

研究助成成果報告 研究助成 (S)

## 野生動物装着センサを利用した IoT 情報機構

IoT information mechanism using wildlife wearing sensors

2188002



研究代表者	東京大学 情報基盤センター	教授	小林 博 樹
共同研究者	東京大学 情報基盤センター	助教	川瀬 純 也

### [研究の目的]

本研究は「福島第一原子力発電所周辺の帰還困難区域内の被曝した動物自身が線量計を持ち歩き、単独行動時に取得した記録を、集団行動時に省電力で共有し、シンクノードまで誘き出して非接触通信して回収する機構」の実現を目的とする。

### [研究の背景]

国際原子力機関 (IAEA) のチェルノブイリ原発事故報告書では、被曝した野生動物群の数世代に亘る被曝状況とその影響の調査は、学術的・社会的に非常に重要であると報告されている。東京大学の石田は、福島第一原子力発電所周辺の、特に高濃度の放射性物質が検出されている阿武隈山地北部地域において、震災直後から定期的に野生動物の被曝モニタリングを行っている。本モニタリングでは、当該野生動物の鳴き声の自動録音装置を 500 地点以上を目標として設置・運用しているが、長期数十年に亘る 24 時間 365 日の生態情報取得 (サイエンス目的の空間情報のビッグデータ) のためには、研

究者の労力だけではその取得・処理・分析は困難と報告している。

### [関連研究]

近年、コンピューターの小型・軽量化によって、人間社会による環境負荷の調査や希少種生物の生態を解明する“Bio-Logging Science”が急速に展開されている。この研究領域では、固定型センサや参加型センサによって観測個体の生態情報 (位置情報, 餌動物情報, 気象情報) などが収集される。例えば、ドイツのアルフレッド・ワグナー研究所による南極の海のリアルタイムなライブ音 (Kindermann, 2010. Science.) 配信システムや、石田による福島原発周辺の動物の鳴き声を記録・分析する (石田, 2012. 生物と科学.) 生態音響調査である。これらの結果から野生動物の個体数の推定 (Carlet al., 2010. Proc. CHI2010.) や、都市・除染計画の見直しなどが実施される (IAEA, 2006)。都市部に近い環境 (人間社会に近い環境) での調査においては、携帯電話等の情報システムの利用による参加型センサ群により効率よい観察が実現できると考えられる。人々が携

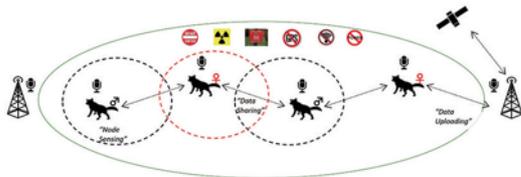


図1 どうぶつ間ネットワークのイメージ

帯デバイスを持ち歩きながら所要のセンシングデータを収集する「参加型センシング」が2005年頃から急速に注目されるようになり、ACM Sensys等センサネットワーク分野の国際会議でも研究事例が散見されてきた。特に、多数の人が携帯電話を用いて頻繁に行動する都市環境をセンシングする場合には、給電の制約なく固定のセンサを必要とせずに広域で安価にセンシングが可能である参加型センシングは有望な手法である。

しかしながら、野生動物の生息環境では極めて限られた電源・情報インフラ網しか利用できない。具体的には、利用者が極めて少ない地域、つまりこのような野生動物の生息環境（森林の地表付近）においては、インフラサービスの採算性（国土総面積の約6割は携帯電話圏外、注：人口カバー率ではない）が問題になる。実環境要因の問題（衛星電波不感地帯）も発生する。また、固定型センサ設置のためには生息地の所有者や国立公園の行政等ステークホルダーとの調整に多大な労力が必要であり、また屋外設置のセンサであり設置・運用コストも莫大になる。その一方で長く低迷する経済活動の中、我が国で新たな生態調査用の基盤を構築し、数十年間の運用を行う余地はほぼないのが現状である。つまり、電源・情報インフラが存在しない森林環境の空間情報センシングを最小限のコストで最大限の効率を実現するシステム（図1）が求められる。

そこで本研究では今現在も実際に生息する野生動物自身の行動・習性を利用したセンシング機構により、情報空間と生態系が分かちがたく一体化し、全体として高度な情報処理を実現するシステム（IoT情報機構）を目指した。本研

究では効率的に研究活動を推進するため野生動物の生息地に設置した関連研究（サイバーフォレストプロジェクト、被曝の森のライブ音プロジェクト）のためのシンクノード基盤を活用して実施した。

#### 〔研究の内容、成果〕

移動する人間や動物にセンサを装着し、行動や周辺環境をモニタリングする構想はセンサネットワーク研究の初期から見られる。しかし、動物対象の場合はデバイスの重量や取得する位置情報の精度が課題となる。そこで本研究の目的を達成するために以下の3点を研究内容として定め取り組んだ。

- A) どうぶつ間ネットワーク：身体特徴と相互作用に最適化した省電力な動物装着センサ網
- B) どうぶつタッチ & ゴー：NFCタグ装着の野生動物を誘き出してピッと記録回収する機構
- C) ジェット機音 de 位置情報：上空を通過するジェット機音を用いてGPSと同等の位置情報取得

#### A) どうぶつ間ネットワーク：

野生動物を対象とした場合、装着可能なデバイスの重さは体重2%に限られ、そして自動車や人間のように定期的に充電する機会はない。本研究では、複数個体間の行動生態学的に意味のある相互作用（挨拶・威嚇行動等）を検知した場合のみノード間通信をアクティブにし、それ以外の時は常にスリープ状態にすることにより、動物装着型センサの長期稼働・省電力化を目指した。具体的には、動物同士が遭遇した際の相互作用（挨拶・威嚇行動等）による行動の特徴量を3軸加速度センサで検知し、通信機器をスリープからWakeする引き金として使用する。こうして動物装着センサ間の省電力な間

欠通信を実現させる。これをきっかけとして動物装着センサ間でデータの共有を行い、繰り返すことで数珠つなぎにデータを回収する。最終的にインフラ圏外のすぐ外に設置したシンクノードからデータ回収を行う。



図2 加速度センサを装着した犬

### A1) 加速度センサによる相互作用の検出機構の構成

省電力な複数個体間の相互作用を検出する機構の実現を目指し、動物の行動に沿って加速度データを収集し、オフラインによる解析を行うこととした。実験は麻布大学伴侶動物研究室（菊水健史教授）の犬（図2）を対象として、獣医師の管理のもと、ハンドラーにより「歩く」・「止まる」・「ボールによって気をひかれる」状況を繰り返し行い、これをビデオカメラおよび犬の背部に取り付けた加速度センサで記録した。加速度センサのサンプリング周波数を50 Hzに設定し、SVM（Support Vector Machine）を用いて犬の行動認識を行う。特徴量として加速度データのタイムウィンドウごとの平均、分散、振動数を用いた。認識する行動のラベルは「止まる」・「歩く」・「興味を示す」の

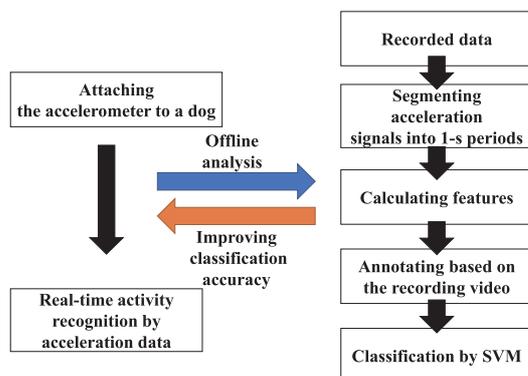


図3 解析フロー

3種類とし、ラベル付けは、ビデオカメラによる映像記録をもとに行った（図3）。その結果、「歩く」・「止まる」についてそれぞれ90%以上の精度で検出することができた。しかし「興味を示す」の検出精度が低かった。この解析では各タイムウィンドウが独立して扱われているため、続いて時系列を考慮した解析手法の検討を行った。そして個体の身体的特徴を考慮した解析を進めた。

### A2) 自律移動型ロボットによる通信プロトコルの検討

自然環境下では当然野生動物同士が、いつ、どの組み合わせで遭遇するかがわからないため、あらかじめ通信相手やスケジュールを設定できない。そこで、これらを考慮して効率的かつ省電力な通信プロトコルが必要となる。この検討のために自律移動型ロボットを用いたテストベッド実験（図4左）を導入した。動物による実験では短期間に同様の実験を繰り返すことが困難であるため、再現性と時間的コストパフォーマンスに優れたテストベッドが必要であったためである。導入コストを削減するため市販STEMロボットであるiRobot Create 2（図4右）を活用した。ロボット同士の衝突を動物の遭遇に見立て、通信プロトコル改善と稼働実験を行った。この結果、通信プロトコルの改善で通信成功率が70%から90%に向上した[2]。



図4 自律移動型ロボットによるテストベッドと、iRobot Create 2を利用した実験ロボット

### A3) 牛用デバイスの開発と実験

続いて、福島県浪江町の野生化牛での評価実験に向け、飼育牛による小型化した装着デバイス（図5）のテストと相互作用の検出実験を、連携研究室である麻布大学伴侶動物研究室の紹

介により同大学の牛舎で2020年1月から開始した。ベルト素材やデバイスカースの装着位置、カウンターウェイト等の調整を実際に牛に装着して評価した。そして実際にデバイスを牛に装着し、一定時間の行動データと加速度センサーデータを記録する実験を行った。他の動物や飼育者に対する反応とその加速度データを収集し、これを分析し特徴量の抽出を進めることとした。



図5 牛用デバイスと装着例

#### B) どうぶつタッチ & ゴー：

野生動物を対象とした場合、物理的に捕獲可能な頻度は2年に一度程度と限られ、そして自動車や人間のように定期的に回収する機会はない。本研究では、行動生態学的な刺激により動物をシンクノードまで誘き出せた場合にのみ非接触通信をアクティブにし、それ以外の時は常にスリープ状態にして動物装着センサの長期稼働・省電力化を目指した。



図6 どうぶつタッチ & ゴー機構の構成

#### BI) 誘き出してピッと記録回収するシステムの構成

本システムは NFC タグ装着の動物を誘き出して情報を取得するユビキタス基盤、物理的な形状を用いて動物を「誘き出す機構」と、誘き出された動物に装着している NFC タグと「非接触通信する機構」からなる (図6)。そして野生動物装着型センサノードをインターネット

接続されたシンクノードまでより効率的かつ安定的に誘き出し、長時間の非接触型通信により記録回収を実現する物理形状機構を明らかにする。評価方法としては、特徴ある物理形状により誘き出される動物の思考・行動過程の特徴量を取得する。



図7 どうぶつタッチ & ゴー用プロトデバイス

#### B2) 誘き出してピッと記録回収するシステムの評価

映像記録とのデータ比較によりタッチ & ゴーシステム反応の因果関係を解析し、最適な物理形状を明らかにする。本研究は行動生態学的な刺激により動物をシンクノードまで誘き寄せ、通信機器が通信可能範囲に入った時のみ通信機器を Wake させるものである。NFC タグを実装した動物装着デバイスと基地局側デバイスの両プロトデバイス (図7) を作成し、どうぶつ間ネットワークと同様に麻布大学伴侶動物研究室の犬と犬小屋を用いて通信評価実験を行い、実際に動作を確認することができた。また、より誘導性を高くする施策として音刺激の併用を検討した。物理形状の評価は内部形状を変化させた犬小屋と犬小屋内部を撮影するためのドライブレコーダーを使用して行う。内部形状の変更は、スチレンブロックを使用して犬小屋内の横幅や高さ方向のスペースを制限していく方法をとっている。観察時間は1日約8時間で2-3日間。2頭の犬がそれぞれ適当な時間にこの小屋内で休息を行っているため、ドライブレコーダーの映像を利用して、滞在時間や滞在時の姿勢等を評価している。また、本評価の実施にあたり、獣医である連携研究者による動物倫理的な確認を事前に行った。詳細な資料や事前説明により問題が無いことを確認した。麻布大学の連携研究者が飼育するペットの犬を対象と

し、犬小屋を参考とした物理形状（図6）を構築して、非接触通信に必要な行動制限や行動停止が起こりやすい状況（壁幅）を明らかにすることができた。

### B3) 誘き出してピットと記録回収するシステムの議論

動物の体サイズに依存する最適な壁の枚数と入場回数の関係を議論する。具体的にはストレッチブロックを使用して、幅方向の枚数を変更した際の犬の入場回数や姿勢評価を通じて、小屋への入場を阻害せず、かつある程度の姿勢制御が可能な条件を見つけることが出来た。壁枚数を5列まで増やしてしまうと入場回数に落ち込みが見られ始めるが、4列では他の条件同等の入りやすさと非接触通信が容易となる行動制限が可能となる。以上の知見から、本研究の目的である NFC タグ装着の動物を誘き出して情報を取得するユビキタス基盤のうち、物理的な形状を用いて動物を「誘き出す機構」の「必要となる幅条件」を明らかにすることができた。

### C) ジェット機音 de 位置情報：

野生動物を対象とした場合、GPS 信号の測位成功率が 20% に限られ、そして自動車や人間のように地上インフラを用いて測位する機会はない。本研究では、地表到達時のエネルギー量が高いジェット機音を野生動物装着マイクとシンクノードにより同期録音し、上空通過時の到達時差と三角測量により、動物装着型センサの位置を測位する機構を目指した。

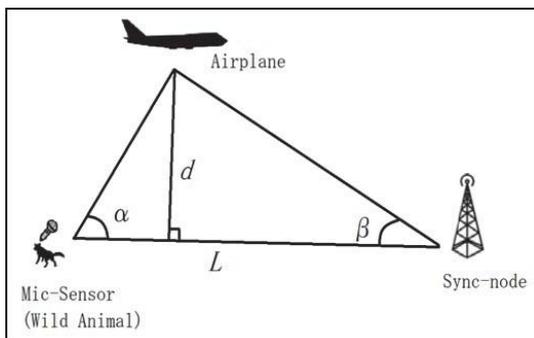


図8 環境音を用いて動物装着型センサでシンクノード上と同等の時刻・位置情報取得を行う補正手法

### C1) ジェット機音による位置情報取得機構の概要

本研究は、地表到達時のエネルギー量が高いジェット機音を野生動物装着マイクとシンクノードにより同期録音し、上空通過時の到達時差と三角測量により、動物装着型センサの位置情報の測位を図るものである（図8）。この手法については、実際に手動計算によって野生動物の位置を誤差 900 m 程度で位置同定を実現できることを確認している。これを最終的には自動で位置同定を行えるようにする必要がある。具体的には、位置同定を行う際に環境音に含まれる航空機音を用いているが、その判定は調査員が手動でラベル付することにより行っている。この位置同定を行うまでに必要となる周辺環境音と航空機音を自動で分類することが本計画となる。

### C2) ジェット機音による位置情報取得機構の評価

この課題に対しまず SVM および音声認識で MFCC を用いることにより環境音に含まれる航空機音の自動分類を試みる実験および評価を行った。具体的には機械学習と音声認識を用いた分類器の生成である。機械学習では教師あり学習のサポートベクトルマシンを分類器として用いた。また、音声認識には高速フーリエ変換により得られた特徴量として用いた手法を単純処理、および人の聴覚特性を反映させ環境音分類に有効とされるメル周波数ケプストラム係数を特徴量として用いた MFCC 処理を定義した。そして、双方の音声処理と分類器においては三種類のカーネル（Linear, Polynomial, RBF）を用いた分類を行った。また、分類の際に用いた音源は、関連研究で述べたサイバーフォレスト研究を実施中の次の3箇所の音源を実際に人間が聴き取り教師データを作成した。

舟田池 (35.59984486314238, 140.13742067272347), 栃本 (35.94093570647529, 138.8553265910508), 矢竹 (35.94468063930462, 138.816490309236)

### C3) ジェット機音による位置情報取得機構の議論

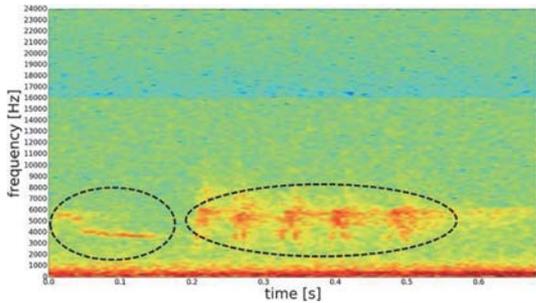


図9 環境音に含まれる航空機音のスペクトラム

しかし、航空機音の教師データを作成するにあたり、矢竹の音源は記録時間が少なく、かつ、航空機音自体の入力が少なく航空機の音が鳴り響いている間に、野鳥音がノイズとなる状況が数多く見受けられた(図9)。これより、我々は野鳥音を分離することにより精度を向上させられる可能性があるかと図り、航空機音における特徴的なスペクトラムが見受けられる帯域以外をカットするフィルタを設計した。また、サンプル数が少ないことから分類精度が高く出ているのではないかという懸念から、3箇所の音源を混合することにより分類器の精度を再評価して更なる分類精度の向上が判明した。カーネルごとの分類結果からは、フィルタを通さない手法では Linear と RBF、フィルタを通した手法では Linear と Polynomial カーネルの分類精度が高かった。なお、フィルタを通さない分類において Polynomial カーネルの分類精度は低いものであったが、フィルタを通した後は向上したことより、Polynomial カーネルは音源次第で分類結果に大きな変化が起こる可能性があると思われる。これらを踏まえると、この程度のサンプル数においては Linear カーネルを用いることが妥当であると考えられる。しかし、サンプル数が増えた場合において同じ結果が得られるのかどうかという問題があり、その場合においては Linear カーネルよりも非線形である RBF カーネルを用いたほうがより良い結果を得る可能性があることを明らかにした。

### [研究全体の議論]

A)B)C)で構築したシステム(図10)を用いて野生動物調査を継続した。具体的には、研究の背景で述べた石田が「高線量地帯周辺における野生動物の生態・被曝モニタリング(石田, 2012, 生物と科学.)」で提案している“鳴き声情報による遠隔生態調査方法”を再現する形で行った。実際に遠隔から行えるシステムを構築し国際会議[1]で成果(図11)を発表した。



図10 (左図) 福島県浪江町の本研究の実証フィールド拠点の場所と(右図) 構築したユビキタス基盤



図11 ACM SIGGRAPH Asia 2018 [1] での成果展示

### [今後の研究の方向, 課題]

A) どうぶつ間ネットワークと B) どうぶつタッチ & ゴーに関しては、屋内の飼育対象の知見を得ることができた。次の段階として、以前に構築した実証実験フィールドを用いて評価実験を行う。

C) ジェット機音 de 位置情報に関しては、実際のフィールドで取得したアーカイブデータ

を用いた実験を行った。次の段階として、これまでに構築した実証実験フィールドを用いて評価実験を行う。

野生動物の生態・健康情報を収集可能とする情報基盤技術には、安心・安全な社会をもたらすような価値がある。2004年1月27日にWHO・FAO・OIEの3機関はアジアでの鳥インフルエンザによって引き起こされる世界的な伝染病の可能性を警告する共同声明を発表した。現実には2019年末からは新型コロナウイルス感染症（COVID-19）が世界中に蔓延し混乱をもたらし、2022年現在完全な終息を見ることはない。こうした感染症の多くは電源・情報・道路インフラが存在しない自然環境で発生することが知られている。

本研究で扱う技術の本来の目的は動物の生態・健康情報を調べる機構であるが、これらを応用して環境情報の取得を行うことを目指していく。このシステムの有効性を福島県の帰還困難区域で実証できれば、感染症が発生しやすい電源・情報・道路インフラが存在しない発展途上国でも導入できることになる。これにより、リアルタイム通知やより精度の高い情報を提供し、感染症の発生・拡大を防ぐことにつなげていきたいと考える。

[成果の発表, 論文, 受賞など]

- [1] Hiroki Kobayashi, Hiromi Kudo, Yuta Sasaki. Radioactive Live Soundscape, ACM SIGGRAPH ASIA 2018 Art Gallery, SIGGRAPH ASIA '2018.
- [2] 川瀬純也, 小林博樹. 野生動物 WSN 開発のための移動型ロボットによる動物実験の代替. CSIS DAYS. A12. 2019.
- [3] Hill Hiroki Kobayashi and Daisuké Shimotoku. Tele Echo Tube for Historic House Tojo-Tei in Matsudo International Science Art Festival 2018. International Conference on Human-Computer Interaction. pp. 520-532, Springer, Cham, 2020.
- [4] Keijiro Nakagawa and Hill Hiroki Kobayashi, Optimal Arrangement of Wearable Devices Based on Lifespan of Animals as Device Transporter Materials for Long-term Monitoring of Wildlife Animal Sensor Network, Sensors and Materials, 32(1), pp. 13-25, 2020. (doi: 10.18494/SAM.2020.2560)
- [5] Keijiro Nakagawa, Daisuké Shimotoku, Junya Kawase and Hill Hiroki Kobayashi. Sustainable Wildlife DTN: Wearable Animal Resource Optimization through Intergenerational Multi-hop Network Simulation. 2021 17th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). pp. 193-199, IEEE, 2021. (10.1109/WiMob52687.2021.9606287)
- [6] 小林博樹. 野生動物自身の行動や習性を逆利用した動物装着型センサネットワークの研究. 電子情報通信学会技術研究報告. 信学技報. 2021年7月.
- [7] 小林博樹, 工藤宏美. 科学技術分野の文部科学大臣表彰. 2020年4月.
- [8] 小林博樹. ドコモ・モバイル・サイエンス賞 (社会科学部門 優秀賞) 2021年9月.