

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07487

研究課題名(和文) 自動撮影カメラとラジコンヘリによるニホンジカの革新的な密度推定手法の開発

研究課題名(英文) Development of innovative approaches to estimate density of Sika deer using camera traps and UAVs

研究代表者

中島 啓裕 (NAKASHIMA, Yoshihiro)

日本大学・生物資源科学部・助教

研究者番号：80722420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ニホンジカを対象とした高精度かつ低コストな密度推定手法を確立することである。とくに自動撮影カメラとドローンの有効性を検証した。前者に関しては、最初にオスジカの角の3次元モデリングを行い、個体識別可能なレベルでシカ角形状を復元できるのかを確かめた。さらに、野外に自動撮影カメラ20台を設置し、オスジカの個体識別と個体群サイズの推定を行った。この結果、オスジカの個体判別、個体群サイズの推定が可能であることが分かった。後者に関しては、群馬県利根郡みなかみ町においてドローンを繰り返し飛行させた。この結果、撮影時の光条件に留意すれば、密度推定に利用可能な質の動画が得られることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to establish accurate and cost-effective approaches to estimate population size or density of Sika deer using camera traps and UAVs. For the former, we performed 3-D modeling on antler of male Sika deer and recognize the individuals to apply capture-recapture model. For the latter, we flew a UAVs in a forest in Gumma prefecture to test whether animals are recognizable from the air. The results showed that both methods are potential to estimate the density of Sika deer, although several constrains should be solved. In particular, a combination of individual recognition by camera traps by 3-D modeling and capture-recapture model are an efficient approach to estimate Sika deer's density.

研究分野：生態学

キーワード：密度推定 自動撮影カメラ ドローン 野生動物

1. 研究開始当初の背景

近年、全国的にニホンジカ *Cervus nippon* が増加し、その採食圧・踏圧によって、林床植物の退行、樹木更新の阻害、希少植物種の減少が進行している (Takatsuki 2009)。また、農林業被害などにおける経済被害も深刻化しており、早急な対策が求められている。ニホンジカの個体群を適正に管理していくためには、個体数を定期的・長期的にモニタリングし、その動向を管理施策にフィードバックさせる「順応的管理」を実施することが不可欠である。しかし、従来の密度推定手法(糞塊法、糞粒法、区画法、ヘリコプターセンサスなど)は、推定精度と調査の簡便性にトレードオフがあり、順応的管理の基礎となる簡便かつ信頼度の高い調査手法の確立が急務の課題となっている。

近年、さまざまな電子機器の技術革新が進んでおり、これらを活用して野生動物の新たな調査方法を確立できる可能性がある。とくに、自動撮影カメラとカメラ付きラジコンヘリコプター(以下、ラジコンヘリ)は、個体数密度推定のツールとしても高い可能性を持っている。自動撮影カメラとは、動物がカメラの前を通過すると熱を感知して写真もしくは動画を自動撮影するカメラで、今世紀に入って高性能化・低価格化が急速に進んだ。一方、ラジコンヘリも、内臓 GPS とプログラミングにより、あらかじめ設定したルートを安定して飛行することが可能になり、搭載したカメラによって高画質の映像をリアルタイムで送信できるようになった。ラジコンヘリの導入により、これまで有人ヘリコプターで行っていた空中センサスを低コストで実現可能である。

しかし、両ツールを用いてシカの密度の推定するためには、さらなる方法論的な検討・改良が必要である。野生動物の密度推定が困難なのは、一般に、動物の全頭カウントが現実的に不可能であるうえに、動物の検出率は、天候、地形、植生、あるいは動物の習性によって時間的にも空間的にも大きく変化するという点にある。近年の統計学的手法の進展は目覚ましく、検出率の変化を考慮した現実的な密度推定アルゴリズムが開発されている。自動撮影カメラ、ラジコンヘリによって得られるデータからも、それぞれ、捕獲再捕獲モデル(以下、CR モデル)、*N*-mixture モデルを用いることで、統計学的に頑健な個体数もしくは密度推定が原理的には可能となっている。しかし、これらのモデルのニホンジカへ適用するためには、以下の点が解決される必要がある。

CR モデルは、同一個体が再捕獲(再撮影)される確率から検出率を決定する。このため、CR モデルの自動撮影カメラのデータへの適用は、撮影された動物の個体判別が可能であることが前提となる。近年、さまざまな角度から同一の対象物を撮影して、その構造の復元・計測を行う「3次元モデリング技術」が

急速に発達・普及している。この技術をうまく応用すれば、ニホンジカの個体識別も可能かもしれない。とくにオスジカの角の形状は個体間で変異が大きいので、3次元モデリングによって角の形状を復元すれば、客観的な個体識別が可能になるだろう。

一方、*N*-mixture モデルは、複数地点で繰り返しデータを取得することで検出率を推定し、真の個体数を推定する手法である (Royle 2004)。このモデルは、動物の個体判別を前提としないが、動物の検出率が低い場合には推定精度が大きく低下する (Joseph et al. 2009)。ラジコンヘリでは、低高度飛行により検出率を高めることが可能だが、撮影面積が小さくなる上に、地上物との衝突による墜落リスクが増すという問題がある。効率的な調査を行うためには、現実的な条件の下で、最適飛行高度・繰り返し飛行回数を決める必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ニホンジカの簡便かつ信頼度の高い個体数推定を可能にするために、とくに(1)自動撮影カメラと3次元モデリングを用いたオスジカ有角個体の個体識別手法を確立すること、(2)カメラ付きラジコンヘリコプターの最適な飛行方式(とくに高度)を特定することである。

3. 研究の方法

(1) 自動撮影カメラによる個体識別

推定精度の検証と個体判別可否の検討

3次元モデリングによるオスジカの個体判別の可否は、どの程度の推定精度でシカ角の形状を復元・計測することが可能であるかに依存する。そこで最初に、形状・サイズが既知のシカ角を対象に3次元モデリングを行い、その測定誤差の推定を行った。東京大学総合研究博物館に所蔵されているオスジカ頭骨50体を対象に、ノギス・巻尺を用いて角の先端間の距離(図1)を計測した(以下では、この計測結果の値を「実測値」と呼ぶことにする)。

ここでは、三尖(16個体)もしくは四尖(21個体)の計37個体を対象に解析を行った。対象頭骨を前方、右斜め前方、右側方

の計3地点から自動撮影カメラ Bushnell Trophy Cam を用いて撮影した。この自動撮影カメラは、手動でも静止画もしくは動画を撮影できる機能を備えており、撮影はこの機能を用いて行った。

自動撮影カメラを用いて撮影された画像



図1. 計測対象とした角尖間の距離

を対象に3次元モデリングを行い角の頂点間の距離を推定した。モデリングは、フリーソフトである写真測量ソフト SurveyFromPhoto (SFP64)を用いた。このソフトは、対象物を少なくとも3方向から撮影した画像が得られた場合に3次元構造を復元できるようになっている。

これらによって求めた実測値と推定値を比較して、推定値の誤差分布を求め、オシカの角の形状に、推定された誤差を踏まえたうえでも個体判別に十分な個体変異があるかどうかを確かめた。まず推定した誤差分布(正規分布を仮定)から、1,000個の乱数を発生させて実測値に加えることで、頭骨ごとに1,000個分の頂点間距離のデータセットを作成した(このデータセットは、同じ有角頭骨を対象に1,000回モデリングと計測を繰り返した値の集合とみなすことができる)。次にこのうち各頭骨あたり500個のデータを抽出して、判別分析を行った(500個×頭骨数のデータセットをもとに線形1次判別式を得た)。この上で、残りの500個のデータに判別式を適用し、どの程度の確率で正しく分類されるかを確かめた。判別分析は、R (R Development Core Team 2014)のMASSパッケージのlda関数を用いて行った。

シミュレーション

シカ角の形状からの個体判別は、判別対象となる個体数が増加するにつれて、頭骨の形状が似た個体が含まれる確率が増し誤判別率が増していくことが懸念される。個体数の増加が判別率に与える影響を確かめるために、次のようなシミュレーションを行った。まず、計測対象としたシカ角の頂点間の距離の平均値と標準偏差を求めた。頂点間の距離が正規分布に従うこと、頂点間の距離は独立に決まることを仮定して、求めた平均値と標準偏差からN個体分の仮想データセットを作成した。実測値と推定値の比較から求めた推定誤差のもとで、各個体1,000個の推定値を作成した。この上で、500個分のデータから判別式を求め、残りの500個の推定値からどの程度の確率で正しく判別できるかを調べた。Nは20, 50, 100, 200, 500と変化させた。このシミュレーションは4尖のもののみを対象とした。

フィールド調査

実際のフィールドで得られた動画からも3次元モデリング化が可能であるかどうかを検証するために、京都府南丹市美山町京都大学芦生研究林および群馬県利根郡みなかみ町日本大学演習林においてフィールド調査を行った。2014年10月から2016年9月にかけて、両調査地に自動撮影カメラを20台ずつ設置した。カメラ設置点は調査エリアからランダムに選んだ地点に設置した。カメラはビデオモードに設定し、撮影時間30秒、撮影インターバルを1秒に指定した。得られた

有角個体の動画は、動画編集ソフトを用いて30秒の動画を2秒ごとの16枚の静止画に変換した。これらの画像から適当な3-5枚を選択し、シカ角の3次元モデリングを行った。

(2) ラジコンヘリの飛行手法の確立

2017年と2018年の秋季(落葉後)に群馬県利根郡みなかみ町奥利根水源の森において、ラジコンヘリを一定のコースで繰り返し飛行させ、最適な飛行高度を特定した。

調査にはDJI社製クアッドコプターのPHANTOM3 Advancedを用いた。この機種は最大速度16m/sで約23分の飛行が可能である。ただし、映像を連続して撮影した場合、飛行時間はおよそ15分前後に短縮される。搭載されているカメラは静止画と動画の両方を撮影することのできる機種であり汎用性が高い。また本機種は、予め決められた飛行ルートに沿って自動飛行させる事ができる。

調査区域内に調査員8人をランダムに配置し(調査員の個体数密度25人km²)、ラジコンヘリの映像からどれだけ調査員を発見できるかを検証した。ラジコンヘリは50m, 100m, 200mの高度で14km/hで飛行させた。充電切れで調査エリア全体を撮影できない場合は、充電電池を交換して再び飛行させた。2017年・2018年とも各高度で10回ずつ反復した。

4. 研究成果

(1) 自動撮影カメラによる個体識別

本研究から、4尖のシカ角をもつ個体であれば、単一の自動撮影カメラと3次元モデリング技術を用いて、個体判別が可能であることが確かめられた。推定値の精度は非常に高く、またシカ角の形状に十分に大きな個体変異が存在した。シミュレーション結果によれば500個体撮影された場合でも誤判別率はわずか10%程度であった。ニホンジカは場所によっては非常に高密度になるが、4尖個体が500個体以上撮影されることは考えにくい。野外で実際に撮影された動画からもシカ角の3次元モデリングに成功しており、本研究により確立された手法は、ニホンジカへのCR法の適用を可能にする基礎技術になることが期待できる。

一方で、3尖のシカ角の場合、3次元モデリングが多くの場合うまくいかなかった。これは、3次元モデリングに内在する理論的な問題というよりは、利用したソフトの実用上の制約によるものである可能性が高い。本研究で使用したSurveyFromPhoto (SFP64)は、少なくとも10点の対応点を手動で指定する必要がある。4尖のシカ角の場合、角の頂点だけで8点を指定できる。残りの2点は明瞭に写っている枝分かれの基部を選択すればよい。しかし、3尖の場合、頂点は6点しかなく、10点確保するためには4つの枝分かれ基部全てを利用しなければならない。しかし、枝分かれ基部は、正確に対応点を指定することがしばしば困難であった。原理的には、よ

り少ない点数でも3次元モデリングは可能であり、不正確な対応点を指定せざるを得ない場合は、(数が少なくとも)角の頂点のみの情報を使って3次元モデリングした方がかえって精度は高くなる可能性もある。現在、R言語でも3次元モデリングをするパッケージが開発されており、今後はより少ない対応点から必要な部位の計測が可能かどうかを検討する必要があると考えられる。

3 尖の場合の個体判別に課題は残されているものの、この制約はシカの密度推定を行ううえでは致命的な問題ではない。Jacobson et al. (1997)は、次のような方法でオジロジカの全個体数推定を行っている。まず、CR法を用いて、目視による個体判別が可能な個体の密度推定を行う。次に、個体判別できた個体の撮影頻度と全個体の撮影頻度の比を算出する。先の推定密度とこの比を用いて、総個体数密度を算出する。同様の方法をとれば、本研究の手法を適用して、ニホンジカの総個体数を推定することも可能である。ただし、動物の撮影頻度は、その動物が自動撮影カメラに撮影される範囲(面積)とその動物の1日当たりの移動距離に依存するため、性年齢カテゴリーによってこれらのパラメータが変われば、撮影頻度の比が密度の比と一致しないことになる。今後、3 尖個体を含めた個体判別手法を確立するとともに、オスジカの推定密度からどのようにして正確な総個体数を算出するかを検討していく必要があると考えられる。

本研究では、3次元モデリングによるニホンジカの有角個体の個体判別手法の確立を行った。本手法に基づいて密度推定を行うためには、さらなる実用上の工夫も必要になるかもしれない。例えば、個体識別の可否は、いかにシカ角全体がはっきり撮影されているのかにも依存する。オスジカの頭骨全体を様々な角度から撮影するためには、自動撮影カメラの前にベイトを設置するなど、さらなる手法の改良を行っていく必要があると考えられる。

(2) ラジコンヘリの飛行手法の確立

本研究から、十分高い確率で動物を検出するためには、かなり低い高度で飛行させる必要があることが分かった。検出率は、高度 50m の場合 86%、100m で 25%、200m では 12%であった。検出率が低いのは、落葉後の森林であっても枝が視界を遮り、林床の様子を十分観察することが出来ないことが多かったためである。とくに高い高度で飛行した場合、ラジコンヘリの真下以外の様子を観察することは非常に困難であった。一方、50m の高度では、検出率は比較的高かったが、調査エリア全体を撮影するためには何度も充電電池を交換しなければならず、労力的なコストはかなり高かった。

この他にも、ラジコンヘリによる密度推定を妨げる要因がいくつか観察された。例えば、

強い日差しはラジコンヘリの映像に白とびを引き起こすことがあった。この場合、低空飛行させている場合でも映像から調査員を検出することは非常に困難であった。また濃霧が発生した場合も検出率は大きく低下した。

本研究からは、ラジコンヘリが野生動物の個体数密度推定において有用であると結論することは出来なかった。しかし、調査で得られた上記の改善点を踏まえて飛行計画を練ることによって信頼度の高い密度推定を行える可能性は依然として残されている。例えば飛行する際にカメラに遮光フィルムを付ける事で映像の白とびを抑制する事ができる。さらに、赤外線カメラを利用することにより、動物の発見率を上げるなどの工夫も考えられる。今後も試行錯誤を繰り返す事で、ラジコンヘリによる密度推定の信頼性も向上することが期待できると考えられた。

<引用文献>

Jacobson, H.A., Kroll, J.C., Browning, R.W., Koerth, B.H. & Conway, M.H. 1997. Infrared-triggered cameras for censusing white-tailed deer. *Wildlife Society* 25: 557-562.

Joseph, L.N., Elkin, C., Martin, T.G. & Possingham, H.P. (2009) Modeling abundance using N mixture models: the importance of considering ecological mechanisms. *Ecological applications*, 19, 631-642.

Royle, J.A. (2004) N mixture models for estimating population size from spatially replicated counts. *Biometrics*, 60, 108-115.

Takatsuki, S. (2009) Effects of sika deer on vegetation in Japan: a review. *Biological Conservation*, 142, 1922-1929.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Nakashima, Y., Fukasawa, K. & Samejima, H. 2018. Estimating animal density without individual recognition using information derivable exclusively from camera traps. *Journal of Applied Ecology*, 55 (2):735-744. (査読アリ)

[学会発表](計10件)

中島啓裕, 深澤圭太, 鮫島弘光「自動撮影カメラによる地上性動物の密度推定 個体識別を必要としない手法の開発と検証」(企画集会口頭) 日本生態学会第65回全国大会(2018年3月 札幌) . 笠田実, 横溝裕行, 中島啓裕, 矢島豪

太, 横山雄一, 宮下直「カメラトラップと罠捕獲を利用したイノシシの個体数推定法の開発」(ポスター) 第 65 回日本生態学会大会 (2018 年 3 月, 札幌) .
青木俊汰郎, 奥野修平, 橋詰茜, 中島啓裕「ブナ林床のササをめぐる草食動物による採食方法の違い」(口頭) 第 65 回日本生態学会大会 (2018 年 3 月, 札幌) .
橋詰茜, 中島啓裕「脊椎動物および節足動物による動物遺体の利用実態 - ハエ幼虫は浄化装置?」(口頭) 日本生態学会第 65 回全国大会 (2018 年 3 月, 札幌) .
東出大志, 栗山武夫, 高木俊, 中島啓裕, 深澤圭太, 横山真弓「自動撮影カメラによるシカ・イノシシの生息密度推定と痕跡・捕獲密度指標との比較検討」(ポスター) 日本生態学会第 65 回全国大会 (2018 年 3 月, 札幌) .
中島啓裕, 鮫島弘光, 青木俊汰郎, 橋詰茜「角の 3 次元モデリングによるニホンジカの個体識別」日本哺乳類学会 2017 年度大会 (2017 年 9 月, 富山) .
鮫島弘光, 中島啓裕, 長野秀美, 池川凜太郎, 高柳敦「シカの寡占する京都府芦生研究林における中大型哺乳類相とその季節変動パターン」(口頭) 日本生態学会第 64 回全国大会 (2017 年 3 月, 東京) .
青木俊汰郎, 中島啓裕「群馬県武尊山における中大型動物による亜高山帯利用の実態解明 自動撮影カメラを用いた調査から」(ポスター) 日本哺乳類学会 2016 年大会 (2016 年 9 月, 茨城) .
中島啓裕, 鮫島弘光, 深澤圭太「個体識別ができない地上性動物でも自動撮影カメラによる密度推定は可能か?」(口頭) 日本哺乳類学会 2016 年度大会 (2016 年 9 月, 茨城) .
池川凜太郎, 古田智博, 鮫島弘光, 中島啓裕, 高柳敦「下層植生が極度に衰退した芦生研究林におけるニホンジカの餌環境評価」(ポスター) 日本生態学会第 63 回全国大会 (2016 年 3 月, 仙台) .

〔その他〕

ホームページ等

<http://hp.brs.nihon-u.ac.jp/~dobutsu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 啓裕 (NAKASHIMA, Yoshihiro)

日本大学・生物資源科学部・助教

研究者番号: 80722420

(2) 研究分担者

高柳 敦 (TAKAYANAGI, Atsushi)

京都大学・農学研究科・講師

研究者番号: 70216795

鮫島 弘光 (SAMEJIMA, Hiromitsu)
公益財団法人地球環境戦略研究機関・その他部局等・リサーチャー
研究者番号: 80594192
(平成 28 年度より研究分担者)

伊勢 武史 (ISE, Takeshi)
京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授
研究者番号: 00518318