

博 士 論 文

長期的な野生動物調査を支援する 動物間マルチホップ通信システムの研究

(A Study on Animal-to-Animal Multi-hop Communication
System for Long-Term Wildlife Monitoring)

中川 慶次郎

目次

第1章 序論

- 1.1 研究の背景
 - 1.1.1 遠隔地の環境調査の必要性
 - 1.1.2 福島第一原子力発電所事故
 - 1.1.3 都市環境と比較した調査条件の違い
- 1.2 先行研究
 - 1.2.1 従来の野生動物調査時に調査員が抱える課題
 - 1.2.2 情報通信技術の活用：固定型デバイス
 - 1.2.3 情報通信技術の活用：装着型デバイス
 - 1.2.4 DELAY-TOLERANT NETWORKING 技術の活用
 - 1.2.5 動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査
- 1.3 研究の目的と方法の概要
- 1.4 本研究の構成

第2章 動物間マルチホップ通信システムの提案

- 2.1 動物間マルチホップ通信システムの要件
- 2.2 動物間マルチホップ通信システムの仕様

第3章 省電力化：動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大の研究

- 3.1 はじめに
- 3.2 通信機器 WAKE 制御アルゴリズムの提案
 - 3.2.1 提案手法
 - 3.2.1.1 3 軸加速度センサーによる行動分析
 - 3.2.1.2 WAKE 制御の引き金
 - 3.2.1.3 WAKE 制御アルゴリズム
 - 3.2.2 実験概要
 - 3.2.2.1 装着個体の選定
 - 3.2.2.2 デバイス装着位置の検討
 - 3.2.2.3 実験用デバイスの検討

- 3.2.2.4 通信機器 WAKE 制御アルゴリズムの実験概要
- 3.2.3 結果と考察
 - 3.2.3.1 フィールド評価実験に関する考察
 - 3.2.3.2 通信機器 WAKE 制御アルゴリズムの結果
 - 3.2.3.3 通信機器 WAKE 制御アルゴリズムの考察
- 3.3 威嚇行動時の通信機器 WAKE 制御アルゴリズムの提案
 - 3.3.1 提案手法
 - 3.3.1.1 空間・時間変化に応じた動的なアルゴリズムの必要性
 - 3.2.1.2 威嚇行動時の WAKE 制御アルゴリズム
 - 3.3.2 実験概要
 - 3.3.2.1 装着個体の選定
 - 3.3.2.2 デバイス装着位置の検討
 - 3.3.2.3 実験用デバイスの検討
 - 3.3.2.4 威嚇行動時の WAKE 制御アルゴリズムの実験概要
 - 3.3.3 結果と考察
 - 3.3.3.1 フィールド評価実験に関する考察
 - 3.3.3.2 威嚇行動時の WAKE 制御アルゴリズムの結果
 - 3.3.3.3 威嚇行動時の WAKE 制御アルゴリズムの考察
- 3.4 遭遇履歴を用いたデータ転送の提案
 - 3.4.1 提案手法
 - 3.4.1.1 同期・非同期スケジューリング手法の概要
 - 3.4.1.2 非同期スケジューリング手法によるデータ送受信
 - 3.4.1.3 中継ノードの重み付け
 - 3.4.1.4 隠れノード問題
 - 3.4.2 実験概要
 - 3.4.2.1 装着個体の選定
 - 3.4.2.2 デバイス装着位置の検討
 - 3.4.2.3 実験用デバイスの検討
 - 3.4.2.4 遭遇履歴を用いたデータ転送の実験概要
 - 3.4.2.4.1 CSMA/CS プロトコル
 - 3.4.2.4.2 CS/P プロトコル
 - 3.4.2.4.3 CS プロトコル（中継ノードの重み付けプロトコル）
 - 3.4.2.4.4 データ転送の評価方法

- 3.4.3 結果と考察
 - 3.4.3.1 フィールド評価実験に関する考察
 - 3.4.3.2 遭遇履歴を用いたデータ転送の結果
 - 3.4.3.3 遭遇履歴を用いたデータ転送の考察
 - 3.4.3.4 フィールド評価実験の結果に基づく定式化
- 3.5 総括

第4章 省力化：法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減の研究

- 4.1 はじめに
- 4.2 SPIN-UP TIME を考慮しないデバイス放獣シナリオの提案
 - 4.2.1 提案手法
 - 4.2.1.1 装着個体の寿命を考慮したアプローチ
 - 4.2.1.2 SPIN-UP TIME を考慮しないデバイス放獣シナリオ
 - 4.2.2 実験概要
 - 4.2.2.1 シミュレーション環境
 - 4.2.2.2 SPIN-UP TIME を考慮しないデバイス放獣シナリオの実験概要
 - 4.2.3 結果と考察
 - 4.2.3.1 SPIN-UP TIME を考慮しないデバイス放獣シナリオの結果
 - 4.2.3.2 SPIN-UP TIME を考慮しないデバイス放獣シナリオの考察
- 4.3 SPIN-UP TIME を考慮したデバイス放獣シナリオの提案
 - 4.3.1 提案手法
 - 4.3.1.1 シミュレーション検証における初期ノイズの考慮
 - 4.3.1.2 SPIN-UP TIME を考慮したデバイス放獣シナリオ
 - 4.3.2 実験概要
 - 4.3.2.1 シミュレーション環境
 - 4.3.2.2 SPIN-UP TIME を考慮したデバイス放獣シナリオの実験概要
 - 4.3.3 結果と考察
 - 4.3.3.1 SPIN-UP TIME を考慮したデバイス放獣シナリオの結果
 - 4.3.3.2 SPIN-UP TIME を考慮したデバイス放獣シナリオの考察
- 4.4 総括

第5章 省資源化：縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイ

- 5.1 はじめに
- 5.2 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化の提案
 - 5.2.1 長期運用時のトレードオフ問題（システム稼働と生態系の影響）
 - 5.2.2 野生動物の群行動
 - 5.2.3 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化
 - 5.2.4 センシングデータの回収効率
- 5.3 実験概要
 - 5.3.1 シミュレーション環境設定
 - 5.3.2 エージェント設定
 - 5.3.3 省資源化の評価方法
- 5.4 結果と考察
 - 5.4.1 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化の結果
 - 5.4.2 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化の考察
- 5.5 総括

第6章 議論

- 6.1 シミュレーション結果に基づく今後のフィールド検証
- 6.2 省電力化のフィールド評価実験の取り組みと課題
- 6.3 動物間マルチホップ通信システムの可用性
- 6.4 従来の野生動物調査時の調査員が抱える課題に対する貢献
 - 6.4.1 省電力化の貢献
 - 6.4.2 省力化の貢献
 - 6.4.3 省資源化の貢献
- 6.5 数百年以上の時間軸で見た自然環境の影響と課題

第7章 結論

- 7.1 まとめ
- 7.2 今後の課題

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

本節では本研究の背景について詳細を述べる。

1.1.1 遠隔地の環境調査の必要性

広大な国立公園や森林、山岳地帯、海中などの遠隔地(人の立ち入りが困難な地域)における野生動物調査が求められている。例えば、南アフリカでは、絶滅寸前種(Critically Endangered Species; CR)[1]であるクロサイ(*Diceros bicornis*)の角を密猟するため、アフリカの野生動物の密猟者により 2016 年を通して 8 時間毎にクロサイが殺されている[2]。また、絶滅危惧種(Endangered Species; EN)であるアフリカゾウについては、毎日 20 分ごとに殺されている[2] (Fig.1.1.1)。絶滅危惧種の保護活動の強化によりクロサイの密猟件数は下降しているが、密猟の防止をより強化する必要がある。なぜならば、既存のクロサイの個体数では繁殖可能な個体数として十分ではないため、密猟により更に現在の個体数が減少した場合には再び種としての全体数が減少に転じる可能性がある。密猟者がサイやアフリカゾウの群れを発見し密猟することを予め防止するために、アフリカゾウの生息地域や個体数などの最新の情報を把握するための野生調査が求められている。

その他の事例[3]では、アマゾン川を象徴する希少な動物であるアマゾンマナティ(*Trichechus inunguis*)においては、食肉用や皮を使用した工業製品の材料として密猟者に密猟されたため、その個体数が減少しており IUCN に「絶滅危惧種(EN)」と指定されブラジルでは保護の対象になっている。しかしながら、その生態自体が十分に解明されておらず、保護活動や保護した個体の野生復帰に知見を活かすため、まずはアマゾンマナティ自体の生態調査が求められている。

また、日本の事例[4]–[6]では、絶滅寸前種(CR)に指定されている沖縄県西表島に生息する小型のネコ科動物であるイリオモテヤマネコ(*Prionailurus bengalensis iriomotensis*)の野生動物調査について述べている(Fig.1.1.2)。イリオモテヤマネコは絶滅寸前種である一方で、飼育下や野生下を含めて繁殖などの生態行動についてはほとんど知られていない。既存研究[5]では、オスの尿マーキングの頻度、繁殖状況、野外での子持ちメスの行動などを観察し、繁殖に関連する過去の報告を参考にして、繁殖サイクルの調査を試みている。また既存研究

[6]や環境省による平成 17 年～19 年度第 4 次総合調査[7]では、イリオモテヤマネコの個体数は 100 個体程度だと推測されている。イリオモテヤマネコの保護・保全活動が行われている一方、観光客の運転する自動車による交通事故などによりその個体数は減少していると考えられる。しかしながら、西表島の森林地域にはその他の固有種が多数存在しており、調査員の立ち入りによる生態系の影響が懸念されることから多数の調査員による立ち入りは難しい。また、イリオモテヤマネコ自体の生態についても十分に解明されていない。イリオモテヤマネコの正確な生息域や個体数が必要とされている一方で、上記の理由によりこれらも十分に把握されていない。

一方、遠隔地における有害鳥獣類においても野生動物調査が必要とされている。例えば、アライグマ(*Procyon lotor*)は日本において外来種として扱われているが、その個体数を増やしながら年々生息域を拡げていることが分かっており固有種の影響が懸念されている。固有種が多数存在し、人の立ち入りが多くない遠隔の森林地域において、外来種であるアライグマの駆除対策に乗り出すためにアライグマの生息域や個体数把握の調査が求められている。その他の事例として、人口減少により日本の農村地域において放棄地、空き家の増加、農林漁業の担い手の不足などの様々な要因により、害獣被害が増加している問題があげられる。具体的には、これまで人の居住する農村地域とその周辺地域に生息するイノシシ(*Sus scrofa*)やサル(*Macaca fuscata*)などの生息域は分かれてきたが、上記の理由によりそのバランスは崩れ、有害鳥獣類の生息域は農村地域まで拡がりつつあり農作物等に対する害獣被害は増えつつある。人口が減少した農村地域における害獣被害を抑えるため、有害鳥獣類の生態調査は必要とされている。

以上で述べてきた通り、広大な国立公園や森林、山岳地帯、海中などの遠隔地(人の立ち入りが困難な地域)においては、保全種、有害鳥獣類に関わらず、生息域や個体数などの野生動物調査が必要とされている。



(a) White Rhinoceros



(b) African Elephants

Fig. 1.1.1 自然の生息域におけるシロサイやアフリカゾウ[2]



Fig. 1.1.2 イリオモテヤマネコ[7]

1.1.2 福島第一原子力発電所事故の影響

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。事故発生当時から時間が経過し、被災地の復興は進み、鉄道や道路などのインフラや市街地については被災前の日常に戻りつつある。また、福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故により、事故発生当時において福島第一原子力発電所周辺 30 キロ圏内は帰還困難区域(指定時の 2012 年 3 月時点で年間積算放射線量が 50mSv を超えており、5 年後の時点で年間積算線量が 20mSv を下回らない地域)に指定されていたが、時間経過により放射線量が減少したことで帰還困難区域の指定が解除された地域も増加しつつある。

しかし、事故発生から 10 年間が経過した現在でも福島第一原子力発電所周辺地域は未だに線量が高く帰宅困難区域に指定されている[8] (Fig.1.1.3). その帰還困難区域の範囲は福島第一原子力発電所から陸側に向かって数十キロ程度の広範囲に及んでおり、今後も数十年以上にわたる帰宅困難制限などの長期的な影響が見込まれている。住民は放射線量が基準値を超える帰宅困難区域から避難している一方、これらの帰還困難区域は森林地域も含まれており、事故発生前から該当区域に生息する野生動物や植物は長期間高い放射線量にさらされている。帰還困難区域内における野生動物や植物の長期的な放射線の影響が懸念されており、それらの研究調査が求められている。

例えば、福島第一原子力発電所周辺の森林地域において、農林水産省の森林内の放射性物質分布状況及び分析結果[9]によれば、発電所周辺の 3 カ所で森林地域における放射能汚染調査を行った結果、発電所周辺の大半を占める森林地域に大量の放射性物質が降下し、広範囲にわたる汚染の可能性が指摘されている。また、Stanislav ら[10]は 2014 年から 2018 年までの期間で、帰還困難区域の 4 つのアカマツ(*Pinus densiflora*)の幼木の調査区と福島大学内に対照区を設置し、外部被ばくとアカマツに取り込まれた放射性セシウムによる内部被ばくを考慮してアカマツの被ばく量と形態を評価している(Fig.1.1.4). その結果、被ばく線量が高いほど形態異常の発生率が高いことが明らかになっている。また、山城らの研究[11]によれば、帰還困難区域外に生息する長期間低線量率の放射線量(LDR)にさらされたアライグマを捕獲し、精巣の形態学的特徴と凍結保存された精子の体外受精機能を分析している。結果、福島第一原子力発電所事故に伴う長期間の LDR 放射線量被ばくは、オスのアライグマの生殖特性や機能に悪影響を及ぼさないことが明らかになっている。

一方、街から住民たちが避難したことで野生動物管理の低下により、様々な野生動物がこれらの街まで行動域を拡大し、個体数を増加しつつあるという研究結果も報告されている[12]。これまで述べたとおり野生動物の被ばくの影響は先行研究から明らかになりつつあるが、行動域や個体数を増加させつつある野生個体もあり、引き続きより詳細な長期的な野生動物調査が必要であると言える。また、チェルノブイリ原子力発電所事故から 20 年経過した野生動物の影響に関する調査結果[13]からも、チェルノブイリ原子力発電所の周辺地域の野生動物に対する放射線の悪影響の痕跡はほとんど見られず、人々が避難したことにより人間による影響が取り除かれたことで野生の動植物が繁栄しているという研究結果が得られている。

これらの先行研究から明らかであるように、福島第一原子力発電所周辺の森林地域は野生動物や植物の長期的な放射線の影響を調査するための実験圃場として解釈することもでき、数十年に及ぶ継続的な野生動物や植物の調査が求められる。

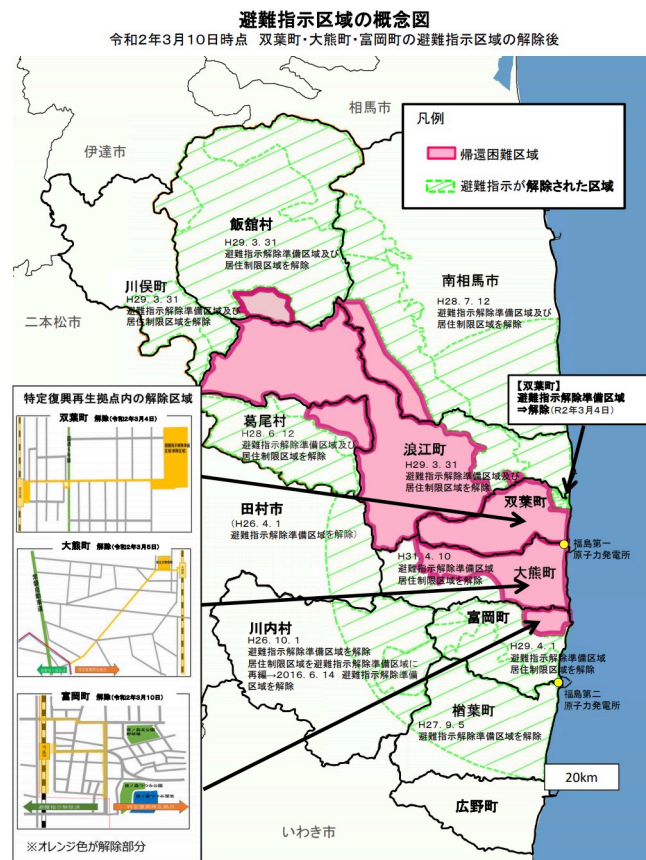


Fig. 1.1.3 避難指示区域の概念図(令和2年3月10日時点) [8]

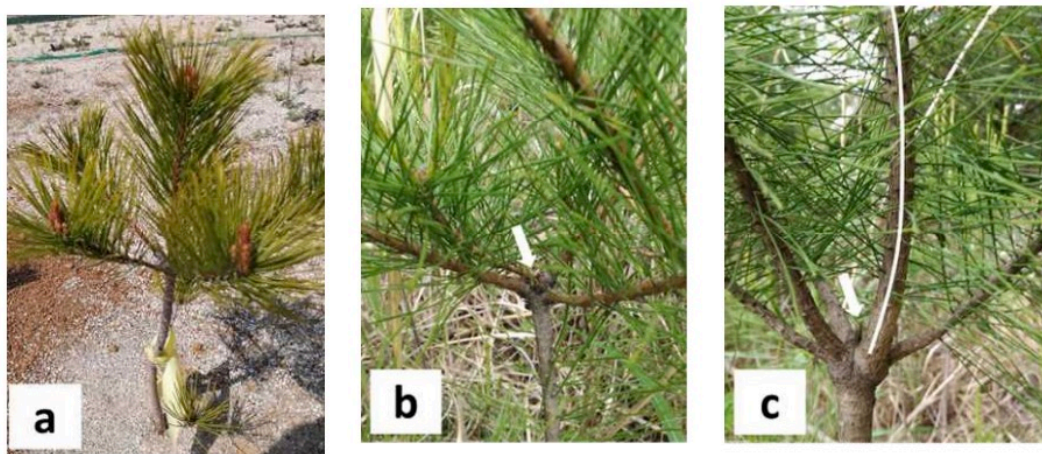


Fig. 1.1.4 アカマツの発達における(a)正常な形態, (b)形態異常(頂芽優勢の消失), (c)形態異常からの回復. (b)の白い矢印は伸長しなかった頂芽を示し, 頂芽優勢の消失となっている. (c)では, 側枝の一本が幹となり, 頂芽優勢が回復している[10]

1.1.3 都市環境と比較した調査条件の違い

人の立ち入りが難しい自然環境での野生動物調査の環境条件は都市環境と比較して異なる

る。例えば、自然環境では有害鳥獣類、保全種を含む野生動物との遭遇の問題がある。都市環境においてもアライグマやハクビシンなどの有害鳥獣類の存在は問題[14]となっているが、野生動物と人間の生活圏は区別されており、大型の有害鳥獣類と遭遇する可能性は低いと言える。しかし、人の立ち入りが難しい自然環境では、イノシシ、クマやシカなどの大型の有害鳥獣類と遭遇する可能性があり、都市環境と比較した際の調査条件の違いと言える。また、有害鳥獣類だけではなく、保全種に指定されている野生動物についても同様の遭遇リスクがあり、自然環境における調査において調査員にはこれらの遭遇リスクによる作業負荷(入山する研究者間でのブリーフィングの必要性、関係機関間での入山手続きと打ち合わせの手間の発生、個人装具の準備など)が存在する。

また、電力や通信のインフラ環境においても都市環境と自然環境では違いが存在する(Fig.1.1.5)。都市環境における調査では、電力や通信インフラが十分に存在し、野生動物調査のために情報端末や固定・移動型センサーを長期間使用することが基本的には可能である。しかし、自然環境においては、人の立ち入りが困難であればあるほど電力や通信のインフラが劣悪であり、電源確保や通信接続が制限されるまたは存在しない。従って、カメラ、赤外線、温度などの固定型センサーにより野生動物調査を行いたい場合、都市環境と比較すると電源や通信の確保のために調査員の作業負荷が発生する。

野生動物に GPS ロガー等のセンサーやバッテリーを搭載して野生動物調査を行う場合でも、都市環境と異なり自然環境では調査員の作業負荷が高い。なぜならば、都市環境においては野生動物に取り付けたバッテリー交換やデバイス回収を行う場合、装着個体の位置を GPS 等による位置情報のデータなどにより把握してバッテリー交換やデバイス回収を行うことが可能である[15]。しかし、自然環境においては、都市環境と比較して地形による開空部分の樹木などの遮蔽による影響が強く、測位信号の劣化によって GPS 電波の測位精度が低くなり[16]、装着個体の位置を正確に把握することが難しいためバッテリー交換がデバイス回収は簡単には出来ない。バッテリー交換がデバイス回収を行うために調査員の増員等が必要となるため、都市環境と比較して調査員の作業負荷が高いといえる。

1.1.2 で述べたように、福島第一原子力発電所周辺地域では放射線の平均積算量が基準値を上回るため帰還困難区域に指定されており、調査員の立ち入り自体が困難である。人の立ち入りが難しい自然環境での野生動物調査の環境条件は都市環境と比較すると調査員の作業負荷が高く、野生動物調査条件は厳しいと言える。

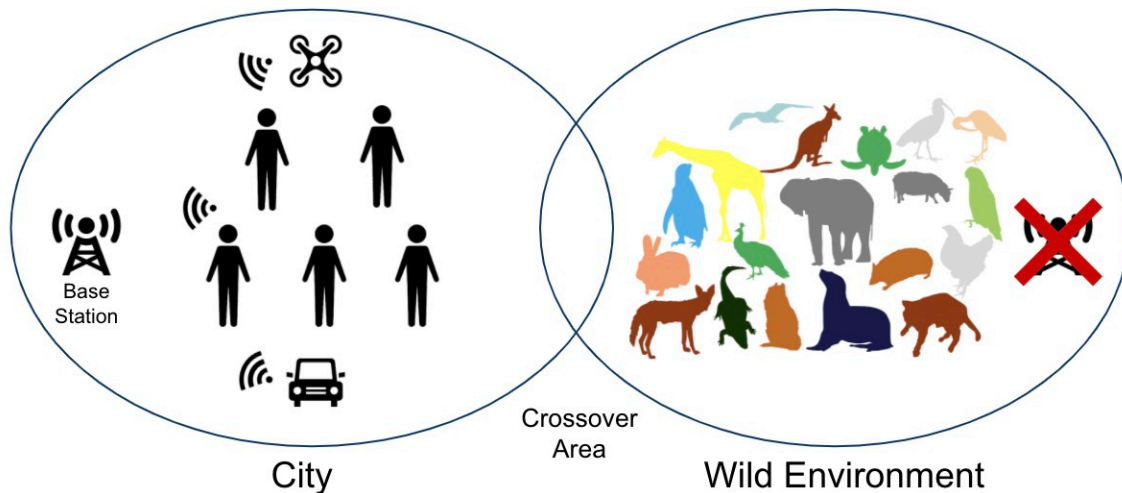


Fig. 1. 1. 5 都市環境と自然環境の調査条件の違い

1. 2 先行研究

1. 2. 1 従来の野生動物調査時に調査員が抱える課題

これまで様々な方法により野生動物調査が行われてきたが、それらの調査時において調査員が抱える課題が存在する。従来の野生動物調査として、環境調査の様子(Fig1.2.1)でも分かるように、調査員が森林地域に立入り、目視による動植物の記録や動物の糞の採取、また水質調査による間接的な調査等が行なわれている。例えば、市民ボランティアによる高山生態系長期モニタリング調査[17]のように、生息する高山植物開花状況について、市民ボランティアの調査員によって現地での目視調査を行なっている研究事例がある。また、北大中川地方演習林鳥類調査報告[18]では北海道の森林性鳥類の生息域の調査のために目視や鳴き声の調査手法が用いられており、1970 年頃から上で述べたような調査員が森林地域に立入り、調査員が動植物と接触して目視による観察手法が現在でも用いられていると言える。

従来の野生動物調査時の調査では、調査員が野生動物の生息地域に直接立ち入る必要があるため特有の課題が存在する。1.1.3 で述べたように、調査地域では有害鳥獣類や保全種など野生動物との遭遇リスクがあるため、調査員の作業負荷(準備、手続き、装具など)が高い。加えて、都市環境と比較して広範囲にわたる調査地域における大規模な野生動物調査を行うことは難しい。都市環境においては多数のユーザーが参加した参加型センシングと言われる手法により、スマートフォン等を用いて広範囲の調査地域においても大規模調査が行われてきた[19]。しかし、自然環境ではそもそも調査員の立ち入りが難しく、これまで述べてきた野生動物の遭遇リスクなど考慮すると、都市環境と同等の多数の調査員を動員した参

加型センシングを行うことは難しい。

また、1.1.2 でも述べたように福島第一原子力発電所周辺地域などは帰還困難区域に指定されており、放射線量が基準値を上回るため調査員の立ち入りが困難である。従って、従来の野生動物調査方法では生息地域に調査員の立ち入り必要となるが、本研究が想定する福島第一原子力発電所周辺地域などの人の立ち入りが困難な地域ではこれを適用することが難しいと言える



Fig. 1. 2. 1 実際の環境調査の様子[20]

1. 2. 2 情報通信技術の活用：固定型デバイス

情報通信技術の進展により、人の立ち入りが難しい自然環境における野生動物調査でも情報通信技術を活用した野生動物調査が行われてきた(Fig1.2.2). Internet of Things という概念が登場し、様々なセンサーやモノがインターネットに接続され、情報交換することにより相互に制御や作用する仕組みである。都市環境では Internet of Things の社会活用が既に進んでおり、具体例としては自動車と橋桁に振動検知のセンサーを取り付け、橋桁の強度をリアルタイムで計測して橋桁のメンテナンスに役立てる研究等がある[21], [22].

自然環境においても都市環境で見られるような Internet of Things による環境モニタリングの活用が進みつつある。具体的には、自然環境においては温度、赤外線、カメラ、音声などの環境情報を取得するための固定センサーを自然環境に設置し、野生動物の生態調査や森林地域の環境調査を行っている。例えば、小林らの研究例[23]では、福島第一原子力発電所事故における音響生態学の研究として、福島第一原子力発電所から 10km 離れた小丸地区(福島県浪江町)の帰宅困難区域内に音声マイクを設置し、録音されたデータセットを収集し

て解析することで生物多様性の変化の調査に役立てている(Fig.1.2.3). また, 中村らの研究例[24]では, 東京大学秩父演習林(埼玉県秩父市大滝)に設置されている定点カメラを利用して, 1995 年から毎年タイムラプス画像を取得している. 1 年を通して毎日午前 11 時 30 分頃に自動的に撮影されており, このタイムラプス画像により桜の開花の観察を可能にしている. また, 気候変動学習の一環として, 中学生向けにこのタイムラプス画像を使用した教育プログラムの実施を行っている(Fig.1.2.4).

また, 複数のセンサーを用いた大規模な研究例として, Mulukulta らの研究[25]では気候変動に対する土壌の反応を監視し, 周囲の生態系や気象学的なプロセスとの複雑な相互作用を理解するため, 自然環境において土壌モニタリングを行うための分散型センサーネットワークを開発している(Fig.1.2.5, 1.2.6). [25]では, 電力インフラがない水源地域内にある森林環境や牧草地域など人の立ち入りが難しい地域にセンサーネットワークを使用した土壌モニタリングを行っており, 本研究と同様の技術課題に直面している. 例えば, 実験場所の 7 箇所のうち 6 箇所には水源地域内にある森林環境に土壌モニタリングのための固定センサーネットワークを設置し, 4 箇所には電力インフラがないためソーラーパネルを設置して電力供給を行っている. ソーラーパネルの設置拠点では, ソーラーパネル供給電力量と固定センサーネットワークの消費電力量を算出し, 数年単位の長期モニタリングを実現するための研究開発を試みている.

これまで述べてきたように, 人の立ち入りが難しい自然環境においても固定型センサーを活用した野生動物や環境調査が行われている. しかし, 自然環境では電力や通信が劣悪であり, [23], [24]においても電力や通信インフラの確保の問題で固定型センサーの設置場所や設置可能な数が限られる. また, [25]では電源や通信インフラの確保が困難な地域ではソーラーパネルと衛星通信を利用し, 固定型センサーが取得した環境情報の送信を試みているが, ソーラーパネルからの電源供給が可能な判断するため設置場所の事前調査(晴天率や設置場所の安定性)が必要となり, 調査員の作業負荷が高いと言える. また, これらの固定型センサーの野生動物調査においては, 固定型センサーの設置やメンテナンスにおいて調査員の立ち入りが必要となるため, 本研究の着目する人の立ち入りが難しい地域(福島第一原子力発電所周辺地域など)では長期的かつ広範囲に活用することは難しい.



Fig. 1.2.2 東京大学秩父演習林に設置している赤外線カメラと気温センサー[20]



Fig. 1.2.3 (a)マイク, (b)同期ノードステーション, (c)ウェブサイト プロジェクト サイト(福島第一原発から 10km 離れた立入禁止区域内) [23]



Fig. 1.2.4 2016 年の桜の開花時期を観察シートの抜粋例. 4 月 28 日は悪天候で観察不可, 白い花のピークは 4 月 27 日から 29 日. 27 日と 29 日が変わらないと判断された場合, 例えば 27 日が満開と判断される[24]

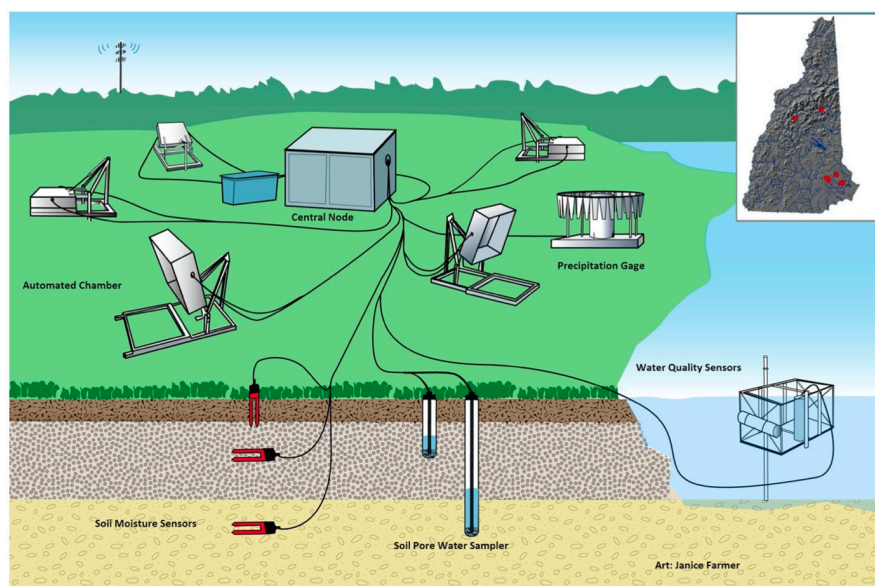


Fig. 1. 2. 5 センサーノードの構成概念図と，センシングシステムが設置されているサイトマップ[25]

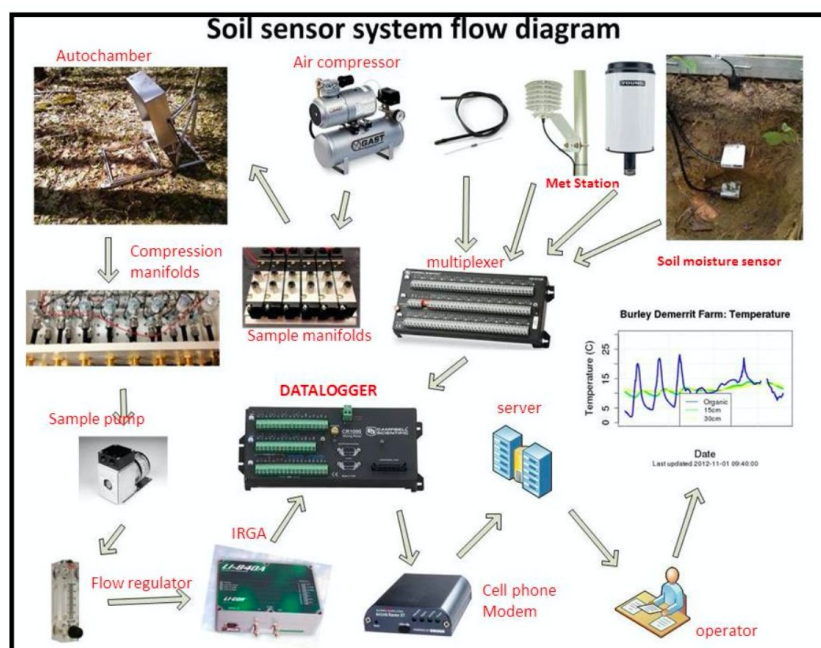


Fig. 1. 2. 6 センサー群とハードウェアのレイアウト図[25]

1. 2. 3 情報通信技術の活用：装着型デバイス

1.2.2 では固定型デバイスの活用例とその課題を述べたが，装着型デバイスによる野生動

物調査も先行研究として行われている。野生動物にデバイスを取り付ける場合、搭載可能なシステム総重量はその野生生物の体重の 2%以内と定められている[26]が、情報通信技術の進歩により通信機器やセンサーの小型化が可能になり、野生動物に装着型デバイス(各種センサーと通信機器が一体化した)を取り付けて野生動物調査が行われている。

例えば、PHS による野生動物の位置探索の研究[27]では、カラスの胴回りに PHS 端末を装着させてカラスの移動を追跡する試みを行なっている。その他に陸生哺乳類では、Rick らによる研究例[28]では、カナダのオハイオ州にて狂犬病対策のためにアライグマの首輪に GPS 発信器を装着させ、各生息域における個体数密度、生態行動の把握や行動域等の調査を行なっている。また、日本においても山崎ら[29]は、GPS 機能付き携帯電話(FOMA)端末に増設バッテリーパックを接続した首輪型ベルトを開発し、定置試験と共にアライグマ野生個体に装着を行い、中型哺乳類追跡ツールとしての携帯電話端末の実用性を検討している。

しかし、装着型デバイスを活用した野生動物調査においても課題が存在する。その課題とは、搭載可能なシステム総重量はその野生動物の体重によって制限されるため、システムの長期運用において十分なバッテリー容量を搭載出来ないことである。アライグマの首輪型デバイスによる野生動物調査例[29]では、100%充電した状態で稼働した場合の稼働日数は平均 25.3 日と報告されている(Fig.1.2.7)。また、計算上の稼働期間は最大 90 日と想定されていたが、実際の稼働期間は 30%にも満たない結果となっている。原因の一つとして、首輪型デバイスの GPS 測位データ送信の際の通信の成功率が低かったことから、首輪型デバイスが GPS 衛星探索や基地局を探索するための通信消費電流が大きくなったためだと考えられている。また、現在の稼働期間ではデバイス装着個体の追跡期間としては十分ではないと述べられている。また、バッテリー交換の観点では、1.1.3 で述べたとおり自然環境は都市環境と比べて人の立ち入りが難しく、デバイスを装着した野生動物の位置をリアルタイムに把握することも容易ではないため作業負荷が高いと言える。

従って、装着型デバイスを用いた野生動物調査においても、搭載可能なバッテリー容量が課題であり、本研究の着目する人の立ち入りが困難な自然環境における野生動物調査においては十分な手法とは言えない。



Fig. 1. 2. 7 アライグマオス成獣に装着された状態の首輪型デバイス[29]

1. 2. 4 DELAY-TOLERANT NETWORKING 技術の活用

本研究で着目する電力・通信のインフラが乏しい劣悪な環境かつ人の立ち入りが難しい地域における野生動物調査の手法として、Delay Tolerant Networking (DTN) 技術[30]を活用した野生動物調査の手法が先行研究として存在する。Delay-tolerant networking (以下DTN) とは、大きな伝送遅延が生じたりする“劣悪な”通信環境でも、信頼性のあるデータ転送を実現する通信方式であり、データ転送としてストアアンドフォワード方式を用いている(Fig 1.2.8)。DTN 技術は本研究が着目する電力・通信のインフラが劣悪な環境を想定しているため、1.2.1, 1.2.2, 1.2.3 で述べた課題を解決することが可能であり、DTN 技術を活用した主な先行研究について詳細を後述する。

DTN 技術を活用した先行研究は数多く存在するが、本研究では野生動物調査に着目した先行研究を述べる。Juang らの先行研究[31]では、Wireless Network と野生動物を活用した野生動物調査を実現する ZebraNet システム概要とシステム改善を述べている。ZebraNet システムとは、広大な野生環境において野生動物調査を行うために、まず首輪型デバイスを複数の野生動物に装着させる。首輪型デバイスは、GPS、フラッシュメモリー、無線通信機器、小型 CPU が搭載されており、小型の無線コンピューティングデバイスとなっている。それらの首輪型デバイスは携帯電話のように基地局に記録データを送るのではなく Peer-to-Peer 通信方式を用いており、他の首輪型デバイスと通信可能圏内に入ると収集データを他の首輪型デバイスに送信する。データ回収においては、調査員が生息域を巡回した際に何らかの方法で首輪型デバイスよりそれらのデータが調査員に送られることで、各首輪型デバ

イスの収集データが回収されるシステムが提案されている。[31]では、データ回収の段階における課題を着目している。データ回収のための調査員は移動しているが、調査員の移動を考慮したデータ送信のためのルーティングプロトコルの検討が十分ではなく、首輪型デバイスが、調査員の持つデバイスにデータを送信する際に、首輪型デバイスが調査員の持つデバイスを探るための電力消費量、およびデータの受信成功率首に対して課題があることを述べている。この課題を解決するため、30ノードの固定基地局をケニア中心部のリサーチセンターに配置することによる解決を提案している。

その他のDTNを活用した野生動物調査の手法として、メッセージフェリー方式[32]、[33]を用いた調査手法の先行研究について述べる。DTN技術を利用した野生鹿の調査と環境情報取得の手法[34]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ーを装着させ、設定した時間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し、各無線センサーから車両に搭載されている基地局に取得データを送信することでデータ取得を可能にする手法が提案されている(Fig 1.2.9)。

これらの手法は従来の野生動物調査と比較して、多数の野生個体に首輪型デバイスを装着して野生動物自身でデータを収集することにより、調査員の数の削減や有害鳥獣類や保全種等の野生動物の接触を減らす事が可能である。従って、従来の野生動物調査時の調査員が抱える課題(調査員の負荷)の低減が可能であり、装着デバイスから基地局へデータ取得するために固定基地局の設置や通信タイミングの設定により実現可能だと考えられる。しかし、上記の手法でもデータ回収のために調査員が周辺地域の巡回をする必要性が残るため、本研究で想定している人の立入りが困難な自然環境の場合には同手法の適用は難しい。

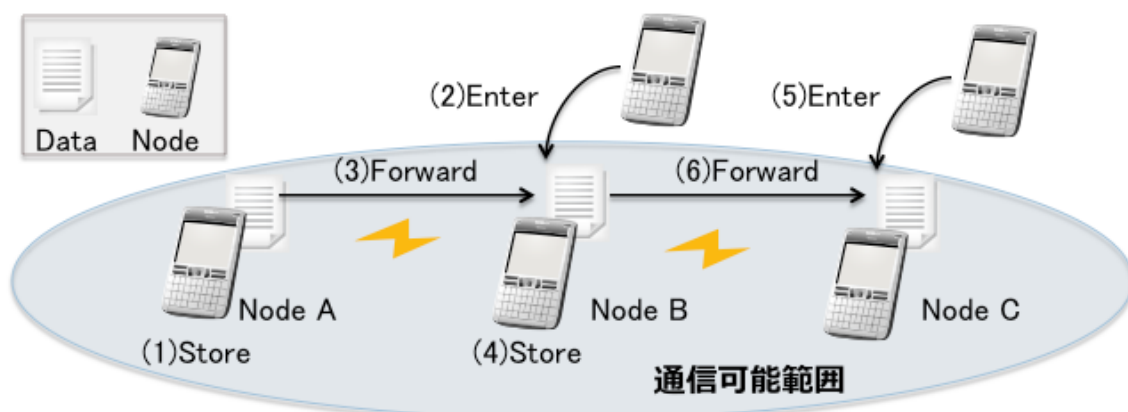


Fig. 1.2.8 Delay-tolerant networking によるデータ伝搬の様子(Node A から Node C)[20]

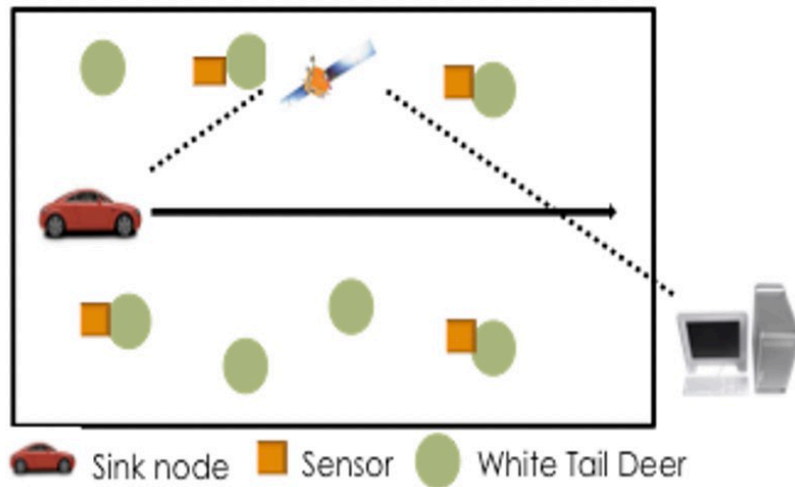


Fig. 1. 2. 9 DTN 技術を利用した野生鹿の調査と環境情報取得手法[20]

1. 2. 5 動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査

これまで先行研究について述べた通り，人の立ち入りが難しい自然環境における野生動物調査のためには，データ回収に人手を必要としない手法が必要である．そこで，本研究では，DTN 技術を活用した人の立ち入りが難しい地域の野生動物調査手法として，動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査を提案する(Fig 1.2.10)．具体的には，野生動物調査のための野生動物の捕獲・放獣プロセスにおいて，捕獲した野生動物に首輪型デバイスを装着させる．首輪型デバイスには，GPS，フラッシュメモリー，近距離用の無線機器，小型 CPU などが搭載される．自然環境に放獣後，以下の 3 つの機能により人の立ち入りが難しい地域における野生動物調査を行う．

1. Sensing: 単独行動時にセンシングして環境情報を収集
2. Data Sharing: 集団行動時に動物間マルチホップ通信によりデータを転送
3. Touch'n Go at Home: いずれかのデバイス装着個体が携帯キャリア網などの通信圏内に来た際にデータをサーバにアップロード

まず，放獣された首輪型デバイスを装着したデバイス装着個体(以下，装着個体と呼ぶ)は，単独行動時には首輪型デバイスにより野生個体自身の生態に関する情報取得や温度，音声，放射線量などの周囲の環境情報のセンシングを行う．本研究では上記の機能を **Sensing** と呼ぶ．次に，装着個体が繁殖活動時に他の装着個体と遭遇した際や集団行動時に他の装着個体と接触した際に，装着個体が **Sensing** で取得したデータについて無線機器によりデータ転送を相互に行う．本研究では上記の機能を **Data Sharing** と呼ぶ．そして，いずれかの装着個

体が人の立ち入りが可能な地域(基地局の通信圏内)に入ると、装着個体のデータはサーバーにデータがアップロードされる。本研究では上記の機能を **Touch'n Go at Home** と呼ぶ。これら3つの機能を組み合わせることで、人手を必要としない野生動物調査を行うことが可能である。

従って、先行研究で述べた DTN 技術を用いた野生動物調査手法においてデータ回収に人手を必要とする課題を解決できるため、本手法により調査員の作業負荷が高く困難であった人の立ち入りが難しい自然環境においても長期的な野生動物調査が可能となる。

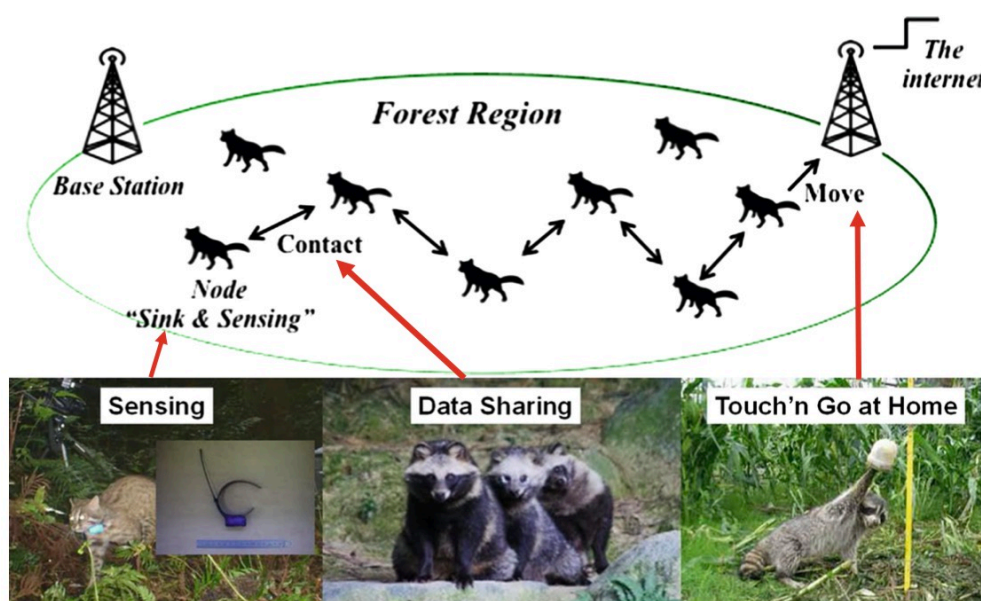


Fig. 1. 2. 10 動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査の概要図[35]

1.3 研究の目的と方法の概要

本研究の目的は、広大な国立公園や森林、山岳地帯、海中などの遠隔地(人の立ち入りが困難な地域)における長期的な野生動物調査の支援のために、動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査を実現することである。これまで述べてきたとおり、人の立ち入りが困難な地域の野生動物調査は必要とされており、特に福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故により周辺地域の野生動植物への影響は先行研究[10]より確認されており、同原子力発電周辺地域の広範囲かつ長期的な野生動物調査は早急に求められている。これらを踏まえて、本研究が対象とする人の立ち入りが困難な地域の長期的な野生動物調査として、以下の環境を前提とする。

1. 調査範囲：10km × 10km 以上
2. 調査期間：10 年以上

人の立ち入りが難しい地域における野生動物調査手法として、動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法が提案されてきた。具体的には、捕獲した複数の野生動物に首輪型デバイスを装着させ、Fig 1.2.10 により装着個体を主体とした人手を必要としない手法により野生動物調査を実現する方法である。動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査により人の立ち入りが困難な地域においても野生動物調査が可能であるが、前提条件を満たすためには課題が存在する。

方法の概要として、本研究では前提条件を満たす地域においても動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法を実現するために、動物間マルチホップ通信システムの提案を行う。動物間マルチホップ転送方式の野生動物調査の機能の一つである Data Sharing 機能(Fig 1.2.10)の課題に着目し、同手法による長期的な野生動物調査を行うための課題を整理する。本研究ではそれらの課題解決のために、動物間マルチホップ通信システムを提案する。具体的には、効率的に動物間の Data Sharing 機能を長期的に維持するために、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大、法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減(省力化)、縄張りの主の入替り(時間発展に伴う群れの構造や順位の変化)を利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減を行うことにより Data Sharing 機能の課題解決を試みる。本研究で提案する動物間マルチホップ通信システムにより Data Sharing 機能の課題が解決されることで、前提条件を満たす人の立ち入りが困難な地域における動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査が実現させることを目的とする。

1.4 本研究の構成

本研究の構成と各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「序論」では本研究を行うにあたっての研究背景、先行研究、本研究の目的を示す。

第 2 章「動物間マルチホップ通信システムの提案」では、1 章で述べた動物間マルチホップ通信システムの概要(課題と仕様)、省電力化、省力化、省資源化の概要を述べる。

第 3 章「省電力化：動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大の研究」では、2 章で述べた動物間通信の効率的な省電力の詳細を述べ、フィールド検証による評価実験、結果と考察を述べる。

第 4 章「省力化：法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減の研究」では、2 章で述べた法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減の詳細を述べ、シミュレーション検証による評価実験、結果と考察を述べる。

第 5 章「省資源化：縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減の研究」では、2 章で述べた縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減の詳細を述べ、シミュレーション検証による評価実験、結果と考察を述べる。

第 6 章「議論」では本研究で得られた知見に関する議論を述べる。

第 7 章「結論」では本研究で得られた知見についてまとめ、今後の課題を述べる。

第 2 章

動物間マルチホップ通信システムの提案

2.1 動物間マルチホップ通信システムの要件

本節では、動物間マルチホップ通信システムの概要を述べる。動物間マルチホップ通信システム(Animal MUltihop System; AMUSystem)とは、省電力化、省力化、省資源化の機能による、10 年単位の長期的な Data Sharing 機能を実現するシステムである。これまで述べたとおり、本研究では人の立ち入りが困難な地域における長期的な野生動物調査の実現を目的としている。本研究で想定する長期的な調査とは、10 年以上の調査期間を想定している。これらの前提条件を満たすために、データ回収に人手を必要としない動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法が有用であることを述べた。動物間マルチホップ転送方式による長期的な環境調査を行うために、Sensing, Data Sharing, Touch'n Go at Home の機能の課題が全て解決されることが必要である。各機能において解決すべき課題があるが、本研究では Data Sharing 機能に着目して課題解決を試み、Sensing, Touch'n Go at Home 機能の課題については本研究では取り扱わない。Data Sharing 機能に着目する理由として、先行研究[26], [29]でも述べているようにシステムの総重量は野生動物個体の体重の 2%以下とする必要があり、バッテリー搭載容量に制限があるにも関わらず通信時の電力消費量は高く、10 年以上の調査期間を必要とする場合には本課題の解決はシステム実現で不可欠となるためである。

以下では長期的な野生動物調査を行うために、Data Sharing 機能で求められる前提と技術課題を整理する。

【前提】

1. 調査範囲：10km × 10km
2. 調査期間：10 年以上
3. 調査員の立ち入り：困難
4. デバイス装着動物：アライグマ

【技術要件】

- データの送受信機能

- 耐遅延特性
- 効率的なルーティング
- 低消費電力
- 長寿命
- 低メンテナンス負荷
- 低資源

前提としている自然環境では、国立公園の保護区域や福島第一原子力発電所周辺地域の帰還困難区域を想定しており、それらの地域の広さから $10\text{km} \times 10\text{km}$ を調査範囲とし、調査員の立ち入りは困難であることを改めて前提として述べる。また、調査期間は Stanislav らのアカマツの研究[10]から分かるように、動植物に対する放射線の影響に関する研究は数年～10年以上の期間が求められるため、本研究の想定する調査期間は10年以上としている。デバイスの装着対象は、環境省により特定外来生物に指定[36]されており、捕獲・放獣の難易度が保全種と比較して低いアライグマを想定している。装着個体の選定理由については、3.2.2の実験概要で詳述する。

技術要件として、電池の交換やデータ収集のために装着個体を再捕獲して装着した首輪機器を回収することは困難であり、Data Sharing 機能を10年単位で維持することが求められるため、上記の要件を満たす必要がある。各機能の技術要件については後述する。本研究では、Data Sharing 機能の長期的な維持の観点で以下3点の技術要件に着目している。生き物の規則性と情報技術の規則性をうまく織り合わせて柔軟に目的を達成するシステム設計論によりこれらの技術要件を解決し、Data Sharing 機能を10年単位で維持するシステムを実現する。その結果、動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法の実現を目的とする。

- 低消費電力
- 低メンテナンス負荷
- 低資源

3点の技術要件として、初めに「低消費電力」に関して述べる。野生動物に装着できる首輪機器の重量は動物倫理の観点により体重の2%以下に制限[26]されており、装着出来るバッテリー容量は限られるため電力消費を抑える方法が求められる。求められる省電力性については、野生環境下のアライグマは寿命が2-3年[28]であることを前提とすると、バッテリー交換なしで3年程度のデバイス稼働が可能な電池容量が必要となる。

次に、「低メンテナンス負荷」に関して述べる。本研究では10年以上の調査期間を想定しているため、Data Sharing 機能においても10年以上の稼働期間が技術要件として求められる。しかし、首輪型デバイス装着対象である野生動物は、自然環境下では飼育環境下と比較すると寿命が短い。特に、本研究にて対象としているアライグマでは、飼育環境下では10年程度の寿命[37]とされているが自然環境では2-3年[28]と報告されている。従って、首輪型デバイス装着個体である野生動物の短い寿命により調査手法の長期運用ができない。Data Sharing 機能を10年以上の長期稼働を実現するためには、デバイスである装着個体が寿命を迎える前にデバイス装着個体の再捕獲を行い、装着個体のデータ収集が必要となる。しかし、調査員が調査地域に立ち入ることが必要となることや、再捕獲では必ずしも再捕獲対象とする装着個体を再捕獲出来るとは限らないため運用コストが高い。加えて、10年以上の長期間に渡りこれらの作業のために調査員を確保することは難しく、再捕獲等の運用コストを削減したメンテナンス負荷の低さが要件として求められる。

最後に、「低資源」に関して述べる。本研究では野生動物調査のための捕獲・放獣プロセスを利用して行われるが、10年以上の長期間にわたり常に多数の野生個体が捕獲出来るとは限らない。また、Data Sharing 機能を長期的に維持するために、長期間に渡って多数の装着個体の放獣をする場合、元々生息する野生個体、装着個体、繁殖個体により調査地域の個体数全体が増加することで、調査地域の生物多様性に影響を与える可能性も考えられる。従って、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、Data Sharing 機能を長期的に維持することが要件として求められる。

次に、本研究において以下2点の技術要件はData Sharing 機能の長期的な維持の観点で技術要件には含まれないが、先程述べた3点の技術要件に関連するため本研究では取り扱う。ここでは、本研究で取り扱う理由を述べる[20]。

- データの送受信機能
- 長寿命

「データの送受信機能」は、Fig.2.1.1のようにこれまでのサーバ・クライアント型の通信とは異なり、Peer to Peer (P2P)と呼ばれる双方向通信の機能が必要となる。本研究のData Sharing 機能では双方向通信においてお互いが送信機、受信機となる必要があるため、データ送信受信の順序を決定する仕組みが必要となる。「データ送受信機能」は「低消費電力」と関連するため、動物間通信機能を効率的に長期間維持する観点での技術要件としては含まれないが、本研究では「低消費電力」の一部として取り扱う。

「長寿命」について述べる。長寿命の点を考慮した動物の選定では、動物の種の違いと法

的な理由の2つの側面から考えていく必要がある。森林地域におけるデータのセンシングと回収のために、動物自身の寿命が先行研究から算出されている値でより長生きする種を選べば解決される。しかし、環境省自然保護局により有害鳥獣以外の鳥獣は保護対象と定められており[48]、一般的な野生動物への機器装着は難しい。本研究では、有害鳥獣であるアライグマを本調査手法の対象動物と仮定しており、具体的な他の動物個体との比較調査などは含まない。しかし、「長寿命」は「低メンテナンス負荷」と関連しており、本研究では「低メンテナンス負荷」の一部として扱う。

一方、本研究では取り扱わない以下の技術要件について、概要と理由を述べていく[20]。

- 耐遅延特性
- 効率的なルーティング

耐遅延特性と効率的なルーティングの技術要件については、動物間通信機能を効率的に長期間維持する観点では直接要件として含まれず、また先行研究で既に多くの検討がなされているため、同手法の実現において本研究の課題として取り扱わない。例えば、Epidemic Routing 方式[38]や Spray and Wait 方式[39]などの拡散型アルゴリズムや、位置情報に基づき距離を計測して効率的なルーティングを行なう Geocast Routing 方式[40]、各ノードとの遭遇履歴とインターネット可能エリア到達回数の各パラメータに基づいたルーティング方式[41]など、基礎的な方式から利用ケースに応じた耐遅延特性を持ったルーティング手法が既に研究されている。従って、本研究の課題として取り扱わない。

動物間通信機能(Data Sharing 機能)を効率的に長期間維持する観点で要件を改めて整理すると、「低消費電力」、「低メンテナンス負荷」、「低資源」が求められる。

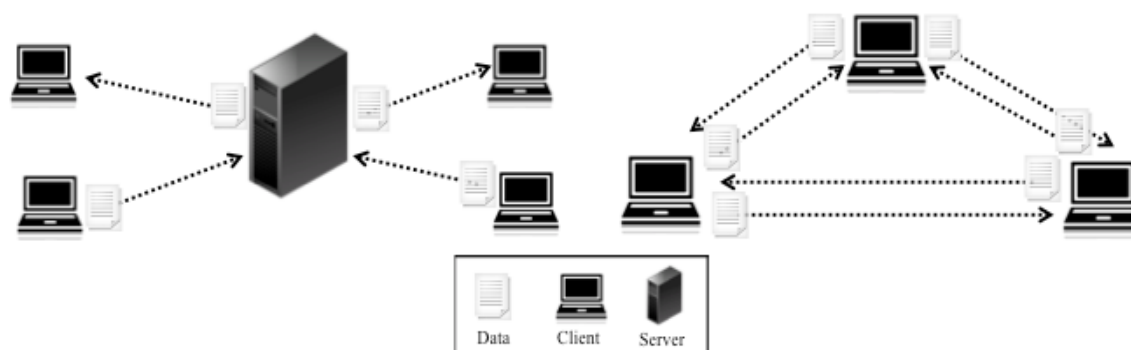


Fig. 2. 1. 1 サーバ・クライアント型(左)と Peer to Peer 型(右)[20]

2.2 動物間マルチホップ通信システムの仕様

動物間マルチホップ通信システム(以下, AMUSystem)とは, 動物間通信機能(Data Sharing 機能)を効率的に長期間維持することを可能にしたシステムである. AMUSystem では以下の仕様を有する.

1. 省電力化: 動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大
2. 省力化: 法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減
3. 省資源化: 縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減

まず, 「省電力化: 動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大」の仕様について述べる. 動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大とは, 3 つの機能により成り立つ. 1 つ目の機能では, 動物同士の接触時(すれ違い)に着目し, 動物同士が接近した際に生じる習性行動の特徴量を 3 軸加速度センサーで解析し, 他個体との遭遇時のみ通信機器を Wake させて装着個体間の Peer-to-Peer 通信を実現させる機能である(Fig.2.2.1). 2 つ目の機能では, 1 つ目の機能を改良し, 空間的・時間的な変化に対応した動的通信機器 Wake 制御アルゴリズム研究の準備段階として, 集団行動時における威嚇行動の特徴量を利用した効率的な通信機器 Wake 制御アルゴリズム機能である. 3 つ目の機能では, 通信機器 Wake 後の双方向のデータ送受信について, 動物同士の遭遇履歴を用いることで低消費電力的に実現する機能である(Fig.2.2.2). これらの省電力機能を用いることで, 要件の「低消費電力」であるバッテリー交換なしで 3 年程度のデバイス稼働が可能な電池容量に近づけることを目指す.

次に, 「省力化: 法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減」の仕様について述べる. 法的対応(法的対応の詳細は 4.1 で詳述する)で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減とは, 10 年以上の長期的な野生動物調査において, 定期的なデバイス装着個体放獣を行うことで, Data Sharing 機能の維持が可能になるためデバイスの再捕獲によるデータ回収が不要となる. 従って, データ回収やデバイス管理のために必ず発生する再捕獲の運用コストを削減することが可能である(Fig.2.2.3). 10 年以上の長期的な動物間通信機能の維持が求められるが, アライグマの場合には装着個体の寿命は野生環境下では 2・3 年程度となるため, 装着個体の寿命により動物間通信機能は維持することが出来ない. そこで, AMUSystem は, 数年毎に定期的に年齢の若い装着個体の放獣を行うことで動物間通信機能が維持できないという問題の解決を試みている. 加えて, 長

期間の定期的な装着個体の放獣により、調査員に対するメンテナンス負荷が高まることが懸念されるため、AMUSystemではメンテナンス負荷が低い最適化シナリオを提案する。以上から、要件の「低メンテナンス負荷」を満たすことで、再捕獲等の運用コストを削減したメンテナンス負荷の低い方法を提供する。

最後に、「省資源：縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減」の仕様について述べる。縄張りの主の入替り(時間発展に伴う群れの構造や順位の変化)を利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減とは、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、動物間通信機能の長期的な維持を可能にする、縄張りの主の入替りと群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオである(Fig.2.2.4)。具体的には、調査期間における縄張りの主の入れ替えと群行動に着目し、親子やオス同士の集団行動などの多世代間の交流時のデバイスの世代間のデータ転送により、資源(デバイス)の最小化と動物間通信機能の長期的な維持を実現する最適化シナリオである。本シナリオにより、要件の「低資源」を満たすことで、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、動物間通信機能(Data Sharing 機能)を長期的に維持することが可能である。

以上より、AMUSystemの3つの仕様により、「低消費電力」、「低メンテナンス負荷」、「低資源」を満たすことにより、動物間通信機能の長期間の維持を可能にさせる。従って、動物間マルチホップ転送方式による調査手法により、人の立ち入りが困難な地域における長期的な野生動物調査が可能となる。次章以降で、これらの仕様の概要、評価実験、結果と考察について述べていく。

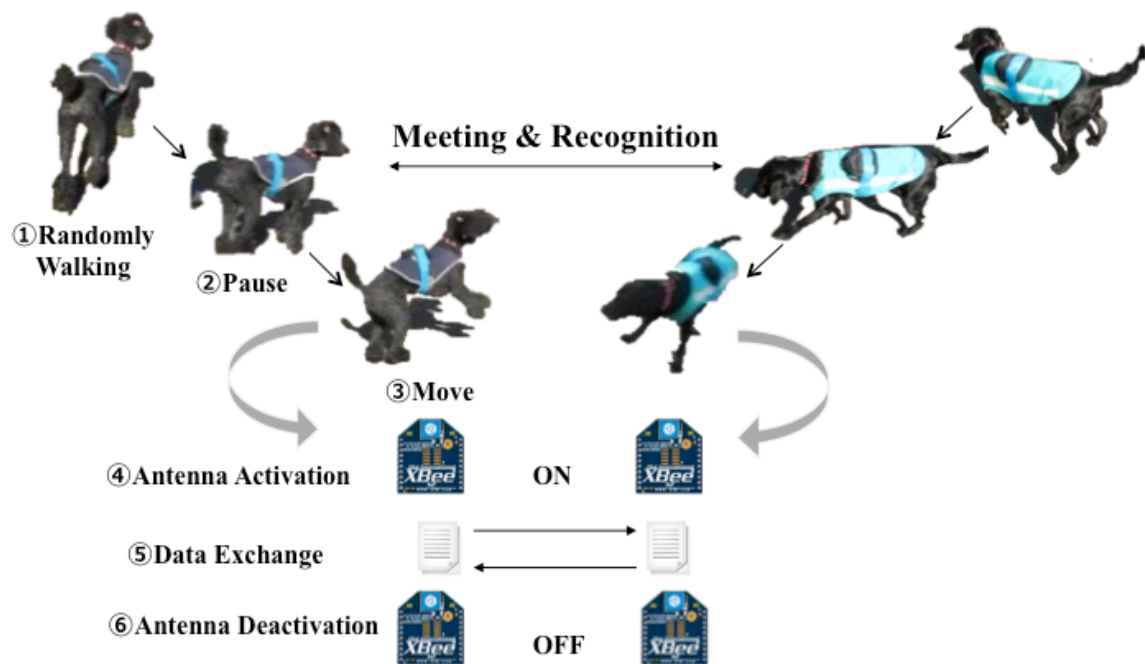


Fig. 2. 2. 1 通信機器 Wake 制御アルゴリズムによるデータ転送の概要[20]

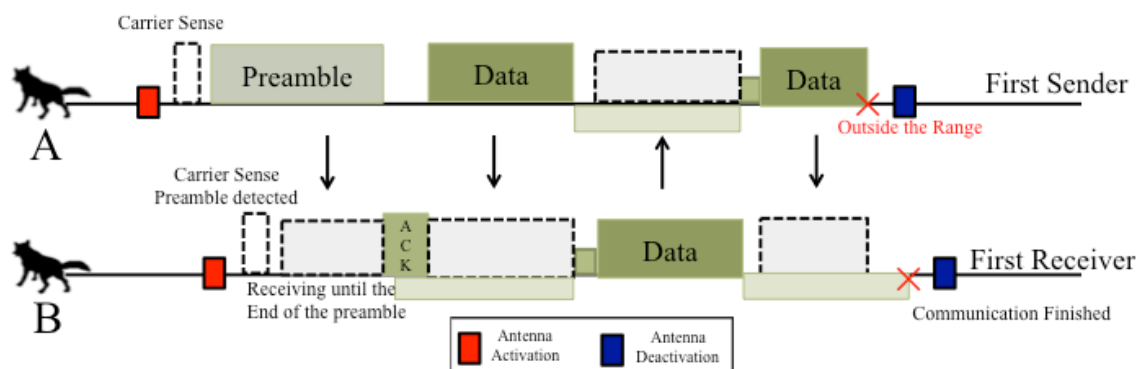


Fig. 2. 2. 2 遭遇履歴を用いたデータ転送(データ送受信)の概要[20]

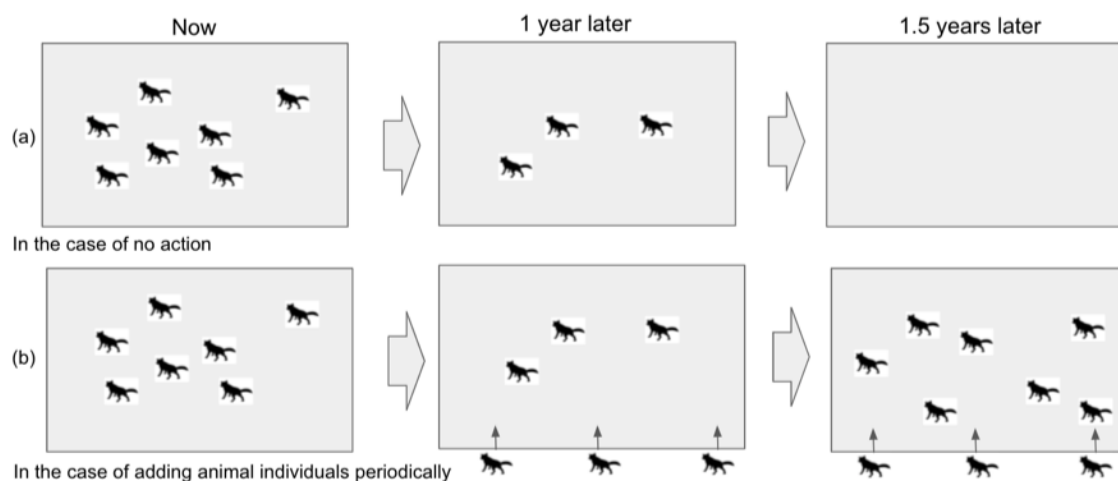


Fig. 2.2.3 Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの概要

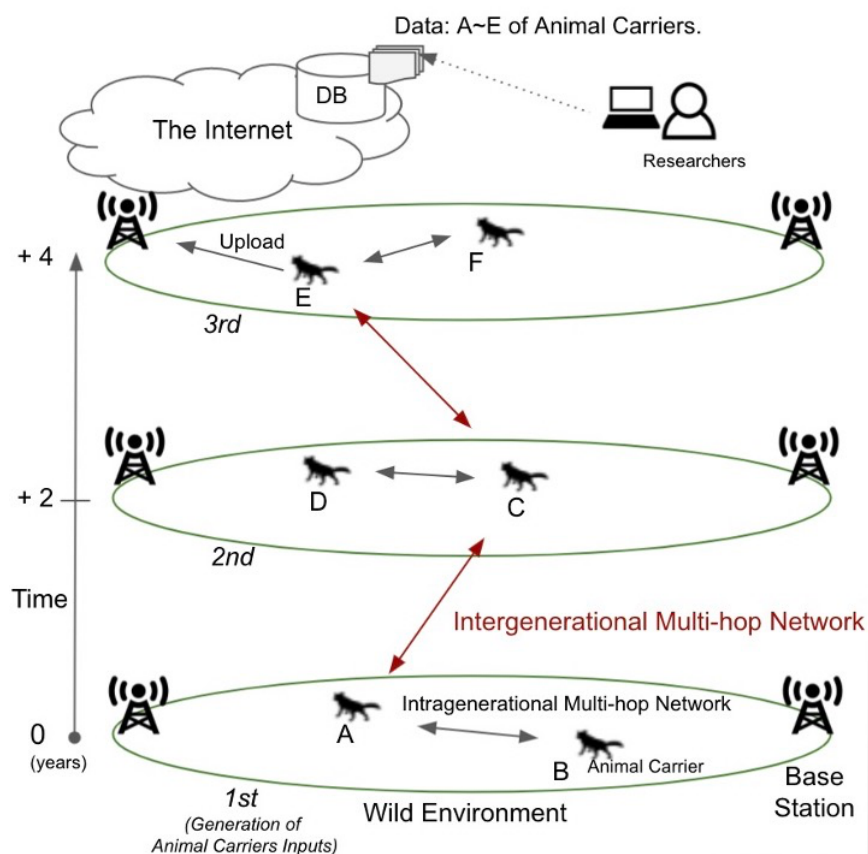


Fig. 2.2.4 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオの概要

第 3 章

省電力化：動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大の研究

3.1 はじめに

本章では、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大について述べる。動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大とは、装着個体間の効率的な通信機器 Wake とデータ転送送受信による 2 つの機能により、バッテリーの低消費電力化を実現する手法である。1 つ目の機能では、動物同士の接触時(すれ違い)に着目し、動物同士が接近した際に生じる習性行動の特徴量を 3 軸加速度センサーで解析し、他個体との遭遇時のみ通信機器を Wake させて装着個体間の Peer-to-Peer 通信を実現させる機能である (Fig.2.2.1)。2 つ目の機能では、通信機器 Wake 後の双方向のデータ送受信について、動物同士の遭遇履歴を用いることで低消費電力的に実現する機能である (Fig.2.2.2)。

次節以降では、通信機器 Wake 制御アルゴリズム、威嚇行動時の通信機器 Wake 制御アルゴリズム、遭遇履歴を用いたデータ送受信機能について述べていく。

3.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの提案

第 2 章では、動物個体間のデータ運搬手法が課題であることを述べた。そこで、本章では 3 軸加速度センサーを利用した通信機器 Wake 制御アルゴリズム手法の提案を行う [20]。

3.2.1 提案手法

3.2.1.1 3 軸加速度センサーによる行動分析

装着個体間の遭遇時における特徴量を 3 軸加速度センサーで合成加速度として取得し、閾値による効率的な通信機器 Wake 制御により省電力なデータ転送を提案する。本提案手法のため、他の装着個体との遭遇時や獲物の発見時における動物の習性行動の一つである、次の動作判断を行うための静止状態と静止時間[42]に着目した。例えば、Fig.3.2.1 はイヌの散歩時における他個体と遭遇時の 3 軸加速度センサーのデータである。本データから分かるように、他のイヌ個体との遭遇時に認識するための静止時間が存在する。その後、しばら

く進んだ後に相手のイヌ個体に対して吠えていることがデータより判断出来る. 言い換えると, 3 軸加速度センサーのデータにより動作の特徴量を算出し, 静止や歩行等の単純な行動を判断する事が可能である. また, 他個体との遭遇時に対象個体に対する興味に基づいた動作判定が, 3 軸加速度センサーの合成加速度の特徴量により推定可能となる. Fig.3.2.2 では, ボールを持ち上げて認識させ, 近くにそのボールを投げる動作を行なった際のイヌの動きと合成加速度の特徴量である. 対象個体の認識のために静止状態と静止時間が存在している事が分かり, その後, 対象個体に対する興味に基づき動作の違いが存在している.

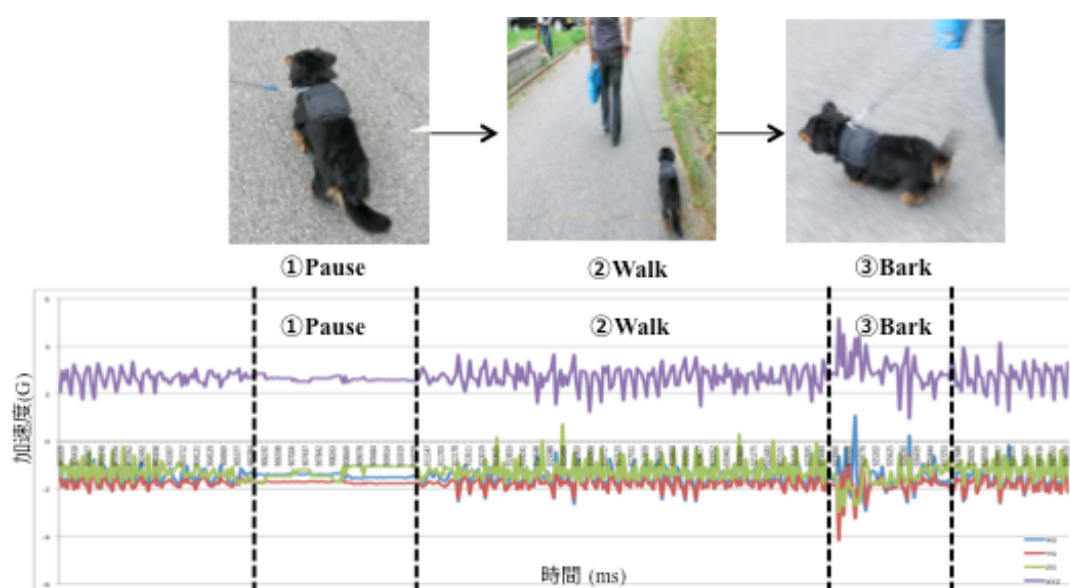


Fig. 3. 2. 1 他のイヌ個体と遭遇した際の動作と 3 軸加速度センサーのデータ比較[20]

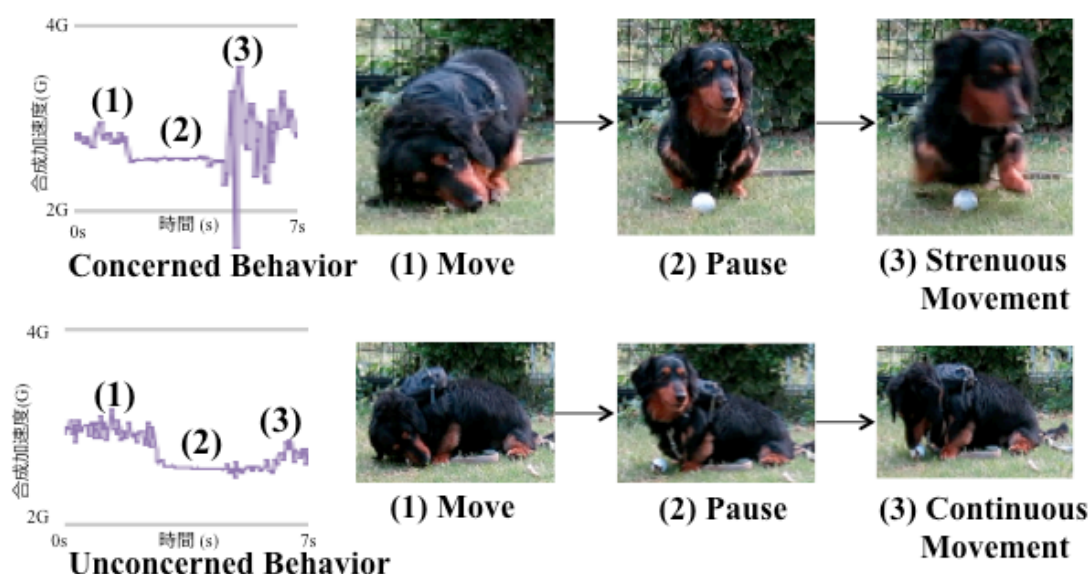


Fig. 3. 2. 2 対象個体の興味により異なる動作比較[20]

3. 2. 1. 2 WAKE 制御の引き金

以上の 3 軸加速度センサーにより行動分析から, 通信機器 Wake 制御の状態遷移図を Fig.3.2.3 に示す. この状態遷移図では, 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ている. 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

遭遇した対象個体により動作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る静止後 (認識後) の動作の違いを識別する事により, 森林地域で遭遇時における対象個体の推定を可能にさせる. つまり, 縄張り巡回時の仲間の群れに対する反応や未知の動物個体に対する反応等, 対象個体を分類した動物個体間の通信が可能となり通信の信頼性が向上することが想定される.

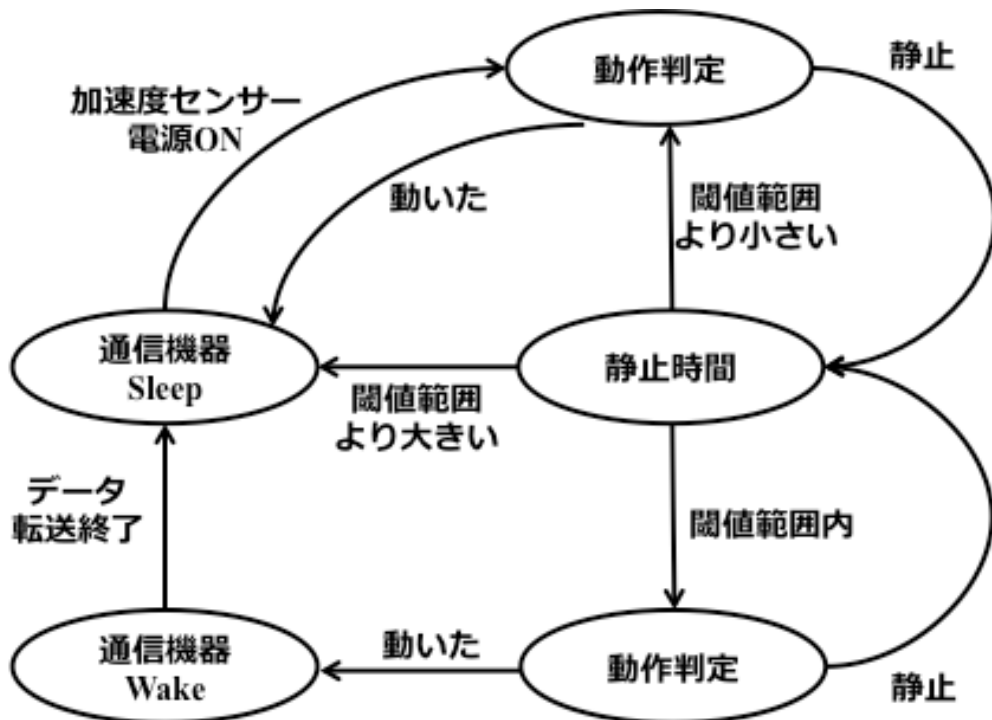


Fig. 3. 2. 3 通信機器 Wake 制御の状態遷移図[20]

3.2.1.3 WAKE 制御アルゴリズム

3 軸加速度センサーの合成加速度の特徴量を用いた通信機器 Wake 制御を実現するため、動物の習性行動に基づくアルゴリズムを開発した (Fig.3.2.4) . まず, 20Hz の頻度で 3 軸加速度センサーから各値を取得し, 3 軸加速度センサーから得られた 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.

$$\|A\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (3.2.1)$$

L2 ノルム $\|A\|$ を, 静止判定と動作判定の閾値 T_0 として定める. Fig 3.2.2 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 T_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 t 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 t と比較を行う.

$$t_0 < t < t_1 \quad (3.2.2)$$

t の静止時間判定で (3.2.2) の条件が満たされる場合, t 後の L2 ノルム $\|A\|$ と動作判定の閾値 T_0 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.

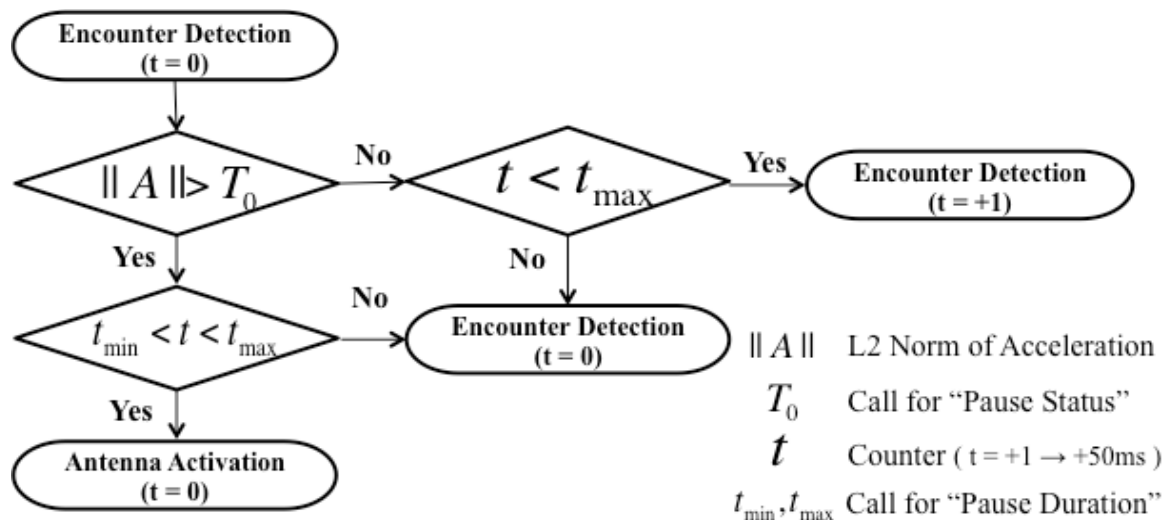


Fig. 3. 2. 4 通信機器 Wake 制御アルゴリズム[20]

3. 2. 2 実験概要

3. 2. 2. 1 装着個体の選定

野生動物に機器を装着する場合, 技術的難易度と身体サイズに関連性がある(Fig3.2.5). 野生動物に搭載可能なシステム総重量は体重の約 2%以下[26]に定められており, 例えば象などの大型野生動物では 100kg 程度のシステムが搭載可能であるが, 一方で鳥類などでは 30g 以下に制限される[26]. 本研究の提案手法の装着個体として対象とする野生動物は, アライグマを想定している(Fig.3.2.6). 環境省が発行するアライグマ防除の手引き[36]では, アライグマは環境省より 1994 年から有害鳥獣として指定され捕獲が行なわれてきたが, 2005 年より特定外来生物に指定されたので捕獲方法の幅が広がり, 戦略的な防除が計画されている. 現在, アライグマはほぼ全国に生息地を拡大しつつあり. 捕獲数は 2006 年度では 1 万頭を越えている. 一般的な野生動物の捕獲は原則的に禁止されており機器装着のハードルは高いが, 免許があればアライグマは上記の理由により捕獲が可能であり, 既に GPS ロガーを装着した先行研究は存在する[29], [43]. 以上の背景から, 動物間のマルチホップ転送方式による野生動物調査手法の機器装着対象動物として, アライグマを設定する事で実現可能性を高めている.

また, 本研究では同じ陸生哺乳類かつアライグマと似た体重や体高の特徴を持ち, 身近にいる動物であるイヌを装着個体として設定し, フィールド評価実験を実施する. アライグマの体重は 4~10kg, 体高は 23cm~30cm, 野生下での寿命は約 2-3 年が一般的であり[28], イヌは犬種によるが小型犬から中型犬の体重 6kg~24kg であり似た特徴を持っている[44]. 以

上の理由により、動物が本来備えている習性行動を利用する観点から、同じ陸生哺乳類であり身体サイズの近いイヌを利用する事は評価実験として適当であると言える。

フィールド評価実験のために実験犬(Fig.3.2.7)を5個体用意し、その特徴をTable.3.2.1に示している。フィールド評価実験の実験犬については次項以降で詳しく述べる。各実験犬における特徴として、犬種の違い、体重 5.8kg～53.0kg、体高 26cm～74cm、雄雌とそれぞれ大きな個体差が存在する。実際の森林地域での運用では複数の野生のアライグマの利用を想定しているが、既存研究ではアライグマに3軸加速度センサーを装着して動きを把握している例がなく想定範囲外の結果が発生する可能性があるため、本実験において実験犬同士の個体差を大きくして実験を行なっている。

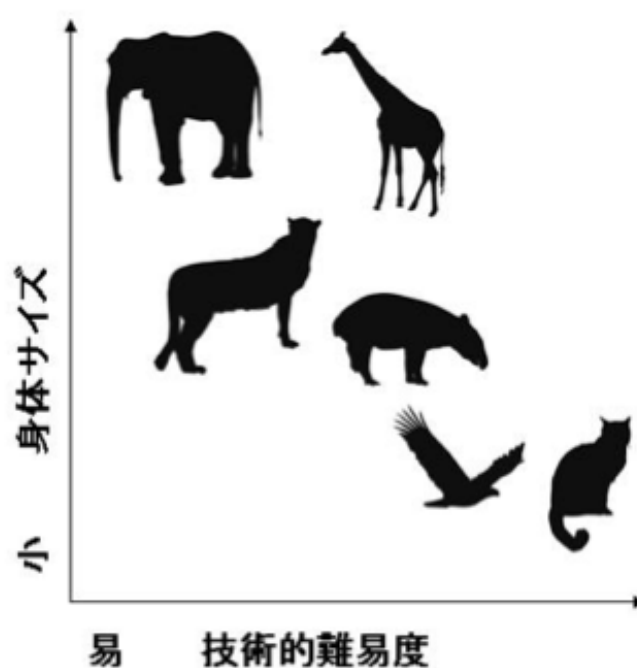


Fig. 3. 2. 5 技術的難易度, 身体サイズの関連性[26]



Fig. 3.2.6 水路を通して果樹園に進入するアライグマの群れ[45]



Dog A



Dog B



Dog C-1



Dog C-2



Dog C-3

Fig. 3.2.7 各実験犬の画像[20]

<i>No</i>	<i>A dog breed</i>	<i>Age (years)</i>	<i>Type</i>	<i>Weight (kg)</i>	<i>Withers Height (cm)</i>
A	Dachshund	9	Male	5.8	20
B	Standard Poodle	9	Male	22	60
C-1	Labrador Retriever	8	Female	24	55
C-2	Pembroke Welsh Corgi	8	Female	11.3	36
C-3	Bernese Mountain Dog	8	Male	53	74

Table. 3. 2. 1 実験犬のプロフィール[20]

3. 2. 2. 2 デバイス装着位置の検討

首輪型デバイスの装着を前提として議論を進めているが、本節では装着個体に機器を装着する際に、習性行動を安定して検知するために機器の装着位置について検討を行なう。

米澤らの Cat@Log 研究[46]では、ネコにおける機器装着位置の検討(ネコ用ウェアラブル設計)を行っている。(a)～(d)のタイプの 4 つのタイプから検討を行なっており(Fig.3.2.8), GPS の信号受信の安定性, ネコのグルーミングの習性を考慮した検討を行なっている。ネコウェアラブル設計の例からも分かるように、機器の必要要件と動物の習性行動を考慮した機器装着が必要となる。

アライグマやイヌは、ネコに比べると身体サイズが大きく体重が重いため、搭載できる機器の重量が大きくなる。また、3 軸加速度センサーの利用が必須のため、装着後の機器のずれが少なく、安定かつ持続的に合成加速度のデータを取得し続けられることが求められる。習性行動の観点では、ネコで見られるような高い塀に飛び移るような脚力はなく、基本的には地上での移動が考えられる。一方で、水辺や湿度の高い場所での生活、草むらや狭い道での移動が想定されるため、防水、耐久性を考慮しつつ、身体と機器が密着した装着が必要とされる。

以上の条件を満たす機器の装着位置は、最も適当な装着位置は Fig.3.5.4 の(d)の首輪と一体型となっている形となる。首輪と一体型の機器の装着により、上記で挙げたような激しい運動や狭い道での機器破損、習性行動に与える機器の影響などに対して、他の装着型と比較

するとそれらを最小限に抑えること出来る可能性が高い. 加えて, 人の立ち入りが難しい自然環境での長期的な野生動物調査のためには 10 年以上の機器の長期運用が求められるが, 首輪型デバイスにより上記で述べた影響を最小限に抑えることで, 機器の長期運用を実現できると考えられる.

本研究では, 首輪型デバイスではなく装着位置として背中に背負う形で実験を行なっている(Fig.3.2.9). 本研究は基礎実験の段階であるため, 3 加速度センサーの合成加速度を利用した提案手法の評価のため, 安定的かつ持続的に合成加速度データを取得し続けられることがまず必要条件となる. 以上の理由から, Fig.3.2.9 の背中に背負うリュック型を採用した.

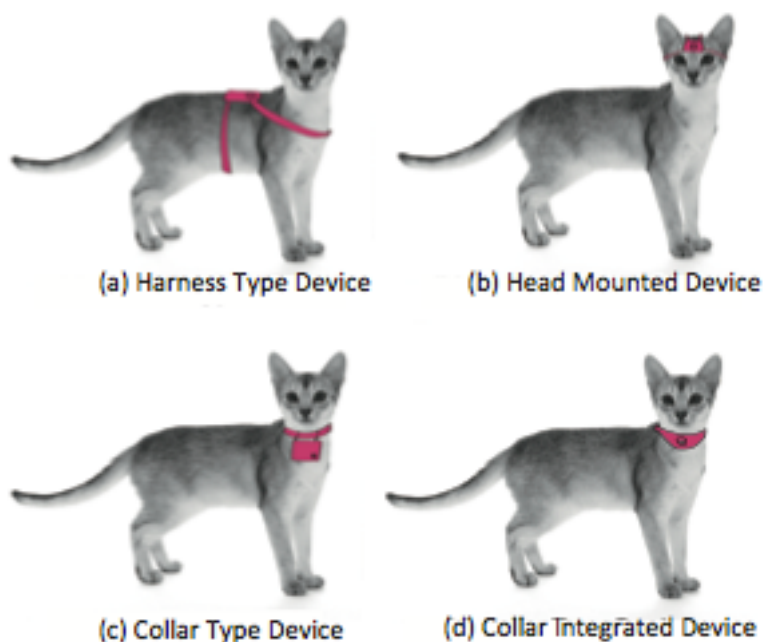


Fig. 3. 2. 8 ネコウェアラブル設計[46]



Fig. 3.2.9 Dog A の装着時の様子(リュック型)[20]

3.2.2.3 実験用デバイスの検討

これまで述べてきたように, 自然環境で野生動物にデバイスを装着する場合の使用条件は, 人間が利用する場合とは異なり特有の条件が存在する. 特に, 装着個体である野生動物のデバイス搭載容量に制限がある一方, 10 年以上の長期運用が求められることから, デバイス選定の際にも低消費電力性を考慮して検討することが重要である. また, 実験用デバイス選定においても同様のことが言える.

無線センサノードにおける加速度センサーの常時稼働に必要な電力と, センサー間通信に必要な電力では後者の方が 10~100 倍も電力消費が大きい[47]. そこで, 動物間通信の消費電力を減らすために, これまでの提案手法に加えて低消費電力性を備えた最適な通信規格・機器を選定する必要がある. 代表的な通信規格として, Bluetooth, UWB, ZigBee, Wi-Fi が挙げられる. 各通信規格のデータ転送速度, 電力消費量, 通信範囲などは, [48]で表にされておりここで引用する (Fig.3.2.10). 上記で述べた各通信規格を比較した研究[48]では, Bluetooth と ZigBee は他の通信規格と比べて約 7 分の 1 程度の低消費電力性を実現しており, 携帯端末などのバッテリー容量に制限がある場合に適していると評価されている. また, Bluetooth と ZigBee を比較した場合に, 通信範囲に大きな差が存在する. Bluetooth の通信範囲は 10m 程度だが, ZigBee の通信範囲は 10~100m 程度と Bluetooth と比べて広範囲となる. 既に述べてきたように, 森林地域などの自然環境では木々など通信遮断物が存在する可能性が高く理論値よりも通信範囲が狭くなる可能性があること, 遭遇を検知してデータ転送を行なう場合にデータ転送を継続する必要があることから, 広い通信可能範囲

をもつ通信規格が適している. 以上の理由から, ZigBee の通信規格を採用した.

3 軸加速度センサーと動物間通信で ZigBee を使用するために, Arduino UNO R3 を基盤機器として使用している(Fig.3.2.11). Arduino[49]は世界的に普及していて価格面の購入ハードルが低いマイクロコントローラー(マイコン)であり, 多種多様なセンサー(3 軸加速度センサーや温度センサー, 湿度センサー, マイクロフォンなど)に対する拡張性が高く, ZigBee 規格である XBee が利用し易い観点から採用した. また加速度センサーは Arduino のシリーズである Lily Pad の 3 軸加速度センサー(ADXL335)を使用している. 通信機器は既に述べた通り ZigBee 規格の XBee を Arduino の専用シールドに搭載して使用している. 3 軸加速度センサーのログデータ, 動物間通信での送受信データは専用シールドに搭載されている Micro SD にてデータを保存している. また, 動物間通信におけるデータ送受信と習性行動の正確な評価を行なうために, 時刻の誤差を減らし計測する事が可能なリアルタイムクロック(DS1307)を使用している. 電源として, Sony 製の 9V 角形アルカリ乾電池を使用している. これらの機器をそれぞれ 5 台ずつ用意し各リュックに搭載した(Fig.3.2.12). これらのデバイス総重量は 250g であり, 各実験犬の体重の 4-5%以下となるため動物倫理の観点から規定内に収まっており [27], [46], 動物の習性行動に装着機器による影響を与えない. また, アライグマの体重は 4~10 キロ程度と言われているので, 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. 本研究の実験では, 実際の装着個体の習性行動と通信機器 Wake アルゴリズムの評価のために Canon Power Shot SX200 IS を使用して各装着個体のビデオ撮影を行う.

Standard	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi
IEEE spec.	802.15.1	802.15.3a *	802.15.4	802.11a/b/g
Frequency band	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	868/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz
Max signal rate	1 Mb/s	110 Mb/s	250 Kb/s	54 Mb/s
Nominal range	10 m	10 m	10 - 100 m	100 m
Nominal TX power	0 - 10 dBm	-41.3 dBm/MHz	(-25) - 0 dBm	15 - 20 dBm
Number of RF channels	79	(1-15)	1/10; 16	14 (2.4 GHz)
Channel bandwidth	1 MHz	500 MHz - 7.5 GHz	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	22 MHz
Modulation type	GFSK	BPSK, QPSK	BPSK (+ ASK), O-QPSK	BPSK, QPSK COFDM, CCK, M-QAM
Spreading	FHSS	DS-UWB, MB-OFDM	DSSS	DSSS, CCK, OFDM
Coexistence mechanism	Adaptive freq. hopping	Adaptive freq. hopping	Dynamic freq. selection	Dynamic freq. selection, transmit power control (802.11h)
Basic cell	Piconet	Piconet	Star	BSS
Extension of the basic cell	Scatternet	Peer-to-peer	Cluster tree, Mesh	ESS
Max number of cell nodes	8	8	> 65000	2007
Encryption	ED stream cipher	AES block cipher (CTR, counter mode)	AES block cipher (CTR, counter mode)	RC4 stream cipher (WEP), AES block cipher
Authentication	Shared secret	CBC-MAC (CCM)	CBC-MAC (ext. of CCM)	WPA2 (802.11i)
Data protection	16-bit CRC	32-bit CRC	16-bit CRC	32-bit CRC

Fig. 3. 2. 10 Bluetooth, UWB, ZigBee, Wi-Fi の機能比較 [48]

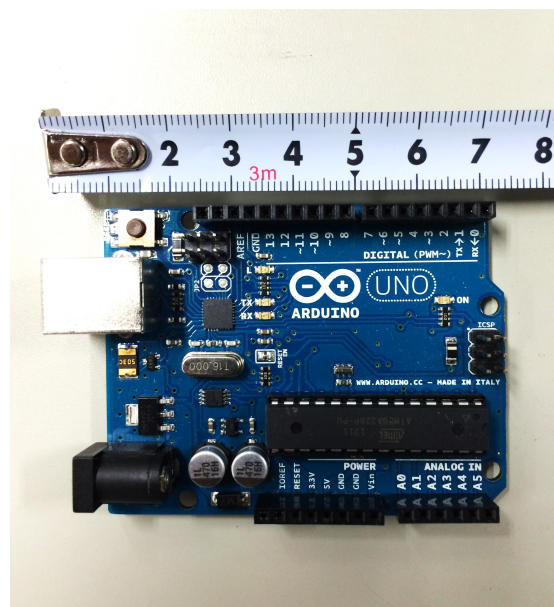


Fig. 3. 2. 11 Arduino UNO R3[20]

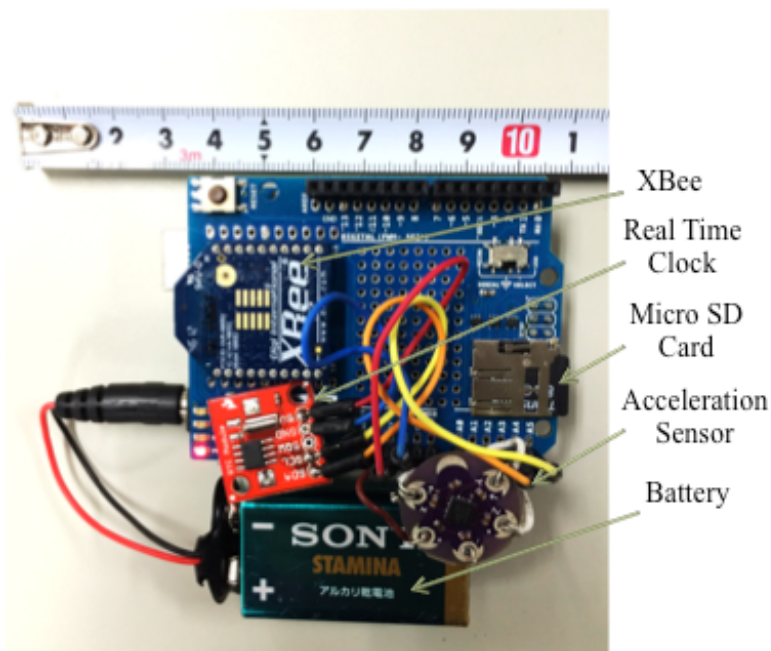


Fig. 3. 2. 12 実験で使用するデバイス群[20]

3. 2. 2. 4 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの実験概要

本項では、通信機器 Wake 制御アルゴリズムの有効性を検証するため、Table.3.2.1 の Dog A を用いた実験の概要について述べていく。

自然環境での野生動物に近い状態を再現するため、周辺環境が森林である $3\text{m} \times 3\text{m}$ の芝生で装着個体 Dog A(以下, Dog A)が自由に動ける状態で実験を行う(Fig.3.2.13). 通信機器 Wake 制御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 Dog A 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 Dog A の近くに投げる実験を行う。対象の個体がボールやイヌであった場合でも、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、通信機器 Wake 制御の有効性について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、本実験を 30 秒毎に 1 回、1 セット 3 分 \times 5 回行う(合計 30 回)。回転籠法による動物行動の観測[50]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。

実験中はビデオカメラを三脚で固定し、動画撮影により Dog A の認識行動と 3 軸加速度センサーの特徴量の正確な把握を試みる。また、本実験では静止時間の閾値を $1.0\text{s} < t < 10.0\text{s}$ と設定して評価を行う。静止と動作判定に用いる 3 軸加速度センサーの合成加速度

の閾値を 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 に設定してフィールド評価実験を行い, 各閾値における再現率と適合率から最適な閾値を評価する.

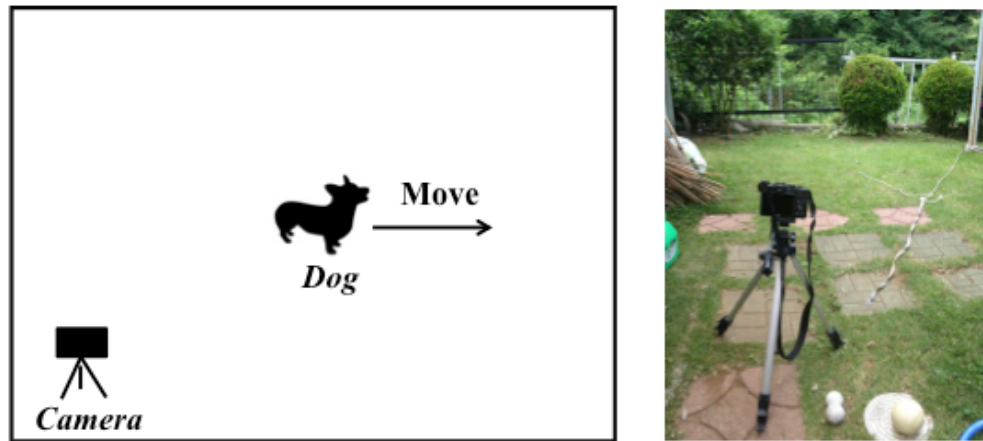


Fig. 3.2.13 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの実験環境[20]

3.2.3 結果と考察

3.2.3.1 フィールド評価実験に関する考察

本実験では, 装着個体の習性行動を引き出すための実験環境として屋外を選択している. これまでの動物行動学分野では, 動物の行動解析を行うために[50][51]のような屋内の特殊環境での実験方法が一般的であった. しかし, 本実験の目的では人の立ち入りが困難な自然環境での野生動物調査のための手法として, 装着個体の習性行動をアルゴリズムに取り入れる背景から, 出来るだけ想定環境における習性行動の再現性が要求される. そのため, 実験では屋外かつ周辺が森林近くである場(Fig 3.2.13)を選ぶことにより, 想定される自然環境に近い環境を再現した. 実際, 実験中に装着個体が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. 装着個体の習性行動を手法の一部として利用する場合, 自然環境で行われている普段の習性行動を把握する必要がある. そのため, 装着個体の習性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.

3.2.3.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの結果

本項では, 通信機器 Wake 制御アルゴリズム(以下, W アルゴリズム)のフィールド評価実験の結果について述べる. Table 3.2.2 は閾値毎の実験結果であり, 再現率(実験中にボールの投げた全回数の内, W アルゴリズムにより習性行動の検出に成功した割合)と適合率(実験

中に W アルゴリズムにより習性行動を検出した全回数の内, ボールに対する習性行動を検出した回数の割合)を示している。

まず, 再現率については, 合成加速度の閾値(静止状態の判定)が 0.2 のときボールの検出成功率は約 89%であり 70%を越えていることから, 高い再現性があると言える[42]. 他の成功率を評価すると, 合成加速度の閾値(静止状態の判定)が高いほど検出成功率は上昇するが, 閾値が高くなるにつれて静止時間も長くなり, ボールに反応して Dog A が静止状態になった場合でも, W アルゴリズムでは静止時間が 10.0s を越えたために検出に失敗する場合がみられた。

Table 3.2.2 の適合率について, 閾値 0.03 が 27.8%であり他の閾値の実験結果と比較して最も適合率が高いことが分かる. 合成加速度の閾値(静止状態の判定)が高いほど, 全体の検出回数が増加していることから割合に換算すると誤り検出の割合が増えており, 閾値 0.03 と閾値 0.3 を比較すると適合率が約 9.3%低下していることが分かる。

Threshold for Synthetic Acceleration	Recall for Detecting Balls (再現率)	Precision for Detecting Balls (適合率)
≤ 0.03	43%	27.8%
≤ 0.05	64%	26.8%
≤ 0.1	57%	20%
≤ 0.2	89%	21%
≤ 0.3	82%	18.5%

Table 3.2.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの実験結果 (合計 15 分で 30 回)[20]

3.2.3.3 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの考察

本項では, これまで述べてきた通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価実験と 3.4 遭遇履歴を用いたデータ転送の評価実験における通信機器 Wake 制御アルゴリズム実験結果を基に, 装着個体の習性行動の再現性や各合成加速度の閾値について具体的な考察を行なっていく。

これまで述べたように, 実験犬の実験環境の学習により, 視覚的に判断出来る装着個体の習性行動が変化していった。しかし, 実験から得られたデータでは通信機器 Wake 制御アル

ゴリズムにより約 70%以上の信頼性の高い再現性が示されている。理由として、視覚的に判断出来ない細かな習性行動を 3 軸加速度センサーにより取得し、アルゴリズムで検知している可能性がある。これまでの動物行動学分野ではビデオ動画との比較が評価方法として用いられてきた[52]が、視覚的には捉えきれない動きを 3 軸加速度センサーと通信機器を用いる事で把握することが可能となり、実験動物の習性行動の評価のための新たな基準としての利用価値があると考えられる。

装着個体の習性行動の再現性に関して、自由に動ける環境と紐などで繋ぎ動きに制限を加えている場合とでは習性行動の再現性に差異が存在する。3.2 では自由に動き回れる環境で実験を行っており、装着個体である実験犬が本来持っている習性行動の再現性を評価する手法として望ましい。一方、3.4 の遭遇履歴を用いたデータ転送の実験では、調査員が装着個体をリードで動きや距離に制限を与えた状態で実験を行っているため、装着個体が本来持つ習性行動を正確に評価するには十分とは言えない。本研究におけるフィールド評価実験では、装着個体が自由に動き回れる状態の実験(3.2)は制限を与えた状態での実験(3.4)と比較して約 19%以上再現率が高く(Table.3.2.2)、実験環境が実験犬の習性行動の再現性に影響を与える可能性があるといえる。複数の実験犬を用いた実験の改善策として、例えばドッグランを利用して実験を行なう事で、イヌ本来が持つ習性行動の評価を行なう事が可能になると考えられる。

本実験では、静止・動作判定と静止時間をそれぞれ事前に設定して行なっている。静止時間の閾値は、3.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価実験と 3.4 遭遇履歴を用いたデータ転送の評価実験で $1.0s < t < 10.0s$ に設定している。この値は、これまで述べてきたように先行研究において十分な知見がなく、Dog A が他の個体と遭遇した際に静止していた時間を視覚的に判断して計測し設定している。本研究では静止時間の閾値に関して評価実験を行っていないが、今後の最適値のための議論が必要となると言える。

3.4 遭遇履歴を用いたデータ転送の評価実験においては、Dog A の実験で得られた結果から合成加速度の閾値を 0.2 と設定している。3.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの実験では動作判定の合成加速度の閾値を、0.3, 0.2, 0.1, 0.05, 0.03 の 5 種類に分けて評価を行っており、それらの実験結果から最適な閾値を決定している。また、3.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価実験で得られた Dog A の最適な合成加速度の閾値としえ 0.2 が得られたことから、個体差がある実験犬の Dog B, Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3 においても同じ閾値を設定している。しかし、最適な通信機器 Wake 制御を考慮すると、装着個体毎に、種、大きさ、体重、性別などに基づく通信機器 Wake 制御アルゴリズムの最適な閾値を得るための予備実験の評価を行なうことが必要であると考えられる。

3.3 威嚇行動時の通信機器 Wake 制御アルゴリズム

本節では, 集団行動時における威嚇行動の特徴量を利用した, 効率的な通信機器 Wake 制御アルゴリズム手法について述べる.

3.3.1 提案手法

3.3.1.1 空間・時間変化に応じた動的なアルゴリズムの必要性

3.2 では, 3 軸加速度センサーによる合成加速度を用いた通信機器 Wake 制御アルゴリズム(以下, W アルゴリズム)により装着個体間の遭遇を検知し, 低消費電力を実現する仕組みを提案している. また, W アルゴリズムによる実験犬を用いた装着個体間の W アルゴリズム評価実験から, 約 70%の確率で通信が可能であると述べられている. W アルゴリズムでは静止・動作判定に合成加速度の閾値 0.2 G , 個体の静止判定の閾値には $1\text{ s} < t < 10\text{ s}$ 時間枠を用いている.

これらの閾値は一定の通信成功率は実現できるものの, 警戒行動や集団行動を考慮した場合にまだ十分に検討されているとは言えない. なぜなら, 他の装着個体との遭遇状況によって個体の振る舞いは変化すると考えられ, また, 野生動物の種や装着個体の体格, 年齢, 性別, 性格などにより, 最適な閾値は大きく異なる可能性が考えられる. 実際, W アルゴリズムの実験結果の考察で言及されているように, 装着個体である実験犬の 4 個体においても通信機器 Wake の頻度に個体差があることが確認できている. 特に, 装着個体の体高とサンプリングレートに相関関係があり, 装着個体の体高に基づいた, 動作判定のための合成加速度の閾値と静止判定のための静止時間の閾値の最適化が必要である.

しかし, 実際の自然環境で捕獲・放獣プロセスにおいて, 首輪型デバイスを装着させて放獣する際に, 体高に合わせた閾値の最適化とその設定は難しく, また体高だけを考慮するのでは十分とは言えない. なぜなら, 各装着個体の体高を事前に調べる必要があるため, 装着個体数を増やした場合には準備作業の手間が増える. また, 装着個体毎に閾値を設定することは, 現地調査員にとって作業難易度は上がるため現実的な方法とは言えない. また, 装着個体間の遭遇において, 縄張りの侵入者に対する威嚇行動や群れの仲間との遭遇などに応じて習性行動の特徴量には差がある. 提案手法である W アルゴリズムでは装着個体間の遭遇において具体的な遭遇の定義がないため, 遭遇の種類毎に対する最適化は十分に検討されているとは言えない.

一方, 本研究は 10 年以上の長期的な野生動物調査を前提としていることから, 装着デバ

イスは 10 年以上の長期的な稼働が必要となる。その点を考慮すると、例えば、放獣後の時間経過に伴う装着個体の加齢によって体力、筋力などが低下するため、W アルゴリズムで使用する習性行動の特徴量にも影響があると考えられる。以上で述べたように、W アルゴリズムの最適な閾値設定のためには、特定の閾値を設定するのではなく空間的・時間的な変化に対応した動的アルゴリズムが求められる。

3.3.1.2 威嚇行動時の通信機器 Wake 制御アルゴリズム

本研究では、空間的・時間的な変化に対応した動的 W アルゴリズム研究のための準備段階として、威嚇行動時において 3 軸加速度センサーの合成加速度から威嚇行動の特徴量を検出し、威嚇行動時における通信機器 Wake 制御を最適化する手法を提案する。威嚇行動の検出に最適化した通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより、威嚇行動時の通信機器 Wake 制御の検出可能性を高めることで、動物間通信機能を向上させる。具体的に提案するアルゴリズムは下記となる。

$$\begin{aligned} & \text{if}(\Delta G > G') \\ & \{ \text{Call for pause: } 0.1 \text{ s} < t < 1.0 \text{ s} \} \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

G' は威嚇行動を判定する動作判定の閾値であり、20Hz 毎に取得する合成加速度から威嚇行動時を判定する仕組みを W アルゴリズムに追加する想定である。 G' から威嚇行動を判定した場合、アルゴリズムは「威嚇行動アルゴリズム」に遷移する(Fig.3.3.1)。威嚇行動アルゴリズムでは、静止時間は $0.1\text{s} < t < 1.0\text{s}$ と既存アルゴリズムよりも静止時間の判定時間を1/10倍としている。Fig.3.3.2 はドッグランにいる 4 匹の実験犬の警戒行動時の様子とその際の合成加速度の特徴量を表したグラフである。Fig.3.3.2 では、ネットで囲まれたドッグランの周囲を調査員が横切る際、①実験犬が調査員の存在を認識すると警戒行動に移り、②各実験犬は走って調査員に近づき、吠える、飛ぶなど威嚇行動に移ったことで、平常時と比較して動作が激しいことが画像と合成加速度の特徴量から判別することが可能である。また、③から調査員に対する威嚇行動が継続していることが分かる。つまり、威嚇行動時の激しい動作に応じてサンプリングレートを最適化するため、平常時とサンプリングレートを明確に分けるため 1/10 倍としている。また、Fig.3.3.2 の③より威嚇行動は継続して行われる特徴があることから、本アルゴリズムにより効率よく遭遇検出することが出来れば、装着個体間でより多くのデータ量を転送することが可能である。

動物間マルチホップ転送方式に野生動物調査手法で課題であった「低消費電力」解決のために、通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる動物間通信機能の省電力化を行っている。

本研究では, AMUSystem の機能の一つである通信機器 Wake 制御アルゴリズムを改良することにより, 動物間マルチホップ転送方式に野生動物調査手法の実現可能性を高めることが目的である.

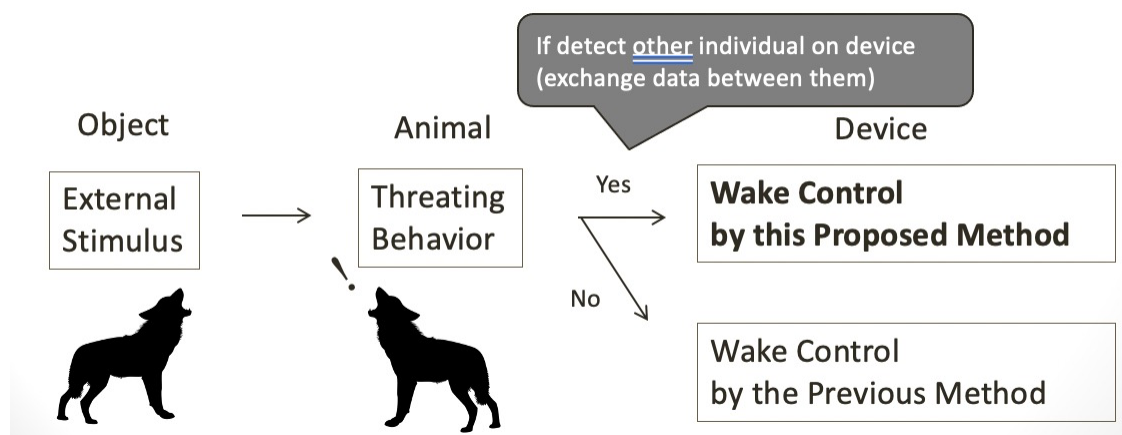


Fig. 3. 3. 1 威嚇行動検出時のアルゴリズム遷移イメージ

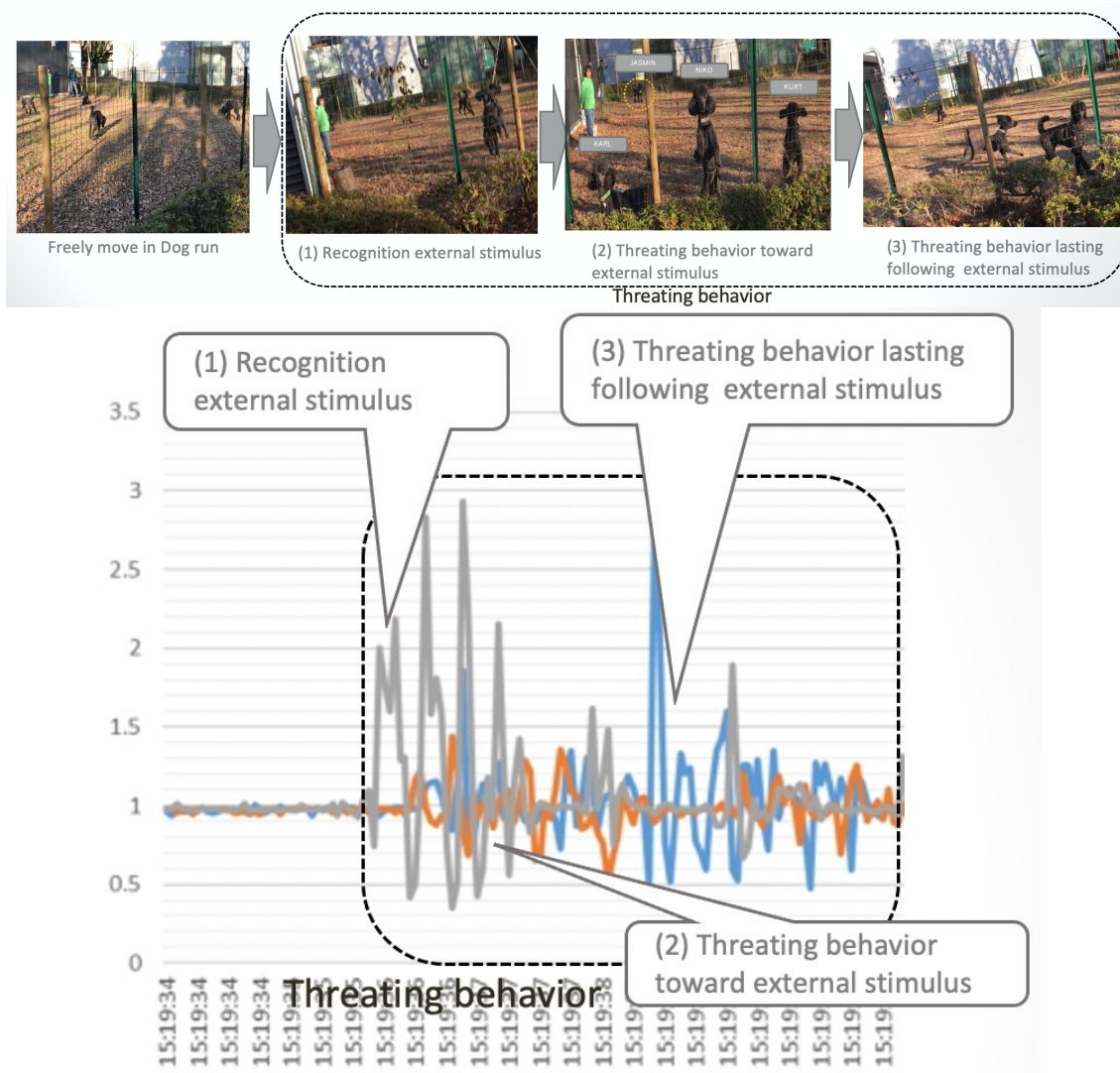


Fig. 3.3.2 威嚇行動検出時の習性行動と合成加速度の特徴量

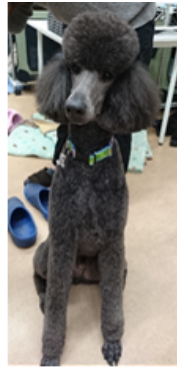
3.3.2 実験概要

3.3.2.1 装着個体の選定

威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムの評価のために、麻布大学伴侶動物研究室の協力の下、4 個体のスタンダードプードルを実験犬(Fig.3.3.3)として評価実験を行う。フィールド評価実験のために犬を選定している理由については、3.2.2.1 について述べたので省略する。



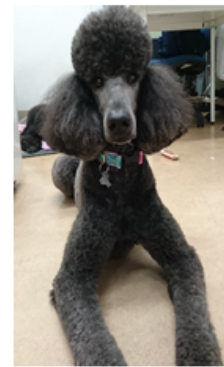
1.KURT



2.KARL



3.JASMINE



4.NIKO

No.	Name	Dog Breed	Age (years)	Type	Weight (kg)	Height (cm)
1	KURT	Standard Poodle	3	Male	24	65
2	KARL	Standard Poodle	3	Male	22	63
3	JASMINE	Standard Poodle	9	Female	23	60
4	NIKO	Standard Poodle	3	Female	21	60

Fig. 3.3.3 実験犬のプロフィール

3.3.2.2 デバイス装着位置の検討

本フィールド実験のために、背中に背負うリュック型を採用して各実験犬に装着を試みた(Fig.3.3.4) デバイス装着位置の検討については、3.2.2.2 で述べているのでここでは省略する。



Fig. 3.3.4 デバイス装着状態の実験犬

3.3.2.3 実験用デバイスの検討

MSR Electronics 社の加速度センサー(MSR145 データロガー[53])を選定し, 実験犬に装着してフィールド評価実験を実施した. MSR145 データロガーは電池と加速度センサーが一体型のデータロガーであり, 重量は 23g[54]と 3.2.2.3 と比較して軽量の重量となっている. 実験用デバイスの検討の観点は, 3.2.2.3 で述べたので省略する.

3.3.2.4 威嚇行動時の WAKE 制御アルゴリズムの実験概要

本研究では, 空間的・時間的な変化に対応した通信機器 Wake 制御のための動的アルゴリズム研究のための準備段階として, 威嚇行動時において 3 軸加速度センサーの合成加速度から威嚇行動の特徴量を検出し, 威嚇行動時における通信機器 Wake 制御を最適化する方法を提案した. 威嚇行動の検出に最適化した通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより, 威嚇行動時の通信機器 Wake 制御の検出可能性を高めることで, 動物間通信機能を向上させることが目的である.

MSR Electronics 社の加速度センサー(MSR145 データロガー[53])を各 4 個体に装着し, 威嚇行動時の正確なデータを取得するため, 3.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムのフィールド実験では実験犬にリードを付けていたのに対し, 本フィールド実験では屋外のドッグランにてリードを付けずに自由に動き回れる状態としている. また, 装着個体である 4 個体は Jasmine を母親とする親子関係であり, 群行動をしている状態を模擬している. 群行動時では, 侵入者に対する威嚇行動が引き出されやすいためである. 獣医学研究者の協力の下, ネットで囲まれたドッグランの前を見知らぬ人が通過するシナリオを設定した. その際に生じる装着個体の威嚇行動により通信機器 Wake が発生し, 装着個体間で動物間通信が行われる設定とした. 評価実験は 20 秒 × 2 回を実施し, 各回では合成加速度データと習性行動の特徴量を評価するためビデオカメラで撮影を行う.

本フィールド実験における MSR145 データロガーのサンプリングレートは, 3.2 の実験と同様に 20Hz とした. 本フィールド実験で用いる評価方法は, 3.2 で用いた評価方法とは前提条件が異なる. 3.2 では, 実験犬にボールを認識させて投げた際の動画を元に, 実際に生じた習性行動と合成加速度の特徴量を比較して通信機器 Wake の成功率を評価している. 本フィールド実験では, 威嚇行動アルゴリズム遷移後の威嚇行動時の通信機器 Wake アルゴリズムの評価に着目しているため, 実験開始時を通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより遭遇を検知し, 威嚇行動アルゴリズムに遷移した時点とする. 従って, 実験開始から約 20 秒間は威嚇行動アルゴリズムが作動し, 他の装着個体と威嚇行動が継続して行われると仮定し, 1 回の遭遇に対する各アルゴリズムの通信機器 Wake 回数を評価する.

本フィールド実験では, 威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムとして最適な動作判定の

閾値を得るために、式 3.3.1 の動作判定の合成加速度の閾値 $G' = 1.2, 1.0, 0.8, 0.4$ で設定し、通信機器 Wake 回数が最も多い効率的な合成加速度の閾値 G' を明らかにする。

3.2.3 結果と考察

3.2.3.1 フィールド評価実験に関する考察

フィールド評価実験に関する考察として、まず装着個体のデバイス装着の課題について述べる。詳細は後述するが本実験結果においては実験犬の 4 個体に加速度センサーのデータロガーを装着したが、1 個体は機器エラーによりデータを取得出来ず、データ回収が出来た個体は 3 個体であった。本実験結果のように、人間以外の動物にウェアラブルデバイスを装着させて評価実験を行う場合、機器エラーによってデータ取得が出来ない場合がある。実際に、3.4 遭遇履歴を用いたデータ転送の実験の予備実験においても、装着個体からデバイスを回収してデータを確認したところ、ログの書き込みにエラーが発生してデータが保存されていないケースが見られた。また、山崎らの研究[29]では、アライグマの行動追跡のために複数の捕獲したアライグマに携帯電話 GPS 端末を装着して実験を試みているが、アライグマに装着した首輪型デバイスを回収したところ、一部の首輪型デバイスの内部に結露が認められている。

上記の結果から、人間以外の動物に首輪型デバイスなどのウェアラブルデバイスを装着して実験する場合、装着機器の耐久性は考慮する必要がある。特に、小型の加速度センサーなどは基本的には人間の装着を想定しており、想定を超える激しい動作、障害物に対する衝突等の外部の圧力、高温、低温、高湿度など、機器使用上の環境要件を満たしていない場合がある。また、装着状態で誤って電源ボタンが押されてしまうなど、機器のユーザーインターフェースについても考慮する必要がある。これらの要件は実際の自然環境における長期的な野生動物調査のために必要となる要件であるが、本研究のようなフィールド評価実験においても研究結果から必要であることが分かる。

3.2.3.2 威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムの結果

本項では、威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムのフィールド評価実験の結果について述べる。威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムとして最適な動作判定の閾値を得るために、威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムに遷移したと仮定し、式 3.3.1 の動作判定の合成加速度の閾値 $G' = 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4$ の各閾値において、通信機器 Wake 回数が最も多い効率的な合成加速度の閾値 G' を評価した。

まず、提案手法の動作判定の合成加速度の閾値 $G' = 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4$ の場合で静止時間

は $0.1s < t < 1.0s$ としたときに、各合成加速度の閾値で通信機器 Wake 回数を評価した結果、閾値 $G' = 0.4$ と設定した場合は 3.2 で提案した通信機器 Wake アルゴリズム(以下, W アルゴリズム)と比較して 11.25 倍多いことが分かった(Fig.3.3.5). また, その他の閾値 $G' = 1.2, 1.0, 0.8, 0.6$ においても W アルゴリズムよりも 通信機器 Wake 回数が多いことが分かる. 従って, 他の装着個体に遭遇後の威嚇行動時の通信機器 Wake は, W アルゴリズムよりも提案手法である威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムの方が効率的に検出できると言える.

また, Fig.3.3.6 では評価実験中の各装着個体の威嚇行動の遷移を示している. KURT, KARL, JASMINE に装着した加速度センサーである MSR145 データロガーから合成加速度データを取得することが出来たが, NIKO からは機器エラーによりデータを取得出来なかった. 従って, この 3 個体のデータから各動作判定の閾値に基づいて通信機器 Wake 回数の評価を行った.

以上のフィールド実験結果より, 威嚇行動時の通信機器 Wake 回数が最も多い効率的な合成加速度の閾値 G' を明らかになった. 従って, 本研究では AMUSystem の機能の一つである通信機器 Wake 制御アルゴリズムを改良できたことにより, 動物間マルチホップ転送方式に野生動物調査手法の実現可能性を高めることができた.

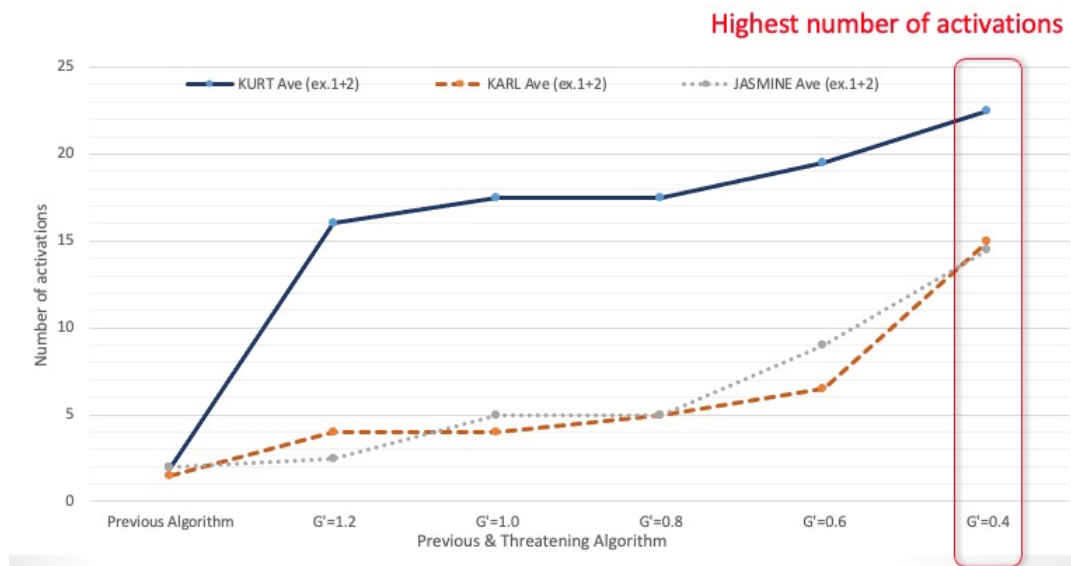


Fig. 3. 3. 5 実験結果 (number of activations vs. each algorithm)



Fig. 3.3.6 威嚇行動の遷移

3.2.3.3 威嚇行動時の Wake 制御アルゴリズムの考察

本実験結果から、威嚇行動時の通信機器 Wake 回数が最も多い効率的な合成加速度の閾値 G' を明らかにした。

次に、動物間通信機能のスループット向上の可能性について考察する。本実験結果から、威嚇行動時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより威嚇行動時における検知の成功率を向上させたことで、無線 LAN の汎用技術である効率的なスループット改善機能を動物間通信機能に組み込む検討可能となる。例えば、現在の無線 LAN 技術においては、基地局との通信は半二重通信により行われるため、通信が完了して次の通信開始までの待ち時間が発生し、スループットを低下させる要因と言われている。IEEE 802.11n/ac では、待ち時間を可能な限り短縮し、データ転送性能を向上させるために、A-MPDU と呼ばれるフレームアグリゲーション方式を実装している[55]。[55]では、基地局から送信される大量のデータをつなぎ、クライアント側で大量のデータを 1 つのフレームで受信するため、通信のたびにキャリアセンスや確認応答(ACK)などのヘッダが不要となる。これにより、データ転送全体のオーバーヘッドが削減され、より効率的なデータ転送が可能となる。

後述する 3.4 の遭遇履歴を用いたデータ転送手法では、装着個体間通信のデータ送受信において、Preamble と ACK により送受信の順序判定を行い、装着個体間の双方向通信を試みている。しかし、3.4 ではデータ転送時のスループットの向上については十分に検討されていない。3.3 威嚇行動時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの実験結果から、遭遇パターンを威嚇行動のみに絞り込み遭遇検出を最適化したことで、遭遇検出率を 10 倍以上に向上させた。また、通信機器 Wake 制御アルゴリズムの静止時間を従来の 10 分の 1 に短縮したことで、遭遇時に通信機器 Wake 制御が遭遇を検知するまでの時間が改善された。

従って、遭遇時に早く遭遇検知が行えることにより、遭遇検知からデータ転送可能な時間が長くなる。つまり、[55]の先行技術のようなフレームアグリゲーション方式を用いることが出来るようになるため、装着個体間通信時のスループット向上が期待できる。

3.4 遭遇履歴を用いたデータ転送

本節では、通信機器 Wake 後の装着個体間通信におけるデータ転送のために、遭遇履歴を利用したデータ送受信の手法について述べていく[20]。

3.4.1 提案手法

3.4.1.1 同期・非同期スケジューリング手法の概要

提案手法である通信機器の Wake 後におけるデータ送受信について述べるため、準備として同期・非同期スケジューリング手法の概要について説明を行なう。

近年、情報通信学分野では、ワイヤレスセンサネットワークと呼ばれる無線センサーを無線ネットワークに接続して協調させる事で、空間制御から環境情報の取得、人の流れの把握等の研究が盛んに行なわれている。ワイヤレスセンサネットワークの分野では、小型センサーを大量に使用するため、バッテリーの容量の制限やメンテナンスコストの削減等の理由から低消費電力の動作の考慮が重要な課題として認識されている[56]。低消費電力を実現させるために、IEEE が定める OSI 参照モデルの MAC 層での通信制御が注目されており、ノード同士の無駄な通信時間を減らすために以下のデータ送受信の手法が研究されている。

- スケジューリングの同期によるデータ送受信

各ノードがデータ送受信のためのスケジュールを保持している。定期的にノード同士がスケジュール同期を行なう事で、ノード間のデータ送受信のタイミングを維持し、信機器の Sleep 時間を延ばす事で省電力性を実現している。既存プロトコルとしては、S-MAC[57]や T-MAC[58]が挙げられる。RTS/CTS と呼ばれる、データ送受信の前に送信側ノードが送信要求を受信側ノードに送り、データ送受信のタイミングを調整してデータ転送を実現させている(Fig.3.4.1)。

- スケジューリングの非同期によるデータ送受信

各ノードはデータ送受信のためのスケジュールを保持していない。代表的なプロトコルでは B-MAC[59]が挙げられ、送信側がデータ送信前に Preamble と呼ばれるデータフレ

ームのヘッダを送信し, 受信側ノードは **Preamble** を検知した場合にその後送られてくるデータ受信を行う. 受信側ノードは **Clear Channel Assessment** と呼ばれる **Preamble** 検知を定期的に行い, 通信機器の **Sleep** 時間を延ばす事で省電力性を実現している (Fig.3.4.2).

第 1 章で述べたメッセージフェリー方式を用いた野生動物調査の研究例[34]では, スケジューリングの同期によって無線センサー同士のデータ送受信, 無線センサーと中継ノード間のデータ送受信を行い, 低消費電力のデータ転送の実現を試みている.

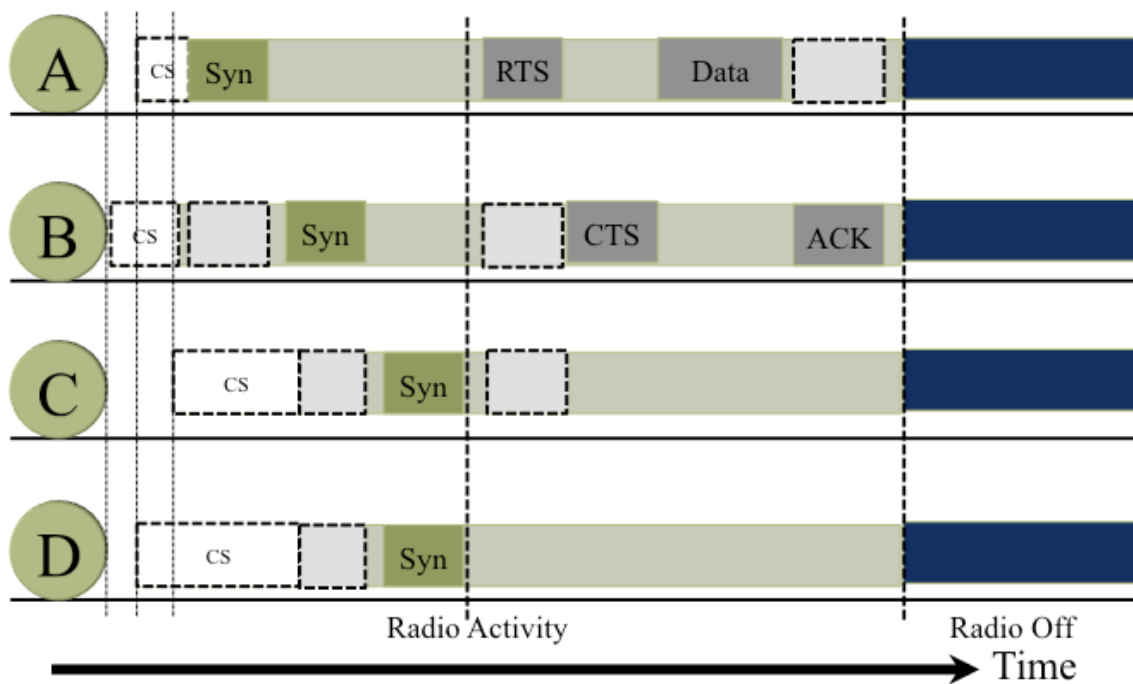


Fig. 3. 4. 1 スケジューリングの同期によるデータ送受信例(S-MAC)[20]

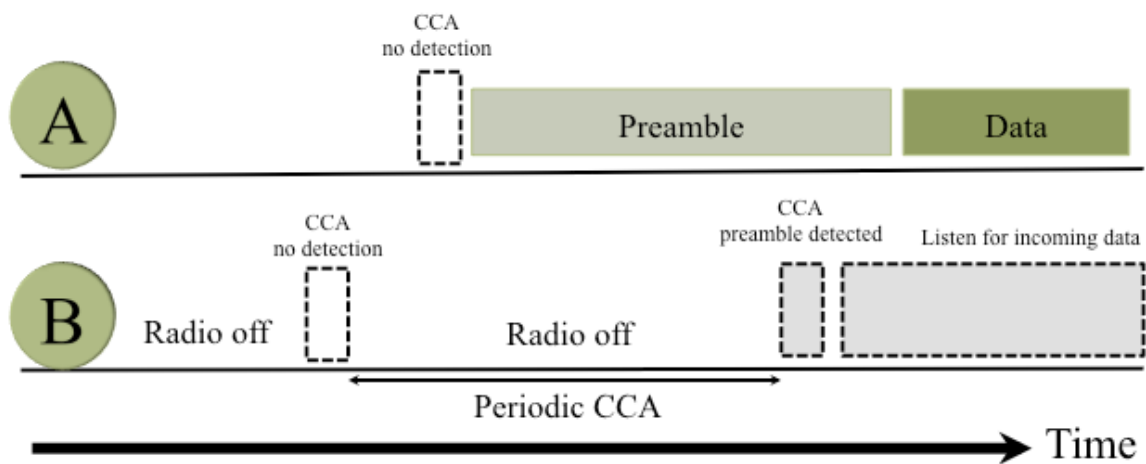


Fig. 3. 4. 2 スケジューリングの非同期によるデータ送受信例(B-MAC)[20]

3. 4. 1. 2 非同期スケジューリング手法によるデータ送受信

次に、3.2 で述べた通信機器 Wake 制御アルゴリズム(Fig.2.2.1)を用いて、通信機器 Wake 後にデータ転送を実現するためには、以下の技術要件が求められる。

- 通信機器 Wake タイミングのずれの考慮(装着個体間の習性行動のタイミングの違い)

による)

- 送信側と受信側の順序決定(データ送受信における)
- データ転送の継続性

装着個体間の遭遇時、習性行動の発生タイミングが異なることで通信機器 Wake のタイミングは装着個体により異なり、ずれが生じる可能性がある。そのため、ずれが生じた場合にそのずれを補完しデータ転送を行なう手法が必要である。動物間マルチホップ転送方式による環境調査手法では、装着個体間でお互いの保持データの転送(コピー)を行なうことが求められる。それゆえに、各装着個体はデータ送信側と受信側の両方の役割を担うため、装着個体間でその順序を決定しなければデータ転送を行なう事はできない。また、装着個体同士の遭遇は偶発的でその回数は限られているため、遭遇機会を検知した際にデータ送受信が高確率で成功することは重要である。首輪型デバイスの装着対象とする野生動物により異なるが、例えばアライグマでは通年活動として縄張りの巡回、捕食活動、繁殖活動等が想定されるため、最低でも年 1 回以上の他の動物個体(野生動物個体または装着個体)との遭遇機会が考えられる[6]。限られた遭遇機会を最大限生かすために、他個体との遭遇した場合は確実にデータ送受信を行ない、かつ通信範囲外になるまで単独行動でセンシングした環境情報の保持データを動物間で転送し続けることが求められる。

以上の条件を達成するため、装着個体同士の接触時(すれ違い)の習性行動を利用したデータ送受信では、スケジューリングの非同期手法を用いて、低消費電力なデータ転送を実現する(Fig.2.2.2)。通信機器 Wake のずれを考慮するため、各装着個体はデータ送信前に Preamble を送信することで、装着個体間の習性行動の違いの調整を行なうことが可能である。動物間での送信側と受信側の順序決定方法として、データ送信側が Preamble 送信後、データ受信側から返答(ACK)がない場合はデータ受信側に役割を変えて一定時間 Preamble の検知(Carrier Sense)を試みる。データ受信側の Carrier Sense で Preamble を検知した場合、データ送信側に ACK を返してデータの受信を開始する。受信が完了したデータ受信側の装着個体は、送信側に ACK を返し、送信側と受信側の役割を入れ替えてデータ転送を繰り返す。各装着個体が通信範囲内から外れる、もしくはお互いの保持データの転送が完了した場合に通信機器は Sleep される。また、データ受信側の Carrier Sense で Preamble を検知できなかった場合、通信機器は Sleep 状態に移行する。

以上の手順により、低消費電力性を考慮した通信機器 Wake 後のデータ送受信を実現することが可能である。

3.4.1.3 中継ノードの概念と重み付け

ここでは、上記の非同期スケジューリング手法によるデータ送受信に加えて、装着個体間における個体差を重み付けとして活用し、より効率的なデータ運搬を実現するために中継ノードの重み付けの概念を述べていく。

装着個体間では個体差が存在する。人間と同様に、同じ種であった場合でも、体重、体高、年齢、性別、生息環境などが異なるため、装着個体によって縄張りの範囲や最大行動域が異なる[14]。この性質を利用して、最大行動域の広い装着個体に対して中継ノード(リレーノード)の役割を設定した(Fig.3.4.3)。最大行動域の広い装着個体ほど、他の装着個体との遭遇可能性が高くなることから、最大行動域の広い装着個体を遭遇回数の多い装着個体として定義し、最大行動域の広い装着個体に対して中継ノードの重み付けを適用する。例えば、複数のアライグマに GPS を装着して行動域を観察した例[14]では、最大行動域が野生個体によって 1.5ha～344.5ha の違いが存在し、3～10 月が最も行動が活発であるという結果が報告されている。また、アライグマの生息環境によって大きな差が見られ、都市部では 5ha 程度～郊外の農地・山林地帯では 2500ha 程度といった結果となっている。

第 1 章で述べてきた動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法では、Touch'n Go At Home 機能で述べたように、各装着個体がセンシングしたデータを回収するために、避難指示区域の境界線上に隣接するねぐら基地局まで効率的にデータを運搬する仕組みが必要となる。そこで、Fig.3.4.3 の最大行動域の広い装着個体(中継ノード)は各装着個体との遭遇可能性が高いので、先程述べたデータ送受信機能に対してデータ受信側になりやすい仕組みを取り入れる(Fig.3.4.4)。具体的には、ある装着個体の遭遇回数が多いほど、Carrier Sense の回数を増やすシステムを取り入れている。この仕組みにより、遭遇時のデータ転送時間が短い場合でも、各装着個体の保持データを中継ノードにコピーすることが可能となる。一方、中継ノードが遭遇したことのない装着個体と遭遇した際に十分なデータ転送時間を確保出来た場合は、中継ノードの保持データが他の装着個体と比較して多いことから、より多くのセンシングデータをその装着個体に転送する事が可能となる。

以上の装着個体間の個体差を利用した中継ノードの重み付けにより、効率的なデータ運搬が実現できることでねぐら基地局へのデータ到達可能性が高まる。

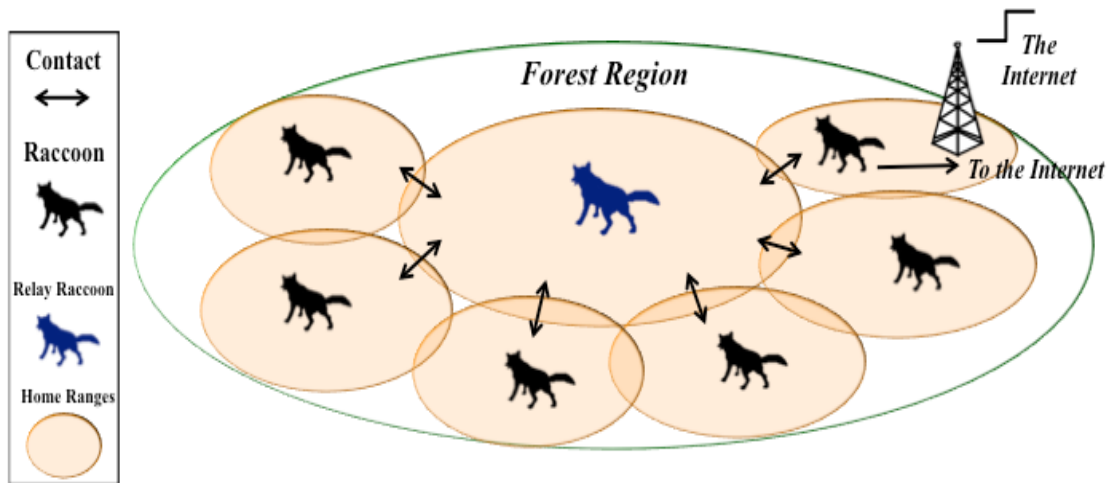


Fig. 3. 4. 3 最大行動域の広い動物個体に対して中継ノード(リレーノード)の役割を設定[20]

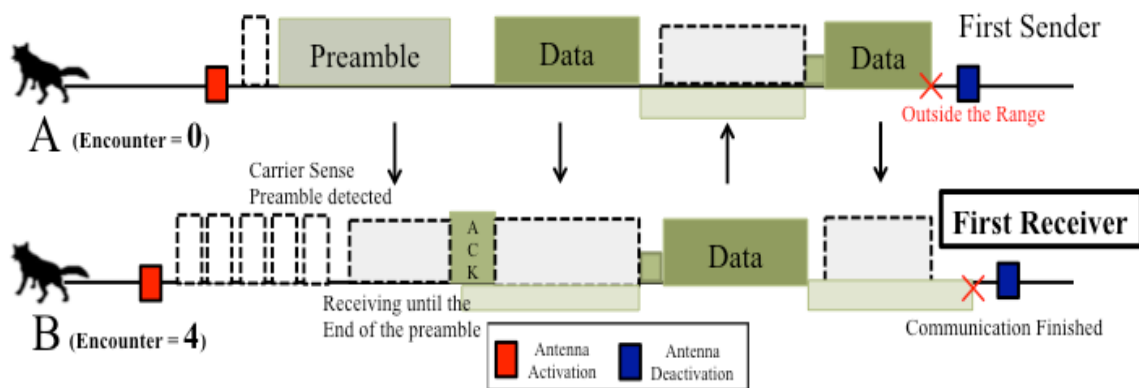


Fig. 3. 4. 4 遭遇回数の多い動物個体に中継ノード(リレーノード)の重み付け[20]

3. 4. 1. 4 隠れノード問題

本節では、無線ネットワークの重要な課題である、「隠れノード問題」における本研究の提案手法の位置づけを述べていく。

無線ネットワークでは、有線ネットワークと異なり、相手のノードが他のノードと通信を行っていることが検知できずにフレームを送信する事で、フレームの衝突が発生し通信のスループットが低下する問題がある[60]. Fig.3.4.5 では、各ノードがアクセスポイントにデータ送信を試みているが、各ノードはお互いの存在を把握出来ていないためアクセスポイント側でデータフレームの衝突が発生する可能性がある. この問題は、「隠れノード(端末)問題」と呼ばれており、現在の商用の無線ネットワークでは CSMA/CA 方式[61]により帯域にフレームが流れていないか検知を行なう事でフレームの衝突を回避し、ランダム時間に再送信する仕組みが利用されている. 無線センサネットワークでも同様の仕組みを持っており、先程述べた RTS/CTS は「隠れノード問題」を避けるために、ノード間における送受

信のスケジューリングの役割を果たしている。

本研究の提案手法では、「隠れノード問題」に対して RTS/CTS の仕組みを取り入れない。なぜならば、森林地域は都市地域に比べて下記の特徴を持っており、森林地域での装着個体間の動物間通信を想定する場合には RTS/CTS の仕組みは必要としない。

- ノード(動物)は縄張りをもつため空間における密度が低い
- 複雑な地形や森林等の遮断物が多いため、通信可能範囲が狭まる
- 各装着個体の遭遇は稀であり、基本的に 1 対 1 通信が想定される

Fig.3.4.6 は都市地域と森林地域を比較したイメージ図である。「隠れノード問題」は都市地域で大量の無線センサーを運用する場合に想定される問題であり、本研究の想定する森林地域での動物間のデータ送受信では、空間における密度の違いや動物間の通信機会を考慮すると、本問題に対応する必要がない。むしろ、装着個体同士の遭遇時には、確実に遭遇を検知して大量のデータ送受信することが求められる。

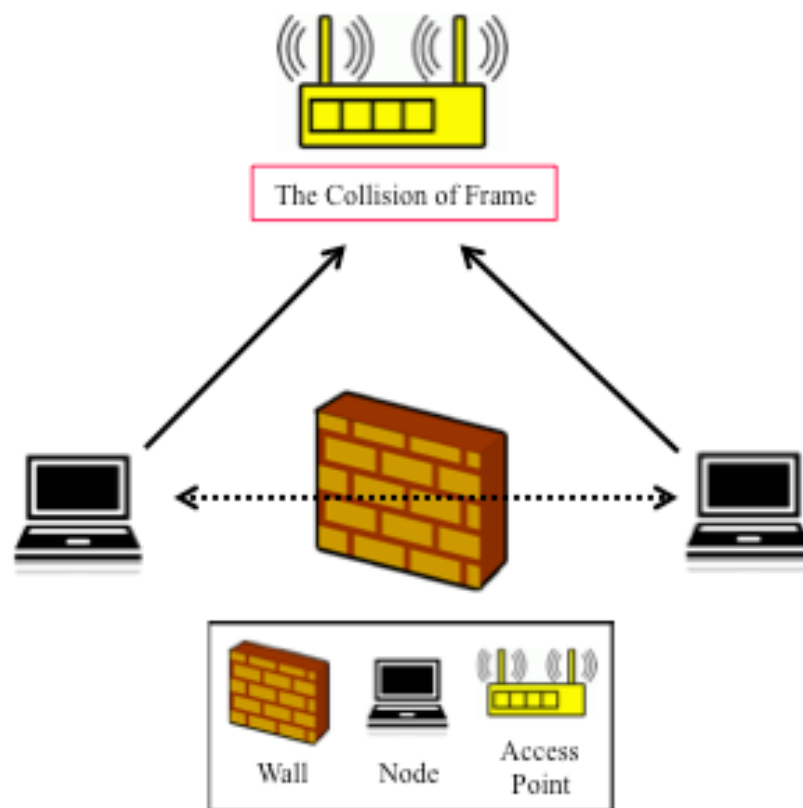


Fig. 3. 4. 5 隠れノード問題が生じる構成[20]

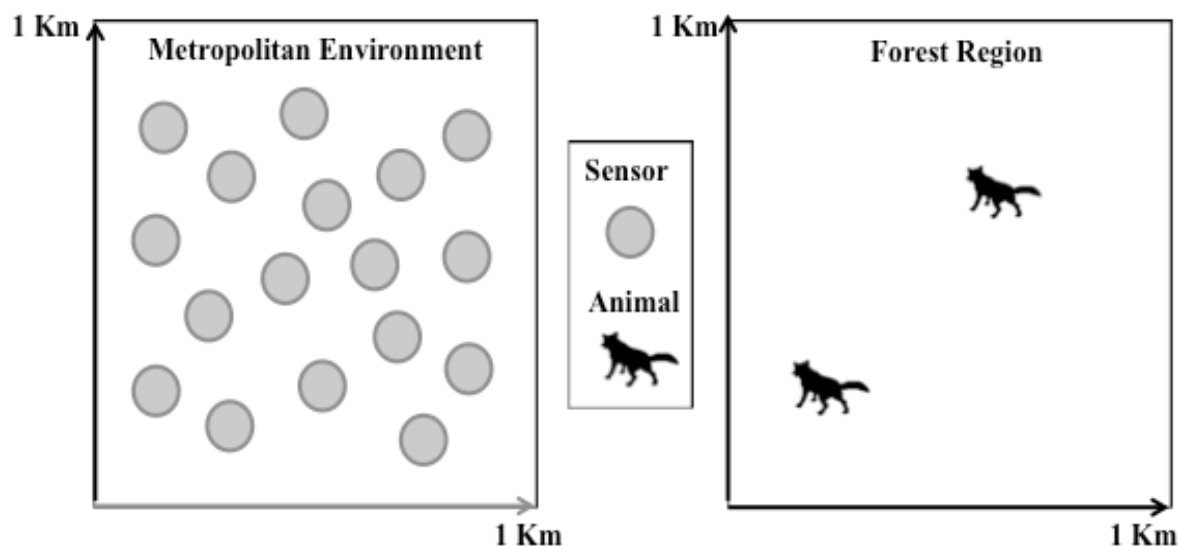


Fig. 3.4.6 都市地域と森林地域におけるノードの密度の比較[20]

3.4.2 実験概要

3.4.2.1 装着個体の選定

3.2.2.1 で述べた実験犬と同じ装着個体によりフィールド評価実験を実施する。装着個体の選定方法については 3.2.2.1 で述べたので省略する。

3.4.2.2 デバイス装着位置の検討

3.2.2.2 で述べた実験犬と同じリュック型によりフィールド評価実験を実施する。デバイス装着位置の検討については 3.2.2.2 で述べたので省略する。

3.4.2.3 実験用デバイスの検討

3.2.2.3 で述べた同じ実験用デバイスによりフィールド評価実験を実施する。実験用デバイスの検討については 3.2.2.3 で述べたので省略する。

3.4.2.4 遭遇履歴を用いたデータ転送の実験概要

本項では、遭遇履歴を用いたデータ転送の有効性を検証するため、Table.3.2.1 の装着個体 Dog B, 装着個体 Dog C-1, 装着個体 Dog C-2, 装着個体 Dog C-3 (以下, Dog B, Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3)である実験犬を用いた評価実験の概要, 提案プロトコルの詳細, その結果について述べていく。

Table.3.2.1 の装着個体を用いて装着個体同士の遭遇機会を人為的に作り、遭遇履歴を用

いたデータ転送プロトコルの有効性の評価実験を行う。本実験では、4匹の装着個体(Dog B, Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3)と5名の実験参加者(4人が装着個体の散歩, 1人は動画撮影)を用いて Fig.3.4.7 に示す 60 m × 40 m の駐車場にて、各実験参加者が装着個体を連れて緑の点線を自由に動き回る方法で実験を行う。実験参加者は装着個体を連れて自由に動き回り、他の装着個体を連れてきた参加者と遭遇した場合には、遭遇した装着個体の名前、遭遇時刻、遭遇場所を記録した後、装着個体同士の認知とそれに伴う行動が終わった段階で再び自由に動き回る動作を 20 分間繰り返した。また、遭遇時の習性行動を正確に分析するため、Dog B に散歩を行なう参加者とは別に動画撮影を行なう参加者が付き添い、Dog B の動画撮影を 20 分間行う。後述する本研究で比較検討を行う各データ送受信プロトコルを実装した機器を装着し、合計 3 回の実験を行なう。また、3.2 で述べたボールを用いた通信機器 Wake アルゴリズム実験との比較を行なうため、Dog B は 1 回の実験で他の装着個体との遭遇回数を計 30 回と定めた。Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3 については遭遇回数を定めていなく、各プロトコルの実験毎に他の装着個体との遭遇回数の合計値は異なる。

本実験では、装着個体同士の遭遇時に習性行動に基づいたデータ送受信が行なわれることを想定している(Fig.3.4.8)。データの送受信の手順は、①では装着個体は自由に散歩されている状態であり、②で装着個体同士が遭遇して次の行動のための静止状態に入る。次に、③でお互いが威嚇や近づく等の動作(習性行動)が生じる事で、④通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより通信機器が Wake される。その後、⑤では 3.4 で述べた遭遇履歴に基づくデータ転送プロトコルにより Preamble フレームの送受信が行なわれ、⑥終了後に通信機器は再び Sleep される仕組みとなる。

本実験の評価対象は以下となる。

- 複数の装着個体による遭遇時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価
- 遭遇履歴に基づくデータ転送プロトコルのデータ送受信確率の評価
- 遭遇履歴に基づくデータ転送プロトコルの低消費電力性の評価(通信時間に基づく)

本実験では、以下の遭遇履歴に基づくデータ転送プロトコルを用いて比較検討を行う。

- CSMA/CA を用いた標準プロトコル (CSMA/CS プロトコル)
- 遭遇履歴に基づく Carrier Sense/Peamble 重み付けプロトコル (CS/P プロトコル)
- 遭遇履歴に基づく Carrier Sense 重み付けプロトコル (CS プロトコル)

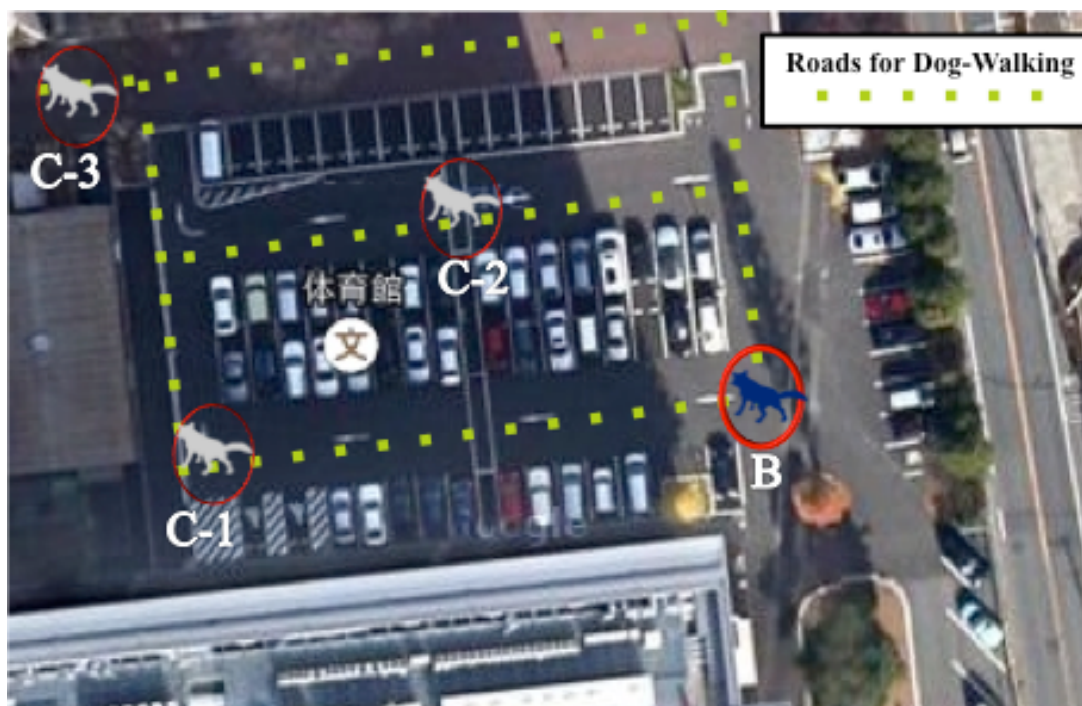


Fig. 3. 4. 7 複数の装着個体(実験犬)を用いた実験環境[20]

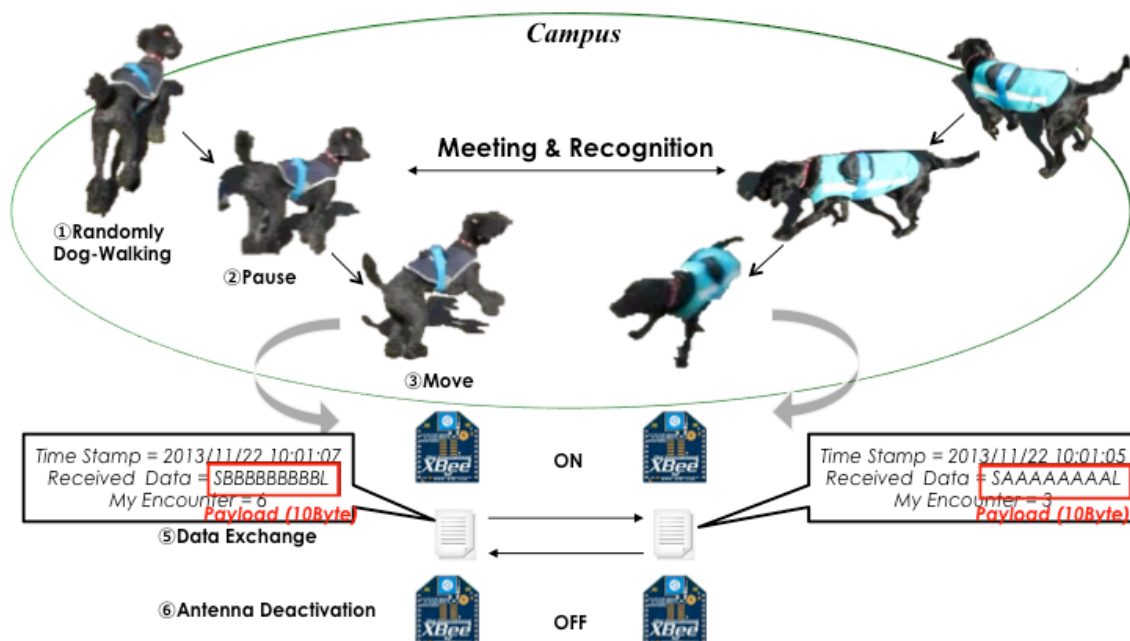


Fig. 3. 4. 8 装着個体の遭遇時に習性行動に基づいたデータ送受信の概要[20]

本実験では, 3.2 の通信機器 Wake アルゴリズムの評価実験と同様に 20Hz のサンプリング間隔で 3 軸加速度センサーから合成加速度データを取得し, 以下の様式で micro SD に保存を行なった. XYZ が合成加速度を示している.

2013/12/24 15:2:28 224 ,XG=-1.82 ,YG=-1.77 ,ZG=-0.87 ,XYZ=2.68

224は20Hz毎に取得したサンプリングレートの合計値を示しており、次の値は274となる。次に Preamble フレームについて述べていく。以下のダブルクォーテーション内の Preamble フレーム(10byte)が、各プロトコルによりイヌ-イヌ間で送受信されるデータとなる。

Data = "SBBBBBBBBBL"

この例では、Dog B が送信するフレームの内容を示している。Dog C-1(もしくは C-2, C-3)が先ほどのデータを受信した場合、以下の様式で受信データとして micro SD に保存される。

GET, Success, 2013/12/24 15:25:10, Ent = 1, Data= SBBBBBBBBBL

タイムスタンプは、Dog C-1(もしくは C-2, C-3)のリアルタイムクロックから取得した時刻となる。Ent はデータ受信回数を表しており、上のデータ受信後には Ent = 2 となり、送信時の Carrier Sense と Preamble の回数が増える。この点については、プロトコル毎に詳しく後述する。

Dog B は Preamble フレームの送信したログとして、以下のデータを micro SD に保存する。

SEND, 2013/12/24 15:25:10, SBBBBBBBBBL

以上、実験参加者の記録、述べてきたデータ、撮影動画を比較して、動物の習性行動により動物間通信が行なわれたかの判別を行なう。

本研究での提案手法を行うために、CSMA/CA プロトコルと 2 つの提案プロトコル(CS/P プロトコル, P プロトコル)との比較のために、CSMA/CA を用いたプロトコルでは Arduino プラットフォームが提供している XBee ライブラリ [62] を使用して実装を行なっている。XBee の通信規格である ZigBee は無線センサネットワークを想定して構成されており、特徴として Fig.3.4.9 で示すようなスター型やメッシュ型、ツリー型などの 1 対多に基づいた通信設計となっている。具体的には、ZigBee でネットワーク構成をするためにはコーディネーターと呼ばれるノードが必ず一つ必要となる [62]。ルータとエンドノードは、ネットワーク

のトポロジーに合わせて組み合わせが可能であり、Fig.3.4.9 のように様々な組み合わせが考えられる。コーディネーターとルーターはデータ送受信機能を持ち、エンドノードはデータ送信機能のみ持っている一方で機器の Sleep 制御がオプションにより可能となる。また、API モードでは CSMA/CA を用いることが可能である。3.4.1 で指摘した「隠れノード問題」のように、複数のノードがあるノードにデータ送信を行なった場合でも、WiFi でも用いられている CSMA/CA 方式によりデータ送信前に信号検知を行い、スループットが低下しないようにデータ送信間隔の調整を行なっている。CSMA/CA 方式は ZigBee に標準で実装されており、XBee の API モードで同ライブラリを使用する事で利用可能となる。

ここまで CSMA/CA を用いたプロトコルについて述べてきたが、Fig.3.4.9 での 1 対多型を想定した場合、宛先はコーディネーター等の最終的な受信側ノードのアドレスに指定する必要があるが、本研究の動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法では間欠通信かつ、どのノードと遭遇しどのノードが最終的にねぐら基地局へ到達するか分からないため、標準で用意されている 1 対多型の通信の設計は適さないと言える。それゆえに、提案プロトコルでは AT モードと呼ばれる 1 対 1 通信に適した方法で独自の通信プロトコルを開発した。本実験では Dog B をコーディネーター、Dog C-1, C-2, C-3 をルーターとして設定している。

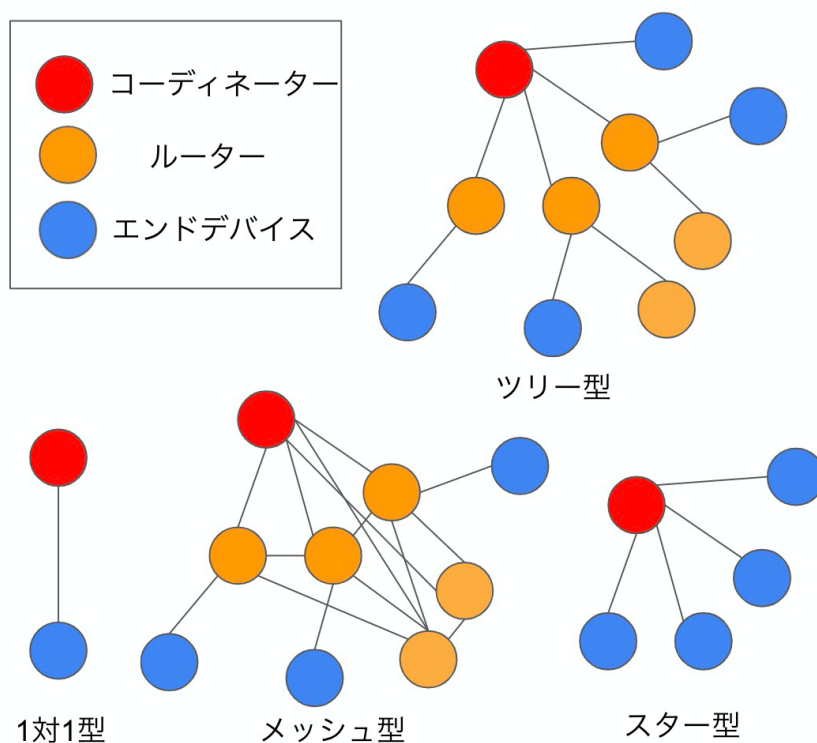


Fig. 3. 4. 9 無線センサネットワークで見られる 1 対多ノードの通信

3.4.2.4.1 CSMA/CS プロトコル

本目では、提案手法である CS/P プロトコル、CS プロトコルとの比較に用いた CSMA/CA を利用した標準プロトコル(以下、CSMA/CS プロトコル)の設計について述べていく。

CSMA/CA 方式によりデータ衝突を回避した通信が可能であるが、基本設計が 1 対多の通信であるため送信先を事前に決めておく必要があることと、データの受信側と送信側を事前に決めておく必要がある。動物間のマルチホップ転送方式の野生動物調査手法で求められる技術要件は、装着個体がデータ送受信の両方の機能を持つことであり、また送信先が事前に決定出来ないため基本的にブロードキャストによるデータ送信となることから、同方式に合わせた本プロトコルの実装は適さないと考えられる。しかし、CSMA/CA は無線センサネットワークで一般的に用いられている手法であることから評価基準として採用した。

本実験では本プロトコルを用いて、Dog B を受信側ノードとし、Dog C-1, C-2, C-3 を送信側ノードとしている(Fig.3.4.10)。Dog B と Dog C-1, C-2, C-3 の間では通信可能であるが、仕様上 Dog C-1, C-2, C-3 の間での通信ができない設計となっている。各イヌに装着している通信機器(XBee)は実験中の 20 分間は常にオンとなっており、通信範囲内であればデータ送受信が行われる。また、データ送信前に受信側の動物個体と送信側の動物個体で送信要求と返答が行われる。後述する CS/P プロトコルと CS プロトコルでは、全ての動物個体がデータ送受信機能を持ち、ブロードキャスト通信を行なっているので送信相手に関わらず通信が可能である。

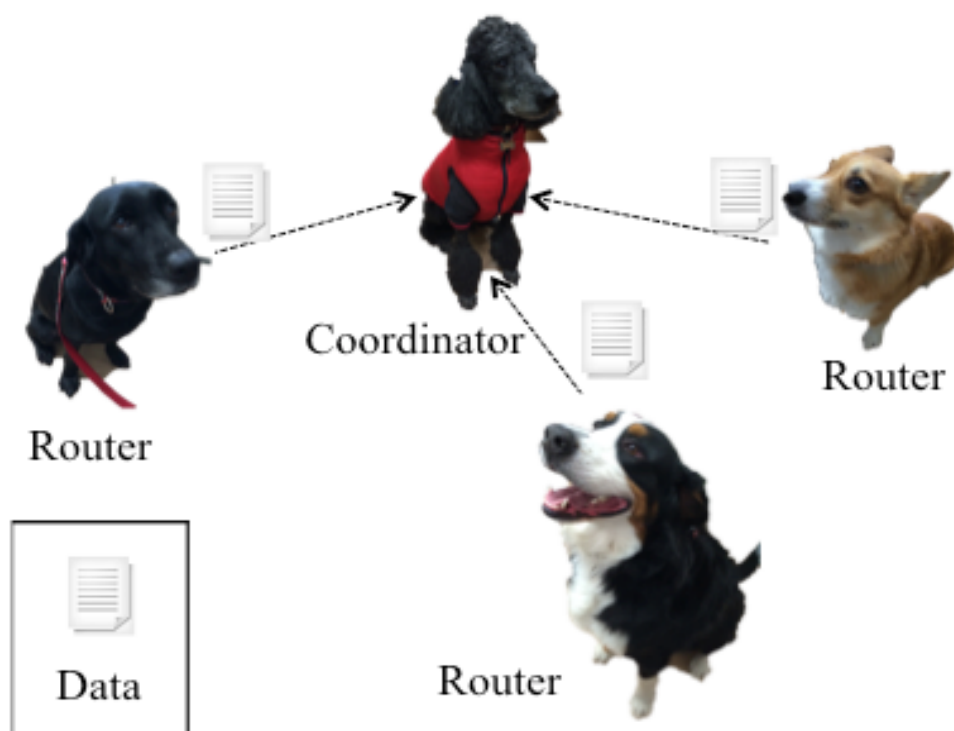


Fig. 3. 4. 10 CSMA/CA を利用した標準プロトコルのネットワークトポロジー[20]

3. 4. 2. 4. 2 CS/P プロトコル

通信機器 Wake 後のデータ送受信の提案手法である，遭遇履歴に基づく Carrier Sense/Preamble 重み付けプロトコル (CS/P プロトコル)について述べていく．CS/P プロトコルと CS プロトコルでは，Preamble フレームの受信回数は他の装着個体との遭遇を検知してデータ転送を達成した回数と一致するので，3.4.1 で述べたように Encounter (Ent)と定義してその数を記録する．また，CSMA/CA を用いたプロトコルでは XBee の API モードを利用していたのに対して，提案する CS/P プロトコルと CS プロトコルでは AT モードを利用する．AT モードでは CSMA/CA 方式は考慮されないが，ブロードキャスト通信により送信相手を選ばない 1 対 1 通信が可能である(Fig.3.4.11)．

CS/P プロトコルは，データ送受信機能の両方の役割を持ち，遭遇時の Preamble フレームの受信回数履歴に応じて，Carrier Sense 時間と Preamble フレームの送信回数の重み付けを行う手法を用いている．Fig.3.4.12 では装着個体 A と装着個体 B が遭遇し，CS/P プロトコルにより Preamble の送受信を行なっている図である．装着個体 B が習性行動により先に通信機器を Wake させ，Arduino の電源がオンになってからこれまでの Preamble フレームの受信回数の履歴に応じて，Carrier Sense 時間と Preamble フレームの送信回数を決定している．Fig.3.4.12 では装着個体 B は過去 3 回(Encounter=3)の Preamble フレームを受信したことがあるため，Carrier Sense 時間は 4 倍と Preamble フレームの送信回数は合計 4

回行なわれる(初期値は 1 回). 一方の装着個体 A は, Preamble フレームの受信回数は 0 回であり, 初期値の 1 回に基づく Carrier Sense 時間と Preamble フレームの送信が決定される. Fig.3.4.12 では, 装着個体 B の 3 回目の Carrier Sense により, 装着個体 A の Preamble フレームが検出されており, Preamble フレームを受信した装着個体 B の Encounter 値は 3 から 4 に変更される. 次に通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより遭遇が検知された場合, 装着個体 B の Carrier Sense 時間は 5 倍と Preamble フレームの送信回数は合計 5 回行われる. Preamble フレームの送受信後は通信機器を Sleep させる.

ここで, Ta を通信時間, m を Preamble フレームの受信回数(Encounter), c を Carrier Sense の Idle 時間, f を Preamble フレームの送信時間とした場合に以下の式が成り立つ.

$$Ta = (m + 1)(c + f) \quad (3.4.1)$$

(3.4.1)式により, 通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより遭遇が検知された場合の通信時間が決定される.

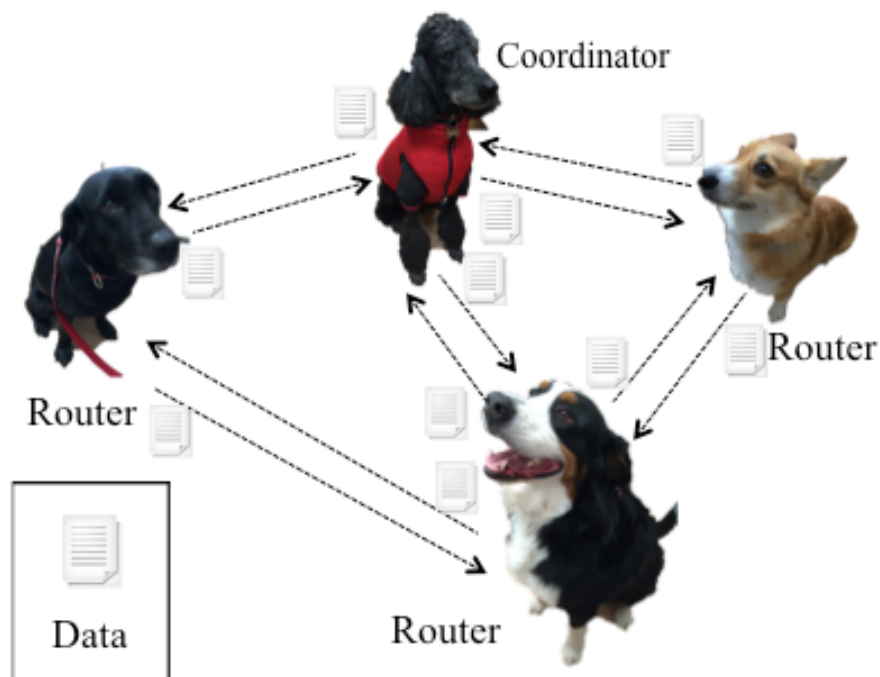


Fig. 3. 4. 11 CS/P プロトコルと CS プロトコルのネットワークトポロジー [20]

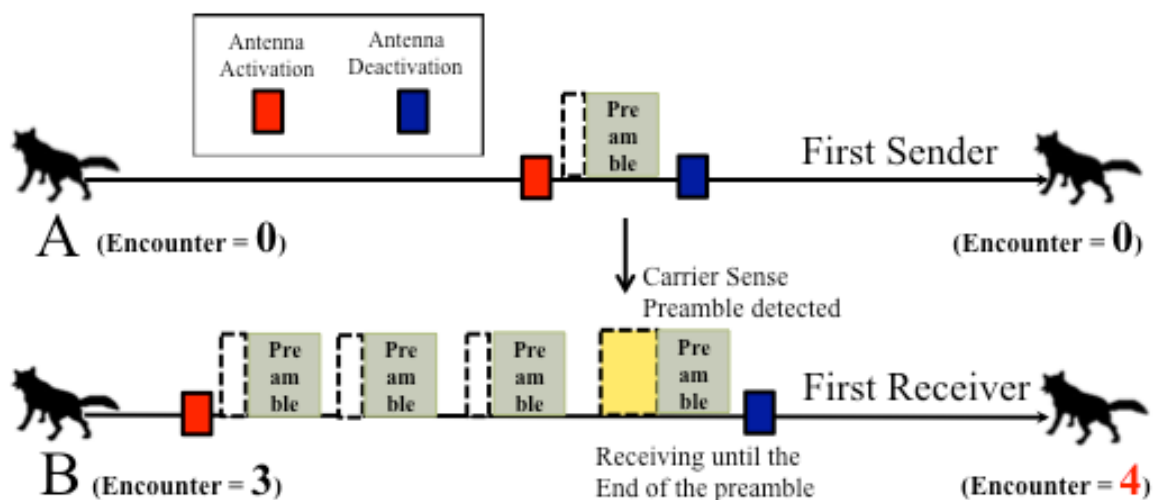


Fig. 3. 4. 12 CS/P プロトコルによるデータ送受信例[20]

3. 4. 2. 4. 3 CS プロトコル(中継ノードの重み付けプロトコル)

通信機器 Wake 後のデータ送受信の提案手法である, 遭遇履歴に基づく Carrier Sense 重み付けプロトコル (CS プロトコル)について述べていく.

CS プロトコルは, データ送受信機能の両方の機能を持ち, Preamble フレームの受信回数に応じて Carrier Sense 時間に重み付けを行う手法を用いている. 既に述べた CS/P プロトコルと比較した場合の特徴として, データ送信前の Carrier Sense 時間だけを増加させる事で全体の通信時間を削減している. また, 本プロトコルにより Preamble フレームの受信回数が多い装着个体ほど Preamble フレームを受信する確率が高く, つまり 3.4.1 で述べた中継ノードの重み付けを行なっていると言える.

Fig.3.4.13 では装着个体 A と装着个体 B が遭遇し, CS プロトコルにより Preamble の送受信を行なっている図である. 装着个体 B が習性行動により先に通信機器を Wake させ, Arduino の電源がオンになってからこれまでの Preamble フレームの受信数に応じて, Carrier Sense 時間を決定している. Fig.3.4.13 では装着个体 B は過去に 3 回の Preamble フレームを受信(Encouter=3)しており, 従って Carrier Sense 時間は初期値の時間より 4 倍長くなる. 一方の装着个体 A は, Preamble フレームの受信回数は 0 回であり, Carrier Sense 時間は初期値の時間分だけ行なわれる. Fig.3.4.13 では, 装着个体 B の 4 回目の Carrier Sense により装着个体 A の Preamble フレームが検出されており, Preamble フレームを受信した装着个体 B の Ecounter 値は 3 から 4 に変更される. 次に通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより遭遇が検知された場合, 装着个体 B の Carrier Sense 時間は初期値の時間より 5 倍長くなる. Preamble フレームの送受信後は通信機器を Sleep させる.

ここで, Tb を通信時間, m を Preamble フレームの受信回数(Encounter), c を Carrier Sense の Idle 時間, f を Preamble フレームの送信時間とした場合に以下の式が成り立つ.

$$Tb = (m + 1)c + f \quad (3.4.2)$$

(3.4.2)式により, 通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより遭遇が検知された場合の通信時間が決定される.

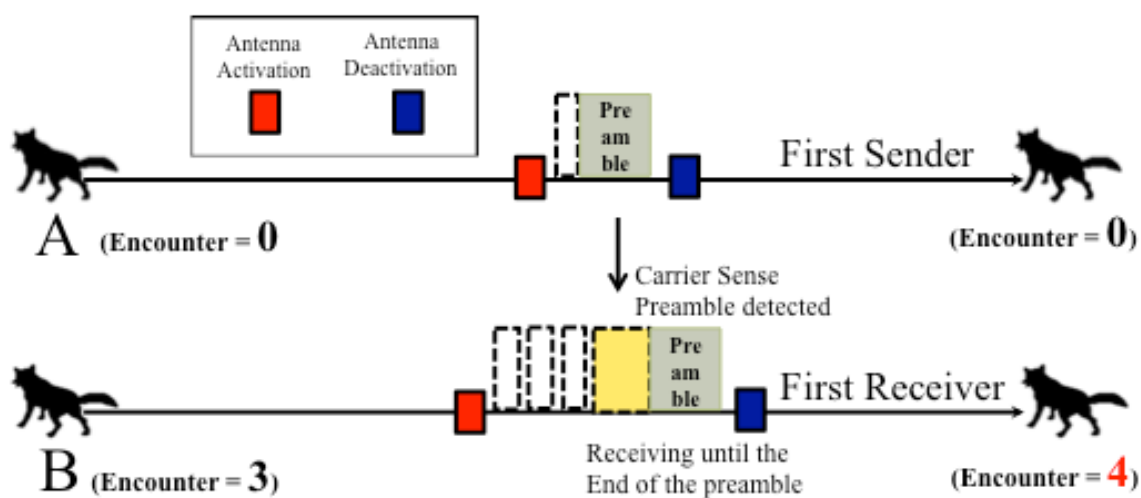


Fig. 3. 4. 13 CS プロトコルによるデータ送受信例[20]

3. 4. 2. 4. 4 データ転送の評価方法

CSMA/CA プロトコル, CS/P プロトコル, CS プロトコル(中継ノードの重み付けプロトコル)の比較評価のために, 通信時間の評価基準として CSMA/CA プロトコルで Dog C-1, C-2, C-3 の通信時間の平均を取った値と Dog B の通信時間を足した値を利用している. また提案プロトコルでは, 通信機器 Wake 制御アルゴリズムにおける静止時間の閾値を $1.0s < t < 10.0s$, 静止・動作判定の合成加速度の閾値 $V_0 0.2$ と仮定して評価を行なっている. 通信時間に関して $c = 220 \text{ ms}$, $f = 1,000 \text{ ms}$ として定め, 本実験では人為的に遭遇機会を作る事から実験内容に適した以下の通信時間の最大値を定めておく.

$$Ta = Tb \leq 25,000 \text{ ms} \quad (3.4.3)$$

CS/P プロトコルと CS プロトコルでは Preamble フレームの受信回数に応じて, Preamble

フレームの送信回数または Carrier Sense 時間が増加する。通信可能範囲が 10 m ～100 m に対して本実験環境は 60 m × 40 m と狭いため、お互いが遭遇していない場合でもデータ送受信の可能性がある、想定を越えて通信時間が長くなる可能性が考えられる。(3.4.3)で最大値を設定する事で、本実験環境に合わせて無駄な通信時間を抑制する目的がある。

ここで、再度本実験の評価対象を以下に記す。

- 複数の装着個体による遭遇時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価
- 遭遇履歴に基づくデータ転送プロトコルのデータ送受信確率の評価
- 遭遇履歴に基づくデータ転送プロトコルの低消費電力性の評価 (通信時間に基づく)

3.4.3 結果と考察

3.4.3.1 フィールド評価実験に関する考察

本実験を通して、実験犬が実験環境に慣れ、学習していく様子が実験を重ねる毎に見られた。遭遇履歴を用いたデータ転送の実験では、Dog C-1, C-2, C-3 は幼少の頃から同じ部屋で育ち、お互いに顔見知りの実験犬である。一方、Dog B と Dog C-1, C-2, C-3 はほぼ初対面の状態であり、CS/P プロトコル, CS プロトコル, CSMA/CA プロトコルの順番で評価実験を行った。1 回目の実験では、遭遇時に立ち止まってお互いに様子を見つつ、その後興味を示して近づきイヌ特有の習性行動である嗅ぎ合う行動が見られた。しかし、1 回目の実験の途中から実験環境に慣れ始め、初期に頃に見せたような警戒心を伴った大きな動作は減少していった。2 回目、3 回目と遭遇回数を重ねる毎にその傾向は強まり、Dog B が Dog C-1～Dog C-3 と顔見知りになったことを含めて、遭遇しても興味を示さない状態や無視といった明らかに実験環境に慣れている様子が見受けられた。

以上のような装着個体の実験環境の学習は、人間にスマートフォンを持たせた実験とは異なり、動物特有の実験の場合には考慮する必要がある。フィールド実験では、提案手法の評価のために設定されたシナリオがあり、その有効性を示すために繰り返し実験が行なわれるのが一般的である。人間の場合では、シナリオに合わせた動きを行なう事が容易であるが、装着個体が動物の場合、特に本研究のように装着個体自身が持つ習性行動を引き出す事はこれまでに述べてきた理由から容易ではなかった。

動物を用いた実験で客観的なデータを取得するために、出来るだけ実験環境の学習を防ぐ方法が必要となる。例えば、本実験のような習性行動を利用するような場合では、実験の間隔を適度に空ける、各装着個体を実験前の一定期間は個別に隔離しておく方法などが、装

着個体同士の遭遇時の再現性を評価する方法として考えられる。このような知見は既に動物行動学研究分野[51][63]にても論じられており、情報通信学分野にて動物を用いた実験を行なう場合には参考にする必要があるだろう。

3.4.3.2 遭遇履歴を用いたデータ転送の結果

まず、複数の装着個体を用いた遭遇時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価について述べていく。Table.3.4.1 は再現率として Dog B と Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3 の遭遇時、通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる検出成功の割合を示しており、3.2 の実験結果の一部を基準として記載した。装着個体同士の遭遇時でも約 70%以上の成功率を示しており、高い再現性があると言える[42]。

次に、各プロトコルでの Preamble フレームの送受信確率の評価を行なう。Table.3.6.2 は、Dog B と Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3 の遭遇時における各プロトコルによる Preamble フレームの送受信の成功率を示している。Standard は CSMA/CA プロトコル、PreSR-P は CS/P プロトコル、PreR-P は CS プロトコル(中継ノードの重み付けプロトコル)を示している。Standard においては、Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3 は送信側ノードなので受信側ノードである Dog B のみの結果となるためサンプル数が他のプロトコルと比べて少なく、評価方法として適切でないと考えられるため記載していない。Table 3.6.2 の表より、Dog B~Dog C-3 でそれぞれ 23.5%から 66.7%と送受信確率は個体毎にばらつきがあることが分かる。Dog C-3 のみ、両方の提案プロトコルで 64.8%, 66.7%と、再現性があると言える程の高い成功率を示している。

次に、各プロトコルでの通信時間に基づく低消費電力性の評価を述べていく。Fig 3.4.14 にて、各プロトコルでの通信時間の結果に対して CSMA/CA プロトコルの通信時間(0.239 h)を 100.0%としたグラフにより比較している。まず Dog C-2 の結果を見ると、提案プロトコルにより通信時間を約 86.9%以上削減出来ている事が分かり、高い低消費電力性を実現出来ていると言える。一方で、プロトコル毎に結果を見ると、CS/P プロトコル(PreSR-P)では Dog C-1 は 108.9%, Dog C-3 は 111.5%と CSMA/CA プロトコル(Standard)と比べて通信時間が増加している。CS プロトコル(PreR-P)では、各装着個体で通信時間が約 13.1%~91.1%であり、装着個体毎に大きな差が存在するが全体として通信時間の削減に成功している事が分かる。

最後に、述べてきたプロトコル毎の通信時間の比較から、20 分間における実際の消費電力に関して Table.3.4.3 の表に記した各機器の仕様から算出した。Table.3.4.3 は、Radio Idle は XBee の通常時の消費電力、Radio TX は XBee のデータ送信時の消費電力、Radio RX は XBee のデータ受信時の消費電力、リアルタイムクロックの消費電力、3 軸加速度センサーの

消費電力を示している. この表から分かのように, 通信機器である XBee の送受信時の電力消費量は 3 加速度センサー(ADXL335)の約 114 倍であり, 消費電力の差が大きい. Fig 3.4.15 では, プロトコル毎の消費電力量の比較を行なっている. Fig 3.4.14 の通信時間の比較と似たような結果が現れており, 通信時間と消費電力量の相関があることが分かる. Dog C-2 では, Idle 時の電力消費量も含められるため Fig 3.4.14 と比べて増加しているように見えるが, 約 56.5%の低消費電力性を実現している. また, CS プロトコル(PreR-P)では, CSMA/CA プロトコル(Standard)と比べて Dog B~Dog C-3 の全ての動物個体で低消費電力を実現出来ていることから, CS プロトコルが遭遇履歴を用いたデータ転送手法として有効性があると検証された.

以上の実験結果から, AMUSystem の仕様である「低消費電力」の有効性を証明した. 動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法における, 動物間通信機能(Data Sharing 機能)を効率的に長期間維持する観点で要件として求められる「低消費電力」を解決に近づいたと言える.

<i>Threshold for Synthetic Acceleration</i>	<i>Dog A vs Balls</i>	<i>Dog B vs Dog C-1,2,3 (ex.1)</i>	<i>Dog B vs Dog C-1,2,3 (ex.2)</i>
$T_0 \leq 0.2$	89.2%	70.0%	73.3%

Table. 3. 4. 1 通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる検出成功の割合 [20]

<i>Proposed Protocol for Data Exchange</i>	<i>Dog B</i>	<i>Dog C-1</i>	<i>Dog C-2</i>	<i>Dog C-3</i>
Standard	100%	-	-	-
PreSR-P	26.7%	35.3%	35.3%	66.7%
PreR-P	36.7%	23.5%	54.2%	64.8%
Total Number of Encounters in PreSR-P	30	17	17	12
Total Number of Encounters in PreR-P	30	17	24	17

Table. 3. 4. 2 装着個体間の Preamble フレーム送受信の成功率 [20]

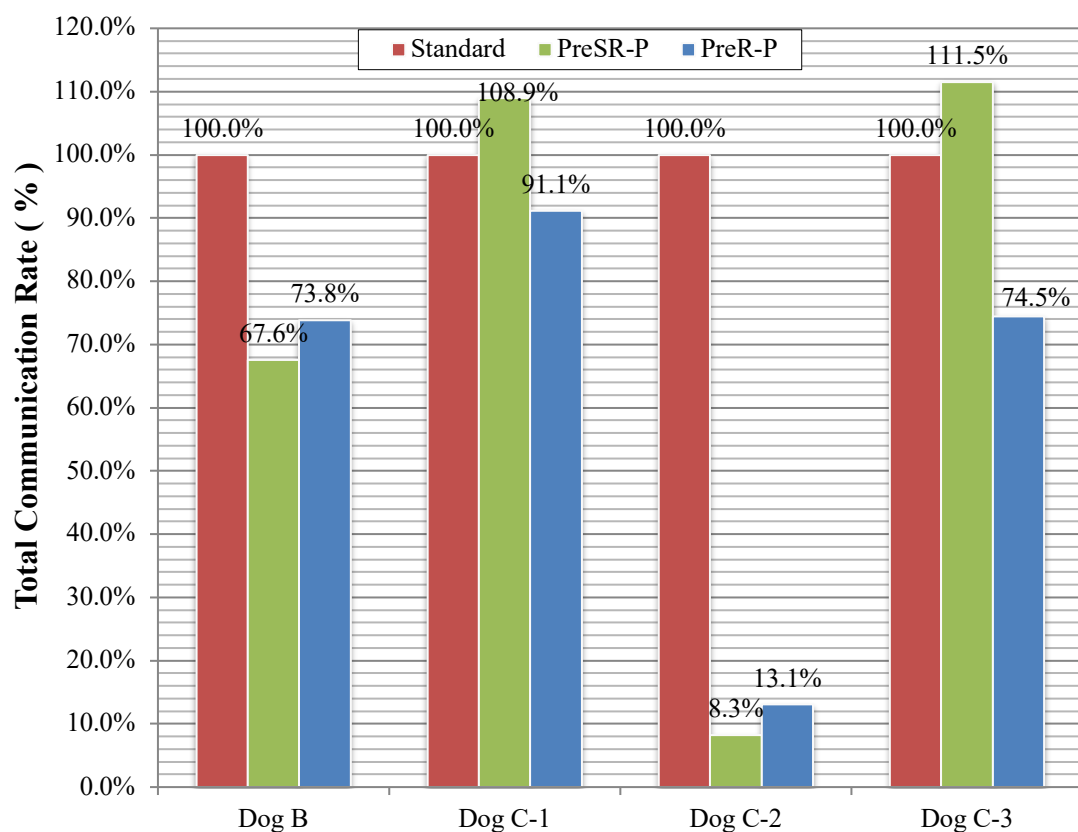


Fig. 3. 4. 14 各プロトコルでの通信時間の比較[20]

Radio Idle (Receiver Off)	15mA (3.3 V)
Radio TX (Transmit)	40mA (3.3 V)
Radio RX (Receive)	40mA (3.3 V)
Real Time Clock	1.5 mA (5V)
Accelerometers Sensors	350 μ A (3 V)

Table. 3. 4. 3 各機器における消費電力[64][65][66]

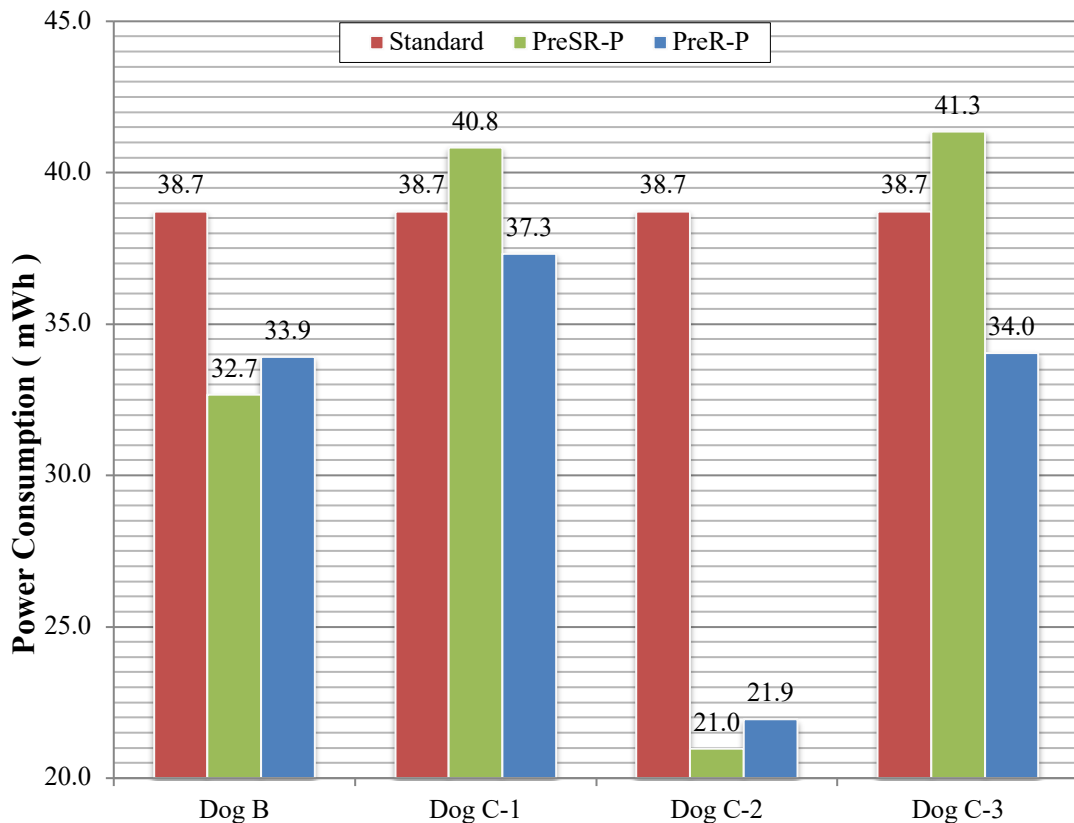


Fig. 3.4.15 各プロトコルでの消費電力量の比較[20]

3.4.3.3 遭遇履歴を用いたデータ転送の考察

本節では、遭遇履歴を用いたデータ転送に関する評価実験に関して、プロトコルの性能に基づいた、データ配送率、消費電力、体高との関係性について述べていく。

3.4 遭遇履歴を用いたデータ転送では、効率的なデータ運搬を実現するために中継ノードの重み付けの概念を述べた。ここでは各プロトコルにおけるデータ配送率と伝搬性について考察を行なう。Fig.3.4.16, Fig.3.4.17 では、実験結果から動物間でのデータ転送を仮定しており、本実験の時刻に基づいた、CS/P プロトコルと CS プロトコル(中継ノード重み付け)の装着個体間のデータ伝搬性を示している。例えば、Dog B と Dog C-1 の遭遇時に Dog B が Dog C-1 より Preamble フレームを受信した場合、装着個体間で相互のデータ転送が行われると仮定している。言い換えると、データ送信前の Dog B の保持データ”B”と Dog C-1 の保持データ”C1”の状態から、遭遇時のデータ転送完了後にはそれぞれの保持データが”BC1”に書き換えられ、相互にデータが伝搬されたと見なしている。本実験の前提では、装着個体間のデータ転送のための Preamble フレーム送受信を評価対象としているため、Fig.3.6.5, Fig.3.4.17 における装着個体間のデータ伝搬の評価に関して有用性があると言える。

以上より、装着個体間におけるデータ転送が全体で完了した時刻(各実験犬が”BC1C2C3”

のデータを保持)を比較すると、中継ノードの重み付けを行った CS プロトコルが、装着個体間で効率的なデータ伝搬を実現出来ている事が分かる. CS/P プロトコルでは約 14 分 7 秒かかったのに対して、CS プロトコル(中継ノード重み付け)では約 5 分 3 秒であり、約 9 分 4 秒短い事が示されている. 理由として、CS プロトコル(中継ノード重み付け)の実験では Dog C-2 の遭遇回数の母数自体が高いことと(Fig.3.6.6), Preamble フレームの受信回数のみを増やす事でデータ回収率を向上させてデータ送受信の成功率を全体で高めていることが要因として考えられる.

次に、実験犬の体高(Fig.3.4.18)と消費電力の関係性について、実験犬の個体情報と実験結果の比較により関係性を述べていく.

Fig.3.4.18 では、Y 軸が CSMA/CS プロトコルを 100%とした PreSR-P (CS/P プロトコル)と PreR-P (CS プロトコル)の合計通信時間の割合、X 軸が実験犬の体高である. CS/P プロトコル、CS プロトコルの仕様は異なる一方で、Dog C-1 を除くと本プロトコルを用いた通信時間と体高にはおおよそ相関関係があることが考察できる. よって、実験犬の体高に合わせて各装着個体の消費電力量が推定可能となりえる. Dog B と Dog C-1 の体重と体高を比較すると、Fig.3.4.19 から Dog C-1 の体高は Dog B の体高よりも約 5cm 低い、体重は約 2 キロ多い. つまり、体高と消費電力量の関係に対して、体重が影響を与えている可能性がある. 合成加速度より得られるデータはその実験犬自身の活動量であり、動作に対して影響を与える可能性は考えられる. また、これまで述べきたが Fig.3.4.19 でも分かるように動物間と同じ種でも個体差が存在するため、サンプル数の実験犬が 4 個体と少ない理由を含め厳密な相関関係についてここでは考慮しない.

これまで述べてきたように、同じ陸生哺乳類であり似た特徴をもつアライグマに対して、アライグマの体高に合わせて各個体の消費電力量が推定可能となりえる.

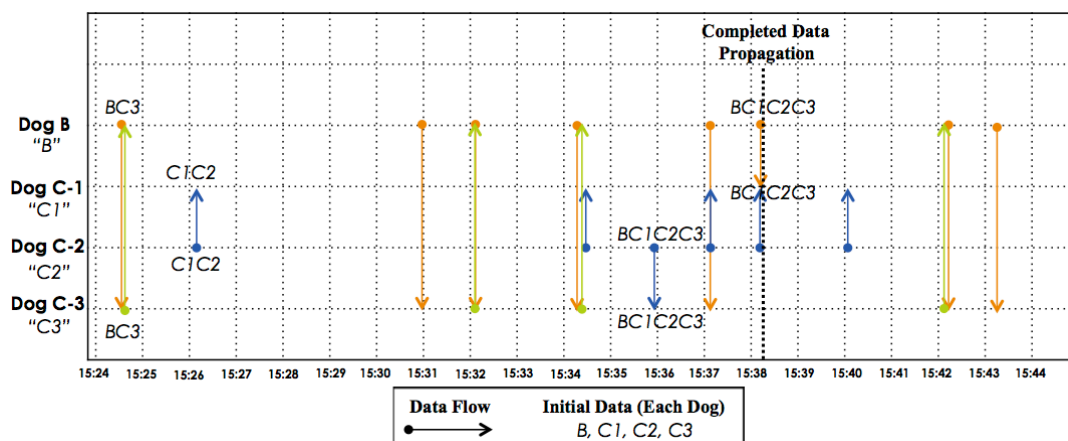


Fig. 3. 4. 16 PreSR-P(CS/P プロトコル)のデータ伝搬性[20]

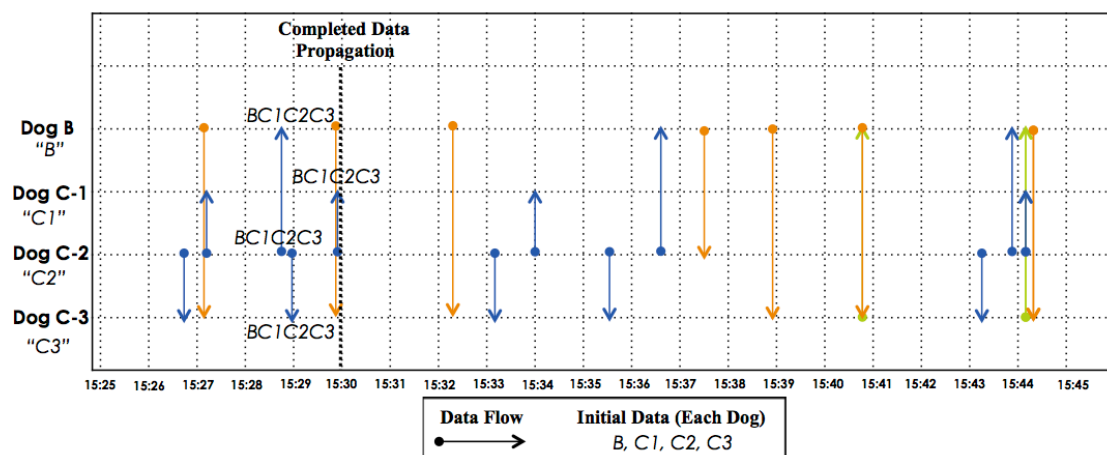


Fig. 3. 4. 17 PreR-P (CS プロトコル) のデータ伝搬性 [20]

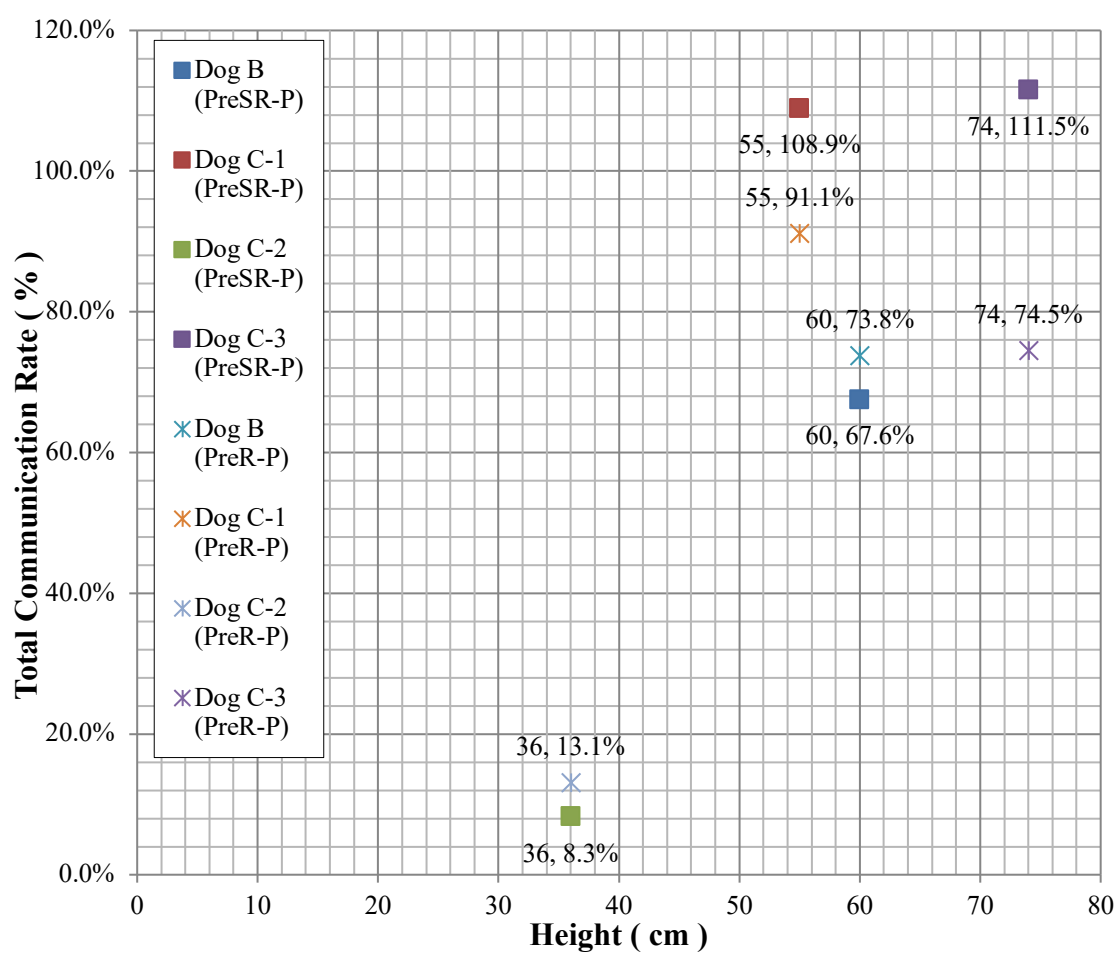


Fig. 3. 4. 18 PreSR-P (CS/P プロトコル) と PreR-P (CS プロトコル) の体高と通信時間 [20]

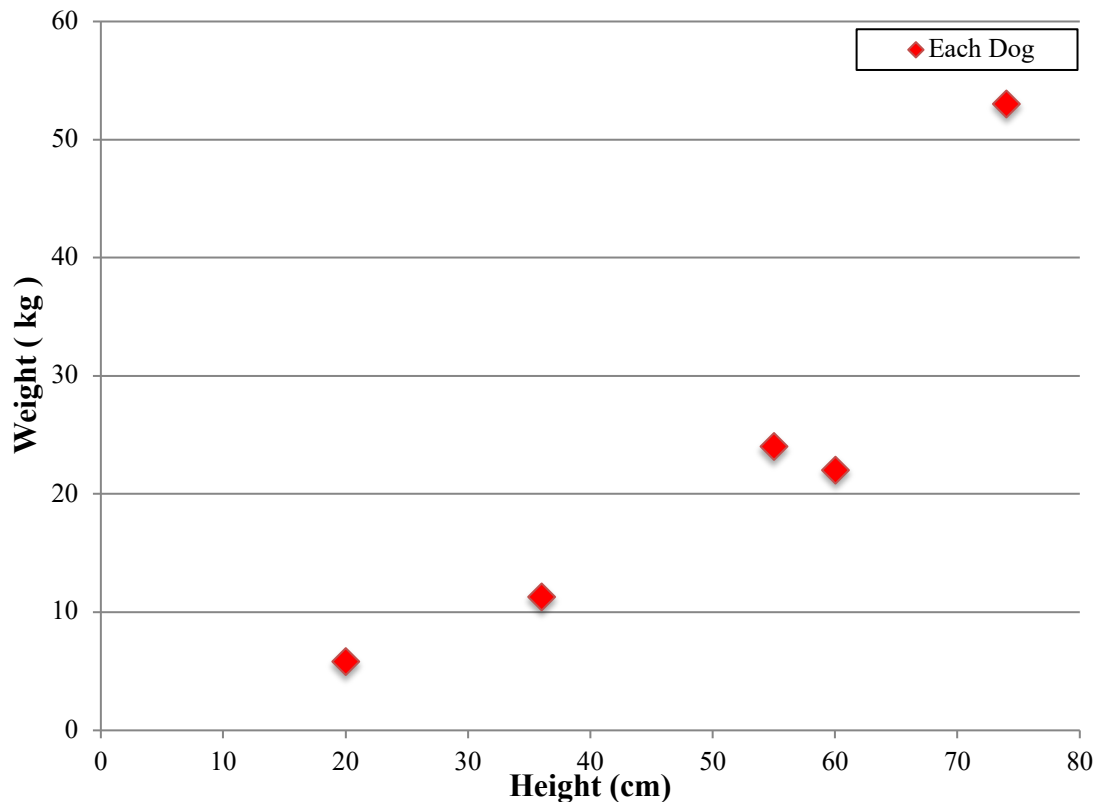


Fig. 3.4.19 各実験犬における体高と体重の関係[20]

3.4.3.4 フィールド評価実験の結果に基づく定式化

本節では、フィールド評価実験の結果に基づき、装着個体間通信における、データ伝搬性と個体差を考慮した消費電力量の定式化を行なう。

遭遇履歴を用いたデータ転送の考察で述べた、PreR-P(以下、CS プロトコル)におけるデータ伝搬性の定式化を試みる。実験結果では、実験開始から約 5 分 3 秒で 4 個体の装着個体間でデータ転送が完了すると算出された。ここで、装着個体間で全データ転送が完了するまでの各実験犬における遭遇回数を、Table.3.4.4 で示している。

Table.3.4.4 より、各実験犬の必要とした遭遇回数の平均を算出すると 8 回であり、本実験での必要とする時間とほぼ近似の関係にある。

以下により、サンプル個体数を 4 個体と設定し、CS プロトコルを実装した場合、データ伝搬のためのおおよその必要となる時間は以下の式により推定可能である。

$$T_p = TP_c$$

T_p は装着個体間で必要となるデータ伝搬の時間、 T は全体の実験時間、 P_c はデータ伝搬のために必要な遭遇割合である。

以下の式により, c を実験での全体の遭遇回数(本実験では 30 回), c' を各装着個体のデータ伝搬のために必要な遭遇回数の平均値と仮定した場合,

$$P_c = \frac{c'}{c} \quad (3.4.5)$$

となる.

CS プロトコルでは, $P_c = 0.266$ となることから $T_p = 5.33$ と算出される. 実際の結果より, $T_p = 5.05$ となるので, 誤差を含むがデータ伝搬のために必要な時間推定の近似式として有効性があると言える. 特に森林地域での野生動物調査のためのデータ伝搬を想定した場合, 月間や年間スケールでの推定になることから, 十分に有効性があると言える.

これまで述べた, 実験に用いたイヌの体高と通信時間の割合の相関関係について, 線形近似を用いて Fig.3.4.20 で示している. この図より, $R = 0.788$ となり相関があることが分かるが, Dog C-1 のデータを取り除いた場合は, $R = 0.948$ となり強い相関がある. 定式化のために, これまで述べた体高と体重の関係から Dog C-2 のデータを取り除いた PreSR-P(以下, CS/P プロトコル)と CS プロトコルの体高と電力消費量の相関関係(Fig.3.4.21)から通信時間の消費電力量の定式化を試みる. 本来であれば, CS プロトコルのデータから定式化を行なうべきだが, サンプル数が少ないため信頼性のある定式化が出来ない. 誤差範囲も想定し, ここでは CS/P プロトコルと CS プロトコルのデータから定式化を行なう.

本実験と同様の条件設定である, 動作判定の合成加速度の閾値を 0.2, 静止時間を $1.0s < t < 10.0s$ とする. 相関のある Fig.3.4.20 の線形近似式を用いると, 遭遇履歴を用いたデータ転送の結果から CSMA/CA プロトコルの通信時間の割合を用いて, 想定される通信時間の割合 T_d に対して以下の関係式が成り立つ.

$$T_d = 0.022x - 0.6666 \quad (3.4.6)$$

となる. x は体高(cm)である.

よって(3.4.6)より, 消費電力の算出のために, T は実験時間(20min), I は送受信時の電流(mA), I' は待機中の電流(mA)とすると, 下の関係式より求まる.

$$[mWh] = VT(I T_d + I'(1 - T_d)) \quad (3.4.7)$$

<i>Proposed Protocol for Data Exchange</i>	<i>Dog B</i>	<i>Dog C-1</i>	<i>Dog C-2</i>	<i>Dog C-3</i>
PreR-P	8	9	8	7

Table.3.4.4 PreR-P(CS プロトコル)におけるデータ伝搬完了時(約5分3秒)の
遭遇回数の総数[20]

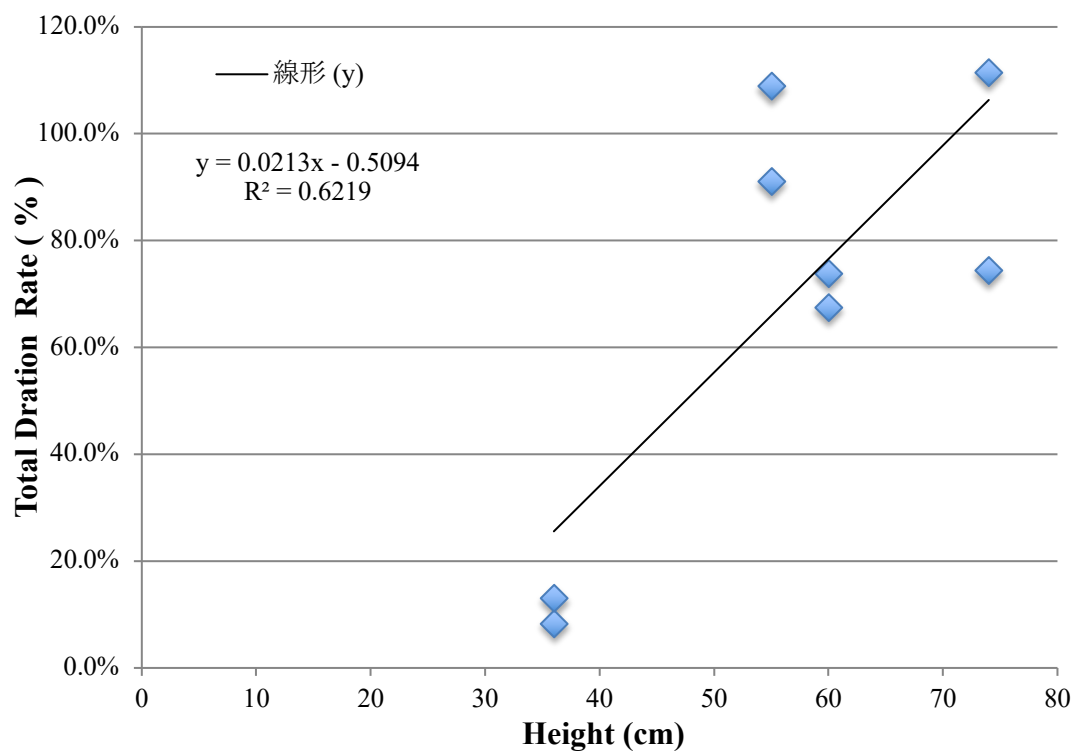


Fig. 3.4.20 実験に用いたイヌの体高と通信時間の割合の相関関係[20]

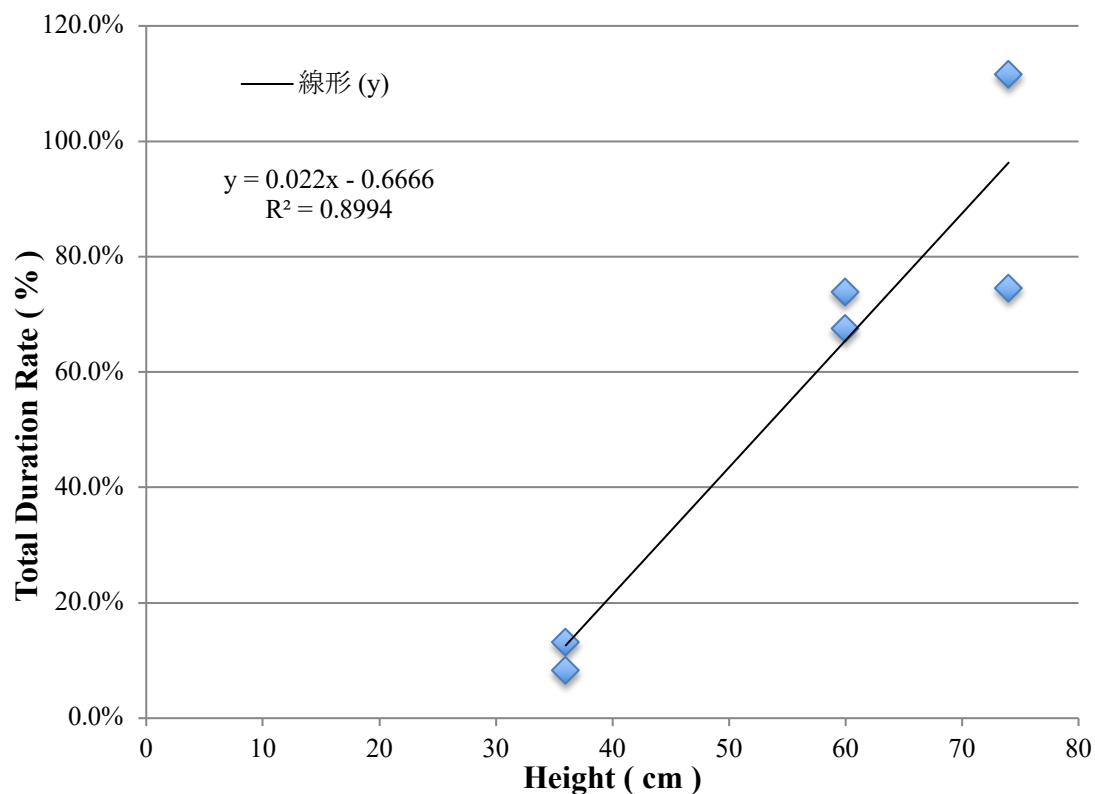


Fig. 3.4.21 Dog C-1 のデータを取り除いた各イヌの体高と通信時間の割合の相関関係 [20]

3.5 総括

本章では、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大のために、動物間通信の通信機器 Wake 制御アルゴリズム、威嚇行動時の通信機器 Wake 制御アルゴリズム、遭遇履歴を用いたデータ転送手法の 3 つの機能について述べ、それらの有効性を検証するための実験概要、実験結果、考察について機能毎に述べた。動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大とは、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査手法において、課題の一つである「低消費電力」を解決する AMUSystem の仕様の一つである。本仕様は以下 3 つの機能により構成される。

1 つ目の機能は、通信機器 Wake 制御アルゴリズムである。通信機器 Wake 制御アルゴリズムでは、動物同士の接触時(すれ違い)に着目し、動物同士が接近した際に生じる習性行動の特徴量を 3 軸加速度センサーで解析する。解析した習性行動の特徴量により、他の装着個体との遭遇時のみ通信機器を Wake させ、低消費電力な装着個体間通信を実現させる機能である。実験犬を用いた 2 つのフィールド評価実験を行った。1 つ目のフィールド評価実験では、実験犬 1 個体に加速度センサーを装着させ、通信機器 Wake 制御アルゴリズムで必要と

なる動作判定の最適な閾値の検討を行った。次に、2つ目のフィールド実験では麻布大学伴侶動物研究室の協力の下、実験犬4個体を装着個体として、1つ目のフィールド実験で求めた動作判定の最適な閾値を使用して、装着個体間の遭遇時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの検証を行った。それぞれのフィールド実験において、ボールの反応や他の装着個体の遭遇時における習性行動をビデオカメラで撮影し、習性行動と通信機器 Wake アルゴリズムの比較を行った。これらの結果から、他の装着個体との遭遇時に約 70%以上の確率で通信機器 Wake 制御が可能であることが分かっている。

2つ目の機能は、威嚇行動時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムである。空間的・時間的な変化に対応した通信機器 Wake アルゴリズムの必要性を述べ、本研究ではその準備段階として、威嚇行動時において3軸加速度センサーの合成加速度から威嚇行動の特徴量を検出し、威嚇行動時における通信機器 Wake 制御を最適化する手法を提案した。威嚇行動の検出に最適化した通信機器 Wake 制御アルゴリズムにより、威嚇行動時の通信機器 Wake 制御の検出可能性を高めることである。麻布大学伴侶動物研究室の協力の下、実験犬4個体に加速度センサーを装着させてフィールド実験を行った。本フィールド実験では、実験4個体にリードなどを付けずにドッグランで自由に動き回れる状態にして実験を行うことで、実験犬が本来持つ習性行動を引き出し、威嚇行動時における通信機器 Wake アルゴリズムの評価を行った。威嚇行動時の動作判定の最適な閾値を求めることができ、効率的な通信機器 Wake 制御アルゴリズムに貢献している。

3つ目の機能は、遭遇履歴を用いたデータ転送である。装着個体の遭遇時に、通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる通信機器 Wake 後、非同期スケジューリング手法によるデータ送受信を提案している。具体的には、装着個体の遭遇履歴により Carrier Sense の時間を延ばす重み付けをすることで、装着個体間でデータ送受信の順序決定を行っている。また、上記の重み付けにより中継ノードは多くのデータを受信可能となるため、より効率的なデータ伝搬を実現する。中継ノードが基地局に帰還してデータ回収が行われた場合、他の装着個体と比較して保持データが多いためより多くのデータ回収が可能であるためである。本機能を検証するため、麻布大学伴侶動物研究室の協力の下、実験犬4個体に加速度センサーと通信機器を装着させてフィールド実験を行った。フィールド実験では、実験犬である装着個体が遭遇時に、通信機器がアルゴリズムにより Wake した後のデータ送受信において、提案する遭遇履歴を用いたデータ転送手法の有効性の検証を行った。結果、遭遇履歴を用いたデータ転送手法(CS プロトコル)がデータ転送において有効な手法であることを示した。これらの結果に加えて、通信機能が常時オンである状態(CSMA/CS プロトコル)と比較した低消費電力性についても述べている。

以上、3つ機能により、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大を実現

することが可能であることを示した。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査手法において課題であった「低消費電力」について、AMUSystem の仕様である動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大により解決可能に近づけた。

第 4 章

省力化：法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減の研究

4.1 はじめに

本章では、法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減について述べる。法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減とは、10 年以上の長期的な野生動物調査において、定期的なデバイスの放獣による Data Sharing 機能の維持によりデバイスの再捕獲が不要となることで、データ回収やデバイス管理のために必ず発生する再捕獲の運用コストを削減することである(Fig.2.2.3)。

ここで述べる法的対応とは、具体的には次のような手順のことである。すなわち、野生動物を捕獲するには、法的に有害鳥獣捕獲、学術捕獲などの捕獲許可を得ることが必要である。さらに実務上捕獲に当たっては捕獲者に有効な狩猟免許が求められることが多い。また前述のような首輪型デバイスを装着するにあたっては、実際に動物を捕獲し麻酔して行うが、麻酔薬のほとんどは麻薬、もしくは向精神薬に指定されているため、麻薬および向精神薬取締法に基づいて管理され、日本では獣医によって麻酔処置される必要がある。こういった法的対応、法的要件を完備するのは容易ではない。

10 年以上の長期的な野生動物調査を実現する上で、装着個体の寿命が課題となる。なぜなら、本研究の装着対象とするアライグマの寿命は野生環境下では 2・3 年程度となるため、装着個体の寿命により Data Sharing 機能を維持することが出来ない。野生環境の特性として、交通事故、捕獲、捕食者、感染病、厳冬など様々な脅威により装着個体が早期に死亡することで、バッテリー持続時間より寿命が短い場合も想定される。つまり、長期間の野生動物調査のためにはバッテリー持続時間と装着個体の寿命の考慮が必要となる。

一方、既存手法により 10 年以上の長期的な野生動物調査を実現する場合、定期的にデバイスを装着させた個体を放獣し、装着個体の寿命が尽きる前に再捕獲を繰り返すことで長期的な野生動物調査を行うことが可能である。しかし、調査員にとって法的対応によるデバイス再捕獲の作業負荷は高い。なぜならば、例えばアライグマを 1 匹捕獲するには、その生息地に捕獲檻 1 個を設置して常に餌がある状態を維持する必要があるが、捕獲檻を設置しても必ずしもデバイス装着個体のアライグマが捕まるとは限らない。仮に、同じ生息地の希少種が捕獲された場合（錯誤捕獲）は違法行為となるため法的対応のために檻から放す作業

が発生する。また、餌が無くならないうちに捕獲檻を再確認し、必要に応じて対応する必要がある。入手可能な檻の数、檻1つを運び設置する作業の時間、檻全てを監視する手間を考慮すると、1匹を再捕獲するための運用コストは高い。ICT型の檻も既に市場には存在する[67]が、本研究が対象とする電力・通信インフラの無い帰宅困難地域では利用できない。従って、これらの捕獲作業は全てが手作業となり、帰還困難区域は線量が高い地域であるため調査員の被曝量も高まる恐れがある。また、浅野らの研究[68]では、再捕獲が装着個体に与えるストレス影響が大きいことから、デバイス装着のストレスと再捕獲のストレス影響を予め検討する必要がある点においても運用コストは高いと言える。これらを考慮した法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストは高い。

そこで、AMUSystemでは10年以上の長期的な野生動物調査を行うための運用コストを削減するため、定期的なデバイスの放獣によるData Sharing機能の維持によりデバイスの再捕獲が不要となることで解決を試みている。具体的には、10年以上の長期間の調査期間において、数年毎に定期的に年齢の若い装着個体の放獣を行うことによりData Sharing機能を維持することにより、デバイスの再捕獲無しで動物間マルチホップ転送方式による調査手法のTouch'n Go at Home (Fig.1.2.10)によりいずれかのデバイスが基地局に帰還すればデータが回収可能である。本研究では、同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率なモデルを明らかにすることで、運用コストの低い最適化シナリオを明らかにする。まず、Spin-up timeを考慮しないデバイス放獣シナリオにおいて、マルチエージェントシミュレーションを用いて最大効率の放獣シナリオの検討を行う。しかし、詳細は後述するが、シミュレーション検証において初期ノイズの課題が存在することがわかっており10年以上の長期間を考慮した観点では最適な放獣シナリオではない。そこで、初期ノイズの課題を除外するための期間(Spin-up time)を設けて、Spin-up timeを考慮したデバイス放獣シナリオとしてシミュレーション検証を行い最適なシナリオを明らかにする。

これらの最適モデル検討結果により、AMUSystemでは10年以上の長期的な野生動物調査においても運用コストが低い最適化モデルを提案する。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査において、課題であった「低メンテナンス負荷」を解決することが可能である。次節より、各モデルの概要、実験、結果と考察、総括を述べる。

4.2 Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの提案

4.2.1 提案手法

4.2.1.1 装着個体の寿命を考慮したアプローチ

寿命を考慮した長期的な野生動物調査のためには2つの手法が考えられる。一つは首輪型デバイスの装着対象に幼獣を選定する手法である。寿命の観点から装着対象個体を幼獣とした場合、成獣に比べて寿命の長さの観点で優位性がある。しかし、体サイズは成獣になるまで小さいためバッテリー搭載サイズが限定されてしまい、デバイスの稼働期間に制限を与えてしまう。また、加齢とともに成獣になるまで体サイズが大きく変化することで、装着している首輪型デバイスが外れるなど別の課題が発生する可能性がある。加えて、幼獣は成獣と比較して病気や捕食者等の脅威を受けやすく、死亡確率が高い傾向にある。これらの点を踏まえ、幼獣選定は有効な手法とは言えない。

別の手法として、装着個体を自然環境に定期的に放獣する手法が考えられる。しかし、これまで述べてきたように装着個体である野生動物には寿命があるため、調査期間に応じて複数回に分けて断続的に装着個体を放獣する必要がある。しかし、動物間通信機能を維持するために装着個体の放獣数を闇雲に増やすことは調査員の作業負荷が増加してしまうため困難である。装着個体の死亡時期を考慮し、いつ、どのくらい装着個体を自然環境に放獣すべきか検討し、装着個体の放獣の指針を決める必要がある。

4.2.1.2 Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオ

Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオについて述べる。Spin-up time とは、シミュレーションにおける個体数変動に対する初期値の影響を無くすための慣らし運転の時間を意味する[69]。そして、Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオとは、シミュレーション慣らし運転の時間を行わずにシミュレーション実験を行い、同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオを指す。

Fig.2.2.3 では、自然環境を示しており、0年後、1年後、1.5年後の装着個体数を示している。また、(a)が定期的な放獣を行わないシナリオ、(b)が定期的な装着個体の放獣を行うシナリオの例を示している。(a)のシナリオでは、0年では装着個体の放獣により自然環境において装着個体が存在していることが分かる。しかし、1年後には装着個体数は減少し、1.5年後

には全ての装着個体数が存在しないことが分かる。理由としては、装着個体の寿命により時間経過とともに各装着個体が死亡したことで装着個体が空間から存在しなくなり、動物間通信機能は維持が出来ないことが分かる。従って、(a)のシナリオでは、調査期間の間に装着個体数が1個体も生存しない状態となった際、各装着個体が取得したデータは他個体に伝搬されないことから、取得データは回収されないまま全ての取得データが失われてしまう可能性がある。

一方、(b)では定期的な装着個体の放獣を行うシナリオであり、1年、1.5年の経過時点で複数の装着個体を放獣している。時間が経過するにつれて寿命により死亡した装着個体数と放獣個体数により、自然環境の装着個体数は変動している。しかし、1年、1.5年の経過時点では生存している装着個体が数を上回っており、装着個体数は存在していることから動物間通信機能は維持できていると言える。従って、シナリオにより10年以上の長期間でもAMUSystemの維持が可能であり、すなわち長期的な野生動物調査が可能であると言える。

しかし、調査員の数は限られており、闇雲に装着個体を放獣することは調査員の作業負担が高くなるため困難である。特に、10年以上の長期間の調査となる場合、その調査員の作業負担は継続して発生してしまうため、調査員の作業負担を低減する必要が求められる。そこで、本研究では、動物間通信機能の維持のための調査員の作業負担を低減した最適化シナリオの検討を行う。つまり、同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオを明らかにする。具体的には、1年間で同じ数の装着個体数の放獣を同一の作業負担であると仮定し、放獣頻度と装着個体数が異なるシナリオを用意する。それらのシナリオを数年単位で検証し、最も遭遇頻度が高いシナリオを明らかにすることで、調査員の同一の作業負担で最も効率的なシナリオを求める。

以上の検討結果から、同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオが明らかになる。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負担」を解決することが可能である。

4.2.2 実験概要

4.2.2.1 シミュレーション環境

Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの検討のために、汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームである artisoc[70] (Kozo Keikaku Engineering Inc. が提供) を利用したシミュレーション検証を実施する。マルチエージェントシステム (MAS)[70], [71] とは、ダイナミックに変化する社会などを、自律的に行動するエージェントの行動ルールおよび相互作用を定義し、コンピュータの中に人工的な社会を構築すること

で分析できる仕組みである。また, *artisoc* は, アイデアをすぐにモデルへ反映できる, 直感的な操作性を兼ね備えたマルチエージェントシミュレーションのためのプラットフォームである(Fig4.2.1, 4.2.2). *artisoc* を利用した研究として三浦ら[72]の研究例において, 複雑系をテーマとして, *artisoc* を用いた教育プログラムである PBL (Project Based Learning) プログラムの実践例とその成果について述べている。複雑系とは, 経済, 交通, 戦争, 伝染病や大衆行動などの複雑な社会現象を理解するための分野であり, 昨今のコンピュータ技術の進化によりこれらの複雑系の研究や分析にマルチエージェント・シミュレーション手法(MAS)が用いられている。コンピュータの専門知識を持たない学生にとって MAS のコンピュータシミュレーションの構築は難しいと言われている。そこで, 佐々木らは *artisoc* の上記の特性を活かした学生向けの教育プログラムの設計を試みている。以上から分かるように, *artisoc* はコンピュータの専門知識を持った研究者だけでなく, コンピュータの専門知識を持たない研究者にとっても有用なツールであると言える。

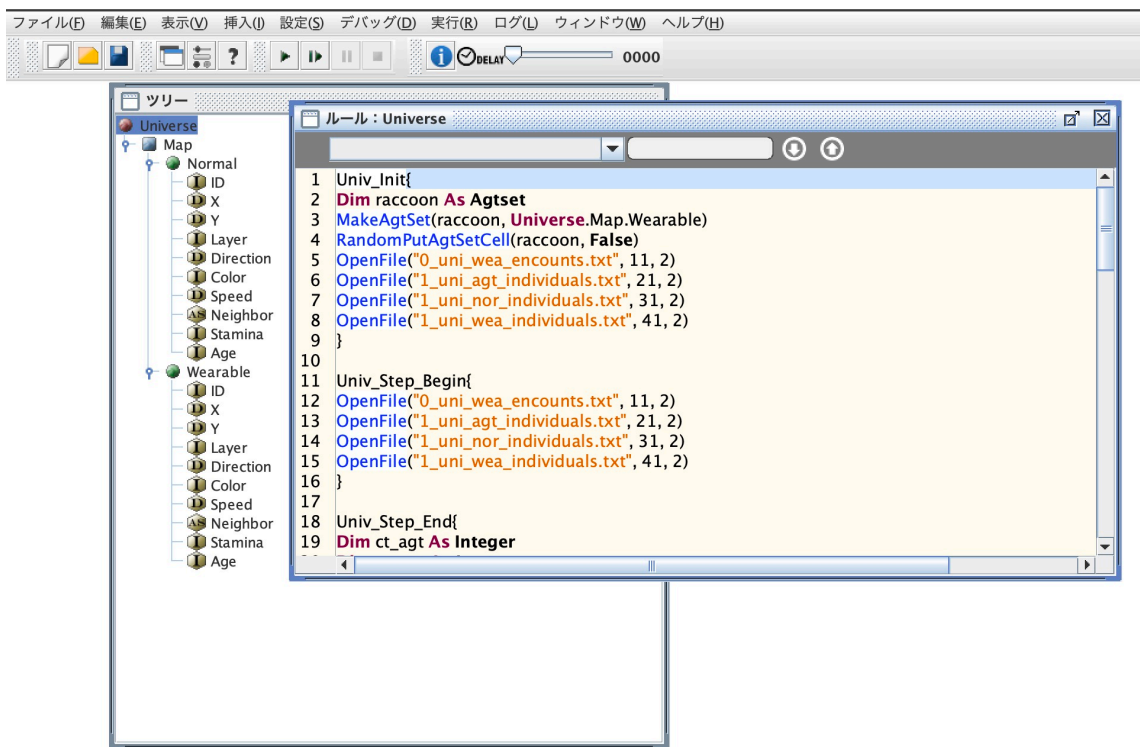


Fig. 4. 2. 1 *artisoc* のシミュレーションパラメータ (例: Universe)

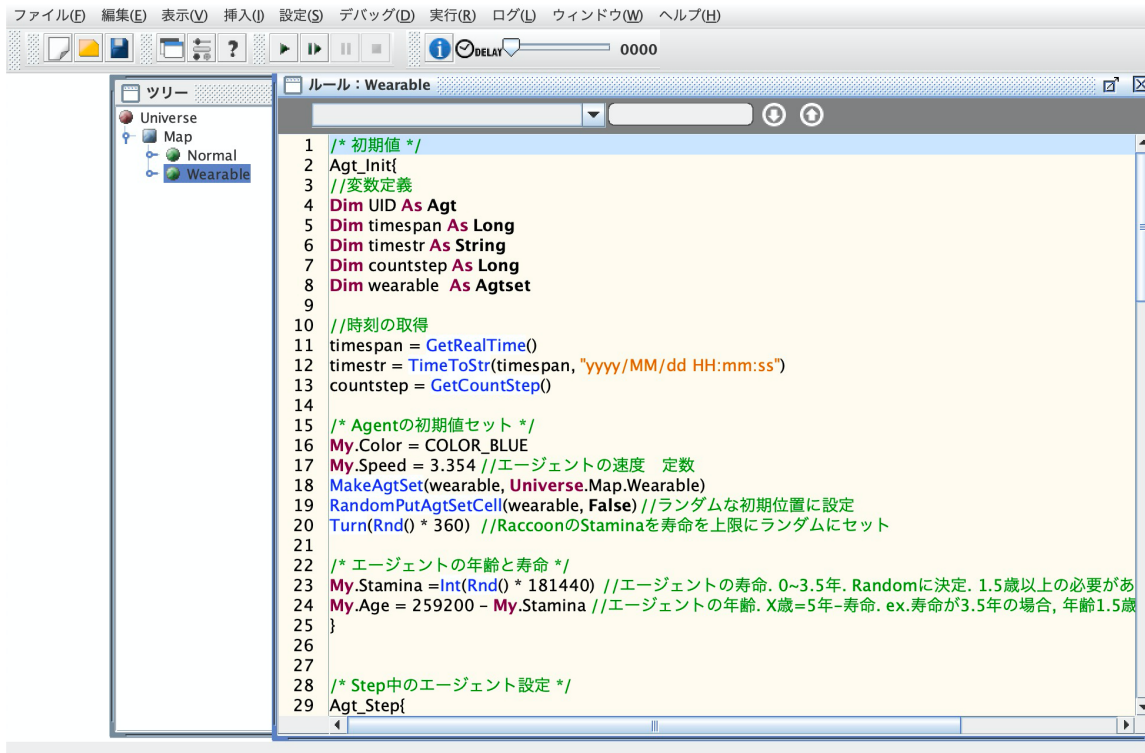


Fig. 4. 2. 2 artisoc のシミュレーションパラメータ (例: Agent: Wearable)

4. 2. 2. 2 Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの実験概要

汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームである artisoc を使用して、先行研究[28], [73]の知見を活用して、人の立ち入りが難しい自然環境と装着個体である野生動物、装着個体間の遭遇を再現する。具体的には、Rossate らの先行研究[28]におけるアライグマの生態行動の知見を活用する。前提でも述べたように、首輪型デバイスの装着個体としてアライグマを前提としており、Rossate らによる長年のアライグマ調査から知見は有用であると言える。なぜなら、Rossate らの研究では 1994 年から 2007 年の 13 年間にかけ 15 万頭以上の個体を生きたまま捕獲して、狂犬病対策のため主に個体密度などのアライグマの生態を調査している。これらの期間と頭数の規模の観点から有用な知見であると言える。

汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームである artisoc では、エージェントのパラメータとして、主に Rossate らの研究[28]の知見を元に、自然環境におけるアライグマの寿命、直線距離、速さ、遭遇距離、個体数の密度等を再現する(Table.4.2.1)。Table.4.2.1 では装着個体であるアライグマの各個体のパラメータを記している。例えば、装着個体の放獣時の寿命は 1.5 歳(18 ヶ月)を想定している。なぜならば、1 歳以上の個体は成

獣とみなされ[74], 体サイズの変化が少ないため首輪型デバイスを個体に装着したとしても外れる可能性が低く, 安定的な稼働が期待できる観点から装着個体の年齢は 1.5 歳を想定している. また, 放獣後の装着個体の寿命は最大 1.5 年としている. 放獣時の年齢が 1.5 歳(18 ヶ月)であり, アライグマの自然環境における平均寿命は 2-3 年であるためである. 各装着個体の寿命については, 放獣時に最大 1.5 年までのすべての値の出現確率が等しい乱数である一様乱数により決定される.

アライグマの移動速度, 移動距離, 遭遇距離について述べる. アライグマの移動速度は 55.9m/h である. [28]によれば, 日中の平均移動距離は 55.9 ± 31.1 m/h, 夜間の平均移動距離は 169.6 ± 78.1 m/h であることから, 日中の最大の平均移動距離の値を使用している. また, [28]によれば 91 頭の首輪型 GPS ロガーから取得したデータによれば, リリースサイトからの平均移動距離は 1.54 ± 1.44 km であることから, 直線移動距離を 1.54km と設定している. また, シミュレーション実験では, 直線移動距離 1.54km 進むと, 次の移動方向は最大 360 度の範囲内で一様乱数により決定される. また, 遭遇距離は 50m 以下として設定しており, ある装着個体が他の装着個体の存在を半径 50m 以内に存在した場合には遭遇とみなす. 遭遇距離を半径 50m 以下としている設定として, Piran らの先行研究[73]によれば, 交尾したキツネのペアは半径 50m 以内に接近する頻度が高いことが分かっており, この研究結果から野生個体間の認知は半径 50m 以内であれば実現可能であると言える. キツネとアライグマの種として異なるため遭遇距離の観点では個体差がある可能性があるが, 同じ陸上の哺乳類であることと, 同じ種においても年齢, 性別, 性格, 健康状態により個体差が生じると考えられることから, 本研究の設定値としては種における差は考慮しないとした. 従って, 本研究では全ての装着個体が半径 50m 以内に遭遇を認知できると設定した.

次に, シミュレーションの環境設定について述べる. Table.4.2.2 では, シミュレーション環境の範囲, 個体密度, artisoc の 1 ステップあたりの経過時間を示している. シミュレーションにおいて想定する自然環境の範囲は 10 km \times 10km としている. 本研究では人の立ち入りが難しい地域を対象としており, 特に福島第一原子力発電所周辺 20km 圏内での野生動物調査を想定している. そのため, 数 km^2 程度では十分な範囲ではない. 従って, 想定エリアの範囲とシミュレーション検証実施における PC のメモリ使用可能量も考慮して, 本研究では 100 km^2 の範囲を設定している. また, 初期値の装着個体の個体数として 350 個体を想定している. [28]によれば, オンタリオ州南部の平均個体密度は 3.4~13.6 個体/ km^2 と述べられていることから, 本研究が想定する 100 km^2 の範囲で個体数を換算して 350 個体として初期値の装着個体数を設定した.

シミュレーションの評価期間はシミュレーション開始直後から 3 年間としている. なぜならば, 自然環境におけるアライグマの最大寿命は約 3 年程度であり, 首輪型デバイスの装

着個体は約 1.5 歳の成獣を想定している。従って、初期放獣の首輪型デバイスの装着個体が最大 1.5 年で寿命を終えることから、シミュレーション期間が 3 年間であれば初期値の装着個体が全て死亡するため 1 サイクルの評価を行うことが可能であると言える。

一方、本シミュレーションでは、行動範囲に影響を与える可能性のある、装着個体の縄張り、年齢、性別の各条件についてはパラメータとして考慮していない。装着個体の縄張りや行動範囲を考慮する上で重要であるが、まだ解明されていないことが多く地域によって大きく異なるため、実験条件として仮定できないため実験条件から除外する。また、年齢、性別などにより行動距離や速さが異なることが分かっている[28]が、生息域における年齢や性別の分布において十分な知見がないため、本シミュレーションでは実験条件から除外する。

本シミュレーション実験では、「一回に放獣する装着個体数」と「放獣回数」の観点で条件の異なる 4 つの放獣シナリオの比較検討を行う。動物間通信機能を維持するためには高い遭遇頻度が野生動物調査期間において求められる。長期間の高頻度な遭遇は、出来るだけ多くの装着個体数と頻度の高い放獣により実現可能であるが、これまで述べたとおり、調査員の作業負荷が増加してしまうためこれらの数を際限なく増やすことは難しい。そこで、本シミュレーション実験では 3 年間で合計 350 個体を自然環境に放獣し、「一回に放獣する装着個体数」と「放獣回数」の観点で各放獣シナリオの遭遇頻度を比較する。Table.4.2.3 における 4 つの放獣シナリオでシミュレーションを行い、各放獣シナリオの比較検討から最も遭遇回数(すなわち動物間通信)が高い効率的な最適な放獣シナリオを明らかにする。すなわち、同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオが明らかになることで、メンテナンス負荷の低い最適なシナリオが明らかになる。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負荷」を解決することが可能である。

Agent parameters	
Age	18 months
Maximum life	18 months
Speed	55.9 m/h
Direct distance	1.54 km
Distance of encounter	Less than 50 m
Direction	Randomly changing (per 1.54 km they move)

Table. 4. 2. 1 シミュレーション検証時のエージェントパラメータ

General parameters	
Area	10 × 10 km ²
Density of individuals	350 (initial status)
1 Step (Artisoc)	10 min

Table. 4. 2. 2 シミュレーション検証時の環境パラメータ

	Number of individuals	Number of times
Method 1	0	0
Method 2	175	2 (per twelve months)
Method 3	70	5 (per six months)
Method 4	10	35 (per one months)

Table. 4. 2. 3 最適化シナリオ検討のための各放獣シナリオ (Method1~4)

4. 2. 3 結果と考察

4. 2. 3. 1 Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの結果

4.2.2 で述べたシミュレーション実験の結果について述べる. Fig.4.2.3 は artisoc による実際のシミュレーション時の様子である. Table.4.2.3 における 4 つの放獣シナリオでシミュレーションを行い, 各放獣シナリオの比較検討から最も遭遇回数(すなわち動物間通信)が高い効率的な最適な放獣シナリオを明らかにする. 実験の結果, 3 年間で合計 350 頭を「一回に放獣する装着个体数」と「放獣回数」の観点で放獣シナリオを分けた場合, 3 年間の遭遇回数が各放獣シナリオで異なることが分かった(Fig4.2.4~8). 各放獣シナリオの遭遇回数を比較すると, Method 4 (放獣个体数:10, 放獣回数 : 35)が, Method 1 (放獣なし)と比較して遭遇回数が約 1.69 倍多く, Method 2 (放獣个体数:175, 放獣回数 : 2)と比較して放獣回数が約 1.11 倍多いことがわかった.

従って, 本研究結果から, 3 年間で同じ装着个体数を放獣する場合に, Method4 のように一回に放獣する装着个体数を増やすよりも放獣回数を増やす放獣シナリオが, 最も遭遇回数(動物間通信の回数)が多い最適なシナリオである. 従って, 同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオが明らかになったことで, メンテナンス負荷の低い最適なシナリオが明らかになった. AMUSystem の一つの機能である動物間通信端末のメンテナンス負荷の省力化が実現できたことで, 動物間マルチホップ転送方式に

よる長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負荷」の解決に近づけた.

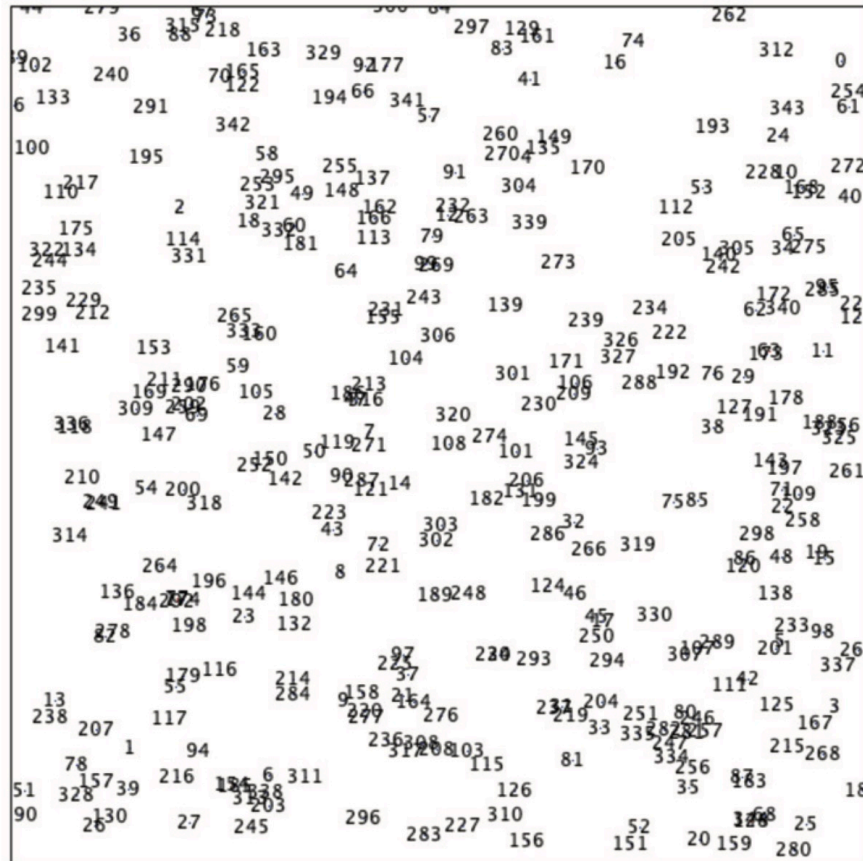


Fig. 4. 2. 3 artisoc による実際のシミュレーション実験時の様子

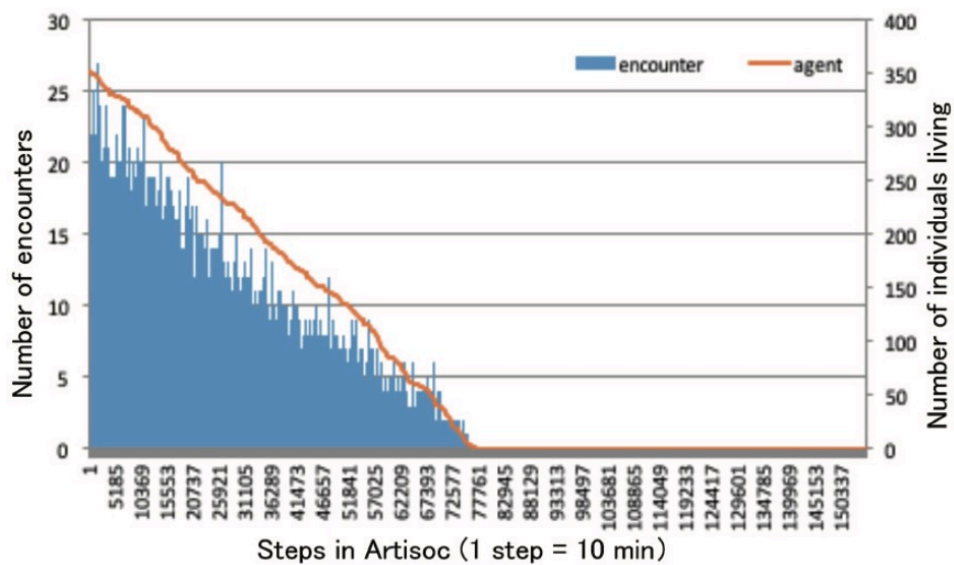


Fig. 4. 2. 4 Method 1 実験結果

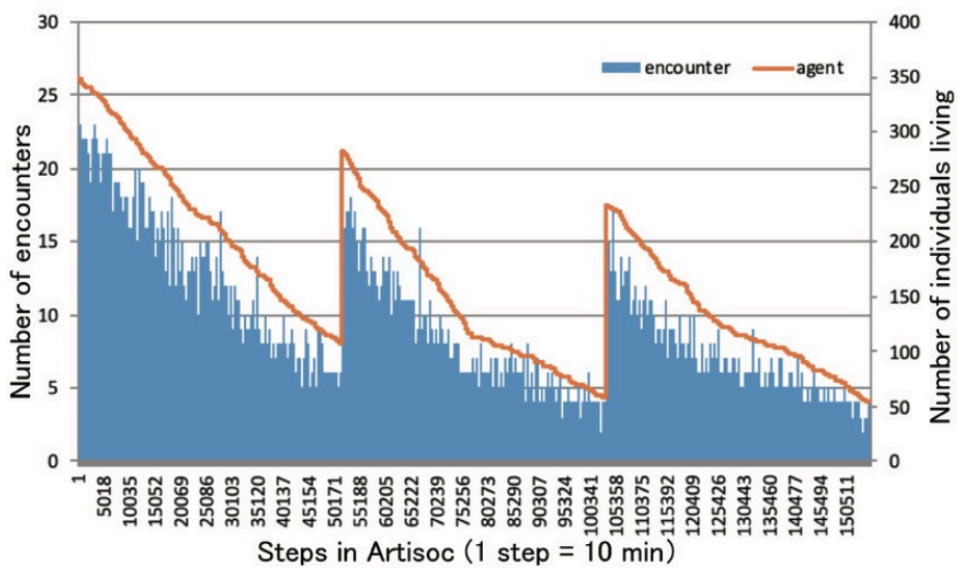


Fig. 4. 2. 5 Method 2 実験結果

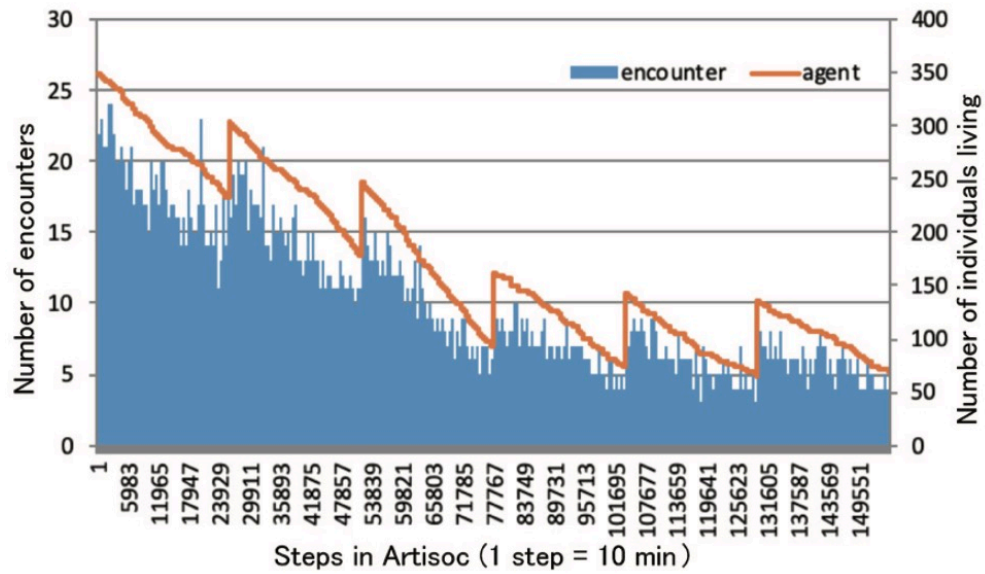


Fig. 4.2.6 Method 3 実験結果

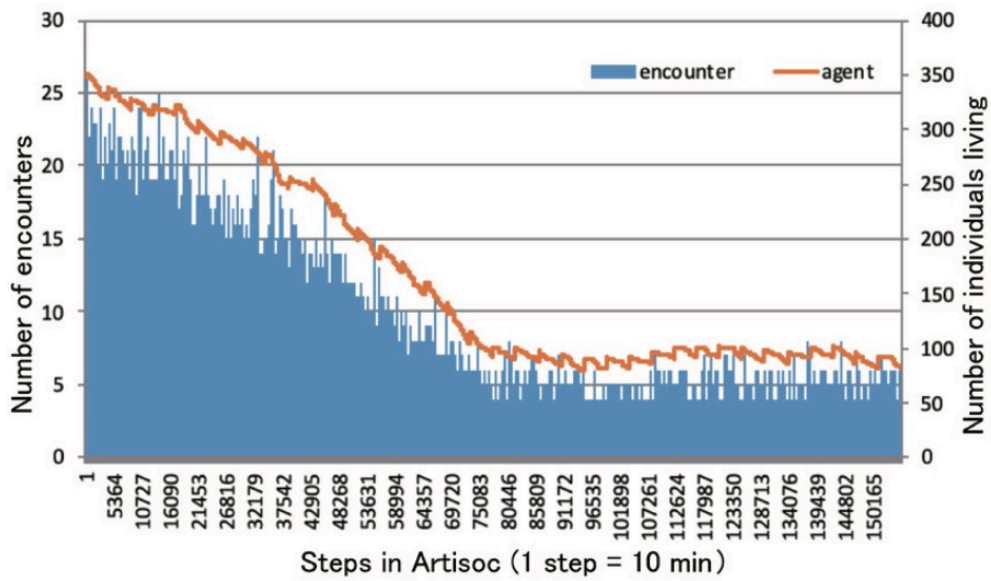


Fig. 4.2.7 Method 4 実験結果

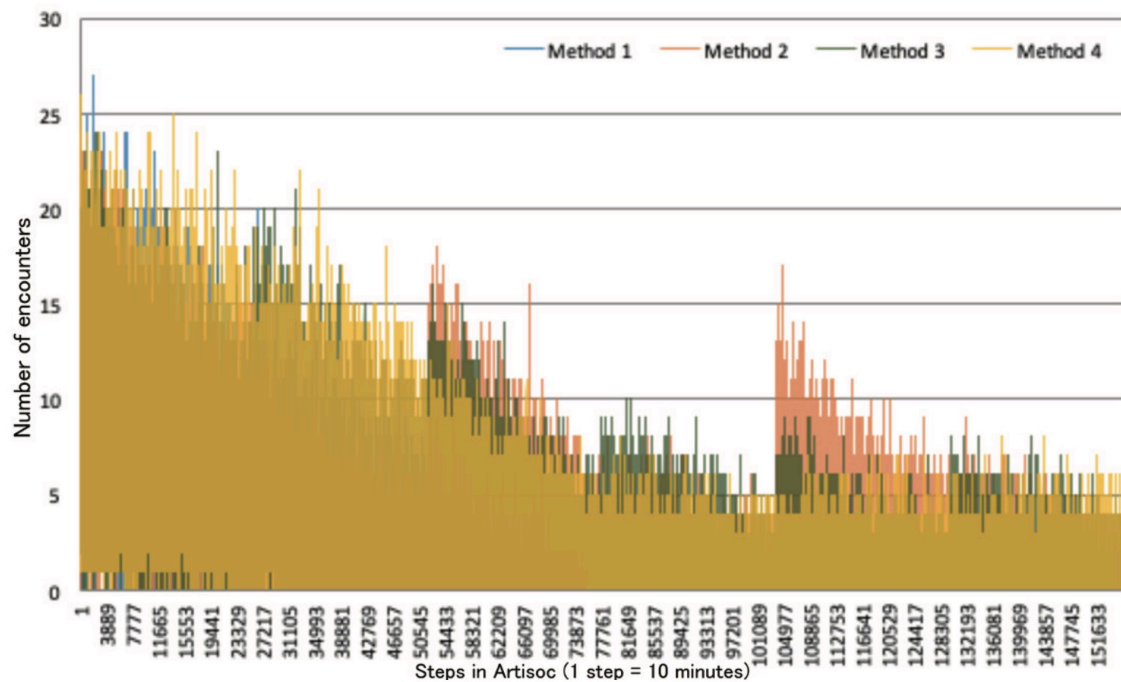


Fig. 4.2.8 各放獣シナリオの実験結果の重ね合わせグラフ

4.2.3.2 Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの考察

Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオにより, 動物間通信端末のメンテナンス負荷の省力化が実現できたことで, 動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負荷」の解決に近づけたことを示した. 第1章の研究背景でも述べたように, 福島第一原子力発電所周辺の森林地域における放射線の影響調査では, 放射線による野生動植物への影響調査には10年以上の調査期間を要する. 従って, 第1章で述べた保全種や有害鳥獣類の野生動物調査と比較すると, 長期間にわたるデータ収集が必要となる. 本章で提案した, 野生動物個体の寿命を考慮したモデルである, Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの検討を行うことで, 長期間にわたるデータ収集が可能となる.

また, 第1章の動物間マルチホップ転送方式による環境調査の概要で述べた, 野生動物調査の空間的な拡がりを実現するだけでなく, 長期間の調査において装着個体が過去の装着個体が取得したセンシングデータを継承することにより, 野生動物調査の時間的な拡がりを実現することが可能である. 従って, 本研究にて前提としている人の立ち入りが難しい遠隔地において野生動物に対する放射線の影響調査など, 10年以上の長期間に及ぶ野生動物調査が必要な場合には Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオ特に有効であると

言える.

4.3 Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオ

Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオについて述べる. Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオとは, Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの初期ノイズを考慮した, 10 年以上の長期間の野生動物調査時における最適化シナリオである. Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオの実験と結果にて詳細は後述するが, 長期間の最適化モデルのためのシミュレーション検討の観点において, 初期ノイズの課題が存在していることが分かっている. 本研究の最適化シナリオでは, 初期ノイズの課題を除外するための期間(spin-up time)を設けてシミュレーション評価を行い, 長期間の野生動物調査時における最適化シナリオを明らかにする.

4.3.1 提案手法

4.3.1.1 シミュレーション検証における初期ノイズの考慮

Fig.4.3.1 では自然環境における各シナリオの例と, シミュレーション検証で対象とする評価期間の違いを赤枠で示している. (a)は Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの検証例であり, 1 年毎に装着個体の放獣を行っていることが分かる. 赤枠で示しているのが検証時の評価期間である. (a)の評価期間について, 図の例では 0 年と 1 年後を示しており, 装着個体の放獣開始から数年間までを評価期間として対象としている. 本評価期間で最適化シナリオの検証を行うことで, 装着個体の放獣開始から数年間において最適化シナリオを得られると言える. 一方, (b)は Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオである. (b)では, 放獣開始直後は評価期間として含めず, 装着個体の放獣開始の n 年後からの評価期間としている.

(a)と(b)の評価期間の違いは, 装着個体の放獣による初期ノイズの考慮の違いである. 佐々木らの研究[75]の気象シミュレーション検証では, シミュレーション開始直後に発生する初期値によるノイズを考慮したシミュレーション検証を行っている. なぜならば, 気象のシミュレーション検証は, 空間・時間のスケールが大きく膨大な数値計算が求められるが, 十分に各設定値の相互作用が完了していないシミュレーション開始直後の結果において, 初期値により計算結果にノイズが現れるからである. 従って, [75]の研究例のように, 初期値によるノイズを落とすため, 初期値によるノイズが十分なくなるまでシミュレーションを行い,

初期ノイズが含まれない時点から評価期間を開始している。従って、長期的な調査において初期ノイズの影響は大きく除外が必要となることが分かる。そして、初期ノイズが含まれない状態までシミュレーションを動かす時間を **spin-up time** と呼び、長期的なシミュレーション検証において初期ノイズを含めない適切な計算結果を得るためには、適切な **spin-up time** が必要であることが分かる。

4.3.1.2 Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオ

放獣開始から数年間の最適化シナリオの知見として(a)の結果は重要であると言えるが、本研究の野生動物調査の期間の前提として 10 年以上を想定している。従って、10 年以上の長期間の野生動物調査を考慮した場合、初期ノイズを考慮して適切な **spin-up time** を用いた検証が必要となるため、(b)の適切な **spin-up time** を用いた **Spin-up time** を考慮したデバイス放獣シナリオの知見が必要となる。

以上の検討結果から、**Spin-up time** を考慮しないデバイス放獣シナリオのシミュレーション評価期間を改善することで、10 年以上という長期的な野生動物調査においてより最適な検討結果を得ることが可能である。そして、本研究において、シミュレーション評価期間の改善により得られたモデルを最適化シナリオと呼ぶ。従って、**Spin-up time** を考慮したデバイス放獣シナリオを得られることで、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負荷」を解決することが可能である。

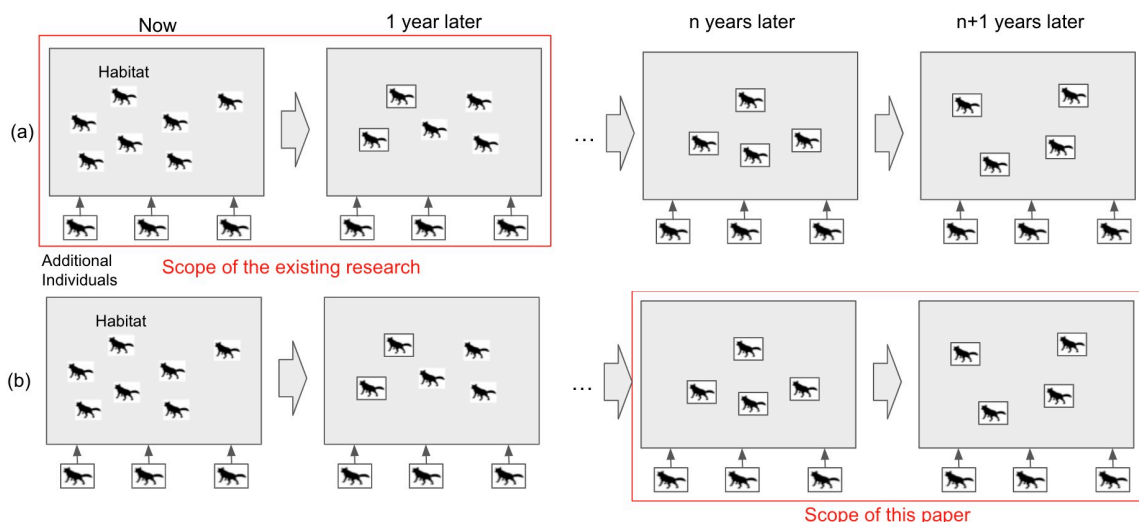


Fig. 4.3.1 Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオの概要

4.3.2 実験概要

4.3.2.1 シミュレーション環境

Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオを明らかにするため、汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームである artisoc を使用する。4.3.2.1 にて artisoc について述べたので省略する。

4.3.2.2 Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオの実験概要

Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオを明らかにするため、汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームである artisoc を使用して、先行研究の知見 [28], [73] を活用して、人の立ち入りが難しい自然環境と装着個体である野生動物、装着個体間の遭遇を再現する。本研究では、主に Rossate らの先行研究 [28] におけるアライグマの生態行動の知見を活用する。Table.4.3.1 における 4 つの放獣シナリオで spin-up time を考慮したシミュレーション実験を行い、各放獣シナリオの比較検討から最も遭遇回数(すなわち動物間通信)が高い効率的な最適な放獣シナリオを明らかにする。同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオが明らかになることにより、メンテナンス負荷の低い最適なモデルが明らかになる。従って、動物間マルチホップ転送方式による 10 年以上の長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負荷」を解決することが可能である。

本シミュレーションの実験における実験環境は、装着個体の初期値、合計の放獣個体数、評価期間を除いて 4.2 の実験と同様の設定値を使用する。なぜならば、本研究では 4.2 の長期的な調査における適切な評価期間の課題に着目しており、4.2 の研究結果と適切に比較検討を行うためには基本的には同じ設定値を用いる必要があるからである。従って、エージェントであるアライグマの移動速度、移動距離、遭遇距離のパラメータは 4.2 の設定値と同様の値を使用する (Table.4.2.1)。

次に、シミュレーションの環境設定について述べる (Table.4.3.1)。Table.4.3.1 から分かるように、シミュレーション環境も主に 4.2 と同様の設定を使用するが、放獣する装着個体の初期値と評価期間は 4.2 と異なるためここでは詳細を述べる。

まず、本シミュレーションの評価期間について 4.2 との違いを述べる。シミュレーション期間は 4.2 と同様に 3 年間としているが、放獣開始後 3 年目の 1 年間を評価対象期間としている。なぜなら、4.3.1 の省力化の提案手法でも述べたように、4.2 の最適化モデルでは初期値のノイズが計算結果に含まれてしまうため、評価開始から数年までの調査期間では最適

モデルを得られるが、長期的な調査期間においては初期値の影響はほぼないため、10年以上の長期間の調査という観点での評価方法として十分ではない。従って、放獣開始後3年目の1年間を評価対象期間とすることで、初期値のノイズの影響を抑え、spin-up time を考慮したシミュレーション検証が可能である。

まず、放獣する装着個体の初期値については、4.2 では350個体であるのに対して本研究では0個体としている。4.2 では自然環境の野生個体密度を[28]の知見を活用して厳密に再現をして検証を行っているが、一方で生息する野生動物の個体と首輪型デバイスの装着個体を区別せず、全て首輪型デバイスの装着個体として仮定して遭遇回数を評価している。しかし、個体間の遭遇時に動物間通信が可能な個体は首輪型デバイスの装着個体に限られるため、遭遇回数をより厳密に評価する場合は首輪型デバイスの装着個体に限る必要がある。従って、本シミュレーションでは、エージェントを首輪型デバイスの装着個体に絞り遭遇回数を評価するため、調査開始時点では装着個体は存在しないことからエージェントの設定値の初期値を0とすることで遭遇回数の評価を厳密に行っている。

次に、3年間で放獣する合計の装着個体数について述べる。4.2 では放獣する装着個体が3年間で350個体であるのに対して、本研究では放獣する装着個体を3年間で合計360個体(1年あたり120個体)としている。既に述べたように評価期間を3年目の1年間としていることから、各放獣シナリオの遭遇回数を適切に評価するため、各放獣シナリオの1年間の合計放獣個体数を同じ値にする必要があるためである。

本シミュレーション実験では、「一回に放獣する装着個体数」と「放獣回数」の観点で条件の異なる4つの放獣シナリオの比較検討を行う。本シミュレーション実験では1年間で合計120個体を自然環境に放獣し、「一回に放獣する装着個体数」と「放獣回数」の観点で各放獣シナリオの遭遇頻度を比較する。Table.4.3.2における4つの放獣シナリオについて述べる。Method 1は放獣する装着個体数が120個体で放獣回数は1回、Method 2は放獣する装着個体数が60個体で放獣回数は2回、Method 3は放獣する装着個体数が30個体で放獣回数は4回、Method 4は放獣する装着個体数が10個体で放獣回数は12回である。Table.4.3.2における4つの放獣シナリオでシミュレーションを行い、各放獣シナリオの比較検討から最も遭遇回数(すなわち動物間通信)が高い効率的な最適な放獣シナリオを明らかにする。同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオが明らかになることで、メンテナンス負荷の低い最適なシナリオが明らかになる。そして、4.2と比較してspin-up time を考慮したシミュレーション実験を行うことで、10年以上の長期的な調査期間において最適化された放獣シナリオを明らかにする。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負荷」を解決することが可能である。

General Parameters	
Area	10 km ²
Initial Population	0
1 Step (Artisoc)	10 min
Evaluation Period	Third year

Table. 4. 3. 1 シミュレーション検証時の環境パラメータ (最適化シナリオ)

	No. of Animal Carriers	Times
Method 1	120	1
Method 2	60	2
Method 3	30	4
Method 4	10	12

Table. 4. 3. 2 最適化シナリオ検討のための各放獣シナリオ

4. 3. 3 結果と考察

4. 3. 3. 1 Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオの結果

4.3.2 で述べたシミュレーション実験の結果について述べる. Table.4.3.2 における 4 つの放獣シナリオでシミュレーションを行い, 各放獣シナリオの比較検討から最も遭遇回数(すなわち動物間通信の回数)が多い効率的な最適な放獣シナリオを明らかにする. 実験の結果, 1 年間で合計 120 個体の装着個体を自然環境に放獣した場合, 評価期間である 3 年目の 1 年間での遭遇回数は各放獣シナリオごとに異なることが分かった(Fig.4.3.2~5). 各放獣シナリオの遭遇回数の比較では, Method 1 (放獣個体数:120, 放獣回数:1)が, Method 3 (放獣個体数:30, 放獣回数:4)と比較して遭遇回数が約 1.28 倍多く, Method 1 が最も効率的な放獣シナリオであることが分かった. また, Method 4 (放獣個体数:10, 放獣回数:12)と遭遇回数を比較すると, Method 1 は+0.11 多いことが分かった(Table.4.3.3).

従って, 本研究結果から, 評価期間を 3 年目とし各放獣シナリオを比較すると, 放獣回数を増やした放獣シナリオも効率的ではあるが, Method1 のように一回あたりに放獣する装着個体数を増やした放獣シナリオが, 最も遭遇回数(動物間通信の回数)が多い最適なシナリ

オであることが分かった. 従って, 10 年以上の長期的な調査において, 同じデバイス放獣数でもデバイス間の遭遇頻度が高い最大効率な最適化シナリオが明らかになったことで, メンテナンス負荷の低い最適なシナリオが明らかになった. AMUSystem の一つの機能である動物間通信端末のメンテナンス負荷の省力化が実現できたことで, 動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の課題であった「低メンテナンス負荷」の解決に近づけた.

	Total Encounters (Ratio. Method 3 is 1.00)	Average No. of Animal Carriers	Maximum No. of Animal Carriers
Method 1	1.28	95	163
Method 2	1.09	91	120
Method 3	1.00	88	108
Method 4	1.17	97	112

Table. 4. 3. 3 各放獣シナリオの実験結果 (最適化シナリオ)

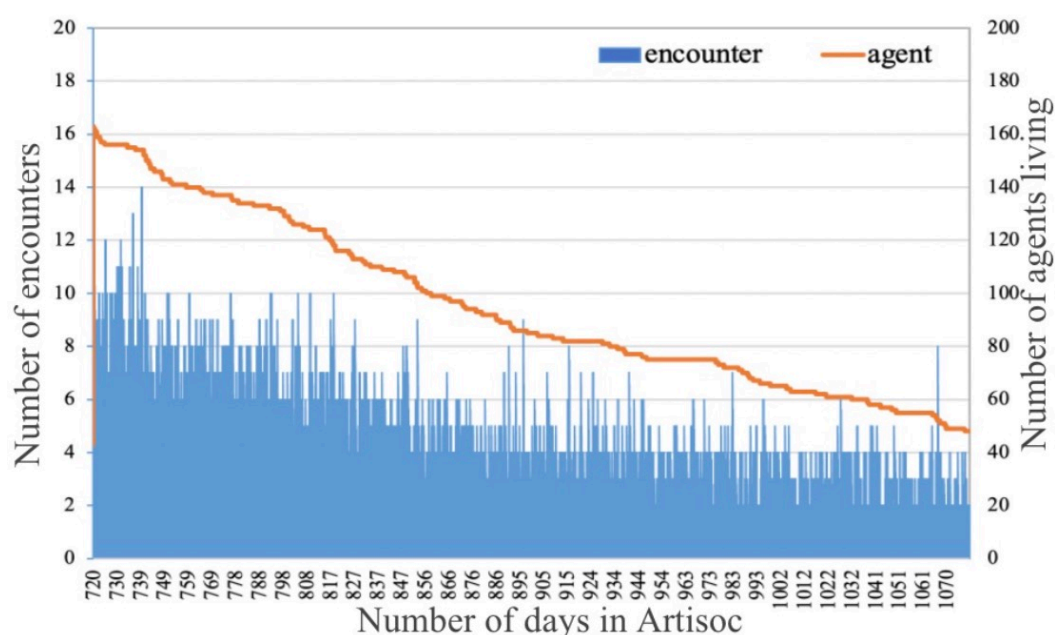


Fig. 4. 3. 2 Method 1 実験結果 (最適化シナリオ)

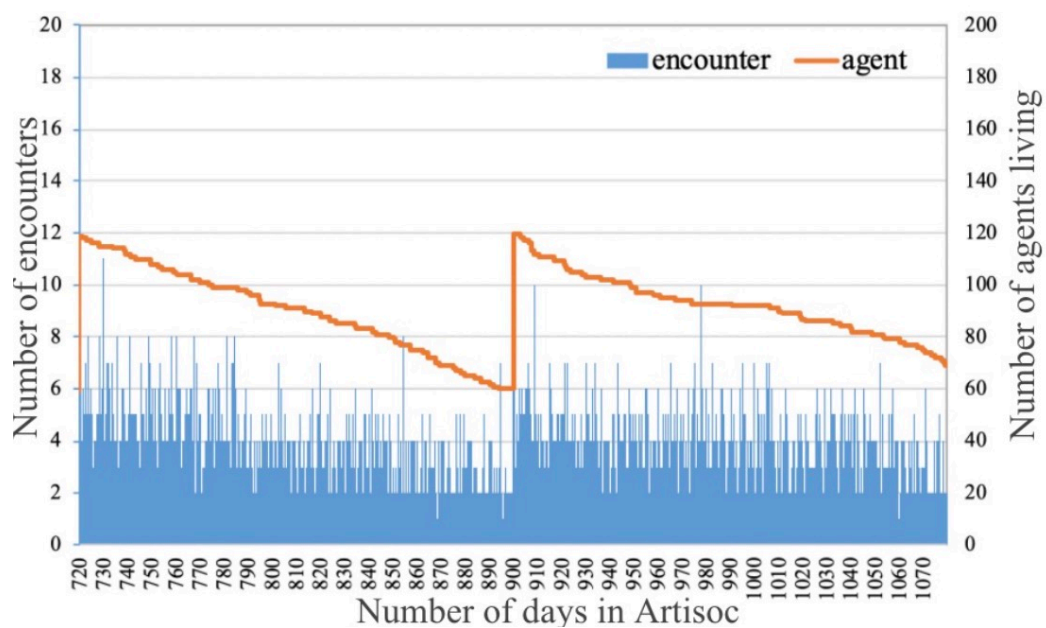


Fig. 4. 3. 3 Method 2 実験結果 (最適化シナリオ)

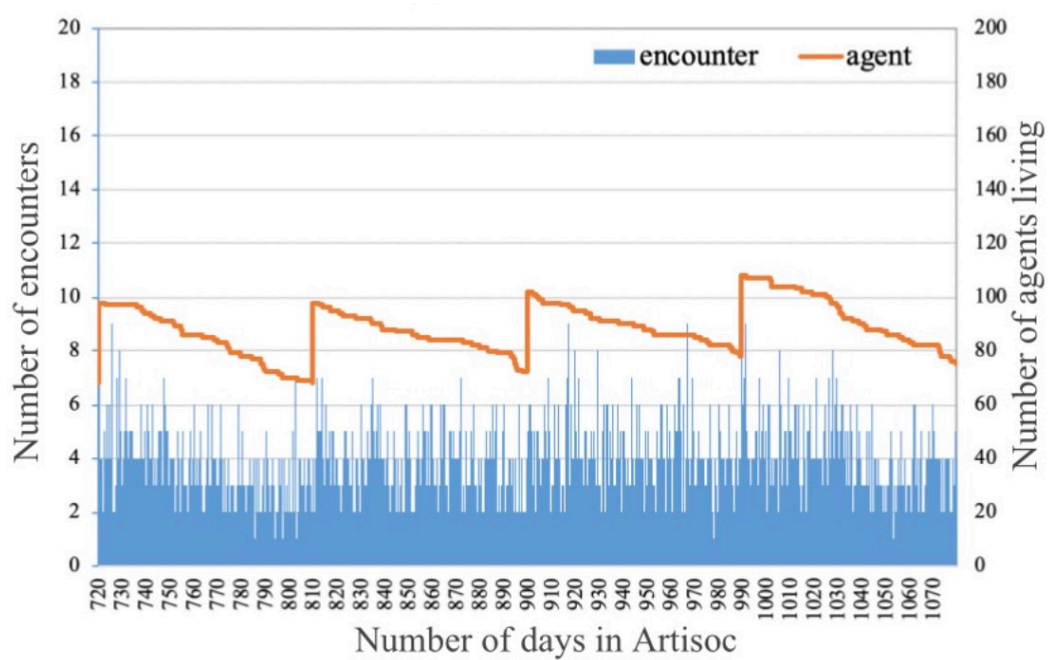


Fig. 4. 3. 4 Method 3 実験結果 (最適化シナリオ)

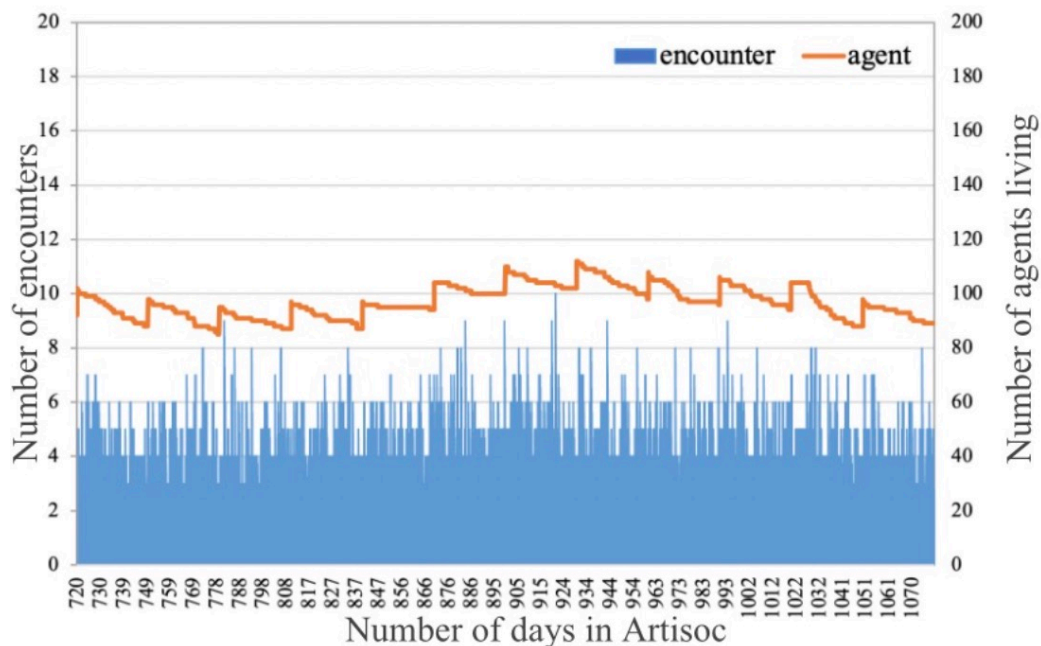


Fig. 4.3.5 Method 4 実験結果（最適化シナリオ）

4.3.3.2 Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオの考察

10 年以上の長期的な野生動物調査のために、本研究では初期ノイズを考慮した Spin-up time を設けたシミュレーション評価を行い、長期間の野生動物調査時における Data Sharing 機能の維持のための放獣シナリオの検討を行った。結果、本シミュレーション結果と Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの結果では、最も遭遇回数が高い最大効率の放獣シナリオが異なることが分かった。Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオでは、Method 4（放獣个体数:10, 放獣回数：35）が最も遭遇回数が高く最大効率な放獣シナリオであることが分かっている。一方、本シミュレーション結果では、Method 1（放獣个体数: 120, 放獣回数:1）が最も遭遇回数が最大効率な放獣シナリオであった。

異なる実験結果が得られた理由として、評価期間の最大デバイス数と平均个体密度の違いが要因の一つとして考察される。4.2 の Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの実験では、4.3.2 で述べたように、デバイス装着个体と装着していない野生个体を区別していない。Rossate らのアライグマの研究結果[28]の个体密度を参考にして、デバイス装着个体の放獣開始前に、生息する野生个体として 350 个体を初期値として設定し、各放獣シナリオの検証を行っている。4.2.4 のシミュレーション結果によると、各手法では个体の寿命により个体数が継続的に減少しており、最も个体数が多く遭遇回数が高いのは野生動物調査の開始直後（実験開始直後）であることがわかる。Fig.4.2.7 の Method 4（放獣个体数:10, 放獣回数：35）の実験結果に着目すると、先程述べた最大个体数が最も高い実験開始直後か

ら1ヶ月毎に装着個体を放獣している。つまり、個体数が最大である実験開始直後から1ヶ月毎に放獣することで、Method 4 (放獣個体数:10, 放獣回数:35)では個体数減少が他の放獣シナリオと比べてなだらかであり、1年後まで個体数と遭遇回数を高い状態で維持してお平均個体密度が高いと言える。一方、初期個体が全て死亡した1年半後以降は初期個体数の影響を受けないため、Method 4 (放獣個体数:10, 放獣回数:35)は他の放獣シナリオと比較して個体数と遭遇回数で低い状態となることがわかる。従って、4.2.4のSpin-up timeを考慮しないデバイス放獣シナリオの実験結果は、実験開始前の初期個体数の影響を大きく受けた結果であり、10年以上の長期的な野生動物調査の検討としては十分ではないということが改めて分かる。

本研究では、前提とする10年以上の長期的な野生動物調査における最適なデバイス放獣シナリオを求めるために、デバイス装着個体と野生個体を区別し、デバイス装着個体のみに限定して各放獣シナリオの遭遇回数の比較を行っている。また、デバイス装着個体の寿命が1.5年であるので、実験開始直後に放獣したデバイスの影響を除外するため2年のspin-up timeを設け、デバイス放獣開始後の3年目の1年間の評価期間で各放獣シナリオの比較を行っている。本シミュレーションのデバイス装着個体の限定と評価期間の改良により、初期状態のデバイス数の影響を受けず(spin-up timeを考慮した)に検討を行っている。Table 4.3.3から分かるように、本研究結果において最も遭遇回数が高いMethod 1(放獣個体数:120, 放獣回数:1)の最大デバイス数は163であり、他の放獣シナリオと比較して最大デバイス数は最も高い。Figure.4.5.7から、2年間で放獣された装着個体の寿命による自然死によりデバイス数はなだらかに減少しているが、他の放獣シナリオと比べて個体密度が高い状態が続いていることがわかる。

従って、4.2.4のSpin-up timeを考慮しないデバイス放獣シナリオの実験結果と本実験結果から、装着個体の放獣時の最大個体数と装着個体密度が高い状態の期間が、調査期間中の合計遭遇回数に影響を与える要因であることが分かった。以上の結果から、Spin-up timeを考慮したデバイス放獣シナリオの結果が10年以上の長期的な野生動物調査において最適であると言える。

本研究で得られた知見である年1回120個体のデバイスを実際の自然環境に適用する場合、今後の課題として遭遇回数を最大効率化できるように放獣時期を検討する必要がある。例えば、本考察で述べた最大デバイス数と平均個体密度を最大化するために、冬が終わり春を迎える前の時期に放獣するシナリオが最適なシナリオであると言える。なぜならば、Rossateらのアライグマの研究結果[28]によれば、自然環境の冬の寒さはデバイス装着者であるアライグマの個体数を減らす要因となると述べられている。従って、冬を過ぎた春先にデバイスを放獣することで、次に冬を迎えるまでに自然環境起因によるデバイス数の減少

を最小化することが出来る。しかし、春はアライグマの繁殖時期であることから、放獣個体同士の繁殖や放獣個体と生息する野生個体の繁殖により、生息する野生個体数が増加する恐れがあるため、遭遇回数の最大効率だけではなくデバイス放獣により付帯して発生する新たな課題について考慮する必要があると言える。

また、4.2.3, 4.3.3 の実験概要で述べたように、アライグマの移動速度、移動距離、遭遇距離、寿命のパラメータについては Rossate らの研究結果[28]から模擬している一方、性別、縄張り等は本研究のシミュレーション実験では模擬していないことを述べた。今後の課題として、性別や性格による個体差、縄張り行動は遭遇回数に影響が大きいいため、エージェントモデルの信頼性を向上するためにはこれらの先行研究を模擬する必要となるだろう。

4.6 総括

本章では、法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減のための、最適化モデルと最適化シナリオの概要、各実験概要、各実験結果と考察について述べた。法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減とは、動物間通信機能を長期的に維持するために、装着個体の放獣を行う際の **Spin-up time** を考慮しないデバイス放獣シナリオである(Fig.2.2.3)。長期的な野生動物調査のためには、10 年以上の長期的な動物間通信機能の維持が求められる。しかし、アライグマの寿命は野生環境下では 2-3 年程度となるため、装着個体の寿命により動物間通信機能を維持することが出来ない。そこで本研究では、10 年以上の長期に渡って動物間通信機能を維持するために、AMUSystem の機能の一つである数年毎に定期的に年齢の若い装着個体の放獣により解決を試みた。具体的には、長期間の調査期間において、調査手間が同じでも装着個体間の遭遇頻度が高く、動物間通信機能を維持しやすい最適化モデルを明らかにすることであった。

本章では、まず、**Spin-up time** を考慮しないデバイス放獣シナリオを得るために、汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームの **artisoc** により想定する自然環境と装着個体として想定するアライグマの生態を再現し、シミュレーション検討を行った。アライグマの生態情報については、Rossate らの先行研究[28]の知見を活用している。シミュレーション実行期間かつ評価期間を 3 年間にて各放獣シナリオの遭遇回数の比較検討を行ったところ、Table.4.2.3 の Method 4(放獣個体数:10, 放獣回数:35)の放獣回数を最も増やした放獣シナリオが効率的な放獣シナリオであることが分かった。

次に、上記で述べた **Spin-up time** を考慮しないデバイス放獣シナリオが直面する評価期間の課題を述べ、その課題を解決した放獣シナリオである **Spin-up time** を考慮したデバイス放獣シナリオについて、同様に **artisoc** を用いてシミュレーション実験を行った。評価期

間の課題とは、spin-up time が考慮されていないため初期値のノイズの影響を受けた結果となるため、10 年以上の調査期間の場合では検討結果が十分ではない点を述べた。従って、最適化シナリオの研究では、10 年以上の調査期間においても効率的な放獣シナリオを得るために、評価期間、装着個体の初期値、装着個体の合計放獣数を変更してシミュレーション実験を行った。特に、10 年以上の調査期間の場合では十分な検討結果を得るために、評価期間を 3 年目の 1 年間に変更して spin-up time を考慮した点が主な改善点として挙げられる。実験の結果、Table.4.3.2 の Method 1(放獣個体数: 120, 放獣回数:1)の一度に放獣する個体数を最も増やした放獣シナリオが最も効率的なモデルであることが分かった。

これらの最適化・最適化シナリオの検討結果により、10 年以上の長期的な調査において、調査手間が同じでも装着個体間の遭遇頻度が高く、動物間通信機能を維持しやすい最適化・最適化シナリオが明らかになった。また、各放獣シナリオの放獣個体数が同じであることから調査手間が同じであると仮定していることから、メンテナンス負荷の低い最適なモデルが明らかになった。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査において、課題であった「低メンテナンス負荷」の解決に近づいた。

第5章

省資源化：縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減の研究

5.1 はじめに

本章では、縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減について述べる。縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減とは、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、Data Sharing 機能の長期的な維持を可能にする、調査期間中の縄張りの主の入替りと群行動の頻度に着目したデバイス数の最適化シナリオである。動物間マルチホップ転送方式の長期的な野生動物調査でも述べたように、本手法では野生動物調査のための捕獲・放獣プロセスを利用して行われるが、10年以上の長期間に渡り常に多数の野生個体が捕獲出来るとは限らない。また、Data Sharing 機能を長期的に維持するために、長期間に渡って多数の装着個体の放獣をする場合、元々生息する野生個体、装着個体、繁殖個体により調査地域の個体数が増加することで、調査地域の生物多様性に影響を与える可能性も考えられる。従って、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、Data Sharing 機能を長期的に維持することが要件として求められる。

AMUSystem の仕様の一つである縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減では、群行動に着目し、親子やオス同士の集団行動などの多世代間の交流時の世代間データ転送により、資源の最小化と動物間通信機能の長期的な維持を実現する最適化モデルである。本モデルにより、動物間マルチホップ転送方式に野生動物調査手法の要件の「低資源」を満たすことで、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、Data Sharing 機能を長期的に維持することが可能である。

上記の最適化シナリオ検討結果により、AMUSystem では縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減モデルを提案する。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査において、課題であった「省資源化」を解決することが可能である。次節より、省資源化シナリオの概要、実験、結果と考察、総括を述べる。

5.2 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化の提案

5.2.1 長期運用時のトレードオフ問題

第4章の法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減でも述べたように、動物間マルチホップ転送方式による10年以上の長期的な野生動物調査のために、動物間通信機能(Data Sharing 機能)の長期運用が必要である。従って、Data Sharing 機能の長期運用を実現させるためには、野生動物調査の対象地域に対して首輪型デバイス装着個体の長期的な放獣を行うことで解決が可能であると言える。しかし、首輪型デバイス装着個体の長期的な放獣を行うことにより、生物多様性の環境的な観点で別の課題が存在する。環境的な課題とは、10年以上に渡って長期的に装着個体を放獣することで、放獣した装着個体数とそれらの繁殖行動により誕生した繁殖個体数によって調査地域の全体個体数が増加してしまい、調査地域の生物多様性に影響を与える可能性がある課題である

(Fig.5.2.1). 本研究ではデバイス装着の法的な難易度から装着個体を有害鳥獣類であるアライグマに設定している。池田らの研究[76]ではアライグマの基本再生産数が3.6-3.9であり外来種であるアライグマの個体数を制御するためには生物学的データに基づいた集中的な駆除が不可欠であると述べられている。また、第1章で述べたように生物多様性や絶滅危惧種などの保全活動が野生動物調査の本来の目的であるため、Data Sharing 機能維持のために10年以上に渡り多くの装着個体を放獣することによる生物多様性への影響は大きいと考えられる。これらから分かるように、アライグマの有害鳥獣類は基本再生産数が高く、放獣する装着個体(デバイス)数は最小にする必要がある。つまり、デバイスの省資源化が必要である。

本課題を解決するために、放獣するデバイス数を大幅に減らすことで放獣個体種の個体数増加を緩やかにすることが可能であるといえる。しかし、技術的な観点で以下の要因により放獣する装着個体数を単純に減らすことはできない(Fig.5.2.2)。

1. Data Sharing 機能の維持が不可
2. 基地局のデータ回収率の低下

1.については、放獣するデバイス数を少なくすることで、野生動物調査対象地域の装着個体の密度が低下する。結果、他の装着個体との遭遇確率が低下することで、他の装着個体に保持データを転送できないためData Sharing 機能が維持できない懸念がある。2.について

は, 第 1 章でも述べたように, 動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法では, Touch'n Go at Home によりいずれかの装着個体が基地局に帰還してデータをサーバーにアップロードすることでデータ回収が可能となる. しかし, 放獣するデバイス数を減らした場合, その減少デバイス数だけ基地局に帰還する可能性のあるデバイス数は減少することでデータを回収できない可能性が増加する懸念がある. これらの要因により, 装着個体のセンシングデータを回収できない可能性が高くなることから, 放獣するデバイス数を単純に減らすことはできない.

従って, Data Sharing 機能の維持と生物多様性の影響はトレードオフの関係にある. Data-Sharing 機能を最低限実現しつつ, 放獣個体種の個体数増加を最大限緩やかにするために, どこまでデバイス数を減らす(省資源化)ことが出来るか指標が必要である.

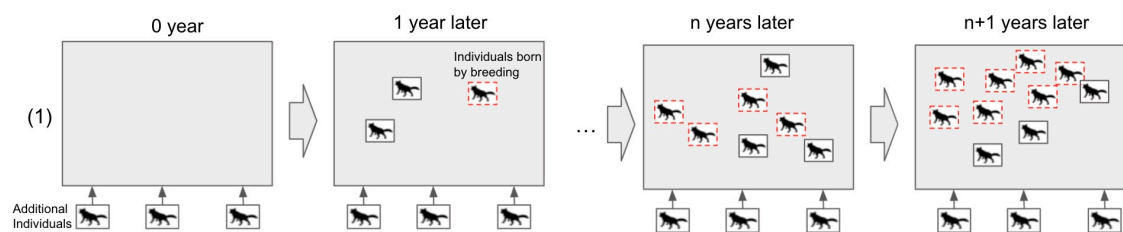


Fig. 5. 2. 1 装着個体の長期的な放獣による総個体数の増加例

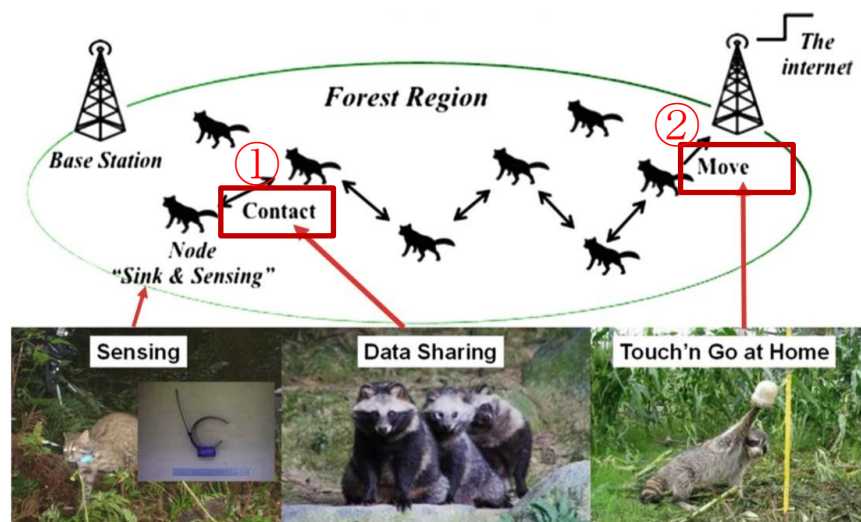


Fig. 5. 2. 2 省資源化における 2 つの課題 ①Data Sharing 機能, ②Touch' n Go at Home
([35]から引用し, 赤字が本研究の加筆箇所)

5.2.2 野生動物の群行動

放獣するデバイス数の省資源化の検討のために、本研究では野生動物の群行動に着目している。例えば、Stanley らのアライグマの性別による社会行動の違いに関する研究[77]によれば、年間を通してオスのアライグマは3-4個体で1つのグループ形成し、休息や採餌の際にグループのメンバーは積極的に行動を共にする傾向があることが分かっている。一方、メスのアライグマは水源近くを生息域としており、オスと比較して基本的には単独行動であることが分かっている。しかし、メスのアライグマについても他の個体とねぐらを共有、他の個体の近くで捕食行動を行うことが分かっている。この行動は、血縁関係(親子や親戚など)にある個体に対しては行われる行動であると考えられている。

これらの研究結果から分かるように、アライグマではオス、メスに限らず群行動が見られることがわかっている。これらの行動はアライグマに限らず、シカにおいても同様の行動が見られていることが農林水産省の「加害鳥獣 生態と行動」[78]でも示されている。

本研究では、これらの群行動に着目しており、年齢が異なるオスでグループが形成される場合や、メスにおいては親子関係でねぐらを共有する場合など、多世代間交流時の世代間群行動に着目している。デバイスの世代間(放獣時期が異なるデバイス間)の群行動を活用した、放獣時期が異なる装着個体間遭遇による世代間データ転送(Intergenerational Multi-hop Network)による、縄張りとは群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオについて次項以降で述べる。

5.2.3 縄張りとは群行動に着目したデバイス数の省資源化

縄張りとは群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオについて述べる。縄張りとは各個体が専有する行動範囲であり、縄張りの主の入れ替えとは専有する主が寿命により入れ替わることである。縄張りとは群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオとは、既に述べた縄張りの主の入れ替えに加えて、親子やオス同士の群行動など多世代間の交流時のデバイスの世代間(放獣時期が異なるデバイス間)データ転送により、資源の最小化と Data Sharing 機能の長期的な維持を実現する最適化モデルである。本モデルにより、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査において課題であった、生物多様性の影響と Data Sharing 機能の維持のトレードオフ問題の解決を試みることに本研究の貢献である。

このトレードオフ問題を解決するため、第3章、第4章で述べた電力寿命やデバイス装着個体の寿命を課題として挙げてきたが、本章ではセンシングデータに寿命はない特徴を活用した世代間データ転送(Intergenerational Multi-hop Network)に着目する。本研究における世代間データ転送とは、群行動時の多世代間交流の際に異なる放獣時期の異なるデバ

イス同士が遭遇し、通信機器が Wake してデータ送受信がデバイス間で行われる、世代をまたいだセンシングデータの転送を指す(Fig.2.2.4). 年齢が若い装着個体のような、他の装着個体と比較して寿命がより長い装着個体にセンシングデータを転送することで、放獣時期の異なる装着個体のセンシングデータを保持することが可能となる(Fig.5.2.3). センシングデータに寿命はないため、提案する縄張りや群行動に着目したデバイス数の省資源化の機能を持った AMUSystem によって Data Sharing 機能が運用される限り、それらのセンシングデータはデバイスから失われることはない。

この世代間データ転送の仕組みは、放獣するデバイス数が極端に少ない環境において重要な役割を果たす。あるデバイスが過去世代のデバイスのセンシングデータを保持することで、各デバイスが空間と時間の両面で厚みのあるデータを保持することが可能である。従って、5.1 で述べた基地局に帰還するデバイス数が減少したとしても、帰還個体のデータ量が非常に多いことが想定されるため、結果的にデータ回収率を向上させることが可能である。

これらを踏まえ、10 年以上の Data Sharing の長期運用において、どこまで放獣するデバイス数を減らす(省資源化)ことが出来るか 5.3 の実験にて明らかにする。また、データ回収率と省資源化が実現可能か明らかにするため、調査期間のデバイスの世代間の遭遇回数と調査期間後の放獣するデバイスの個体種の個体数の評価を行う。これらにより、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の課題であった「低資源」を解決することが可能である。

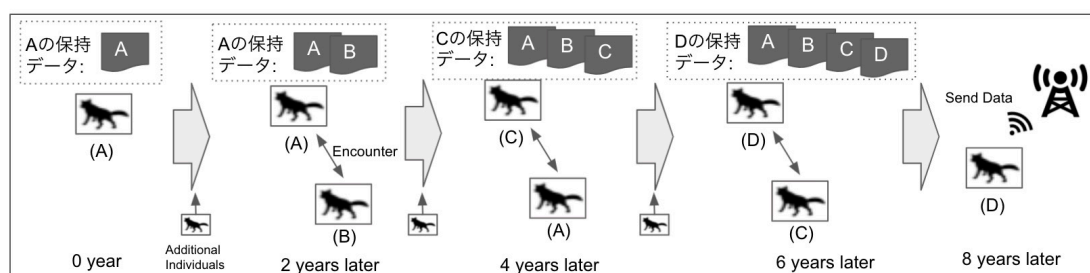


Fig. 5. 2. 3 群行動に着目した端末数の最適化モデルによるセンシングデータ遷移

5. 2. 4 センシングデータの回収効率

これまでも既に述べているが、バッテリーや装着個体の寿命を超えた長期運用が要求される時間的要求が厳しいネットワークシステムにおいて、デバイスの世代間のデータ転送の仕組みによりデータ回収率を向上させることが可能である。Fig.2.2.4 はデバイスの世

代間データ転送と世代内データ転送の仕組みを表し、世代間データ転送箇所、世代内データ転送の箇所を説明し、時系列に沿ったデータ転送の流れを説明している。例えば、デバイス A とデバイス B が同世代間交流の群行動時における世代内データ転送により、デバイス A はデバイス B のセンシングデータを得る。次に、デバイス A はデバイス C と多世代間交流の群行動時における世代間データ転送により、デバイス C はデバイス A が持つ A と B のセンシングデータを得る。世代間データ転送と世代内データ転送が繰り返された場合、デバイス E はデバイス A～E のセンシングデータを保持しているため、デバイス E だけが基地局に帰還しさえすればデバイス～E のセンシングデータを回収することが可能であり効率的であると言える。

デバイスの世代間のデータ転送によるデータ回収効率について詳細を述べる。野生動物調査期間において、放獣回数 n 回、装着個体の放獣数 m 個体(1回)のとき、総放獣個体 mn 個体のデータ回収に必要な理論上の最小帰還個体数を求める。「世代内のみのデータ転送」、
「世代内と世代間データ転送」を比較すると以下の式を求めることが可能である。

$$n \text{ 個体 (世代内のみのデータ転送)} \quad (5.2.1)$$

$$1 \text{ 個体 (世代内+世代間データ転送)} \quad (5.2.2)$$

(5.2.1), (5.2.2) より、データ回収に必要な理論上の最小帰還個体数は、「世代内のみのデータ転送」と比較すると「世代内+世代間データ転送」では $1/n$ 倍の装着個体数の基地局帰還のみで良く、センシングデータの回収効率が高いことが分かる。従って、放獣する装着個体数が減少したとしても、世代間データ転送により Data-Sharing 機能を実現しつつセンシングデータの回収効率を高めることで、放獣個体種の個体数の増加を抑えた手法が可能となると言える。

5.3 実験概要

本節では、縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオの実験概要について述べる。

5.3.1 シミュレーション環境設定

10 年以上 Data Sharing 機能の長期運用において、どこまで放獣するデバイス数を減らす(省資源化)ことが出来るか明らかにすることと、調査期間のデバイスの世代間の遭遇回数と調査期間後の放獣するデバイスの個体種の個体数について評価を行うため、汎用マルチ

エージェント・シミュレーションプラットフォームである artisoc を使用する. 先行研究の知見[28], [73]を活用して, 人の立ち入りが難しい自然環境と装着個体である野生動物, 装着個体間の遭遇を再現する. 本研究では,主に Rossate らの先行研究[28]におけるアライグマの生態行動の知見を活用する.

シミュレーションのエージェントとして, 本研究の装着個体として想定されているアライグマを想定する. エージェント設定については次項で詳細を述べる. シミュレーション環境設定について, 4.2 のシミュレーション環境設定を基本的に踏襲して設定する (Table.5.3.1). 例えば, シミュレーションにおける自然環境の範囲は 10km × 10km とする. シミュレーション上の自然環境において, ある装着個体が他の装着個体と半径 50m 以内に遭遇した場合, 通信機器が Wake してデータ転送が行われたとみなす. また, 本研究では 4.2 と同様に, 行動範囲に影響を与える可能性のある一部の条件を考慮しない. 例えば, 移動距離や行動範囲における装着個体差の観点で, エージェントの設定値として装着個体の縄張り, 年齢, 性別の各条件は除外する. 装着個体の縄張りや行動範囲を考慮する上で重要であるが, まだ解明されていないことが多く地域によって異なるため, 実験条件として仮定できないため実験条件から除外する.

4.2 のシミュレーション環境設定とは異なる箇所を述べる. シミュレーション実施期間は 10 年間としている. なぜなら, 10 年以上の長期間に渡るデバイスの放獣による, デバイスと繁殖個体の総個体数の増加率と, 世代間データ転送のための装着個体間の遭遇回数を比較検討するためである. また, デバイスの放獣タイミングはシミュレーション開始時点と, 開始時点から 2 年毎に放獣して, 10 年間のシミュレーション実験にて合計 5 回の放獣を実施する. その他の設定はエージェント設定に関わる箇所となるため, 次項以降で述べる.

	General parameters
Area	100 km ²
Evaluation period	10 years
Step size (in Artisoc)	10 min
Breeding frequency	Once in every end of year
Reproduction Ratio	Two per female
Sex ratio (M/F)	1/1

Table. 5. 3. 1 シミュレーション検証時の環境パラメータ (省資源化シナリオ)

5.3.2 エージェント設定

シミュレーションのエージェント設定について本項で述べる。エージェント設定について、Rossate らのアライグマに関する先行研究[28]の知見を生かした、4.2 のエージェント設定を基本的に踏襲して設定する(Table.5.3.2)。なぜならば、本研究では人が立ち入れない地域の自然環境での野生動物調査を目的としており前提に違いはないためであり、エージェントの移動速度、移動距離、遭遇距離は同様の設定を用いる。

次に、本シミュレーションにおいて、変更・追加したエージェント設定について述べる。本シミュレーションでは、2 種類のエージェントを用意する。エージェント A (デバイス) とエージェント B (繁殖個体) である。エージェント A とエージェント B は平均寿命、速度、移動距離は同じである。異なる点として、エージェント A は放獣時の年齢を 1.5 歳としているが、エージェント B は 0 歳としている。エージェント A は成獣を放獣する必要があるため 1.5 歳としている。一方、エージェント B は野生環境で繁殖行動の結果として誕生するため 0 歳に設定している。

本シミュレーション実験では先行研究[76]の知見を参考に装着個体の繁殖活動を模擬する。繁殖回数を年 1 回(1 年間の終了時点)、メスの 1 個体が出産するエージェント B の個体数を 2 として設定する。池田らの[76]研究結果から繁殖率は個体の年齢によって変わり、まず妊娠率は 1 歳前後の個体で 66%、成体で 96%であった。一度の妊娠で誕生する個体数は、1 歳前後の個体で 3.6、成体で 3.9 であった。従って、1 歳個体が実際に出産する個体数は 2.376 となることから、今回の実験で設定した繁殖率 2 は妥当であると言える。

10 年という評価期間の長さについては、1 個体の平均寿命が 2.5 年であり評価期間が寿命を上回っており、合計 9 回分の繁殖回数が評価期間に含まれるので十分だと言える。また、繁殖時に誕生する個体数の基準となる元の個体数は、エージェント A とエージェント B の合計個体数を 2 で割った数となる。2 で割る理由は、メスとオスの割合と 1:1 と仮定し、メスの数だけを基準とするためである。例えば、繁殖時に自然環境にエージェント A が 5 個体、エージェント B が 3 個体の合計 8 個体が存在する場合、メスが 4 個体存在すると仮定するため新たに 8 個体が繁殖個体として誕生する。

	Agent parameters	
	Agent A	Agent B
Age (month)	18	0
Max. remaining life (month)	42	60
Speed (m/h)	55.9	
Distance of encounter	Less than 50 m	
Walking direction	Randomly changed per 1.54 km	

Table. 5. 3. 2 シミュレーション検証時のエージェントパラメータ (省資源化シナリオ)

5. 3. 3 省資源化の評価方法

10 年以上の Data Sharing 機能の長期運用において、どこまで放獣するデバイス数を減らす(省資源化)ことが出来るか明らかにするための実験評価方法について述べる。

Table.5.3.3 は省資源化シナリオ評価のための各提案モデルである。

Table.5.3.3 の省資源化シナリオでは、2 年毎に放獣する装着個体数として、Scenario 1 が 4 個体、Scenario 2 が 6 個体、Scenario 3 が 8 個体、Scenario 4 が 10 個体として省資源化シナリオを用意する。放獣が 2 年毎の理由は、放獣する装着個体の年齢と平均寿命から、2 年後に放獣される装着個体と生存期間が重なるようにするためである。また、1 年毎など頻繁に放獣するとその回数だけ繁殖行動の時期を迎えて個体数が増加してしまう恐れがあり、寿命から計算して繁殖時期を最大限避けて 2 年毎とした。また、Scenario 1 については、放獣個体の年齢、平均寿命、放獣頻度の観点で、基準となる最低限の放獣個体数として設定した。以上の前提条件から、artisoc 汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームを使用した各放獣シナリオのシミュレーション実験を 3 回実施し、10 年間でデバイス数が 0 とならない Data Sharing 機能が維持可能な省資源化シナリオを明らかにする。また、10 年間のデバイスの世代間平均遭遇回数と 10 年後の合計個体数により省資源化シナリオ毎の評価を行い、データ回収率化と省資源化が実現可能か明らかにする。

	Inputs of animal carriers (per 2 years) (10 years)	
Scenario 1	4	20
Scenario 2	6	30
Scenario 3	8	40
Scenario 4	10	50

Table. 5. 3. 3 省資源化シナリオ評価のための各シナリオ

5. 4 結果と考察

5. 4. 1 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化の結果

artisoc 汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームを使用して、Table.5.3.3 の各放獣シナリオのシミュレーション実験を 3 回実施し、10 年間でデバイス数が 0 とならない Data Sharing 機能が維持可能な省資源化シナリオの比較検討を行った (Table.5.3.4, Fig5.4.1~4). 3 回実施したシミュレーション結果を比較すると、Scenario 3 (放獣デバイス数:8)と Scenario 4 (放獣デバイス数:10)が調査期間でデバイス数が 0 とならなかったことから、放獣デバイス数が最も少ない Scenario 3 (放獣デバイス数:8)が最適なモデルであることがわかった. また、10 年間の世代間平均遭遇回数と 10 年終了時の合計個体数の観点で Scenario 3 と Scenario 4 を評価すると、10 年間の世代間平均遭遇回数については Scenario 3 が Scenario 4 よりも約 1.02 倍多く、10 年終了時の合計個体数については Scenario 3 が Scenario 4 よりも約 0.84 倍少ない結果となり、データ回収率化と省資源化が実現可能なモデルであることがわかった. 以上のシミュレーション結果から、Scenario 3 が Data Sharing 機能が維持可能な省資源化シナリオであり、データ回収率化と省資源化が実現可能なシナリオであることが明らかになった.

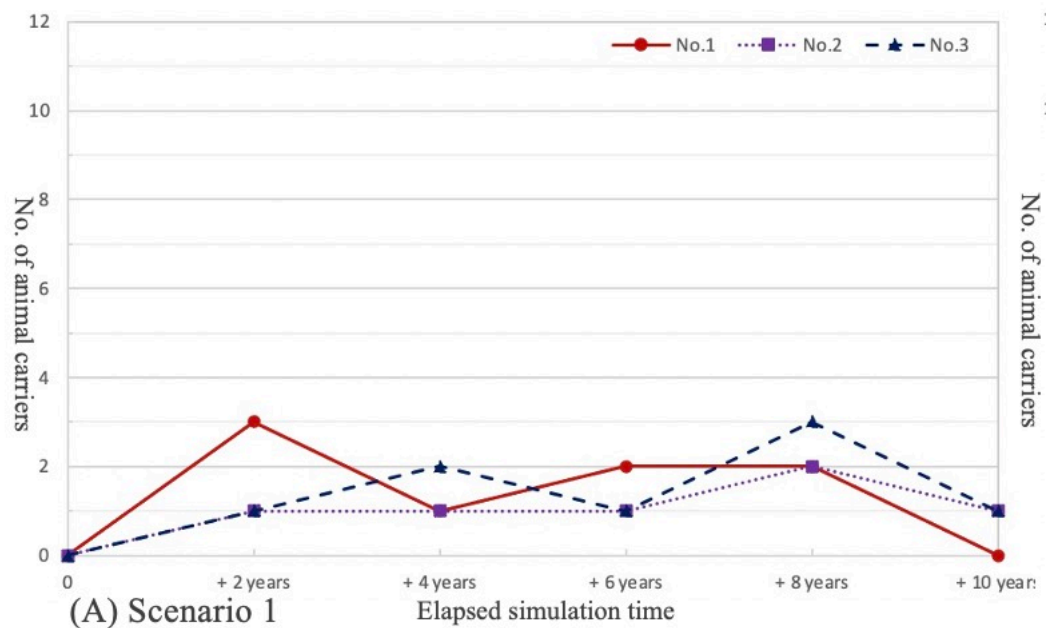


Fig. 5. 4. 1 2年毎の残存デバイス数 (Scenario 1). No.1~3 は各回のシミュレーション結果

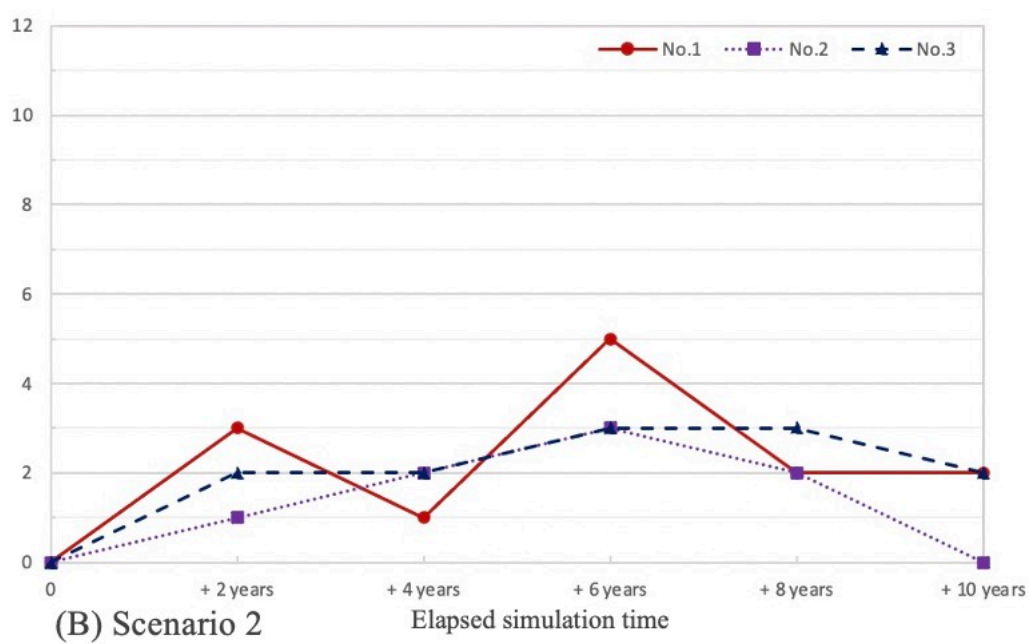


Fig. 5. 4. 2 2年毎の残存デバイス数 (Scenario 2). No.1~3 は各回のシミュレーション結果

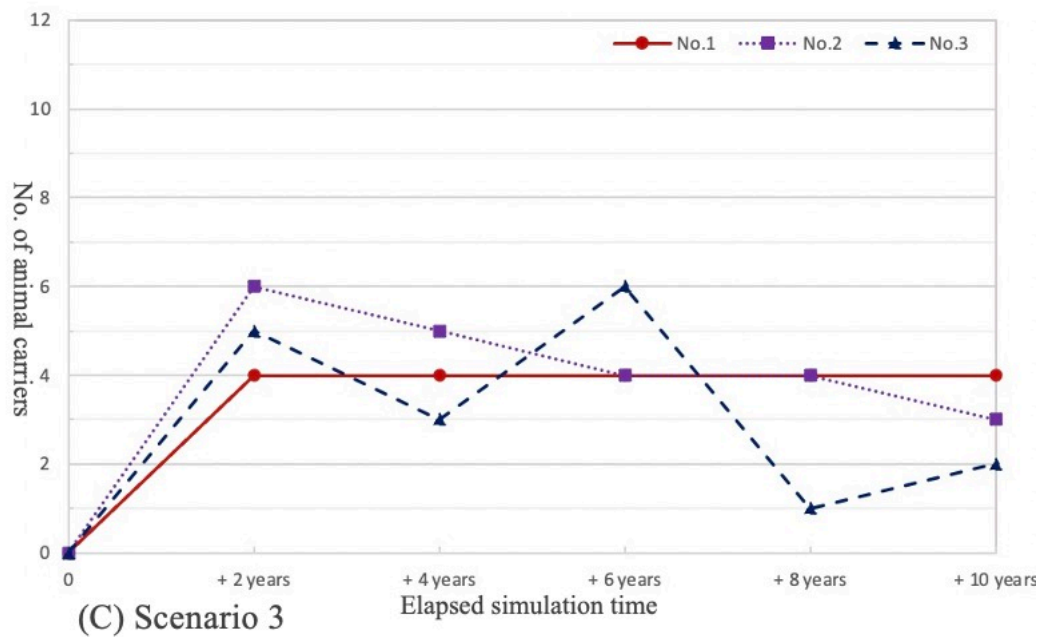


Fig. 5. 4. 3 2 年毎の残存デバイス数 (Scenario 3). No.1~3 は各回のシミュレーション結果.

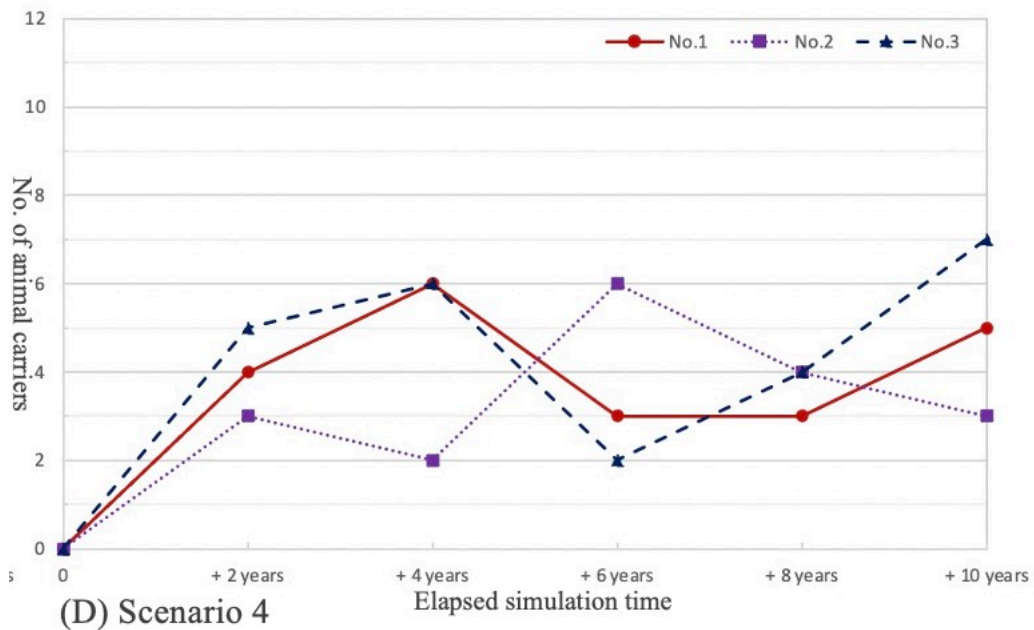


Fig. 5. 4. 4 2 年毎の残存デバイス数 (Scenario 4). No.1~3 は各回のシミュレーション結果.

	Intergenerational encounters (per capita)		Individuals after 10 years	
Scenario 1	9.6	(1.00)	162.3	(1.00)
Scenario 2	17.8	(1.85)	157.7	(0.97)
Scenario 3	24.6	(2.56)	287.3	(1.77)
Scenario 4	24.2	(2.52)	344.0	(2.12)

The numbers in parentheses depict the ratio per scenario 1.

Table. 5. 4. 1 各省資源化シナリオの実験結果 (世代間平均遭遇回数と 10 年後の総個体数)

5. 4. 2 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化の考察

個体の生存率は世代間平均遭遇回数, 10 年後の合計個体数に影響を与える要因の一つであると考えられる. 例えば, 放獣個体の個体数について, Fig.5.2.3-6 では各放獣シナリオの 2 年毎の残存する放獣個体数について, 3 回分のシミュレーション結果を示している. これらの結果から, シミュレーション 1 回目の Scenario 1 とシミュレーション 2 回目の Scenario 2 では, 10 年間の終了時点のデバイス数が 0 となっている. 本結果により, 10 年目以降にデバイスを放獣したとしても自然環境にデバイスは存在しないため, 放獣時期の異なるデバイスによる世代間遭遇によるデータ転送はできない. 従って, 10 年目の時点でいずれのデバイスが基地局に帰還していない場合, 過去 10 年間の環境モニタリングのデータを回収できない. 装着個体が生存し続けることは 10 年以上の長期運用において不可欠であり, 10 年以上の長期に渡る世代間データ転送の維持のためにはデバイスの放獣タイミングで, 自然環境において 1 個体以上の装着個体が存在する必要がある.

上記の通り, 放獣するデバイス数を増やせば次の放獣までに装着個体が生存している可能性が上がるが, 放獣した装着個体の繁殖により長期運用時の合計個体数が増加してしまうため有効ではない. 放獣個体数を増やせない環境で世代間データ転送を断絶させずに実現するために, 捕獲された野生個体からデバイス装着個体を選定する際に生存確率の高い個体を選定する方法を提案する. 生存確率の高い個体をデバイス装着個体として選定することで, 放獣後の自然環境における個体の生存期間を延ばし, 異なる放獣時期のデバイスとの世代間データ転送を断絶させずに実現させる. 生存確率の高い個体の選定方法として, 例えば, 病気や怪我をしていない 1~1.5 歳の成獣で, 可能であればメス個体を選定する方法などが考えられる. Rossate らの研究[28]からオスの平均生存日数が 816 日でメスが 924 日と報告されており, メス個体の寿命が長い傾向にあるためである. また, 捕獲時に怪我をさせず, 捕獲個体に心理的・身体的負荷を与えない方法を導入することも, 生存確率の高い個

体の選定のためには有効である。以上から、10年以上の長期運用が求められる縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減において、放獣個体の生存確率を考慮した研究が必要とされるであろう。

5.5 総括

本章では、縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減のための省資源化シナリオの概要、実験概要、実験結果と考察について述べた。縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減とは、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、Data Sharing 機能の長期的な維持を可能にする、調査期間中の縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオである (Fig.2.2.4)。動物間マルチホップ転送方式の長期的な野生動物調査でも述べたように、本手法では野生動物調査のための捕獲・放獣プロセスを利用して行われるが、10年以上の長期間に渡り常に多数の野生個体が捕獲出来るとは限らない。また、Data Sharing 機能を長期的に維持するために、長期間に渡って多数の装着個体の放獣をする場合、元々生息する野生個体、装着個体、繁殖個体により調査地域の個体数が増加することで、調査地域の生物多様性に影響を与える可能性も考えられる。従って、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、Data Sharing 機能を長期的に維持することが要件として求められる。

本章では、まず、縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減のために、アライグマ等の野生動物に見られる群行動について述べた。多世代間交流の群行動に着目した世代間データ転送を活用した、縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオを提案した。放獣する装着個体数の異なる省資源化シナリオを用意し、10年間でデバイス数が0とならない Data Sharing 機能が維持可能な省資源化シナリオとデータ回収率化と省資源化が実現可能なモデルを明らかにするため、汎用マルチエージェント・シミュレーションプラットフォームの artisoc により想定する自然環境と装着個体として想定するアライグマの生態を再現し、シミュレーション検討を行った。アライグマの生態情報については、Rossate らの先行研究[28]の知見を活用している。シミュレーション実行期間を10年間にて残存するデバイス数、各省資源化シナリオの世代間遭遇回数と10年後の合計個体数の比較検討を行ったところ、Table.5.3.3 の Scenario 3(放獣個体数:8)の省資源化シナリオが、デバイス数が0にはならず、Scenario 3と比較して1個体あたりの平均世代間遭遇回数が高く、10年後の合計個体数が少ないデータ回収率化と省資源化が実現可能なモデルであることが分かった。

省資源化シナリオの検討結果により、縄張りと群行動に着目し、親子やオス同士の集団行動などの多世代間の交流時の世代間データ転送により、資源の最小化と Data Sharing 機能の長期的な維持を実現する省資源化シナリオの有効性が示された。従って、縄張りの主の交替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減モデルにより、調査地域の空間に配置する資源(装着個体)の数を減らした場合でも、Data Sharing 機能を長期的に維持することが可能となったことで、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査において課題であった「低資源」の解決に近づいた。

第 6 章

議論

6.1 シミュレーション結果に基づくフィールド検証

本節では、本研究で実施したシミュレーション検証結果に基づく、今後のフィールド検証に対するアプローチ方法について議論する。まず、第 4 章、第 5 章の機能の有効性を検証するため、汎用マルチエージェントシミュレーション・プラットフォーム artisoc を使用したシミュレーション実験を行った。結果、各機能である「省力化」、「省資源化」の有効性について証明した。第 4 章、第 5 章の評価実験としてフィールド実験ではなくシミュレーション実験を行った理由は以下となる。

1. 数年以上の長期間の実験期間
2. 数十個体以上の大規模な装着個体数

まず、「1.数年以上の長期間の実験期間」について述べる。第 4 章、第 5 章では装着個体の寿命を超えた評価期間を前提としているため、アライグマの平均寿命は 2-3 年であることから、少なくとも個体の寿命を超えた数年以上の評価期間が必要である。次に、「2.数十個体以上の大規模な装着個体数」について、第 4 章、第 5 章では各放獣シナリオによる装着個体数の変動と全体の遭遇回数から最適なモデルを検討する必要があるため、実際の自然環境を想定して評価実験を行う場合、少なくとも数十個体以上の大規模な装着個体数が必要となる。また、第 5 章では省資源化シナリオの検証となるため放獣する装着個体数は数個体となるが、1 年毎に増加する繁殖個体の個体数変動にも着目する必要がある、装着個体と繁殖個体の総数では数十個体以上の大規模な個体数変動に着目する必要がある。従って、第 5 章においても同じ要件が求められる。

従って、「1.数年以上の長期間の実験期間」と「2.数十個体以上の大規模な装着個体数」の要件を満たす実験方法としては、フィールド実験ではなくシミュレーション実験が適切であると言える。なぜなら、「1.数年以上の長期間の実験期間」と「2.数十個体以上の大規模な装着個体数」の要件を満たすフィールド実験を実施する場合、数年以上の長期間において、調査員確保のコスト、数十個体以上の大規模な装着個体(実験犬など)確保のコストがかかるため、装着機器の機材確保のコストなど、現実的な実験方法とは言えない。また、本シミュレーション実験では、10 km × 10 km の自然環境を想定してエージェントを放獣して

実験を実施しているが、フィールド実験で同規模の環境を用意する場合、その調達コストも必要となる。これらの理由から、第4章、第5章ではシミュレーション実験が適切であると考え、シミュレーションによる評価実験を行っている。

しかし、シミュレーション実験結果だけでは、AMUSystemの機能の有効性を示し、動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査の実現するためには十分ではない。なぜなら、第4章、第5章の実験概要でも述べたように、シミュレーション実験の環境設定はRossateらのアライグマの生態に関する先行研究[28]の知見を活かして環境設定を行っているが、野生個体毎の縄張りや年齢、性別による行動範囲の違いなどは考慮していない。従って、シミュレーション実験の環境設定は野生動物の生態情報を完全に模擬出来ていないわけではないため、本シミュレーション実験結果を基にして、フィールド実験など野生動物の生体情報が反映された環境を用意し検証する必要がある。動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の実現のために、以下の段階的な検証を通して知見を増やす必要がある。

1. シミュレーション検証
2. 装着個体を模擬したロボット等による実機検証
3. 飼育下の動物を用いたフィールド検証
4. 現地の野生個体を用いたフィールド検証

「1.シミュレーション検証」の必要性については既に述べたので省略する。

次に、「2. 装着個体を模擬したロボット等による実機検証」は、開発用のロボット掃除機等を用いて、装着個体と見立てて検証を行う方法である(Fig.6.1.1)。ロボット掃除機に通信機器等のデバイスを装着させて、野生動物の生態情報を用いてロボット掃除機の動作設定を行い、装着個体間の遭遇検知のフィールド検証を行う方法である。本検証方法のメリットは、フィールド検証を行いつつ試行回数を比較的増やしやすいためである。フィールド検証では、調査員の確保や装着個体の確保の観点で、試行回数を増やすことは出来ない。しかし、本検証方法では装着個体の確保が不要となるため、フィールド検証の実施は2や3と比較して難易度は下がる。また、3.6.7でも述べたように、複数の実験犬を使用して連続してフィールド検証を行う場合、他の実験犬に対する慣れや実験方法の慣れにより十分な知見が得られないため、実験間隔を空けるなどの考慮が必要である。しかし、ロボット掃除機の場合では実験の慣れの問題は発生しないためその点の考慮は不要となるメリットもある。しかし、ロボット掃除機等を用いたデバイス装着個体の生態情報の模擬については、十分に検討する必要がある。第4章、第5章で得た知見を活かしたフィールド検証として、装着個体の台数と実験期間の規模についてロボットを使用した検証環境に合わせることで、省力化、

省資源化の検証結果の精度を高めると考えられる。

「3. 飼育下の動物を用いたフィールド検証」は、第3章で実施した実験犬を用いたフィールド評価実験等が該当する。野生動物調査でデバイス装着対象とする個体種に近い体サイズ、体重などの装着個体を用いることで、有用な試験結果が得られると考えられる。特に、第3章で述べた動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大の研究では装着個体である動物の習性行動を利用するため、1のシミュレーション検証による再現は難しく、本フィールド検証方法による検討が有用であると言える。また、第4章、第5章では数年以上の長期間の実験期間が必要であるが、実験犬を用いた数年以上の長期間のフィールド評価実験のために、数十個体の複数の実験犬の確保は難しい。しかし、例えば、第3章の低消費電力な動物間通信機能と組み合わせて、複数装着個体のフィールド実験における合計の遭遇回数の比較により、第5章で述べた省資源化のフィールド実験を実施することは可能である。これらの結果より、より精度の高いAMUSystemの実現を加速化が可能であると考えられる。

最後に、「4. 現地の野生個体を用いたフィールド検証」について述べる。[28][43]などでは捕獲したアライグマに首輪型デバイスを装着させて野生動物調査を試みている。しかし、第4章、第5章の研究においては数十個体以上の装着個体、数年以上の長期間が実証実験では求められるため、先行研究[28][43]と比較して大規模、長期間となり、フィールド実験の難易度は高くなる。また、捕獲したアライグマに首輪型デバイスを装着させて一度放獣すると、装着個体を再捕獲することは難しいためデータ回収は難しい。従って、フィールド実験の試行回数が非常に限られるため、「3.飼育下の動物を用いたフィールド検証」までの実験結果により最適なモデルの有用性を求める必要がある。

以上で、第4章、第5章の評価実験としてフィールド実験ではなくシミュレーション実験を行った理由を述べた。また、より再現性の高い実験環境で最適モデルを求めるための段階的な実験を述べた。本節で述べた段階的な実験を踏み、AMUSystemによる動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の実現を目指したい。

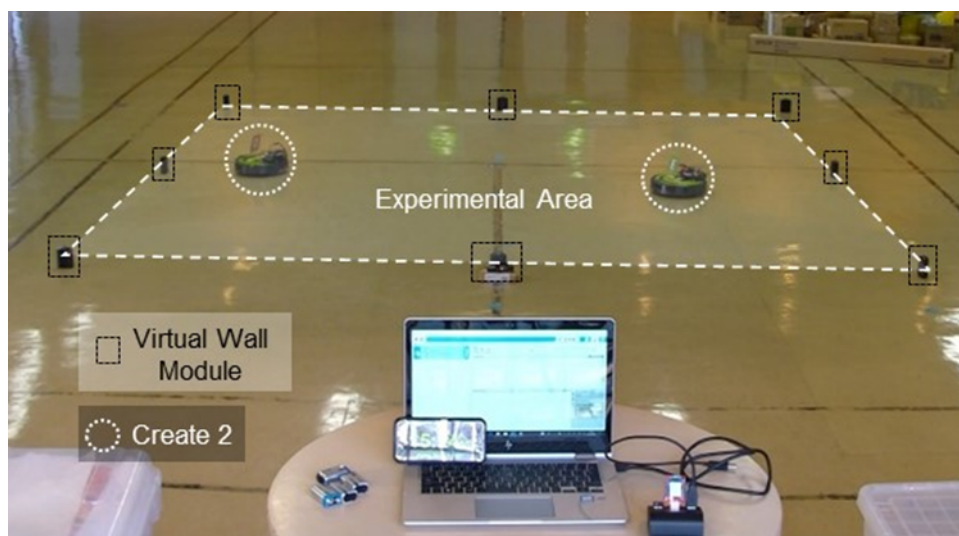


Fig. 6.1.1 開発用のロボット掃除機を用いた実験の様子

※東京大学 情報基盤センター 川瀬純也らの未発表論文

6.2 省電力化のフィールド評価実験の取り組みと課題

第3章の動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大の研究では、装着個体の習性行動を用いた動物間通信機能の省電力化の実現に向けて、フィールド評価検証を中心に進められている。第3章でも述べたように、装着個体間の通信では無線通信による装着個体間のデータ転送が行われるため、電力消費量が高く搭載可能なバッテリー容量に制限があることから、10年以上の長期的な野生動物調査のためには装着機器の省電力化は必須であり、特に電力消費量の大きい動物間通信機能の省電力化は必須となる。本節では、動物間通信機能の効率的な省電力化のためのフィールド評価実験の取り組みと課題を述べる。

動物間通信機能の省電力化の実現のために、第3章で述べたように、麻布大学伴侶動物研究室の協力の下で実験犬4個体を使用した、動物間通信機能の省電力化のためのフィールド検証を行っている。次に、牧山らの研究[35]では、麻布大学の実験犬2個体を装着個体として、第3章の3.2, 3.4で述べた各機能を実装し、約20分間の散歩中における動物間通信機能の精度と再現性の評価を行っている(Fig.6.2.1)。具体的には、実験犬の行動を分類して可視化することで、動物間通信機能の精度と再現性の評価を向上させている。

次に、小林らの研究[79]では、福島第一原子力発電所周辺の帰還困難区域に電力とネットワークのインフラを持つプロジェクトサイトを設置し、福島第一原発事故周辺の家畜牛を使用した動物間通信機能のフィールド評価実験を行っている(Fig.6.2.2, 6.2.3)。これらのフ

フィールド評価実験環境は、本研究が対象とする人の立ち入りが難しい自然環境に近い実験環境であるが、実験に使用した装着個体は家畜牛であり、本研究が想定するアライグマと比較すると体サイズ・体重は異なる。

第3章のフィールド実験結果, [35], [79]のフィールド実験結果から、動物間通信機能の省電力化において新たな知見や課題が浮き彫りになりつつある。例えば、第3章のフィールド実験と[79]のフィールド実験にて、3.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムと 3.4 遭遇回数を用いたデータ転送手法がフィールド実験にて評価検証された。しかし、これら2つの実験では同様の実験結果が得られていないことが分かっている。第3章では、装着個体である実験犬の習性行動を3軸加速度センサーで取得し、3.2.2 で評価実験を行い通信機器 Wake アルゴリズムの動作判定の最適な閾値をまず求めている。次に、その動作判定の最適な閾値を3.4.2 の遭遇履歴を用いたデータ転送手法の実験にて採用して、フィールド検証を行っている。これらの実験の実験犬は異なるものの、同じイヌの種を用いており、体サイズや重量、習性行動には大きな違いはないと思われることから、通信機器 Wake 制御において精度の高い結果が得られていると考えられる。

一方、[79]のフィールド実験では、家畜牛を対象動物とした場合のフィールド評価実験では同様の精度の高い結果は得られていない。理由としては、[79]の考察からは動物の種類の違いから同様の結果が得られなかった可能性があるとし唆されている。具体的には、通信機器 Wake 制御アルゴリズムの動作判定は3軸加速度センサーの合成加速度により決定されるため、3.4.3.3, 3.4.3.4 で述べたように通信時間と体高におおよそ相関関係があることが分かっており、装着個体の体高が通信 Wake 制御に影響を及ぼしていると考えられる。従って、[79]の実験結果と装着個体の体高の関係性を考慮すると、装着個体の体高に合わせて通信機器 Wake 制御アルゴリズムの動作判定の閾値を設定する必要があると考えられる。また、装着個体の体高と動作判定の閾値はおおよそ相関関係があることから、3.4.3.4 にて体高と電力消費量に基づく定式化は行われているが、さらに幅広い体高の装着個体による評価実験により精度の高い定式化が可能である。特に、[79]のフィールド実験では、帰還困難区域における作業となるため、調査員の長期間の滞在は難しく、予備実験として家畜牛にデバイスを装着させて動作判定の閾値を調査することはハードルが高い。従って、定式化された体高と通信時間や電力消費量の間関係があれば、現地でフィールド評価実験を行わなくてもおおよそその通信時間は予想できるため、有用な方法であると言える。

以上で、省電力化のフィールド評価実験について、本研究と先行研究の各実験概要と実験結果の詳細を述べた。また、残された課題として体高と電力消費量の間関係の定式化のために、幅広い体高の装着個体による評価実験を行う必要がある。この定式化が行うことが出来れば装着個体の体高に基づく通信時間 Wake 制御アルゴリズムの閾値設定が事前に可能であ

り, 結果, 装着個体の種や体高に違いがあったとしても動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大が行えると考えられる.

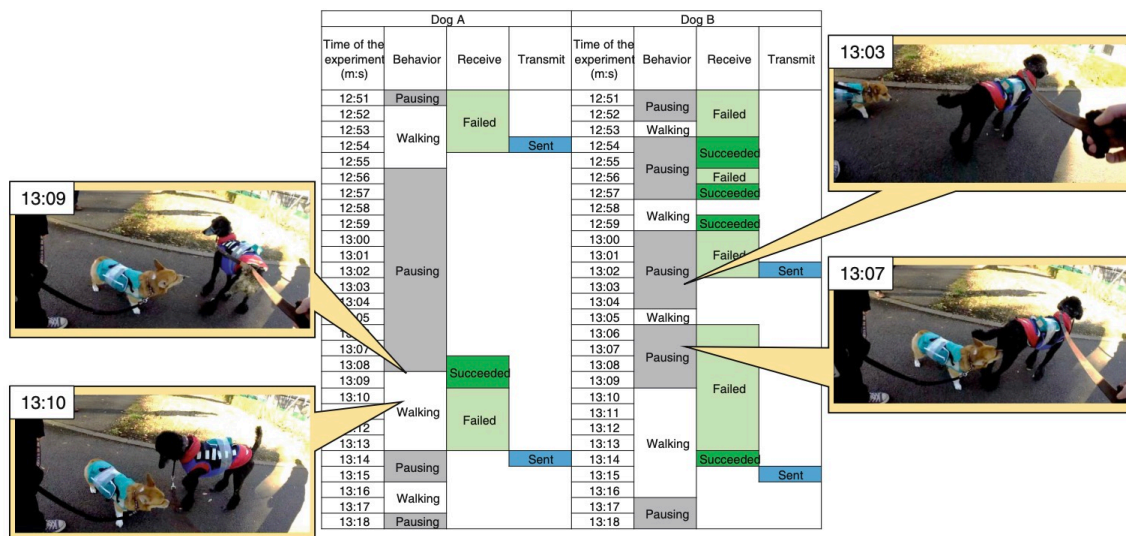


Fig. 6.2.1 実験犬の行動の可視化例[35]



Fig. 6.2.2 (a)プロジェクトサイト, (b) sink node station[79]

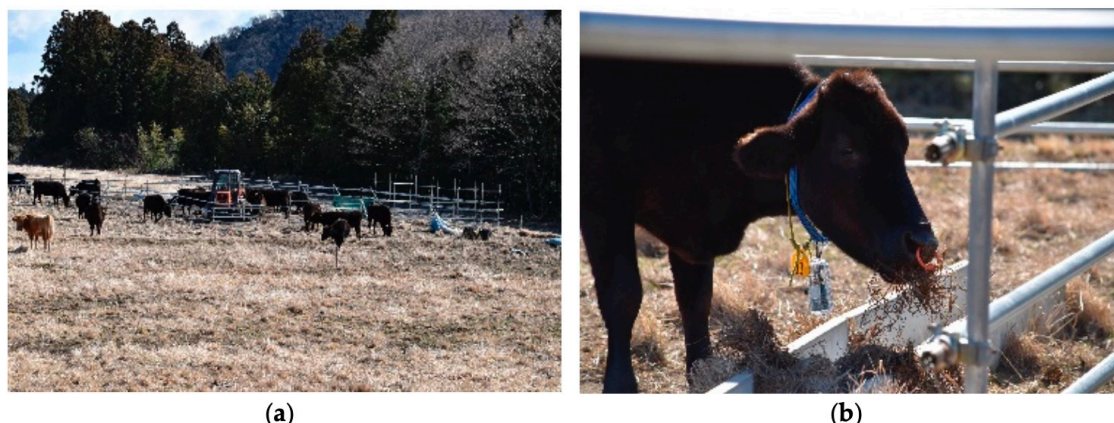


Fig. 6. 2. 3 (a) sink node station から撮影した帰還困難区域の家畜牛, (b) cage [79]

6.3 動物間マルチホップ通信システムの可用性

本節では、動物間マルチホップ通信システムの可用性について述べる。第 1 章で述べたように、人の立ち入りが難しい自然環境では、電力や通信インフラが劣悪な環境であることから、10 年以上の長期的な野生動物調査の手法の研究は十分ではない。そこで、DTN 技術を活用した手法である、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査手法を本研究では述べ、同手法の Data Sharing 機能の課題を解決するため動物間マルチホップ通信システム(以下、AMUSystem)について提案した。本節では、DTN 技術の観点から提案手法である AMUSystem の可用性について議論する。

DTN 技術は通信が劣悪な環境で使用される技術であり、その技術自体が end-to-end の接続確立を前提とせず、データ転送においてタイムラグが発生する技術である。従って、本手法を DTN 技術の観点で可用性を評価する場合、送信元ノードから最終送信先ノード(経由ノードではない)に到達できる確率と到達までの時間により決定されると言える。DTN 技術の観点で可用性が高いネットワークシステム、つまり、最終送信先ノードに到達できる確率が高く、到達までの時間を速くするためには、以下 3 つの要素が考えられる。

1. 遭遇確率 (1.1 同一世代間の遭遇確率 + 1.2 異なる世代間の遭遇確率)
2. 通信成功確率
3. データ転送効率

遭遇確率とは、あるノード(装着個体)が他のノードと遭遇する確率となる。遭遇確率とし

ては様々な要素で決定される。想定環境ではノードを放獣した野生動物と想定しており、動物の種類による習性行動の違いや年齢、性別、性格など個体差により個体毎の遭遇確率は異なることが想定される。本研究では、動物の種類や個体差に着目するのではなく、全ての個体に共通して普遍性が高いと言える遭遇確率を決定する装着個体の密度に着目している。ノードは基本的に自由に動き回ることから、ノードの密度が高いほど遭遇確率は高くなる。第4章で述べたが、これらのシミュレーション実験ではこれまでの動物行動学の知見に基づき、自然環境におけるアライグマの個体密度をシミュレーション上で再現している。野生動物の個体密度を再現することで、信頼性の高い遭遇確率の評価を行っている。また、異なる世代間の個体遭遇確率とは、放獣時期が異なるタイミングの個体同士の遭遇確率を指す。同一世代間の個体遭遇確率とは、放獣時期が同じタイミングの個体同士の遭遇確率を指す。空間的な観点で放獣個体数を増やすことで(例. 1回あたりの放獣個体数を4→8)、1.1の同一世代間の遭遇確率を高くすることができる。一方、時間的な観点で放獣の頻度を多くすれば(例. 放獣頻度: 2年に1回→1年に1回)、1.2の異なる世代間の遭遇確率を高くすることができる。特に、第5章5.4.2の考察で述べた時間的な観点では、放獣個体種の寿命を参考にして、放獣頻度や放獣個体数を決めることがend-to-endの信頼性を決定する上で重要であるといえる。

通信成功確率とはあるノードが遭遇時に、送信相手であるノードを検知して、そのノードと通信を確立してデータを転送できる確率である。通信機器を常時オンにすれば通信確率は高まるが、第1章で述べたとおり想定環境では搭載バッテリーの制約があるため常時オンにすることは難しい。そこで、第3章で述べた野生動物の習性行動に基づいた省電力性を考慮した動物間通信機能の提案、同手法のフィールド実験の進捗について詳細を述べた。

データ転送効率とはあるノードが他のノードと通信確立した際のデータ転送容量を指す。遭遇時に通信確立したとしても、データ転送量が少ない場合はデータが十分に転送されないため、最終送信先ノードに到達できるまで時間が非常に要する。従って、通信確立時に出来るだけ多くのデータ転送が可能であれば、データが他の個体に転送される確率が高まり、最終送信先ノードに到達する時間が速くなり可用性が高い通信と言える。本研究では、1.個体の遭遇確率と2.通信成功確率に着目してきた。3.データ転送効率については、第3章3.3.3.3の考察にてフレームアグリゲーションの技術応用について述べているが、想定環境のデータ転送効率に関する研究は十分にされていない。なぜなら、1.と2.自体の先行研究がこれまでなかったことと、もし3の研究を行う場合には1と2の先行研究が前提となるためである。しかしながら、1.と2.の研究が進捗した場合、3.データ転送効率について着手する必要がある。

以上から、DTN技術の観点で提案手法の可用性について本節で議論した。DTN技術の観

点での可用性の高さを考慮すると、これまでの本研究の提案手法は有効であると言える。より可用性の高いシステムのために、本節で言及した課題に対して今後の研究が必要となるであろう。

6.4 従来の野生動物調査時の調査員が抱える課題に対する貢献

本節では従来の野生動物調査時の調査員が抱える課題に対する貢献を述べる。本研究では、従来の野生動物調査時の調査員が抱える課題として、調査員が野生動物の生息地域に直接立ち入りが必要となるため特有の課題が存在する。1.1.3 で述べたように、調査地域では有害鳥獣類や保全種など野生動物の遭遇リスクがあるため、調査員の作業負荷(準備、手続き、装具など)が高い。加えて、自然環境ではそもそも調査員の立ち入りが難しく、都市環境と比較して広範囲の調査地域における大規模な野生動物調査を行うことは難しい。従って、都市環境と同等の野生動物調査手法を用いることは難しいことを第1章で述べてきた。

まず、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大の研究の貢献について述べる。

6.4.1 省電力化の貢献

ここでは準備として、福島第一原子力発電所周辺の 20~30 キロ圏内における放射能汚染による立ち入り禁止の森林地域で、動植物の生態系調査のための必要要件を改めて整理する[20]。周辺地域の必要情報、技術要件、アライグマの生態行動の3つに分類を行う。

まず、同地域で生態系調査の推定を行なうにあたり、周辺地域の情報として必要となる要件は以下となる。

- 調査が必要な森林面積
- 通信可能・不可地域の調査

まず、森林地域における調査のための必要面積は、福島県農林水産部が発行する平成22年福島県森林・林業統計書[80]の情報より民有林を除いた $86,646\text{ha}=866.46\text{km}^2$ と仮定した。福島第一原子力発電所周辺の避難指示区域の概念図[8]より、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域を対象としている。福島県森林・林業統計書[57]より、磐城の森林

管理署では、いわき市、南相馬市、相馬市、双葉郡(広野町、檜葉町、富岡町、川内村、大熊町、双葉町、葛尾村、浪江町)、相馬郡(新地町、飯舘村)を管理しており、本研究で対象としている地域がほぼ網羅されている。その面積は、森林面積は国有林野が 85,810ha、公有林野等官公造林地の面積は 836ha と示されており有効な数値と言える。実際の森林面積は、対象外の市町村(いわき市など)が含まれるため森林面積は狭く見積もられるが、本研究の目的では動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法の評価となる

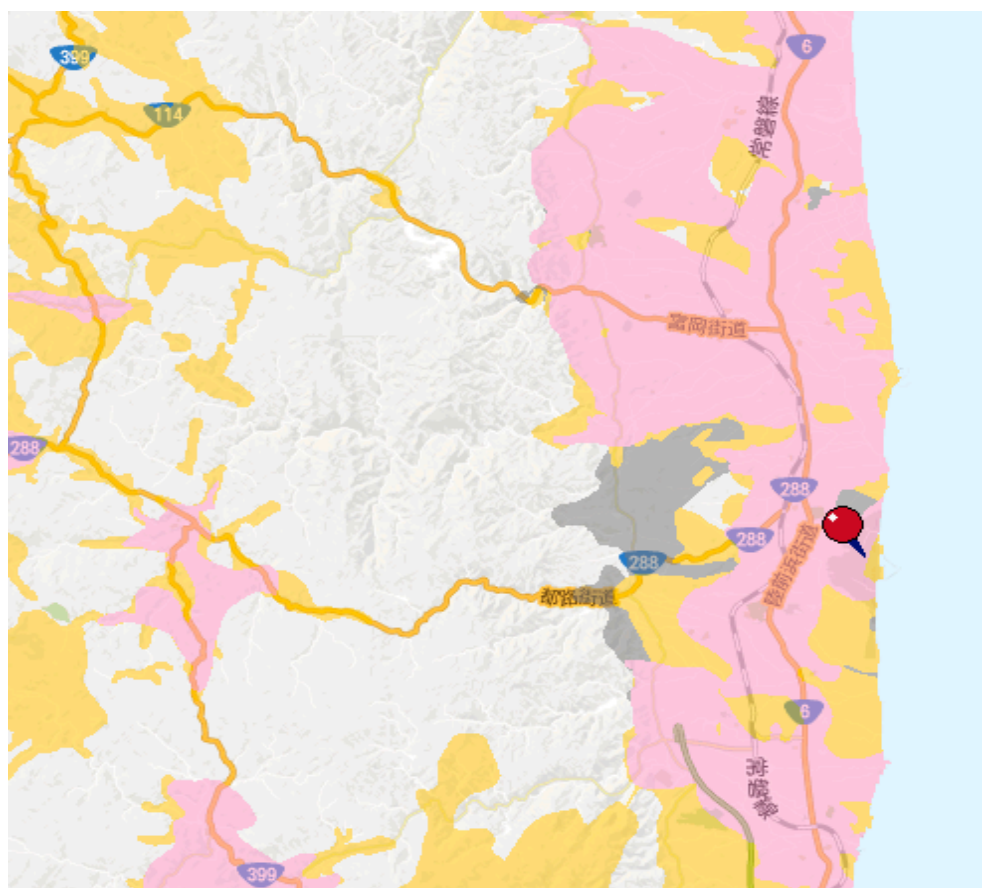


Fig. 6. 4. 1 2014 年 1 月時点の福島第一原子力発電所周辺のサービス対応エリア [81]

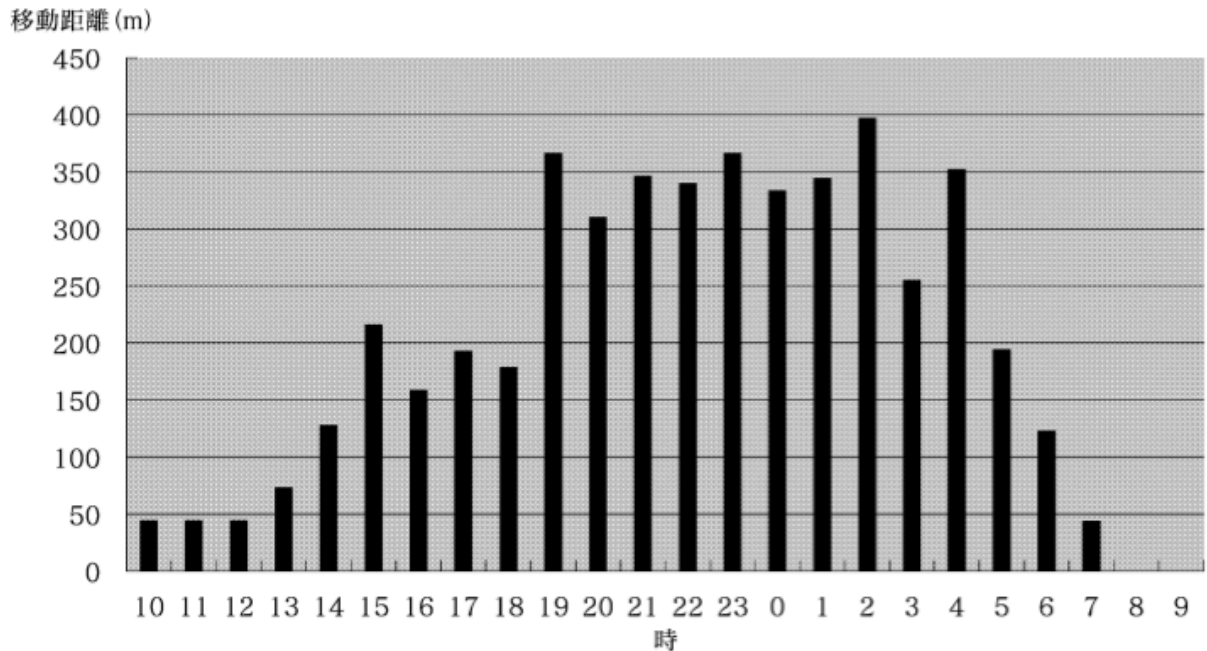


Fig. 6.4.2 メスのアライグマにおける時間別平均移動距離[14]

ため厳密な面積推定は行わない。以上より，本研究では 86,646ha の森林面積を調査対象とする。

動物間マルチホップ転送方式の野生動物調査手法で述べた，データ回収のための Touch'n Go at Home の基地局の設置のために，通信可能・不可地域の調査を行なう必要がある。Touch'n Go at Home の基地局にサーバを設置しておき，そのサーバからインターネット経由でデータ収集を行なうためである。電源供給の問題も考慮する必要があるが，発電機や大型バッテリー，ソーラー電池など代替手段が存在し，それらを設置することで解決可能であるためここでは扱わない。通信可能・不可地域の調査を行なう方法として，携帯電話各社のページより通信可能エリアの確認が可能となる[81]。例えば，Fig.6.4.1 は 2014 年 1 月時点の福島第一原子力発電所周辺のサービス対応エリアを引用している。黒塗り(東日本大震災によるサービス中断エリア)と何も塗られていない箇所以外は 3G 回線である FOMA が利用可能である。これらの情報から，立入り禁止の森林地域の境界近くに対して通信可能エリアを当てはめることで，基地局が設置可能である。

次に，提案手法の森林地域の適用に対して，必要となるアライグマの情報を整理する。

- 年間の遭遇回数
- 1 日の行動パターン
- アライグマの駆動期間

年間の遭遇回数は、年 1 回の繁殖時期を考慮すると少なくとも年 1 回以上の遭遇回数が想定される。実際、フィールド実験での遭遇回数を論じた先行研究はないため、本研究の今後の予備実験として解明する必要がある。

1 日の行動パターンは、野幌森林公園地域におけるアライグマの行動圏[14]によれば、夕刻から活動を開始し活動量が増えて、5 時以降の日中の活動量は少ないことが指摘されている (Fig. 6. 4. 2)。この結果から、8 時から 13 時までの日中の期間 (6 時間) を睡眠状態とし、13 時から 8 時までの期間 (18 時間) を活動状態として仮定している。よって、単独行動時の環境音のセンシングは活動時間のみに行なわれるよう設定する。

アライグマの駆動期間は寿命に左右される。自然環境のアライグマは、約 1 年で成獣となり寿命は約 2-3 年と言われている [28]、本研究では、搭載デバイスの容量のために成獣のアライグマを対象動物として選定し、平均寿命までの駆動を考慮すると約 1-2 年の駆動が可能となる。

次に、環境調査のために考慮すべき技術要件は以下となる。

- センシングデータの保存容量
- 搭載バッテリー容量
- 遭遇時のデータ転送時間

第 1 章で述べたように、森林地域の環境音をセンシングデータとして取得することを想定している。音データを取得するために、幾つか圧縮方法があるが AAC コーディックで音データを保存すること想定する。CD の音質で 1 分の曲を録音した場合、約 10MB のデータサイズになるが、地上デジタル放送や iPod 等に利用されている AAC コーディックを用いることで 0.05MB/1min で保存が可能となる。つまり、年間で 26,280MB のデータサイズになることが予想される。一方、micro SD カードは既に microSDXC では 128GB のメモリ容量で発売がされており、規格上では 2Tbyte まで提供可能であるのでデータの保存容量に問題はない。

搭載バッテリーでは、アライグマの体重は最大 10kg 程度であり、搭載出来るデバイスのサイズは 500g に規定される。本実験で用いたバッテリーを含むデバイス重量は 250g であり、残りの 250g をバッテリー搭載に割り当てることが可能である。現在、他の専門分野にて小型化や持続力の高い電池の研究開発が行なわれており、本研究の提案手法である低消費電力性を合わせて利用することで、年単位でのバッテリー駆動を実現させたい。

アライグマ同士の遭遇時に、本研究の提案手法を用いてデータ転送を行なう。その際に、最大データ転送時間をどのくらい確保出来るかが懸念される。本実験では通信規格として

Zigbee を用いており、データ転送率は最大 250kbit/s でありことから byte に変換すると 1 分間で最大 1.875MByte となる。

本研究の提案手法では、動物間通信のために遭遇時の習性行動を利用しているので、第 1 章の先行研究で述べた繁殖活動におけるオス・メスの遭遇時でも有用性は高い。繁殖活動において、陰茎骨の長さや交尾の時間に相関関係があるとされており、イヌなどは 10 分～1 時間とされている[82]。アライグマに当てはめた場合、1 時間と仮定すると 112.5MB/h のデータ転送が可能となる。また、Zigbee の通信半径は最大 100m であり、遭遇後のデータ転送も行なうことが可能であることからデータ転送時間は延ばすことが出来る。また、繁殖期間は 1～3 月の 90 日間であることと、一夫多妻制で、オス・メスは単独行動で生活をし、発情期のみペアが形成される[6]ことが解明されている。つまり、繁殖期間の約 90 日間ペアで行動をとにした場合、1 時間当たり 12.16MB/h のデータ転送が可能であるので、最大データ転送容量の 112.5MB/h 内に収まっていることから、データ転送の実現可能性が高い。本研究の提案手法により、繁殖活動期の遭遇、その期間以外の遭遇(縄張り巡回時など)の両方でデータ転送を実現していくことが重要であると言える。

以上で、森林地域における、周辺地域の必要情報、技術要件、アライグマの生態行動の 3 つの準備要件を行なった。次に、本研究の実験結果を用いたセンシングデータの伝搬時間の推定と消費電力量の推定を行なっていく。

福島第一原子力発電所周辺の 20～30 キロ圏内における森林地域に本提案手法を適用した場合のセンシングデータ取得時間の推定を述べていく。

アライグマの最大行動圏は、森林地域の国内データでは 2048ha/月と言われている[14]。つまり、年間で最大 24,576ha/年の移動が考えられる。アライグマは 1 年で行動圏を一巡すると仮定した場合、年間の最大行動圏のデータと福島第一原子力発電所周辺の森林面積を用いて必要なアライグマの頭数を算出すると以下となる。

$$\frac{86,646}{24,576} = 3.525 \leq 4 \quad (6.4.1)$$

よって、4 頭のアライグマにより、想定している森林地域 86,646ha を 1 年間でセンシングすることが可能である。以下より、4 頭のアライグマに機器装着させ、各アライグマが保持するセンシングデータについて、全てのアライグマに伝搬が完了する時間の推定を行なう。

機器を装着させたアライグマを繁殖期間終了後の 4 月に森林地域に離し、各アライグマは他のアライグマと年間で合計 30 回遭遇すると仮定した。提案手法のプロトコルを用いて、 T を 365 日として、本実験と同じサンプル数であることから P_c を 0.266 とすると、(6.4.1)より、

$$T_p = TP_c = 97.09 \leq 98 \quad (6.4.2)$$

よって、約 98 日間で 4 頭のアライグマ間でデータ伝搬が完了することが推定される。

次に、森林地域での電力消費量の推定を行なう。3.4.3.4 で述べた個体差を考慮した消費電力量の定式化した式を用いるが、各実験犬とアライグマの体高の差が大きいため、3.4.3.4 で述べた体高と通信時間の割合の相関関係の近似式を用いる。

$$T_d = 0.0213x - 0.5094 \quad (6.4.3)$$

6.4.3 より、3.2.2 で述べたアライグマの特徴より各アライグマの体高を 30cm と仮定すると、

$$T_d = 0.1296 \quad (6.4.4)$$

よって(6.4.4)より、通信時間における消費電力の概算のために、 V を 3.3 V、 I は送受信時の電流(mA)として 40mA、 I' は待機中の電流(mA)として 15mA とすると、(6.4.4)より下の関係式より求まる。

$$[mWh] = 19.8 mW \quad (6.4.5)$$

(6.4.5)式に本実験と同様に、リアルタイムクロックと 3 軸加速度センサーの消費電力を合わせると 22.65mW となる。よって、CSMA/CA 標準プロトコルを使用した場合よりも、約 58.5%の低消費電力で動作が可能となる。また、1 日の消費電力量で比較した場合、アライグマは 1 日約 6 時間の睡眠時間が存在する。これを考慮に入れて、提案手法のプロトコルの待機時間を 6 時間/日と仮定すると、CSMA/CA 標準プロトコルに比べて約 52.4%/日の低消費電力が実現可能と推定出来る。

以上より、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大を実現することが可能であることを示した。従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査手法において課題であった「低消費電力」について本提案手法により解決に貢献した。

6.4.2 省力化の貢献

本項では省力化の貢献について述べる。後述する福島県双葉町の帰宅困難地域におけるアライグマの駆除と生態系調査を一例として省力化を評価する。環境省の帰還困難区域等でのイノシシ等緊急捕獲[83]によれば、帰還困難区域ではイノシシ等の野生鳥獣の数が増え、避難した家屋に侵入する等の被害が報告されている。帰還困難区域の野生鳥獣の現状を放置した場合、帰還準備や帰還後の生活及び地域経済の再建に影響を及ぼすため、環境省ではイノシシ等の捕獲事業を行っている。また、河北新報[84]によれば、福島県双葉町において

2016 年 4 月～2021 年 3 月末の 5 年間で捕獲されたアライグマは計 1113 匹と報告されている。また、駆除作業と区域内のアライグマの生態系の実態を把握するため、2020 年度から双葉町を含む 12 市町村の害獣対策を補助する駐在員を 7 人配置していると述べられている。

AMUSystem の省力化を評価するため、以上のデータを生態系調査のための運用コストとして仮定し、AMUSystem による運用コストの削減割合を求める。農林水産省のデータ[85]から、福島県双葉町の林野面積は 3001ha と述べられており、こちらを対象の調査地域と仮定する。AMUSystem を使用しない場合、生態系調査のために 1113 匹の捕獲が必要であり、その捕獲作業のためには運用コストとして調査員 7 人が必要である。以下が AMUSystem を使用しない調査手法による必要となる運用コストである。

- 調査期間：5 年間
- 調査地域の面積：3001ha
- 捕獲数：1113 匹
- 調査人員：7 人

次に、AMUSystem による運用コストを求める。Rossate らの先行研究[28]から、1 デバイスの縄張りは 20ha とする。従って、調査地域の面積は 3001ha であることから、各デバイスの縄張りで調査地域全体を満たすデバイス数は以下となる。

$$\frac{3001 \text{ ha}}{20 \text{ ha}} \cong 150 \text{ devices} \quad (6.4.6)$$

デバイスの電池寿命については、株式会社サーキットデザイン社が提供する小型動物用 GPS 首輪発信器 GLT-02 の電池寿命の仕様[86]から、一例と述べられている電力消費量 (GPS 測位回数：1 日 8 回、ビーコン発信スケジュール：1 日 3 時間、ビーコン発信周期：3 秒)を前提とし、デバイスの電池寿命は約 1 年とする。

まず、省電力化の結果から最大 43.3%の電力消費量を削減可能であることから、以上で述べた約 1 年のデバイスの電池寿命について省電力化を行った場合のデバイスの電池寿命は以下となる。

$$643 \text{ days} \cong 1.76 \text{ years} \quad (6.4.7)$$

以上の省電力化の結果によるデバイスの電池寿命に基づき、調査期間のデバイスの放獣回数を求める。第4章で求めた **Spin-up time** を考慮したデバイス放獣シナリオの実験結果から1年毎に1回、150個体のデバイスを調査地域に放獣すると仮定する。(6.4.7)で求めた電池寿命である1.76年から、1年毎に新しいデバイスが放獣されることから、0.76年の間に **Data Sharing** 機能により異なる放獣時期のデバイス間でデータ転送が可能である。従って、5年間で5回の放獣が実施されることから、5年間で750個体のデバイス数の放獣が必要となる。

以上から、省力化による必要な調査員数を求めると以下となる。

$$\frac{750 \text{ devices}}{1113 \text{ devices}} \cong 67.4\% \quad (6.4.8)$$

以上の結果から、調査員の稼働を67.4%に低減することが可能である。よって、調査員数7人を4.716人(約5人)に減らすことができ、AMUSystemの省力化により運用コストを32.6%削減可能であることがわかった。

従って、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査手法において課題であった「低メンテナンス負荷」について本提案手法により解決に貢献した。

6.4.3 省資源化の貢献

本項では省資源化について述べる。6.4.2で述べた、福島県双葉町の帰宅困難地域におけるアライグマの駆除と生態系調査を一例として省資源化を評価する。第5章で述べた実験結果から、調査地域100km²(10000ha)に対してデバイスは8個体で **Data Sharing** 機能の実現が可能である。従って、本項で取り上げている福島県双葉町の林野面積は3001haであることから、面積比からデバイス数を算出すると約2.4個体で **Data Sharing** 機能の実現が可能であると言える。

次に、調査期間におけるデバイスの放獣回数を求める。6.4.2と同じデバイスの電池寿命を仮定すると、第5章で得られた実験結果から1年毎に2.4個体を放獣する。すなわち、0.76年の間に **Data Sharing** 機能により異なる放獣時期のデバイス間でデータ転送が可能である。5年間で5回の放獣が実施されることから、5年間で合計12個体のデバイス数の放獣が必要となる。

以上から、省資源化によるデバイス数の削減割合を求めると以下となる。

$$\frac{12 \text{ devices}}{1113 \text{ devices}} \approx 1.08\%$$

以上の結果から, AMUSystem の省資源化を用いない調査手法と比較して, 5 年間で捕獲が必要となるデバイス数は 1.08% に省資源化が可能であると言える.

また, デバイス数の省資源化によりデバイスの捕獲作業に必要な調査員数 7 人を 0.0756 人に減らすことができる. 調査員 7 人が 8 時間/日で 5 年間毎日捕獲・放獣作業を実施したと仮定すると, 0.0756 人とは調査期間 5 年間で必要となる調査員数は 1 人だけでよく, 年間で約 28 日間の捕獲・放獣作業だけで良く, 捕獲・放獣作業の省力化が可能である.

以上より, 動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査手法において課題であった「低資源」について本提案手法により解決に貢献した.

6.5 数百年以上の時間軸で見た自然環境の影響と課題

本節では 10 年をさらに超える時間軸でみた人間による環境の影響と課題について述べる. 深澤らの研究[87]によれば, 生物分析や遺跡分布により, 製鉄といった太古の人間活動が現在の哺乳類の地理的分布を説明する重要な要素であることを述べている. 具体的には, 多くの小型哺乳類において, 古墳時代や近世での製鉄により負の影響を与えていることが研究からわかっており, 燃料や鉱石の利用が生物多様性に長い時間軸で影響があることがわかっている. 一方, 中型～大型の哺乳類では負の影響は見られず, 逆に正の影響がある個体種も観測されている. 要因として, 製鉄や製陶の生産過程で, 多量の薪や炭を必要とするため, 周辺の山が禿山になることがあった. その結果, 土壌流出が生じたことにより, 地域全体の原生林がほぼ失われ, 二次林や草原が広がる景観が形成されたと言われている.

これらの影響を受けたのは, モモンガやヤマネ等の小型の哺乳類であり, 体サイズが小さい種は分散距離や生息可能な環境の幅が小さいため, 長期間の森林植生の回復の阻害や残存個体群からの流入ができなかったことにより個体数に負の影響が出たと考えられる. また, 約 1300 年前まで続いた古墳時代でも統計学的に明瞭な影響が確認されており, 過去に製鉄が行われた地域では現在においても小型哺乳類の多様性が低いと言われている. 上記で述べた先行研究は, 人間活動により人工物が自然環境に現れ, 人工物を取り囲む自然環境に影響を与えているだけでなく, 数百年という長期間において生物多様性に影響を及ぼしている結果であると言える.

一方, 本研究では人の立ち入りが出来ない自然環境を対象としており, その対象として福

島第一原子力発電所周辺の帰還困難区域における地域も対象としている。特に福島第一原子力発電所周辺地域では今なお放射線量が高い区域があり、第1章で述べたように野生動植物に放射線の影響が確認されている[10]。また、チェルノブイリの原子力発電所周辺地域の森林地域の動植物の影響でも述べたように、事故から30年が経過した今も周辺地域は居住が禁止されており、放出されたプルトニウムは半減するまで約24,100年かかると言われている[88]。従って、自然環境や生態系に対する放射線の影響は長期間に渡って影響が続くため、本研究の対象とする調査地域においても10年を超える長期的な野生動物調査が求められる。

製鉄所という人工物(ハード)と多量の放射性物質という人工物(ソフト)という観点で、自然環境において求められる調査手法の要件の議論について述べる。深澤らの研究[87]ではハードとしての人工物が、自然環境にどう影響を与えてきたかという調査とも言える。また、それらの調査のために、遺跡や土壌の分析をするで、過去の状態を同定することで過去から現在の変化を調査している。一方、福島第一原子力発電所周辺地域の放射線の影響は、ソフトとしての影響とも言い換えることが出来る。放射線は目に見えず、徐々に減衰することが特徴として挙げられるため、特定の地点でどの程度の放射線量が存在したか、深澤らの用いた調査手法でミクロな視点での過去の同定は難しい。つまり、影響結果から過去の起きた事象を同定する手法ではなく、多量の放射性物質という人工物(ソフト)に対する影響調査ではリアルタイムで情報を収集することが必要とされる。

これまで述べた数百年以上の時間軸で見た自然環境の影響と、人工物におけるハードとソフトの観点で調査手法を比較検討すると、多量の放射性物質という人工物(ソフト)に対する数百年の長期的な野生動物調査手法として、本研究で述べた動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法が有効であると言える。なぜなら、本手法のSensing機能により各デバイス装着個体は単独行動時にリアルタイムで環境情報を収集が可能である。次に、本手法は人の立ち入りが出来ない地域において調査員の介在を必要としないため、デバイス装着個体である動物主体のシステムによる長期的な自律型の野生動物調査を行うことが可能であるからである。従って、これまで述べてきた人工物(ソフト)による自然環境の影響調査を数百年以上の単位の期間で実施する必要がある場合において、本調査手法は有効であると言える。

本節で述べたように、本研究で前提としている10年単位といった調査期間を超えた、数百年以上の時間軸でみた人間による環境の調査においても、本研究で有効性を明らかにした動物間マルチホップ通信システム(AMUSystem)を用いた、動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法の実現が期待される。

第 7 章

結論

7.1 まとめ

本研究では、広大な国立公園や森林、山岳地帯、海中などの遠隔地(人の立ち入りが困難な地域)における長期的な野生動物調査のために、動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査手法の提案を行った。また、動物間マルチホップ転送方式の野生動物調査手法の機能の一つである動物間通信機能(Data Sharing 機能)の課題に着目し、長期的な野生動物調査を行うための Data Sharing 機能の課題を整理した。具体的な課題は、高い電力消費量により動物間マルチホップ通信が不可、野生動物の短い寿命により長期運用不可、繰り返しの放獣と繁殖による 10 年後の生態系影響であった。

本研究ではそれらの課題解決のために、動物間マルチホップ通信システム(AMUSystem)を提案した。AMUSystem では、10 年以上の長期的な野生動物調査を実現するために Data Sharing 機能を長期的に維持するための研究として、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大(省力化)、法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減(省力化)、縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減(省資源化)を行うことにより課題解決を試みた。

結果、本研究で提案した動物間マルチホップ通信システム(AMUSystem)により、人の立ち入りが難しい地域での長期的な野生動物調査システムの設計論を確立できた。

7.2 今後の課題

AMUSystem にて提案した、動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大(省電力化)、法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減(省力化)、縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減(省資源化)における今後の課題について、各章の考察で述べているが改めて本節で述べる。

動物間マルチホップ通信の実現による環境調査範囲の拡大(省力化)の今後の課題として、低消費電力性の向上のために、体サイズと消費電力量の関係性の検証が必要である。3.4.3 の実験結果の考察で述べたように、複数の実験犬を用いたフィールド実験において、実験犬の体サイズ(体高)と消費電力量に相関関係が見られた。帰還困難区域などの人の立ち入りが難

しい遠隔地での長期的な野生動物調査に向けて、通信機器 Wake 制御アルゴリズムの閾値の最適化が求められるが、同じ種類の動物でも体サイズ(体高)で実験結果が異なることから、今後は動物の種類ではなく体サイズに着目した低消費電力な閾値の検証が必要であると考えられる。実際に、6.3 で述べたように、[79]のフィールド実験では、家畜牛をデバイス装着個体として、3.4.3 と同じ閾値を使用して通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価実験を行っているが、通信機器 Wake 制御の成功率や消費電力量において 3.4.3 と同様の結果は得られていない。実験犬と家畜牛の体サイズによる差異が、結果に影響を及ぼしていると考えられ、3.4.3 で体サイズによる定式化を行ったように体サイズに着目した検証が必要であると考えられる。

法的対応で必ず発生する調査員の作業頻度に着目した運用コストの削減(省力化)の今後課題として、本研究で得られた知見である年 1 回 120 個体のデバイスを実際の自然環境に適用する場合、今後の課題として遭遇回数を最大効率化できるように放獣時期を検討する必要がある。最大効率な遭遇回数の観点では、冬が終わり春を迎える前の時期に放獣するシナリオが最適なシナリオであると言える。Rossate らの研究結果[28]によれば、自然環境の冬の寒さはデバイス装着者であるアライグマの個体数を減らす要因となると述べられており、冬を過ぎた春先にデバイスを放獣することで次に冬を迎えるまでに季節要因によるデバイス数の減少を最小化することが出来る。しかし、春はアライグマの繁殖時期であることから、放獣個体同士の繁殖や放獣個体と生息する野生個体の繁殖により、生息する野生個体数が増加する恐れがあるため、遭遇回数の最大効率だけではなくデバイス放獣により付帯して発生する新たな課題について考慮する必要があると言える。また、今後の課題として、エージェントモデルの信頼性を向上のため、性別や性格による個体差、縄張り行動の模擬が必要であると言える。4.2.3, 4.3.3 の実験概要で述べたように、アライグマの移動速度、移動距離、遭遇距離、寿命のパラメータについては Rossate らの研究結果[28]から模擬している一方、性別、縄張り等は本研究のシミュレーション実験では模擬していないことを述べた。性別や性格による個体差、縄張り行動は遭遇回数に影響が大きいいため、エージェントモデルの信頼性を向上のためには必要であると言える。

縄張りの主の入替りを利用した長期センシング機構によるデバイス数の削減(省資源化)の今後の課題として、捕獲・放獣プロセスにおいて生存率の高い個体をデバイス装着個体として選定するための検討が必要である。5.3.4 の実験結果から、個体の生存率は世代間遭遇回数、10 年後の合計個体数に影響を与える要因の一つであると考えられる。生存率の高い個体をデバイス装着個体として選定することで、放獣後の自然環境における個体の生存期間を延ばし、異なる放獣時期のデバイスとの世代間データ転送を断絶させずに実現させる。生存率の高い個体の選定方法として、例えば、病気や怪我をしていない 1~1.5 歳の成獣で、

可能であればメス個体を選定する方法などが考えられる。

以上が本研究の今後の課題であり、人の立ち入りが難しい地域での長期的な野生動物調査のシステムの設計論に加えてこれらの今後の課題を解決することで、動物間マルチホップ転送方式による長期的な野生動物調査の実現に近づける。

謝辞

本研究は、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 博士課程において、筆者が小林博樹教授の下で行った研究、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 修士課程において、筆者が瀬崎薫教授の下で行った研究をまとめたものです。

修士課程から博士課程に至るまで、本研究テーマに対するアドバイス、論文執筆や論文構成の考え方、研究の進捗や方向性の相談など、フランス留学時や仕事と博士課程との両立で悩んだ辛い時期においても、いつも身近で親身になって支えていただいた小林博樹教授にここで深く感謝申し上げます。大学院入学前に、社会人として勤務していた頃から今日に至るまで、進学の相談、研究に対する姿勢、実験に対する周到的準備の必要性、研究分野での発表方法、留学中の支援、博士論文の審査員など多岐にわたる面で瀬崎薫教授にご指導いただきました。心から感謝いたします。東京大学大学院 新領域創成科学研究科の柴崎亮介教授、福永真弓准教授、中村和彦講師には、博士論文の審査員をつとめていただき、分野を横断した観点で様々なアドバイスをいただき、本稿の質が非常に向上しました。審査員の皆様に感謝申し上げます。

まず、修士課程在籍時のお世話になった皆様に感謝を申し上げます。2013年10月より瀬崎研究室に着任され現在は東京大学大学院情報理工学系研究科の伊藤昌毅助准教授より、短い期間ながらも研究の意義の再考、資料作成の方法など、非常に分かりやすいご指導をしていただきましたことを感謝いたします。フランス国立応用科学院リヨン校留学中の指導教員である **Hervé Rivano** 先生には、慣れない留学生活の中で研究の議論、論文執筆など、丁寧に指導をしていただきました。東京電機大学の岩井将行准教授より瀬崎研究室の助教授時代から最新技術の知見や論文執筆のアドバイス、お忙しい中で副指導教員の本實新一准教授より研究の議論をさせていただき、客観的な意見をいただくことが出来ました。

麻布大学 伴侶動物学研究室の菊水健史教授、永澤美保講師、当時博士課程の片山真希さんには実験の相談、調整など、その他の伴侶動物学・介在動物研究室の学生の皆さんにも、長期にわたる実験に協力していただきました。また、実験に参加していただいた茂木一孝准教授の飼い犬パンチとその他の伴侶(ネネ、ユフィ、太陽)・介在の実験犬、飼い犬ラブにも、ここで御礼を申し上げます。

瀬崎研究室の研究員の奥野淳也さんより研究の相談を気軽にのっていただき、プロトタイプの開発や実装など多方面で助けていただきました。また、瀬崎研究室の先輩として研究に対する真摯な姿勢を教えてもらった、当時博士課程の **Asif Hossain Khan** さん、党聡維さ

ん、劉広文さん、Niu Hao さん、Dunstan Matekenya さん。後輩である、坂本敬太君、中村直人君、稲葉瞳さん、加藤宗肖さんと研究生である Jiang Tiantian さんには、研究に対する強い意欲や挑戦する姿勢に刺激を受けました。同期である、青木俊介君、木田裕一朗君、Jose Alvarez Pablo 君には、私生活での出来事から研究、学会や進路の相談など楽しい時間を共に過ごすことができ掛替えのない存在でした。共に感謝申し上げます。

大学院進学の相談や後押しをしていただきました、ソフトバンクテレコム株式会社の前田憲一郎さん、菅野徳之さん、今城啓一さん、佐藤励さんにはここで敬意を表し感謝いたします。

次に、博士課程在籍時のお世話になった皆様に感謝を申し上げます。博士課程の入学後は、小林研究室の川瀬純也さん、下徳大祐さん、佐々木遊太さん、工藤宏美さんには本研究に関する議論やフィールド実験のご協力など、感謝を申し上げます。また、小林研究室の秘書の平川久美さん、渡部いづみさんには、常日頃から海外出張などの経費精算のサポートや、事務続きのご協力をしていただき感謝を申し上げます。当時小林研究室の特任研究員の槇田篤哉さんには麻布大学のフィールド実験のサポートをしていただき多方面で助けていただきました。社会文化環境学専攻の OG・OB である東京大学の笹尾知世特任助教、筑波大学の小倉拓郎助教には博士論文執筆にあたり様々なサポートをいただき感謝申し上げます。

また、社会人学生として博士課程と仕事の両立のため、業務と並行しながら博士課程の在籍に対する理解と多大なサポートをしていただいた、シスコシステムズ合同会社 岡本真樹さん、株式会社本田技術研究所 長谷川さん、屋敷哲也さん、北村さん、東治臣さん、また、アカマイテクノロジーズ合同会社 Jaydeep Nargund さん、根本隆志さん、Jaesoon Kweon さん、場田隼也さんにここで敬意を表し感謝いたします(所属は私が在籍していた当時の所属を記しております)。

最後に、生まれてから今に至るまで筆者を暖かく見守ってくれた両親と兄妹、いつも献身的なサポートをしてくれた妻への敬愛と感謝の言葉で、本研究を締めくくりたいと思います。

2021 年 6 月 11 日

中川 慶次郎

発表文献

査読付き論文誌

- K. Nakagawa and H. Kobayashi. Optimal Arrangement of Wearable Devices based on Lifespan of Animals as Device Transporter Material for Long-Term Monitoring of Wildlife Animal Sensor Network, Sensors and Materials. (accepted November 18, 2019).

査読付き国際会議

- K. Nakagawa, A. Makita, M. Nagasawa, T. Kikusui, K. Sezaki, and H. Kobayashi: Proc. 2018 Distributed, Ambient and Pervasive Interactions: Understanding Humans. 10921. Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91125-0_22.
- K. Nakagawa, A. Makita, M. Nagasawa, T. Kikusui, K. Sezaki, and H. Kobayashi: Poster. "Opportunistic Data Exchange Algorithm for Animal Wearable Device through Active Behavior against External Stimuli." Asian CHI Symposium: Emerging HCI Research Collection in ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) 2019. Glasgow, UK. 2019.05.05.
- Keijiro Nakagawa, Daisuke Shimotoku, Junya Kawase, Hill Hiroki Kobayashi. Dependable Wildlife DTN: Wearable Animal Resource Optimization for Sustainable Long-Term Monitoring, IEEE International Conference on Dependability in Sensor, Cloud, and Big Data Systems and Applications (DependSys 2020), Shangri-La's Fijian Resort and Spa, Yanuca Island, Fiji, Dec 14-16 2020.
- K. Nakagawa and H. 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). (投稿中)

国内会議

- 中川慶次郎, 槇田篤哉, 永澤美保, 菊水健史, 小林博樹, 瀬崎薫. アニマルウェアラブルデバイスのための習性行動を利用したデータ転送アルゴリズムの提案, 超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会(RISING), 東京, 2019.11.26-27.

その他の発表文献 (本博士論文には含まれない)

査読付き国際会議

- Keijiro Nakagawa, Hihroki Kobayashi, Junya Okuno, Hiromi Kudo, Jun Matsushima, Kaoru Sezaki, “Carrier Pigeon-like Sensing system: Animal–Computer Interface Design for Opportunistic Data Exchange Interaction for a Wildlife Monitoring Application”, AHI2014 March 7 – 9.

査読なし国際会議

- Keijiro Nakagawa, Hiroki Kobayashi and Kaoru Sezaki. Carrier pigeon-like sensing system: Animal–computer interface design for opportunistic data exchange interaction for a wildlife monitoring application. Digital Conservation Conference 2014, University of Aberdeen, Aberdeen, England. May 21-23, 2014.

国内会議

- 中川慶次郎, 小林博樹, 奥野淳也, 岩井将行, 瀬崎薫, "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", 第12回情報科学技術フォーラム, 鳥取, 2013年09月.
- 中川慶次郎, 小林博樹, 奥野淳也, 岩井将行, 瀬崎薫, "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", 第10回ネットワーク生態学シンポジウム, 有馬温泉, 2013年09月.

参考文献

- [1] International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, “The IUCN red list of threatened species,” *The IUCN red list of threatened species*, 2000.
- [2] J. Kamminga, E. Ayele, N. Meratnia, and P. Havinga, “Poaching Detection Technologies—A Survey,” *Sensors*, vol. 18, no. 5, Art. no. 5, May 2018, doi: 10.3390/s18051474.
- [3] D. A. de Souza, A. L. S. Gonçalves, E. M. von Muhlen, and V. M. F. da Silva, “Estimating occupancy and detection probability of the Amazonian manatee (*Trichechus inunguis*), in Central Amazon, Brazil,” *Perspectives in Ecology and Conservation*, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.pecon.2021.03.009.
- [4] M. Tateno *et al.*, “Molecular Epidemiologic Survey of Bartonella, Ehrlichia, and Anaplasma Infections in Japanese Iriomote and Tsushima Leopard Cats,” *Journal of Wildlife Diseases*, vol. 49, no. 3, pp. 646–652, Jul. 2013, doi: 10.7589/2012-07-194.
- [5] M. Okamura, T. Doi, N. Sakaguchi, and M. Izawa, “Annual reproductive cycle of the Iriomote cat *Felis iriomotensis*,” *Mammal Study*, vol. 25, no. 2, pp. 75–85, 2000, doi: 10.3106/mammalstudy.25.75.
- [6] R. Masuda and M. C. Yoshida, “Two Japanese Wildcats, the Tsushima Cat and the Iriomote Cat, Show the Same Mitochondrial DNA Lineage as the Leopard Cat *Felis bengalensis*,” *jzoo*, vol. 12, no. 5, pp. 655–659, Oct. 1995, doi: 10.2108/zsj.12.655.
- [7] “環境省_イリオモテヤマネコ.”
<https://www.env.go.jp/nature/kisho/hogozoushoku/iriomoteyamaneko.html> (accessed May 27, 2021).
- [8] “避難指示区域の状況 - ふくしま復興ステーション - 福島県ホームページ.” <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/list271-840.html> (accessed May 27, 2021).
- [9] “国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所／森林内の放射性物質の分布状況などについて調査結果公表.”
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2011/20110930/index.html> (accessed May 27, 2021).
- [10] S. Geras'kin *et al.*, “Multifaceted effects of chronic radiation exposure in Japanese red pines from Fukushima prefecture,” *Science of The Total Environment*, vol.

763, p. 142946, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142946.

[11] K. Komatsu *et al.*, “Morphological reproductive characteristics of testes and fertilization capacity of cryopreserved sperm after the Fukushima accident in raccoon (*Procyon lotor*),” *Reproduction in Domestic Animals*, vol. 56, no. 3, pp. 484–497, 2021, doi: <https://doi.org/10.1111/rda.13887>.

[12] 文雄山田 *et al.*, “福島原発事故後の放射能影響を受ける野生哺乳類のモニタリングと管理問題に対する提言,” *哺乳類科学*, vol. 53, no. 2, pp. 373–386, 2013, doi: 10.11238/mammalianscience.53.373.

[13] K. A. Higley, “Environmental consequences of the chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the chernobyl forum expert group ‘environment,’” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 121, no. 4, pp. 476–477, Dec. 2006, doi: 10.1093/rpd/ncl163.

[14] T. IKEDA, M. ENDOH, and N. MURANO, “Home Ranges of Invasive Raccoons in Nopporo Forest Park,” *Journal of Rakuno Gakuen University. Natural science*, vol. 25, no. 2, pp. 311–319, Feb. 2001.

[15] S. Prange, S. D. Gehrt, and S. Hauver, “Frequency and duration of contacts between free-ranging raccoons: uncovering a hidden social system,” *Journal of Mammalogy*, vol. 92, no. 6, pp. 1331–1342, Dec. 2011, doi: 10.1644/10-MAMM-A-416.1.

[16] 聡露木, 定洙李, M.-H. Phua, and 泰雅平田, “森林でgpsをもっと有効に使うために: 高感度gps受信機の森林内における利用可能性,” *森林計画学会誌*, vol. 40, no. 2, pp. 283–291, 2006, doi: 10.20659/jjfp.40.2_283.

[17] 岳工藤 and 邦子横須賀, “高山植物群落の開花フェノロジー構造の場所間変動と年変動: 市民ボランティアによる高山生態系長期モニタリング調査,” *保全生態学研究*, vol. 17, no. 1, pp. 49–62, 2012, doi: 10.18960/hozen.17.1_49.

[18] 阿部永, 小林恒明, 石城謙吉, and 太田嘉四夫, “北大中川地方演習林鳥類調査報告 その1,” *Report of the survey on birds in the Nakagawa Experiment Forest No. 1*, vol. 27, no. 1, pp. 69–77, Jul. 1970.

[19] D. Estrin *et al.*, “Participatory sensing: applications and architecture [Internet Predictions],” *IEEE Internet Computing*, vol. 14, no. 1, pp. 12–42, Jan. 2010, doi: 10.1109/MIC.2010.12.

[20] K. Nakagawa, “動物の習性を利用した環境調査のための省電力データ転

送プロトコルの研究,” 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文(未公開), 2014, [Online]. Available: <https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/record/6009/files/K-04516.pdf>

- [21] A. Miyamoto and A. Yabe, “Bridge Condition Assessment based on Vibration Responses of Passenger Vehicle,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 305, p. 012103, Jul. 2011, doi: 10.1088/1742-6596/305/1/012103.
- [22] K.-T. Park, S.-H. Kim, H.-S. Park, and K.-W. Lee, “The determination of bridge displacement using measured acceleration,” *Engineering Structures*, vol. 27, no. 3, pp. 371–378, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.10.013.
- [23] H. H. Kobayashi *et al.*, “A Real-Time Streaming and Detection System for Bio-Acoustic Ecological Studies After the Fukushima Accident,” *Multimedia Tools and Applications for Environmental & Biodiversity Informatics*, pp. 53–66, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-76445-0_4.
- [24] K. Nakamura, A. Fujiwara, K. Hiroki, and K. Saito, “Multi-Timescale Education Program for Temporal Expansion in Ecocentric Education: Using Fixed-Point Time-Lapse Images for Phenology Observation,” *Education Sciences*, vol. 9, p. 190, Jul. 2019, doi: 10.3390/educsci9030190.
- [25] G. K. Mulukutla, B. T. Godbois, and S. Frey, “Deployment of a large-scale soil monitoring geosensor network,” *SIGSPATIAL Special*, vol. 7, no. 2, pp. 3–13, Sep. 2015, doi: 10.1145/2826686.2826689.
- [26] H. Kobayashi, A. Hiyama, S. Kobayashi, M. Izawa, J. Matsushima, and M. Hirose, “Wild Theremin: Wildlife Monitoring through Remote Microphone and Capacitance Sensors,” *The Transactions of Human Interface Society*, vol. 12, no. 1, pp. 15–22, 2010, doi: 10.11184/his.12.1_15.
- [27] T. Takasaki *et al.*, “Wild animal tracking by PHS (Personal Handy phone System),” in *Human Friendly Mechatronics*, E. Arai, T. Arai, and M. Takano, Eds. Amsterdam: Elsevier Science, 2001, pp. 43–48. doi: 10.1016/B978-044450649-8/50009-7.
- [28] R. Rosatte *et al.*, “Density, movements, and survival of raccoons in Ontario, Canada: implications for disease spread and management,” *J Mammal*, vol. 91, no. 1, pp. 122–135, Feb. 2010, doi: 10.1644/08-MAMM-A-201R2.1.
- [29] 晃司山崎 and 緑佐伯, “携帯電話GPS端末を利用したアライグマの行動

追跡の実用性について,” 哺乳類科学 = *Mammalian science*, vol. 1, pp. 47–54, Jun. 2012.

[30] K. Fall, “A delay-tolerant network architecture for challenged internets,” in *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, New York, NY, USA, Aug. 2003, pp. 27–34. doi: 10.1145/863955.863960.

[31] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L.-S. Peh, and D. Rubenstein, *Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet*, vol. 37. 2002, p. 107. doi: 10.1145/605397.605408.

[32] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, “A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks,” in *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, New York, NY, USA, May 2004, pp. 187–198. doi: 10.1145/989459.989483.

[33] 正人鶴 *et al.*, “Dtn 技術の現状と展望,” 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, vol. 2011, no. 16, p. 16_57-16_68, 2011, doi: 10.1587/bplus.2011.16_57.

[34] D. I. Adamou, A. Mouradian, and V. Veque, “Towards the Use of Commercial Flights for Data Collection in Wide White Area Networks,” in *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Barcelona, Spain, Oct. 2019, pp. 241–248. doi: 10.1109/WiMOB.2019.8923558.

[35] K. Makiyama, K. Nakagawa, M. Katayama, M. Nagasawa, K. Sezaki, and K. Hiroki, *Synchronization of Peripheral Vision and Wearable Sensors for Animal-to-Animal Interaction*, vol. 9170. 2015, p. 764. doi: 10.1007/978-3-319-20916-6_69.

[36] “防除に関する手引き（防除マニュアル） | 日本の外来種対策 | 外来生物法.” <https://www.env.go.jp/nature/intro/3control/tebiki.html> (accessed Jun. 06, 2021).

[37] A. N. Hamir, “Spontaneous Lesions in Aged Captive Raccoons (*Procyon lotor*),” *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science : JAALAS*, vol. 50, no. 3, p. 322, May 2011.

[38] A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” 2000.

[39] “Spray and wait | Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking.” <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1080139.1080143> (accessed

May 30, 2021).

[40] C. Maihofer, “A survey of geocast routing protocols,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 6, no. 2, pp. 32–42, Second 2004, doi: 10.1109/COMST.2004.5342238.

[41] Y. KOYAMA, T. MIZUMOTO, S. IMAZU, and K. YASUMOTO, “Safety Confirmation System with DTN-based Message Routing in 3G Disabled Areas Caused by Large-Scale Disaster,” *IEICE technical report*, vol. 112, no. 44, pp. 171–177, May 2012.

[42] K. A. Houpt, *Domestic Animal Behavior for Veterinarians and Animal Scientists*. John Wiley & Sons, 2011.

[43] A. R. Berentsen, M. R. Dunbar, and C. E. Fitzpatrick, “Raccoon Rabies Research Using Remote Download GPS Collars in an Urban Environment,” *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference*, vol. 24, no. 24, 2010, doi: 10.5070/V424110468.

[44] “主要指標のまとめ.” <https://petfood.or.jp/data/chart2010/01.html> (accessed Jun. 06, 2021).

[45] “鳥獣対策マニュアル | 長崎県.” <https://www.pref.nagasaki.jp/bunrui/shigoto-sangyo/nogyo/chojutaisaku/wildlife-choju/> (accessed Jun. 06, 2021).

[46] K. Yonezawa, T. Miyaki, and J. Rekimoto, “Cat@Log: sensing device attachable to pet cats for supporting human-pet interaction,” in *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, New York, NY, USA, Oct. 2009, pp. 149–156. doi: 10.1145/1690388.1690414.

[47] K. Shimizu, M. Iwai, and K. Sezaki, “Social Link Analysis Using Wireless Beaconing and Accelerometer,” in *2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, Mar. 2013, pp. 33–38. doi: 10.1109/WAINA.2013.141.

[48] J.-S. Lee, Y.-W. Su, and C.-C. Shen, “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi,” in *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2007, pp. 46–51. doi: 10.1109/IECON.2007.4460126.

[49] “Arduino - Home.” <https://www.arduino.cc/> (accessed Jun. 06, 2021).

- [50] 敬太中村, “回転筆法による動物行動の観測,” 日本薬理学雑誌, vol. 74, no. 6, pp. 671–686, 1978, doi: 10.1254/fpj.74.671.
- [51] 康男阿部, 寛田中, 章義三島, and 継男小野, “ハブならびにハブ咬症に関する研究 (Tr.-3): ハブの行動解析, 特に照度との関係について,” 衛生動物, vol. 16, no. 3, pp. 177–183, 1965, doi: 10.7601/mez.16.177.
- [52] 詩織三家, 乃莉子三浦, 庄平武田, 司宇田, and 一成梶, “飼育下フサオマキザルにおける給餌スケジュールの変化が行動変容に及ぼす影響,” 日本家畜管理学会誌・応用動物行動学会誌, vol. 48, no. 2, pp. 79–87, 2012, doi: 10.20652/abm.48.2_79.
- [53] “MSR145 - 万能データロガー by MSR Electronics GmbH | DirectIndustry.” <https://www.directindustry.com/ja/prod/msr-electronics-gmbh/product-40578-922791.html> (accessed Jun. 07, 2021).
- [54] “Datalogger MSR145 Datasheet - MSR Electronics GmbH - PDFカタログ | 技術資料 | パンフレット.” <https://pdf.directindustry.com/ja/pdf-en/msr-electronics-gmbh/datalogger-msr145-datasheet/40578-290171.html#open922791> (accessed Jun. 10, 2021).
- [55] D. Skordoulis, Q. Ni, H. Chen, A. P. Stephens, C. Liu, and A. Jamalipour, “IEEE 802.11n MAC frame aggregation mechanisms for next-generation high-throughput WLANs,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 40–47, Feb. 2008, doi: 10.1109/MWC.2008.4454703.
- [56] 健太長, 昭彦大須賀, and 真一本位田, “知的移動エージェントによる低消費電力なワイヤレスセンサネットワークアプリケーションの構築,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J90-D, no. 9, pp. 2365–2377, Sep. 2007.
- [57] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Jun. 2002, vol. 3, pp. 1567–1576 vol.3. doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019408.
- [58] T. van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, New York, NY, USA, Nov. 2003, pp. 171–180. doi: 10.1145/958491.958512.
- [59] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd international conference on*

Embedded networked sensor systems, New York, NY, USA, Nov. 2004, pp. 95–107.
doi: 10.1145/1031495.1031508.

[60] 隆志松田, 真澄一圓, 真司三上, 能太田, 博川口, and 雅彦吉本, “定期情報収集型センサネットワークのためのRTS/CTS交換に基づくデータ送信スケジューリング(トラヒック, 一般),” *IEICE Conferences Archives*, vol. 106, no. 14, pp. 25–28.

[61] E. Ziouva and T. Antonakopoulos, “CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis,” *Computer Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 313–321, Feb. 2002, doi: 10.1016/S0140-3664(01)00369-3.

[62] A. Rapp, *andrewrapp/xbee-arduino*. 2021. Accessed: Jun. 06, 2021. [Online]. Available: <https://github.com/andrewrapp/xbee-arduino>

[63] 寿一長谷川, “動物行動研究における適応論的アプローチの重要性,” *動物心理学研究*, vol. 55, no. 1, pp. 41–44, 2005, doi: 10.2502/janip.55.41.

[64] “ADXL335 データシートおよび製品情報 | アナログ・デバイセス.” <https://www.analog.com/jp/products/adxl335.html#product-overview> (accessed Jun. 14, 2021).

[65] “DS1307 64 x 8, シリアル, I2Cリアルタイムクロック - Maxim Integrated.” <https://www.maximintegrated.com/jp/products/analog/real-time-clocks/DS1307.html> (accessed Jun. 14, 2021).

[66] “XBee® ZB ZigBee® RF モジュール :: デイジ インターナショナル - Digi International.” <http://www.digi-intl.co.jp/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module.html> (accessed Jun. 14, 2021).

[67] “鳥獣被害対策に活用出来る機器情報：農林水産省.” <https://www.maff.go.jp/j/seisan/tyozyu/higai/kikijouhou/kikijouhou.html> (accessed Jul. 21, 2021).

[68] 玄浅野, 英晴塚田, and 真弓岸本, “生体捕獲調査における計測, 採材, 器具装着および衛生上の諸注意,” *哺乳類科学*, vol. 46, no. 1, pp. 111–131, 2006, doi: 10.11238/mammalianscience.46.111.

[69] V. A. Kowal, S. M. Jones, F. Keesing, B. F. Allan, J. M. Schieltz, and R. Chaplin-Kramer, “A coupled forage-grazer model predicts viability of livestock production and wildlife habitat at the regional scale,” *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, p. 19957, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-56470-3.

- [70] “Artisoc,” *Artisoc*. <https://mas.kke.co.jp/en/>
- [71] T. M. Press, “Growing Artificial Societies | The MIT Press.” <https://mitpress.mit.edu/books/growing-artificial-societies> (accessed Jun. 03, 2020).
- [72] M. Miura, “Project Based Learning with Multi-agent Simulation in Liberal Arts Education,” in *2015 3rd International Conference on Applied Computing and Information Technology/2nd International Conference on Computational Science and Intelligence*, Jul. 2015, pp. 242–247. doi: 10.1109/ACIT-CSI.2015.51.
- [73] P. C. L. White and S. Harris, “Encounters between Red Foxes (*Vulpes vulpes*): Implications for Territory Maintenance, Social Cohesion and Dispersal,” *Journal of Animal Ecology*, vol. 63, no. 2, pp. 315–327, 1994, doi: 10.2307/5550.
- [74] T. Kato, Y. Ichida, K. Tei, M. Asano, and S. Hayama, “Reproductive Characteristics of Feral Raccoons (*Procyon lotor*) Captured by the Pest Control in Kamakura, Japan,” *Journal of Veterinary Medical Science*, vol. 71, no. 11, pp. 1473–1478, 2009, doi: 10.1292/jvms.001473.
- [75] H. Sasaki *et al.*, “A series of eddy-resolving ocean simulations in the world ocean - OFES (OGCM for the Earth Simulator) project,” in *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No.04CH37600)*, Kobe, Japan, 2004, vol. 3, pp. 1535–1541. doi: 10.1109/OCEANS.2004.1406350.
- [76] T. Ikeda, M. Asano, Y. Matoba, and G. Abe, “Present status of invasive alien raccoon and its impact in Japan,” *Global Environ. Res.*, vol. 8, Jan. 2004.
- [77] S. D. Gehrt and E. K. Fritzell, “Resource distribution, female home range dispersion and male spatial interactions: group structure in a solitary carnivore,” *Animal Behaviour*, vol. 55, no. 5, pp. 1211–1227, May 1998, doi: 10.1006/anbe.1997.0657.
- [78] “野生鳥獣による被害防止マニュアル等：農林水産省.” <https://www.maff.go.jp/j/seisan/tyozyu/higai/manyuaru/manual.html> (accessed Jun. 07, 2021).
- [79] H. H. Kobayashi *et al.*, “Animal-to-Animal Data Sharing Mechanism for Wildlife Monitoring in Fukushima Exclusion Zone,” *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 2, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2018, doi: 10.3390/mti2030040.
- [80] “森林・林業統計書を公表しています - 福島県ホームページ.” <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36055a/toukeisyo.html> (accessed Jun. 11, 2021).
- [81] “通信・エリア | NTTドコモ.” <https://www.nttdocomo.co.jp/area/> (accessed Jun. 11, 2021).

- [82] 川口敏, 死物学の観察ノート: 身近な哺乳類のプロファイリング. PHP 研究所, 2001. Accessed: Jun. 11, 2021. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA52691611>
- [83] 環境省自然環境局野生生物課鳥獣保護管理室, “帰還困難区域等でのイノシシ等緊急捕獲 || 野生鳥獣の保護及び管理[環境省].” <https://www.env.go.jp/nature/choju/effort/effort10/effort10.html> (accessed Jul. 18, 2021).
- [84] “大繁殖のアライグマ, 双葉で駆除難航 空き家すみかに子育て,” 河北新報オンラインニュース, Jun. 22, 2021. <https://kahoku.news/articles/20210621khn000032.html> (accessed Jul. 18, 2021).
- [85] “市町村の姿 グラフと統計でみる農林水産業 詳細データ 福島県双葉町.” <http://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/07/546/details.html> (accessed Jul. 19, 2021).
- [86] “サル用GPS首輪発信器 | 動物行動調査用テレメトリー発信器 | サーキットデザイン GLT-02 | 鳥獣被害対策向け製品 | 製品情報 | 動物行動調査用テレメトリー発信器 | サーキットデザイン,” Aug. 19, 2016. <https://www.tracking21.jp/products/glt-02/> (accessed Jul. 19, 2021).
- [87] K. Fukasawa and T. Akasaka, “Long-lasting effects of historical land use on the current distribution of mammals revealed by ecological and archaeological patterns,” *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Jul. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-46809-1.
- [88] “Plutonium release from Fukushima Daiichi fosters the need for more detailed investigations | Scientific Reports.” <https://www.nature.com/articles/srep02988> (accessed Jul. 21, 2021).

付図

第 1 章

- 1.1.1 自然の生息域におけるシロサイやアフリカゾウ[2]
- 1.1.2 イリオモテヤマネコ[7]
- 1.1.3 避難指示区域の概念図(令和 2 年 3 月 1 0 日時点)[8]
- 1.1.4 アカマツの発達における(a)正常な形態, (b)形態異常(頂芽優勢の消失), (c)形態異常からの回復. (b)の白い矢印は伸長しなかった頂芽を示し, 頂芽優勢の消失となっている. (c)では, 側枝の一本が幹となり, 頂芽優勢が回復している.[10]
- 1.1.5 都市環境と自然環境の調査条件の違い
- 1.2.1 実際の環境調査の様子[20]
- 1.2.2 東京大学秩父演習林に設置している赤外線カメラと気温センサー[20]
- 1.2.3 (a)マイク, (b)同期ノードステーション, (c)ウェブサイト プロジェクトサイト(福島第一原発から 10km 離れた立入禁止区域内)[23]
- 1.2.4 2016 年の桜の開花時期を観察シートの抜粋例. 4 月 28 日は悪天候で観察不可, 白い花のピークは 4 月 27 日から 29 日. 27 日と 29 日が変わらないと判断された場合, 例えば 27 日が満開と判断される[24]
- 1.2.5 センサーノードの構成概念図と, センシングシステムが設置されているサイトマップ[25]
- 1.2.6 センサー群とハードウェアのレイアウト図[26]
- 1.2.7 アライグマオス成獣に装着された状態の首輪型デバイス[29]
- 1.2.8 Delay-tolerant networking によるデータ伝搬の様子(Node A から Node C)[19]
- 1.2.9 DTN 技術を利用した野生鹿の調査と環境情報取得手法[20]
- 1.2.10 動物間マルチホップ転送方式による野生動物調査の概要図[35]

第 2 章

- 2.1.1 サーバ・クライアント型 (左) と Peer to Peer 型 (右) [20]
- 2.2.1 通信機器 Wake 制御アルゴリズムによるデータ転送の概要[20]

- 2.2.2 遭遇履歴を用いたデータ転送(データ送受信)の概要[20]
- 2.2.3 Spin-up time を考慮しないデバイス放獣シナリオの概要
- 2.2.4 縄張りと群行動に着目したデバイス数の省資源化シナリオの概要

第 3 章

- 3.2.1 他のイヌ個体と遭遇した際の動作と 3 軸加速度センサーのデータ比較[20]
- 3.2.2 対象個体の興味により異なる動作比較[20]
- 3.2.3 通信機器 Wake 制御の状態遷移図[20]
- 3.2.4 通信機器 Wake 制御アルゴリズム[20]
- 3.2.5 技術的難易度, 身体サイズの関連性[26]
- 3.2.6 水路を通して果樹園に進入するアライグマの群れ[45]
- 3.2.7 各実験犬の画像[20]
- 3.2.8 ネコウェアラブル設計[46]
- 3.2.9 Dog A の装着時の様子 (リュック型) [20]
- 3.2.10 Bluetooth, UWB, ZigBee, Wi-Fi の機能比較[48]
- 3.2.11 Arduino UNO R3[20]
- 3.2.12 実験で使用するデバイス群[20]
- 3.2.13 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの実験環境[20]
- 3.3.1 威嚇行動検出時のアルゴリズム遷移イメージ
- 3.3.2 威嚇行動検出時の習性行動と合成加速度の特徴量
- 3.3.3 実験犬のプロフィール
- 3.3.4 デバイス装着状態の実験犬
- 3.3.5 実験結果 (number of activations vs. each algorithm)
- 3.3.6 威嚇行動の遷移
- 3.4.1 スケジューリングの同期によるデータ送受信例 (S-MAC) [20]
- 3.4.2 スケジューリングの非同期によるデータ送受信例 (B-MAC) [20]
- 3.4.3 最大行動域の広い動物個体に対して中継ノード (リレーノード) の役割を設定[20]
- 3.4.4 遭遇回数の多い動物個体に中継ノード (リレーノード) の重み付け[20]
- 3.4.5 隠れノード問題が生じる構成[20]
- 3.4.6 都市地域と森林地域におけるノードの密度の比較[20]
- 3.4.7 複数の装着個体(実験犬)を用いた実験環境[20]
- 3.4.8 装着個体の遭遇時に習性行動に基づいたデータ送受信の概要[20]

- 3.4.9 無線センサネットワークで見られる 1 対多ノードの通信
- 3.4.10 CSMA/CA を利用した標準プロトコルのネットワークトポロジー[20]
- 3.4.11 CS/P プロトコルと CS プロトコルのネットワークトポロジー[20]
- 3.4.12 CS/P プロトコルによるデータ送受信例[20]
- 5.4.13 CS プロトコルによるデータ送受信例[20]
- 3.4.14 各プロトコルでの通信時間の比較[20]
- 3.4.15 各プロトコルでの消費電力量の比較[20]
- 3.4.16 PreSR-P(CS/P プロトコル)のデータ伝搬性[20]
- 3.4.17 PreR-P(CS プロトコル)のデータ伝搬性[20]
- 3.4.18 PreSR-P(CS/P プロトコル)と PreR-P(CS プロトコル)の体高と通信時間[20]
- 3.4.19 各実験犬における体高と体重の関係[20]
- 3.4.20 実験に用いたイヌの体高と通信時間の割合の相関関係[20]
- 3.4.21 Dog C-1 のデータを取り除いた, 各イヌの体高と通信時間の割合の相関関係[20]

第 4 章

- 4.2.1 artisoc のシミュレーションパラメータ (例: Universe)
- 4.2.2 artisoc のシミュレーションパラメータ (例: Agent: Wearable)
- 4.2.3 artisoc による実際のシミュレーション実験時の様子
- 4.2.4 Method 1 実験結果
- 4.2.5 Method 2 実験結果
- 4.2.6 Method 3 実験結果
- 4.2.7 Method 4 実験結果
- 4.2.8 各放獣シナリオの実験結果の重ね合わせグラフ
- 4.3.1 Spin-up time を考慮したデバイス放獣シナリオの概要
- 4.3.2 Method 1 実験結果 (最適化シナリオ)
- 4.3.3 Method 2 実験結果 (最適化シナリオ)
- 4.3.4 Method 3 実験結果 (最適化シナリオ)
- 4.3.5 Method 4 実験結果 (最適化シナリオ)

第 5 章

- 5.2.1 装着個体の長期的な放獣による総個体数の増加例
- 5.2.2 省資源化における 2 つの課題 ①Data Sharing 機能, ②Touch' n Go at Home

([34]から引用し, 赤字が本研究の加筆箇所)

5.2.3 群行動に着目した端末数の最適化モデルによるセンシングデータ遷移

5.4.1 2年毎の残存デバイス数 (Scenario 1). No.1~3 は各回のシミュレーション結果

5.4.2 2年毎の残存デバイス数 (Scenario 2). No.1~3 は各回のシミュレーション結果

5.4.3 2年毎の残存デバイス数 (Scenario 3). No.1~3 は各回のシミュレーション結果

5.4.4 2年毎の残存デバイス数 (Scenario 4). No.1~3 は各回のシミュレーション結果

第 6 章

6.1.1 開発用のロボット掃除機を用いた実験の様子 ※東京大学 川瀬らの未発表論文

6.2.1 実験犬の行動の可視化例[35]

6.2.2 (a)プロジェクトサイト, (b) sink node station[79]

6.2.3 (a) sink node station から撮影した帰還困難区域の家畜牛, (b) cage [79]

6.4.1 2014 年 1 月時点の福島第一原子力発電所周辺のサービス対応エリア[81]

6.4.2 メスのアライグマにおける時間別平均移動距離[14]

付表

Table.3.2.1 実験犬のプロフィール[20]

Table 3.2.2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムの実験結果 (合計 15 分で 30 回)[20]

Table.3.4.1 通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる検出成功の割合[20]

Table.3.4.2 装着個体間の Preamble フレーム送受信の成功率[20]

Table.3.4.3 各機器における消費電力[64][65][66]

Table.3.4.4 PreR-P(CS プロトコル)におけるデータ伝搬完了時 (約 5 分 3 秒) の遭遇回数の総数[20]

Table.4.2.1 シミュレーション検証時のエージェントパラメータ

Table.4.2.2 シミュレーション検証時の環境パラメータ

Table.4.2.3 最適化シナリオ検討のための各放獣シナリオ (Method1~4)

Table.4.3.1 シミュレーション検証時の環境パラメータ (最適化シナリオ)

Table.4.3.2 最適化シナリオ検討のための各放獣シナリオ

Table.4.3.3 各放獣シナリオの実験結果 (最適化シナリオ)

Table.5.3.1 シミュレーション検証時の環境パラメータ (省資源化シナリオ)

Table.5.3.2 シミュレーション検証時のエージェントパラメータ (省資源化シナリオ)

Table.5.3.3 省資源化シナリオ評価のための各シナリオ

Table.5.4.1 各省資源化シナリオの実験結果 (世代間平均遭遇回数と 10 年後の総個体数)