

フィールド調査負荷を考慮した動物の生態行動を逆利用したデータ運搬手法の提案 Opportunistic Data Exchange by Animals' Natural Behavior for Investigation of Inaccessible Areas

中川 慶次郎^{†1} 小林 博樹^{‡1} 奥野 淳也^{‡1} 岩井 将行^{†2} 瀬崎 薫^{†1,‡1}
Keijiro Nakagawa Hiroki Kobayashi Junya Okuno Masayuki Iwai Kaoru Sezaki

1. 研究の背景と目的

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故が発生した。現在も復旧活動が行われている一方、周辺地域の農作物や動物への放射能の長期的な影響が懸念されている[1]。特に、福島第一原子力発電所から周辺 30 キロ圏内の森林地域では、放射能汚染による生態系の影響が懸念されており長期的な調査が必要とされている。森林地域における野生動物の調査手法として、観測者が森林地域を巡回し動物の糞等を採取して生態系の影響を推定する手法が一般的に行われている。近年では情報通信技術の発展に伴い、センサや情報通信機器により音声・映像・行動軌跡・気象などの環境情報を取得し、森林地域の生態系調査に役立たせている。具体的には、ねぐらや獣道付近にビデオやマイクを設置し動物観察を行う手法や、動物に GPS ロガーを装着させて無線機器などによって環境情報を取得する手法が用いられている。しかし、上記に挙げた調査手法は人手に頼る部分が大きく、対象の森林地域が広範囲に及ぶため多くの観測者が必要となる場合や、熊などの危険・有害動物と接触する危険性が存在し、観測者のフィールド調査における負荷が大きい。加えて、放射能汚染地域では観測者の立入りが困難であり、従来の野生動物の調査手法では効果的な観測は難しい。人手に頼らない方法で生態系の調査を効率的かつ長期的に行う手法が求められている。

このような森林地域における自然環境、動物の生態の長期的な調査を行うため、東京大学の小林氏らは FABEE (Fukushima Acoustic and Behavioural Ecology Exchange) Project を発足した[2]。「動物指向クラウドネットワーク」と呼ばれる、動物に取り付けた首輪と動物基地 (ねぐら・獣道) に生態音収集マイクとリモートセンサを設置し、動物の個体間接触と集団行動の習性を利用する「動物間ネットワーク」により森全域の生態・環境情報の取得を試みている。従来の調査手法と異なり、動物の生態行動を逆利用することで効果的なフィールド調査が可能となる。森林地域で観測者が行っていたセンシングやデータ運搬の役割を動物に移管させることで、長期的な生態系調査の負荷を軽減する事ができる。

本稿では、動物指向クラウド機構の実現のために、動物の個体間遭遇時のデータ運搬に着目する。従来の手法と技術的な課題を整理し、動物行動を逆利用した効率的かつ長期的な調査が可能なデータ運搬手法の提案を行う。具体的には、動物同士が接近した際に生じる生態行動を動物間通信の引き金とすることで、生態行動を利用したデータ運搬を実現する。これにより、フィールド調査負荷の低減を実現させる。



図1:フィールド調査の様子

2. 関連研究

これまで、動物を用いた環境モニタリング手法は数多く研究されている。例えば、DTN (Delay Tolerant Network) を利用した野生鹿の調査手法[3]では、国立公園の広大な地域で効率良く野生鹿の状態を把握するために、野生鹿に無線センサを装着させ、定期的に通信機器を搭載した自動車やヘリコプターが周辺地域を巡回することでデータ取得を行う手法である (図 2)。各無線センサと通信機器は時間同期によりデータ取得を行っている。この手法は、従来のフィールド調査と比べて観測者の人数は削減されるが、自動車やヘリコプター利用による経済費用の増加、観測者の立入りが困難な森林地域を想定した場合での調査では課題が存在する。

一方、[2]では動物自身でセンシングを行い、動物をキャリアとしてデータを運搬・リレーする事で広域の森林環境でも効率的にデータを取得する手法が提案されている (図 1)。この手法の目的は森林地域の立入り作業を最小限に抑えて長期のモニタリングを行う事であり、そのためにセンサネットワークや DTN のような遅延耐性ネットワーク技術を応用した動物指向クラウドネットワークの構築を目指している。しかし、動物をキャリアとしたデータ運搬のための個体間のデータ同期手法は時間同期が提案されているが、リアルタイムクロック LSI 等を用いた場合でも野生動物が行動する森林内地上数十センチといった特殊な環境は標準電波の利用環境としては想定されておらず、LSI 単独で時間同期を行う事は難しい。

[2]のような動物の生態系を利用したフィールド調査手法を構築する場合、従来の同期手法のような技術的な改善では森林環境や動物の装着を考慮されていないため最適化することは難しく、技術的観点とは異なる動物の生態行動を考慮した新たな手法が求められる。

本稿ではまず、第 3 章で 3 軸加速度センサを利用した個体間通信の検出手法とそのアルゴリズム設計を述べる。第 4 章では、第 3 章で述べた提案手法の評価実験と実験結果を述べて有効性を論じ、第 5 章で本手法における可能性の議論を行う。

^{†1} 東京大学生産技術研究所

^{‡1} 東京大学空間情報科学研究センター

^{†2} 東京電機大学未来科学部情報メディア学科

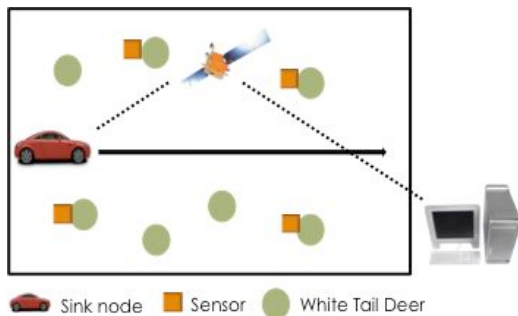


図2: DTNを利用した野生鹿の調査手法

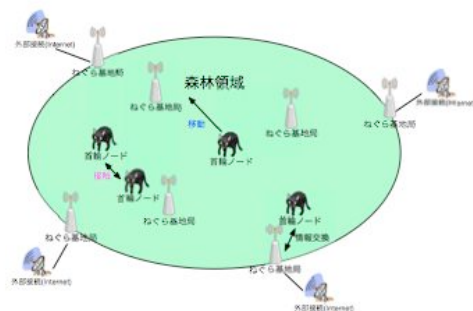


図3: 首輪+ねぐらネットワーク[2]

第6章で本結果に基づく有効性から動物指向クラウド機構の実現可能性を示唆し、フィールド調査の低減と今後取り組む課題を述べる。

3. 提案手法

3.1 3軸加速度センサを利用した個体間通信

動物指向クラウド機構では、動物の個体間でのデータ運搬手法が課題であることを述べた。そこで、本稿では3軸加速度センサを利用した個体間通信の手法の提案と検討を行う。

個体間の遭遇時における特徴量を3軸加速度センサで合成加速度として取得し、閾値により通信開始を判定する事で効率的なデータ運搬を実現させる。そのために、他の個体との遭遇時や獲物の発見時に、次の行動の判断を行うための一定の静止時間を利用する。例えば、図4は犬の散歩時における他個体と遭遇時の3軸加速度センサのデータであり、認識のための一定の静止時間が存在する事が分かる。その後、しばらく歩行した後に相手の散歩中の犬に対して吠えていることがデータより判断出来る。このように、取得した3軸加速度センサのデータにより特徴量を算出し、静止や歩行等の動物における単純な行動を把握する事が可能である。これらから、我々は通信開始判定のため図5で示す「行動認識トリガー」を定めた。この行動認識トリガーでは、森林地域で特定の個体が他の個体と遭遇した際、その個体が引き起こす認識、判断、行動の一連動作の分類を行った。以下の手順で動作の特徴量を抽出する。

1. 静止判定
2. 静止時間の判定
3. 興味に基づく動作判定

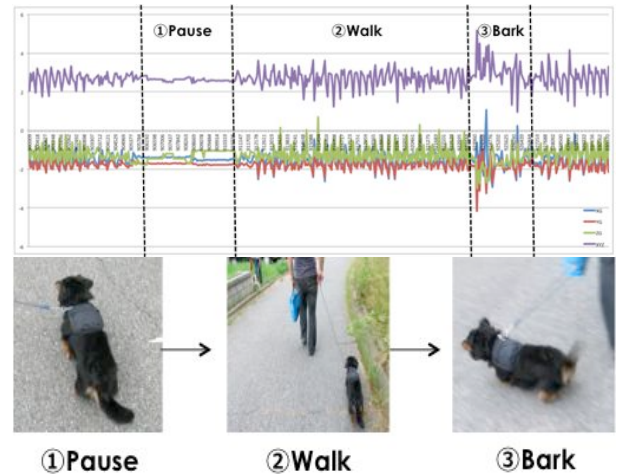


図4:

(上) 散歩時に他の個体と遭遇した際の3軸加速度データ
(下) 遭遇時における行動の変化

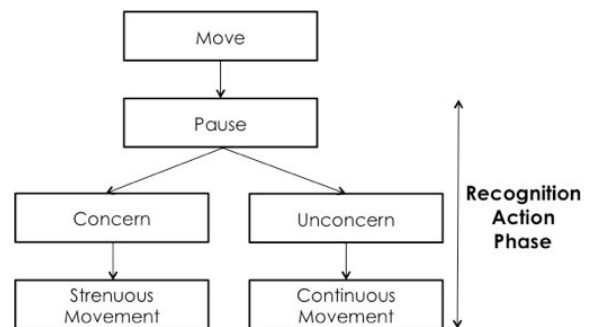


図5: 行動認識トリガー

相手により行動の違いが想定されることから興味や関心に基づく認識行動の場合分けを行った。対象個体に対する興味や関心の差により静止後（認識後）の行動の違いを識別する事で、森林地域で同種による個体間通信を行う場合の信頼性向上を目的としている。

3.2 行動認識トリガーのアルゴリズム設計

合成加速度の特徴量を用いて、行動認識トリガーを実現するための生態行動に基づくアルゴリズムを開発した（図8）。まず、20Hzの頻度で3軸加速度センサから値を取得し、3軸加速度センサから得られたx, y, z軸の値を a_x, a_y, a_z から加速度のL2ノルム $\|A\|$ を算出して定める[4]。

$$\|A\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.1)$$

L2ノルム $\|A\|$ を、静止判定の閾値 $\|A\|_0$ 、動作判定の閾値 $\|A\|_1$ として定める。図4で述べたように、何らかの外的要因と遭遇した場合、次の行動に移る前に判断するための静止時間（認識時間）が存在する。まず、取得されたL2ノルム $\|A\|$ と閾値 $\|A\|_0$ を比較し、現在の動作の静止（認識）判定を行う。この判定を20Hz毎に行い、静止と判定された場合は初めに静止と判断されてからの経過時間 Δt を算出する。静止時間の閾値の下限 t_0 、上限 t_1 を下記のように定め、動作判定のために Δt と比較を行う。

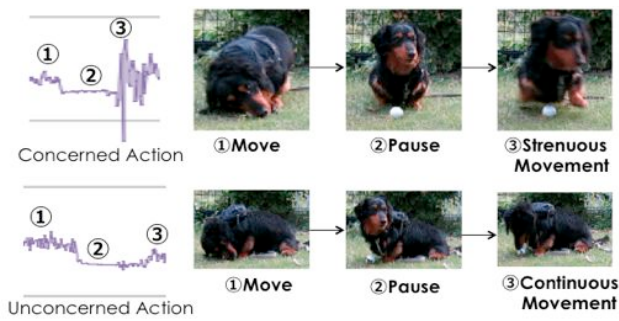


図 6: 興味に基づく特徴量の違い

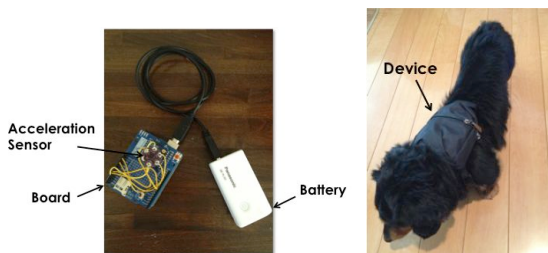


図 7:

(左) 使用した実験装置
(右) 実験装置を装着している犬

$$t_0 < \Delta t < t_1 \quad (1.2)$$

Δt の静止時間判定で (1. 2) の条件が満たされる場合、 Δt 後の $L2$ ノルム $\|A\|_a$ と動作判定の閾値 $\|A\|_1$ と比較を行う。動作判定にて行動開始が判定された場合、通信機器の電源を入れて他の個体に対して通信を開始する。また、通信時間は送信するデータ量に依存する。

他の個体との遭遇時、個体の習性、生息環境や対象個体に対する興味や関心に応じて合成加速度の特徴量である $L2$ ノルム $\|A\|$ に違いが生じるため、それらに応じて各閾値に対して最適な値を設定する必要がある。

4. 評価実験と考察

4.1 評価実験

提案手法の有効性を検証するために、小型哺乳類であるミニチュアダックスフンド (オス, 体重 5.4kg, 生後 85 ヶ月) に対してリュックに入れた機器を装着して評価実験を行った。

使用機器として、Arduino UNO と Lily Pad 用の 3 軸加速度センサを利用した。Arduino は拡張性が高く、多種多様なセンサの装着や通信規格である Xbee の ZigBee との連携が容易であるため本実験で用いた (図 8)。また、動物倫理上の観点から、動物にデバイスを装着する場合にデバイス重量は 4-5% に抑える必要がある [5]。今回対象とした犬の体重は 5.4kg であり、デバイス総重量は 250g なので規定内に収まっている。森林地域では、害獣として定められているアライグマ等の小型～中型哺乳類への装着を考慮しており、アライグマは体重 4-10kg と言われていることから、今後のデバイスの小型化を含めれば十分に装着可能と言える。

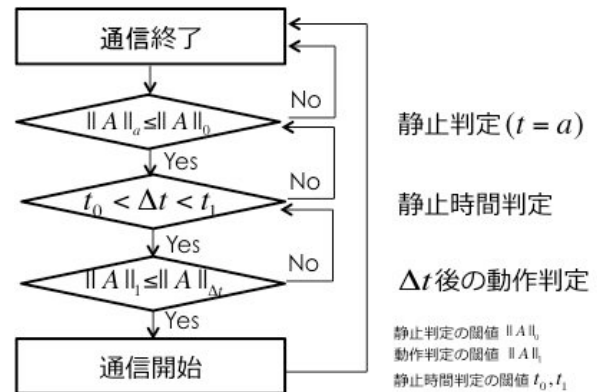


図 8: 提案手法のフローチャート



図 9:

(左) 実験環境の構成
(右) 芝生に覆われた実験環境

森林地域での野生動物に近い状態を再現するため、3m × 3m の芝生で犬が自由に動ける状態で実験を行った。行動認識トリガーの有効性を検証する方法として、個体間の遭遇時を再現するためにボールを他の個体と見立てて検証を行った。まず、自由に動き回っている犬に対してボールを突然持ち上げて認知させ、その後ボールを犬の近くに投げる実験を行った。対象の個体がボールや犬であった場合でも、認知、判断、行動するための静止時間は同様に起きることから、行動認識トリガーの有効性のある検証方法として用いている。また、再現性を検証するために、[9]を参考にこの実験を 30 秒毎に 1 回、1 セット 3 分 × 5 回行った (合計 30 回)。[6]では回転籠のラットの活動量を 26 日間に渡って計測し、日毎に比較して論じていることから、本実験の目的であるボールを投げた際の反応を検出する評価として、30 回ボールを投げて比較する手法は妥当と言える。実験中はデジタルカメラ (Canon Power Shot SX200 IS) を三脚で固定し、ビデオ撮影により犬の認識行動と 3 軸加速度センサの特徴量の正確な把握を試みた。各データは SanDisk 製 Micro SD Card に保存した。

本実験では、提案手法である行動認識トリガーの有効性を検証するため、実験データから最適な静止判定のための合成加速度の閾値、静止時間の閾値、静止後の動作判定の閾値を決定し、本手法の検出率を算出した。

4.2 実験結果と考察

表 1 の Detection Rate は、ボールの投げた回数の中、行動認

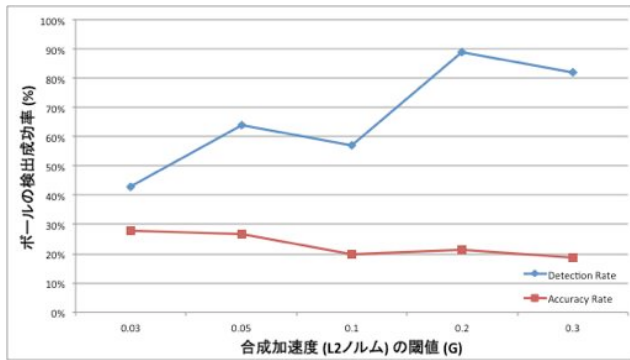


表 1:

(Detection Rate)

ボールの投げた回数内、ボールを検出した回数の割合
(Accuracy Rate)

全体の検出回数内、ボールを検出した回数の割合

認識トリガーによって検出に成功した割合を示している。静止時間の閾値を $1s < t < 10s$ として定めた。縦軸はボールの検出成功率、横軸は静止判定の合成加速度の閾値を表している。ここでは静止後の動作判定も同じ閾値を利用している。静止判定の閾値によって検出成功率に差がみられ、閾値が 0.2 のときボールの検出成功率は約 89%であった。閾値が高いほど検出成功率は上昇するが、閾値が高すぎる場合は静止時間が長くなり静止時間が 10s を越え検出に失敗する場合がみられた。

他方、表 1 の Accuracy Rate は全体の検出回数内、ボールを検出した回数の割合を示している。閾値が高い程、検出回数が増加するため検出成功率の正確性が低下しており、閾値 0.03 と 0.3 では約 10%の低下がみられた。

本結果から、他の個体と遭遇した場合の検出成功確率が約 9 割を示したことから、個体間通信の実現のために 3.1 で述べた動物の生態行動を逆利用した新たな手法として有効性があると言える。この手法の有効性を示した事により、動物指向クラウド機構の課題であるデータ同期手法に対して、各個体が遭遇した際にデータ同期を行うタイミングを検出することを可能にした。

5. 議論

これまで、無線センサネットワークや DTN のような遅延耐性ネットワークの研究分野では、電池容量の制限がある中でデバイスの小型化やポータブル性が求められてきたため、電力消費が大きいノード間通信を効率的に行うことにより省電力化を実現する手法の研究が多くなされてきた。例えば、従来は MAC 層で Sleep や Wake のタイミング制御する手法 (Preamble の改善手法[7]等) の技術的な手法の検討が行われてきた。しかし、これまでの研究は同じ動物対象であってもホモ・サピエンス (ヒト) に着目していたため、生態行動を利用した通信制御の検討は行われていなかった。Internet of Things のような動物を含めた全ての物が繋がる世界で、技術的な側面だけでなく自然原理をも利用した制御が必要とされる。例えば、環境問題の解決支援として、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が可能となる。

本実験では、屋外で犬が自由に移動出来る (限られた範囲で) 方法で評価実験を行っている。従来の研究では、動物の

行動解析を行うために屋内の特殊環境で実験を行う場合が多かった。しかし、提案手法は動物の生態行動を逆利用することを目的としており、動物の生態行動をありのままに取得するため、屋外かつ周辺が森林近くである場を選ぶことで、より自然環境に近い環境を再現した。実際、実験中に昆虫を発見して追いかける行動や、鳥の鳴き声に反応して耳を澄ませる行動を見かける場面も存在した。動物の生態行動を手法として利用する場合、自然環境で行われている普段の生態行動を把握する必要がある。そのため、動物の生態行動を正確に評価するために実験環境を考慮する事は重要であると言えるだろう。

6. 今後の展望

本稿では、3 軸加速度センサで取得した動物の生態行動の特徴量による個体間通信の手法を提案した。人の立ち入りが困難な森林地域で、フィールド調査負荷を低減した手法である動物指向クラウド機構に対し、課題であった個体間のデータ運搬の解決手法を示した。これらの有効性を示した事により、森林環境のフィールド調査に対してより安全で効率的な調査手法を実現する可能性を示した。今後、今回の実験結果から複数の個体に機器を取り付け提案手法によるデータ運搬の実験を行い、森林環境下での実証実験に繋がっていきたいと考えている。

謝辞

本論文の寄稿にあたり、指導教官である瀬崎薫教授、小林博樹特任助教授に多くの支援を頂いた。また、東京大学瀬崎研究室の学生、東京大学の空間情報科学研究センターの木實准教授とは、何度も議論を重ね、論文執筆にあたり有益な助言と協力をして頂いた。実験にあたり、松岡夫妻と飼い犬 ミニーちゃん (コーリー、メス) に快くご協力いただいた。最後に、実験を承諾してくれた家族と飼い犬であるラブ (ミニチュアダックスフンド、オス) に感謝いたします。

参考文献

- [1] Hiroki Kobayashi and Hiromi Kudo, "Carrier Pigeon-like Sensing System: Beyond Human-Red Forest Interactions", In Proceeding of Balance-Unbalance International Conference 2013, Queensland, Australia, May 31-June 2, 2013.
- [2] 安田 真悟, 小林 博樹, 崔 舜星, 篠田 陽一, "動物指向クラウドネットワークの設計と課題", 第 13 回インターネットテクノロジーワークショップ, 2012.
- [3] Tovar, A., Friesen, T., Ferens, K., Mcleod, B., "A DTN WIRELESS SENSOR NETWORK FOR WILDLIFE HABITAT MONITORING", Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010.
- [4] Kazuto Shimizu, Masayuki Iwai, Kaoru Sezaki, "Social Link Analysis using Wireless Beacons and Accelerometer", The 6th. International Workshop on Data Management for Wireless and Pervasive Communications (DMWPC), 2013.
- [5] 米澤 香子, 味八木 崇, 暦本 純一, "Cat@Log: Human Pet Interaction のための猫ウェアラブルセンシング", 第 17 回インタラクティブシステムとワークショップ (WISS2009), pp.47-52, 2009.
- [6] 中村 敬太, "回転電法による動物行動の観測", 日薬理誌, Vol.74, pp. 671-686 (1978)
- [7] Bachir, A., Barthel, B., Heusse, M., Duda, A., "Micro-Frame Preamble MAC for Multihop Wireless Sensor Networks", Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference, Vol. 7, pp.3365-3370, 2006.