誤判別削減のためには音の時間構造に注目したCRNN(Convolutional Recurrent Neural Network)へのモデルの変更や、引き続き音声ファイルを収集するというフィールドでの努力が考えられる。識別器の汎化性能では、他地域に適応した際に識別精度が下がらないことが重要である。そこでスペクトログラムに加え、コウモリ類の分布推定マップを学習要素に含む、マルチモーダル学習による識別器の構築が有力である。

③試験音声モニタリング

試験音声モニタリングを行った結果、6月には36,254個、7月には37,076個の音声ファイルを記録できた。この音声ファイルからコールを検出した結果、6月は169,240個、7月には296,730個のコウモリ類のコールを検出した。コールの数が予想以上に膨大であり、これらに上記②で開発した識別器を適用する作業は現在進行中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 増田 圭祐, 松井 孝典, 福井 大, 福井 健一, 町村 尚	4. 巻 57
2. 論文標題 機械学習法を用いたエコーロケーションコールによるコウモリの種判別	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 哺乳類科学	6. 最初と最後の頁 19-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11238/mammalianscience.57.19	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 -
1. 著者名 福井 大	4. 巻 154
2. 論文標題 コウモリ類の音声調査の現状と課題	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JEAS NEWS	6. 最初と最後の頁 10-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 福井 大	4. 巻 58
2. 論文標題 和歌山県におけるコウモリ類の記録	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 南紀生物	6. 最初と最後の頁 162-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 Heim Olga, Puisto Anna I. E., Fukui Dai, Vesterinen Eero J.	4. 巻 22
2. 論文標題 Molecular evidence of bird-eating behavior in <i>Nyctalus aviator</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 acta ethologica	6. 最初と最後の頁 223 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10211-019-00319-5	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 該当する

1. 著者名 Hoyt Joseph R., Langwig Kate E., Sun Keping, Parise Katy L., Li Aoqiang, Wang Yujuan, Huang Xiaobin, Worledge Lisa, Miller Helen, White J. Paul, Kaarakka Heather M., Redell Jennifer A., Gorfol Tamas, Boldogh S?ndor Andr?s, Fukui Dai, et al.	4. 巻 117
2. 論文標題 Environmental reservoir dynamics predict global infection patterns and population impacts for the fungal disease white-nose syndrome	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 7255 ~ 7262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1914794117	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 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 増田圭祐・松井孝典・福井 大・町村 尚
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークを用いたエコーロケーションコールによるコウモリの種判別
3. 学会等名 2017年度人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 増田圭祐, 松井孝典, 福井大, 町村尚
2. 発表標題 Deep Convolutional Neural Networkを用いたコウモリ種判別システムの開発と音声モニタリングへの応用
3. 学会等名 日本生態学会第65回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fukui D. and Matsui T.
2. 発表標題 Effects of forest disturbance on bat assemblages in Japan as revealed by acoustic monitoring.
3. 学会等名 18th International Bat Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kobayashi K., Matsui T., Fukui D.
2. 発表標題 Development of Japanese bat species identification system by echolocation calls using deep learning and evaluation of increasing images by GAN.
3. 学会等名 The 6th Annual Meeting of the Society for Bioacoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 啓悟, 松井 孝典, 福井 大, 町村 尚
2. 発表標題 CNNを用いたエコーロケーションコールによる日本産コウモリ類の種判別システムの開発
3. 学会等名 音学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林啓悟, 松井孝典, 福井大, 町村尚
2. 発表標題 日本産コウモリの音声モニタリングシステムの開発と北海道北部での空間利用分布の予測
3. 学会等名 日本生態学会第67回全国大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 生物音響学会	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 464
3. 書名 生き物と音の事典	

〔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 分 担 者	松井 孝典 (Matsui Takanori) (30423205)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	