

2013 年度 修 士 論 文

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

A Study on Data Transmission Protocol for Environmental
Monitoring Leveraging Animal Behavior

中川 慶次郎
Nakagawa, Keijiro

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

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 目的と手法の概要	1
1.3 本論文の構成	2
第 2 章 森林地域における環境調査の現状	3
2.1 森林地域	3
2.1.1 福島第一原子力発電所事故の影響	3
2.1.2 野生動植物の種の保全と有害鳥獣類	4
2.2 環境調査	5
2.2.1 既存手法の現状	5
2.2.2 既存手法の課題	7
2.3 DELAY-TOLERANT NETWORKING 技術	8
2.3.1 DELAY-TOLERANT NETWORKING 技術の概要	8
2.3.2 メッセージフェリー方式による調査手法	10
2.3.2 マルチホップ転送方式による調査手法	10
第 3 章 本研究の目的	13
1.1 動物間通信の技術要件	13
1.2 本研究の構成	16
第 4 章 動物の習性を利用したデータ転送手法の提案	18
4.1 通信機器の WAKE 制御	18
4.1.1 3 軸加速度センサーによる行動分析	18
4.1.2 WAKE 制御の引き金	18
4.1.3 WAKE 制御アルゴリズム	19
4.2 遭遇履歴を用いたデータ転送	21
4.2.1 同期・非同期スケジューリング手法の概要	21
4.2.2 非同期スケジューリング手法によるデータ送受信	23

4.2.3	中継ノードの重み付け	24
4.2.4	隠れノード問題	27
第5章 フィールドでの評価実験		29
5.1	はじめに	29
5.1.1	対象動物について(アライグマとイヌ)	29
5.1.2	装着位置の検討	31
5.1.3	使用機器の検討	32
5.2	WAKE 制御の予備実験	36
5.2.1	予備実験の概要	36
5.2.2	WAKE 制御の評価	36
5.3	データ転送手法の評価実験	37
5.3.1	評価実験の概要	38
5.3.2	CSMA/CA を利用した標準プロトコル	41
5.3.3	遭遇数に基づく PREAMBLE 送受信プロトコル	43
5.3.4	遭遇数に基づく PREAMBLE 受信プロトコル	45
5.3.5	データ転送の評価	45
第6章 考察		50
6.1	評価実験手法に関する考察	50
6.1.1	実験環境の考慮	50
6.1.2	実験環境の学習	50
6.2	通信機器の WAKE 制御に関する考察	51
6.2.1	動物の習性の再現性	51
6.2.2	各閾値の検討	52
6.3	データ転送手法に関する考察	52
6.3.1	データ伝搬性	52
6.3.2	体高と消費電力量の関係性	55
6.4	評価実験の結果に基づく定式化	55
6.4.1	データ伝搬性の定式化	55
6.4.2	個体差を考慮した消費電力量の定式化	58
第7章 議論		59

7.1	森林環境における環境調査の拡張	59
7.2	森林地域の環境調査における必要要件の検討	63
7.3	センシングデータの伝搬時間の推定	
7.3	森林地域の消費電力量の推定	63
7.4	動物個体間の感染経路特定モデル	64
第8章 結論		66

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故が発生した。現在も復旧活動が行われている一方、周辺地域の農作物や動植物への放射能の長期的な影響が懸念されている[1, 2, 3]。特に、福島第一原子力発電所から周辺 30 キロ圏内の森林地域では、放射能汚染による生態系の影響が懸念されており長期的な調査が必要とされている。森林地域における野生動物の調査手法として、調査員が森林地域を巡回し動物の糞等を採取して生態系の影響を推定する手法が一般的に行われている。近年では情報通信技術の発展に伴い、センサーや情報通信機器により音声・映像・行動軌跡・気象などの環境情報を取得し、森林地域の生態系調査に役立たせている。具体的には、ねぐらや獣道付近にビデオやマイクを設置し動物観察を行う手法や、動物に GPS ロガーを装着させて無線機器などによって環境情報を取得する手法が用いられている。しかし、上記に挙げた調査手法は人手に頼る部分が大きく、対象の森林地域が広範囲に及ぶため多くの調査員が必要となる場合や、絶滅危惧種（イリオモテヤマネコ等）に指定されている保全種や熊などの危険・有害動物と接触する危険性が存在し、調査員の環境調査における負荷が大きい。加えて、放射能汚染地域では調査員の立入りが困難であり、従来の野生動物の調査手法では効果的な観測は難しい。人手に頼らない方法で環境調査を効率的かつ長期的に行う手法が求められている。

1.2 目的と手法の概要

人の立入りが困難な森林地域における環境調査を行うため、先行研究では動物間マルチホップ転送方式が提案されている[18][20]。「動物指向クラウドネットワーク」と呼ばれる、動物に取り付けた首輪と動物基地（ねぐら・獣道）に生態音収集マイクとリモートセンサを設置し、動物の個体間接触と集団行動の習性を利用する「動物間ネットワーク」により森全域の生態・環境情報の取得を試みている。従来の調査手法と異なり、動物の習性行動を利用することで効果的な環境調査が可能となる。森林地域で調査員が行っていたセンシングや

データ運搬の役割を動物に移管させることで、長期的な環境調査の負荷を軽減する事ができる。

本研究では、動物間マルチホップ転送方式による調査手法の「動物間ネットワーク」の実現のために、動物の個体間遭遇時のデータ運搬に着目する。従来の手法と技術的な課題を整理し、動物の習性行動を逆利用した効率的かつ長期的な調査が可能なデータ運搬手法の提案を行う。具体的には、動物同士が接近した際に生じる習性行動を3軸加速度センサーで解析し、動物間通信の引き金とすることで動物の習性を利用したデータ転送を実現する。これにより通信時間の省電力化を行い、立入れない森林地域の長期的な環境調査を実現させることを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文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背景を述べ、本研究の目的を示す。

第2章「森林地域における環境調査の現状」では関連研究分野についてまとめ、本研究の意義について明らかにする。

第3章「本研究の目的」では、2章で述べてきた研究背景、関連研究分野に基づいた課題を述べ、本研究の目的を明確に定める。

第3章「動物の習性を逆利用したデータ転送手法」では、本研究で提案するシステムについて示す。

第4章「環境評価実験」では、3章で提案した手法の有用性について屋外での複数のイヌを用いた実験にて検証する。

第5章「考察」では評価実験から得られる知見について考察する。

第6章「森林地域における環境調査の拡張」では、本研究で得られた知見を基に森林地域における環境調査の拡張性について述べる。

第7章「結論」では本研究で得られた知見についてまとめる。

第 2 章

森林地域における環境調査の現状

2.1 森林地域

本節では、森林地域における福島第一原子力発電所事故の影響と、潜在的に存在する動植物の種の保全と有害鳥獣類の課題について述べる。

2.1.1 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。現在も復旧活動が行われている一方、避難指示区域の概念図（Fig2.1.1）に示すように周辺20キロ圏内は避難指示解除準備区域等に指定されており、居住や立入りの制限がされている[1]。特に、事故後6年間を経過しても年間積算線量が20ミリシーベルトを下回らない地域である「帰宅困難区域」は未だに周辺30キロ圏内地域内に存在しており、数十キロ程度の広範囲かつ数年以上にわたる長期的な影響が見込まれている。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[2]によれば、福島原発周辺の3カ所で森林地域における放射能汚染調査を行った際に、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。

森林地域では、動植物やその周辺地域を含めた生態系の循環が行なわれている一方で、人間に対して水、食料、燃料等の供給源として重要な役割を果たしている。放射線医学総合研究所の放射性物質の森林生態系での動態に関する調査研究[3]によると、我が国は国土の約60%以上を森林が占め、福島県はその約71%が森林で覆われており、放射能汚染の影響調査を行なうためには、福島県の森林地域の影響調査は不可欠なものとしている。森林地域の生態系に対する放射能汚染の影響を把握するためには、先に述べたように森林地域では生態系の循環が行われているため、空間的だけでなく時間的スケールを考慮した効果的な放射能汚染の調査が早急に求められている。だが、福島第一原子力発電所周辺20~30キロ圏内の地域では人の立入りが制限されており、現状では周辺の森林地域の立入り自体が困難となっていることと財政的な理由のために、科学的に重要にも関わらず抜本的な生態系の影響調査は進展していない。

避難指示区域の概念図

平成25年8月8日時点

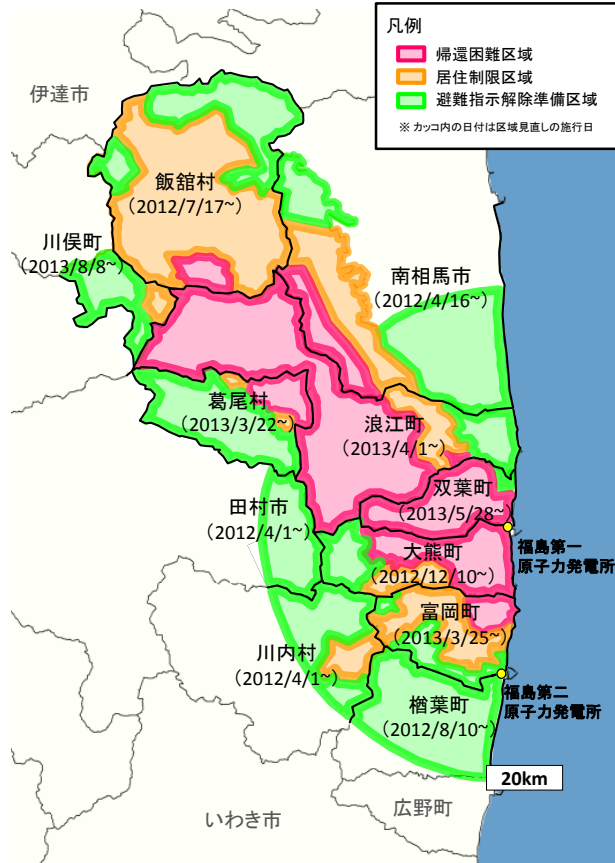


Fig. 2. 1. 1 福島第一原子力発電所周辺の避難指示区域の概念図 [1]

2. 1. 2 野生動植物の種の保全と有害鳥獣類

森林地域を取り巻く環境では、これまで様々な課題が存在してきた。例えば、多様性を維持するために絶滅危惧種等の動植物の種の保全や、人畜や農作物等に被害を与え個体数の調整が必要な有害鳥獣等の課題が存在している。動植物の種の保全の代表的な例として、西表島に生息するイリオモテヤマネコが挙げられる。絶滅危惧種として指定されているが、効率的な観測方法がなく正確な個体数の把握はなされていない。理由として、組み込み型Linuxを用いたイリオモテヤマネコ観察手法の開発[4]で述べられているように、生息地の厳しい気象条件（高温・高湿度環境）のため調査員への負荷が高く非効率であることが挙げられる。また、調査員が森林地域等の生息地に立入る事によって生態系に影響を与える可能性があるため、観測期間や調査員の数は限定する必要がある。

一方、朝日新聞の2007年3月30日の記事[5]では有害鳥獣に関して、鳥獣保護法動物により農作物被害や生態系への影響を防ぐため、鳥獣の捕獲について特別に許可されている

と述べられている。兵庫県森林動物研究センターの行政職員用ひょうごアライグマ捕獲技術マニュアル[6]のように外来種であるアライグマの捕獲方法について、県単位で取り組みが行なわれている。有害鳥獣として、[6]でアライグマは下記のように述べられている。

“我が国において野生化したアライグマの分布は、全国規模で拡大を続けており、各地で農作物被害や家屋侵入、希少な在来生物への被害など、日本固有の生態系への影響が報告されています。こうした危機的な状況を受けて、平成17年6月に施行された「特定外来生物による生態系に係る被害の防止に関する法律」（以下「外来生物法」という。）では、アライグマなどの外来生物のうち、生態系や農林水産業、人の生命・身体に被害を及ぼしているものや及ぼすおそれのあるもの対象として、その輸入や取扱を規制し、野外への新たな侵入を防ぐとともに、必要に応じて防除等の措置を講ずることにより被害を防止することを目的としています。”（引用）

森林地域における課題として、絶滅危惧種のような動植物の種の保全の調査とともに、希少な在来生物への被害や農作物被害をもたらす有害鳥獣の生態調査等が存在する。これらを解決するため、人の立入りが困難な地域での効率的な環境調査手法が求められている。

2.2 環境調査

本節では、森林地域で実施されている環境調査の現状を述べると共に、そこから導かれる課題を示す。

2.2.1 既存手法の現状

既存手法の現状として、情報通信機器の利用の否かにより二種類に分ける事が可能である。

情報通信機器を用いない手法として、環境調査の様子（Fig2.2.1）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。具体的には、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[7]のようにプロット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[8]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いることから、1970年頃から上記に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。



Fig. 2. 2. 1 実際の環境調査の様子



Fig. 2. 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

一方、近年の情報通信技術分野の急速な発展により、環境調査のより効率的かつ客観的なデータを収集する手法として情報通信機器を用いた調査手法が試みられている。具体的には、関連研究の一環として東京大学秩父演習林に設置した機器（Fig2.2.2）のような気象センサーの設置により環境情報の取得、赤外線カメラにより動物行動の観察を行なうことが可能である。野生動物装着型センサノードの伝書鳩指向な空間情報センシング機構の研究[9]では東京大学秩父演習林にて上記のセンサーに加えて、静電気容量にて動物の検知を行なうためテルミン機器の設置を行なった。

また、通信機器の小型化・ポータブル化により、動物自身に機器を装着させて生態行動を把握する試みがなされている（Fig2.2.3）。PHSによる野生動物の位置探索の研究[9]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。



Fig. 2. 2. 3 GPS ロガーを首輪に装着しているアライグマの様子 [23]

その他に陸生哺乳類では、コロラド州の National Wildlife Research Center の Raccoon Rabies Research Using Remote Download GPS Collars in an Urban Environment [10]によればアライグマの首輪に GPS 発信器を装着させ、生態行動の把握や行動域等の調査を行っている。

先に述べた通り、森林地域の環境調査の現状について従来は調査員が現地に赴き目視による観察等が行なわれてきたが、最近では情報通信技術を用いた手法が研究されつつある。

2. 2. 2 既存手法の課題

2.2.1 で既存手法の現状を述べてきた。これらの課題を以下の三点に分類できる。

- 調査員の負荷

保全種との遭遇・接触により生態系へ影響が考えられる一方で、クマ等の危険動物との接触が考えられるため調査員の負荷が大きい。広範囲の調査のために調査員の数を増やす可能性が想定される。

- 電力、通信のインフラ

森林地域では人が生活していないため、電力や通信インフラが劣悪か存在していない可能性が高い。そのため、環境情報取得のために気象センサー等のセンサー設置は広範囲であるほど難しい。

- バッテリー容量

動物倫理上で積載できる機器重量は体重の約 5%の制限[20]があり、小型動物であるほどバッテリーの容量に制限がかかるため、環境情報取得のためのセンシング時間が制限される。

これまで既存手法の課題を述べてきた。森林地域は都市部のような人々が生活する環境とは異なるため、特に情報通信機器は都市部での利用を考慮された設計が多く、想定外の課題が存在する森林地域での活用は難しい。特に、本研究の想定している福島原子力発電所周辺の森林地域の調査を行う場合、加えて以下の課題が存在する。

- 調査員の立入りが不可

述べてきた既存手法では調査員の立入りが必要となるため、福島原子力発電所周辺の森林地域の環境調査手法として適していない。そのため、調査員の立入りを必要としない環境調査の手法が求められている。

2.3 Delay-tolerant networking 技術

本節では調査員の立入りを必要としない環境調査手法を実現するために、Delay-tolerant networking 技術の概要とその先行研究と、本研究の方向性の定義を述べる。

2.3.1 Delay-tolerant networking 技術の概要

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る。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。具体的には Delay-tolerant networking によるデータ伝搬の図 (Fig2.3.1) のように、ノード A の通信可能範囲にノード B が通過した場合、ノード A は自身が保持するデータをノード B に転送する。次に、ノード B の通信可能範囲にノード C が通過した場合、ノード B は保持していたデータをノード C に転送する。バケツリレーのようにノードを介してデータ転送する事で宛先にデータ転送を実現する手法である。この DTN 技術が用いられている事例として、大規模災害時に基地局が倒壊し携帯電話の電波が利用出来ない場合の代替の通信方式、また通信インフラ整備が充分でない発展途上国での通信方法として期待されている。例えば、大規模災害時の安否確認システムと広域無線網利用可能エリアへの DTN に基づいたメッセージ中継法[13]の研究事例では、スマートフォン利用者が”MONAC”と呼ばれる Android[14]等のスマートフォン向けアプリ

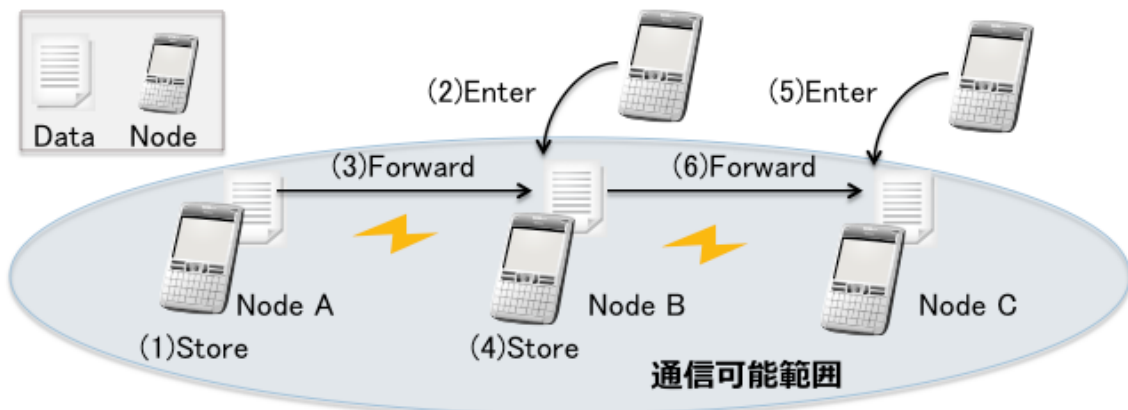


Fig. 2. 3. 1 Delay-tolerant networking によるデータ伝搬の様子 (Node A から Node C)

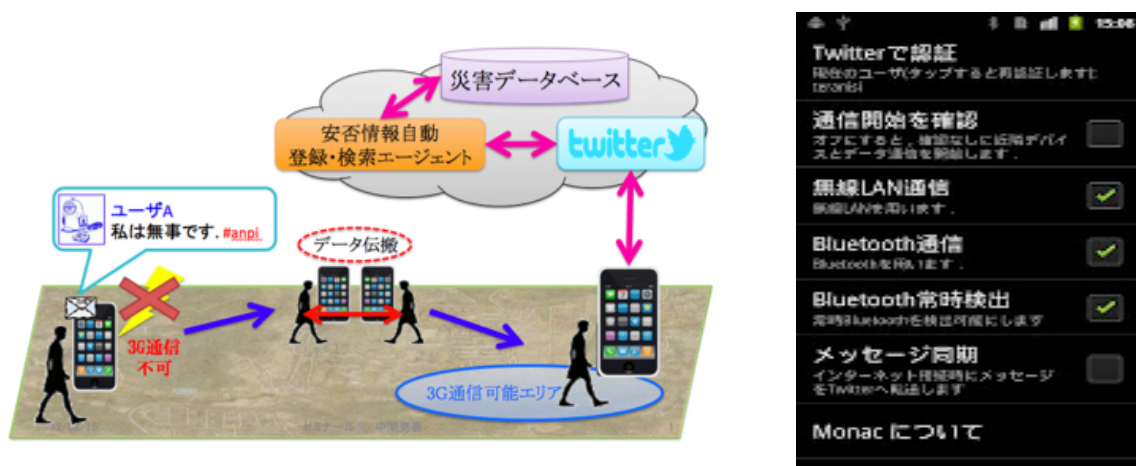


Fig. 2. 3. 2 DTN 技術を利用した大規模災害時の安否確認システム [13]

ケーションを利用する事で、大規模災害時のデータ転送の実現を目指している。利用者は、スマートフォンに搭載されている Bluetooth や NFC 等の端末同士の近接間通信と Twitter[15]を用いる事で、例えば大規模災害時に瓦礫の下に埋まっていた場合に自身の安否情報付きツイートを実感通信により他者の端末を介してツイートを転送し、インターネットが繋がる端末に転送された場合にインターネット上のサーバに送られ、一般利用者が確認出来る仕組みとなっている(Fig 2.3.2)。

このように、DTN 技術は大規模な災害時等の通信インフラが劣悪である環境下での通信方式として先行研究が進められており、本研究の想定している森林地域では同様に通信インフラは劣悪であるため環境調査手法として適用出来る可能性がある。

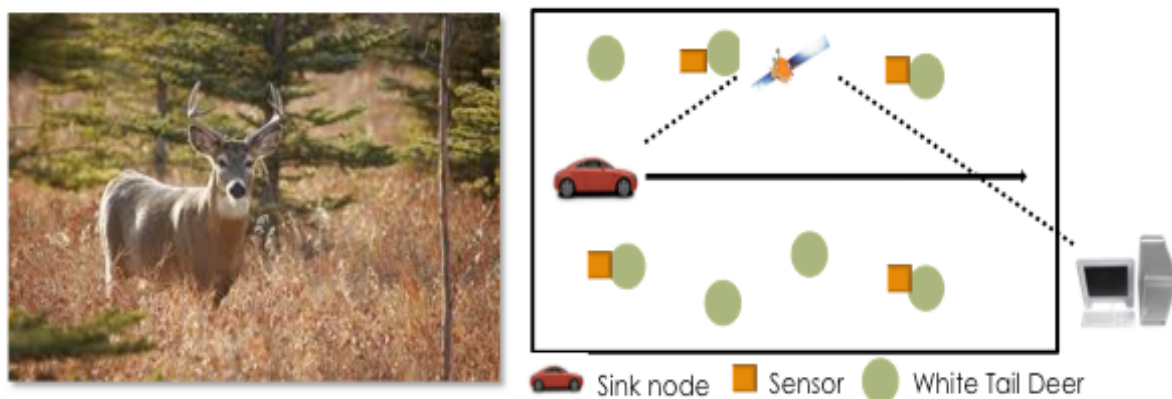


Fig. 2. 3. 3 DTN 技術を利用した野生鹿の調査と環境情報取得手法

2. 3. 2 メッセージフェリー方式による調査手法

DTN 技術には幾つか方式があるが、環境調査手法に着目したメッセージフェリー方式 [55]による調査手法の先行研究を述べる。DTN 技術を利用した野生鹿の調査と環境情報取得の手法[16]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通信機器に取得データを送信することでデータ取得を行う手法が提案されている (Fig2.3.3)。この手法は従来の環境調査と比べて、調査員の数の削減や動植物の接触を減らす事で調査員の負荷の低減が可能であり、各無線センサーから通信機器へデータ取得するための通信タイミングを設定することで電力消費量を減らすことが可能となる。だが、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り、想定している立入りが困難な森林地域の場合には同手法の適用は難しい。

2. 3. 3 マルチホップ転送方式による調査手法

一方、動物指向クラウドネットワークの設計と課題[24]では動物自身でセンシングを行い、動物をキャリアとしてデータを運搬・リレーする事で広域の森林環境でも効率的にデータを取得する手法が提案されている (Fig.2.3.4)。この手法の目的は、調査員による森林地域の立入り作業を行わずに長期の環境調査を行う事であり、センサネットワークや DTN のような遅延耐性ネットワーク技術を応用した動物指向クラウドネットワークの構築を目指している。動物に取り付けた首輪と動物基地 (ねぐら・獣道) に生態音収集マイクとリモートセンサを設置し、動物の個体間接触と集団行動の習性を利用する「動物間ネットワーク」により森全域の生態・環境情報の取得を試みている。従来の調査手法と異なり、全体のシステム設計に動物の習性行動を利用することで効果的な環境調査が可能となり、森林地域で調

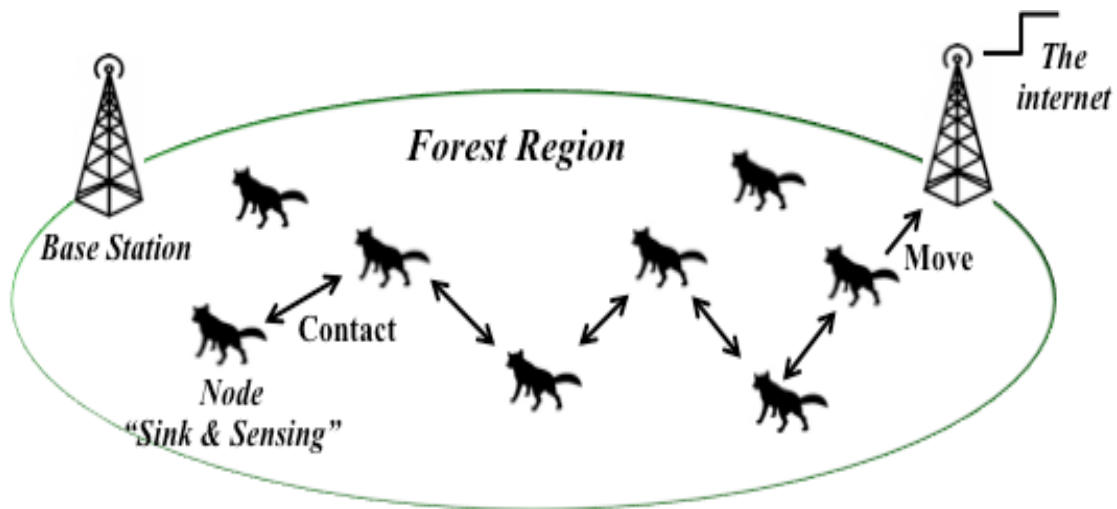


Fig. 2.3.4 動物間マルチホップ転送方式による調査手法のイメージ図



Fig. 2.3.5 アライグマのデータアップロードの様子 (イメージ図) [19]

査員が行っていたセンシングやデータ運搬・回収の役割を動物に移管させることで、長期的な生態系調査の負荷を軽減する事ができる。具体的には、「単独行動」と「集団行動」時の習性行動を利用する。

単独行動時、アライグマで見られるような捕食活動や縄張りの見回りのために自身の行動域[18]を動き回る習性を利用し、装着した生態音収集マイクとリモートセンサでデータ収集する事で森林地域内の動植物の生態系調査を行なう。森林環境の生態音に基づいた生態系調査の研究[17]によれば、時系列・空間スケールにより生態音に含まれる動物の鳴き声の変化によってその地域における生態系調査の推定が可能となる。その他に、Fig2.3.5の表のように、環境情報全般や、動物移動パターン、接触(すれ違い)、繁殖活動、生存情報など

はセンサーによる取得, 推定が可能である.

集団行動時には, 装着された首輪機器による動物間通信と動物-ねぐら間通信が想定されている. 首輪による動物間通信は, 動物自身の縄張りを越えて取得してデータを転送することを目的としている. 動物同士の接触時(すれ違い)に, 動物自身が保持するデータをお互いに転送することでデータ運搬を実現させる. 野幌森林公園地域におけるアライグマの行動圏の研究[18]に述べてあるように, 動物の行動域はパターンが存在しており, 年齢や個体サイズ, 雄雌の個体差, 気温湿度の季節変動によって行動圏に差が存在するため, これらを効率的なデータ転送の実現のため考慮する必要がある. 動物-ねぐら間通信では, ねぐら基地局と呼ばれる, 環境情報のモニタリングとデータの送信・転送を行うネットワークセンサデバイスを動物の生活拠点付近に固定的に設置する. ねぐら基地局は環境情報を取得するセンサーと GPS を用いた位置基準局の機能を持たせる. 観測対象となる森林領域と外界の境界域にあるねぐら基地局には外部ネットワークへの定常的な接続性を確保し, 森林地域内部に設置するねぐら基地局は外部への定常的ネットワークを確保しない. また, 野生動物を用いた空間情報センシングに関する研究[19]では, アライグマを想定したねぐら基地局での時間同期とデータアップロード手法が提案されている(Fig.2.3.5). アライグマの捕獲用の罠を用いて, 罠に掛かった際にデータを近距離通信のデバイスを用いてデータのアップロードを実現させる.

以上から, Fig2.3.4 の動物間マルチホップ転送方式による調査手法の図のように外部ネットワークに収集したデータを転送するためには, 境界域のねぐら基地局までデータの転送が必要であるため, 信頼性の高い動物同士の接触時(すれ違い)に動物間通信を実現する手法が求められる. 特に, 提案手法では森林地域内部にねぐら基地局の設置がシステムの一つの特徴として述べられているが, 本研究の想定環境である調査員の立入りが出来ない森林地域でこれらの固定設置は難しいため, 動物だけで完結した環境調査手法を実現する事が求められる.

第 3 章

本研究の目的

3.1 動物間通信の技術要件

これまで述べてきたマルチホップ転送方式による調査手法における「動物間ネットワーク」の実現のために、動物同士の接触時(すれ違い)の動物間通信の手法を提案する。

動物指向クラウドネットワークの設計と課題[24]では、センサーと取得した情報を伝送する通信機器には以下のような技術要件が必要となると述べられている。

- データの送受信機能
- 耐遅延特性
- 効率的なルーティングと小型軽量
- 低消費電力
- 長寿命

想定している森林環境では、電池の交換やデータ収集のために動物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、動物間通信の手法の実現のために上記の条件を満たす事が求められる。本研究では、以下の2点の技術要件に着目し、動物の習性行動を利用したシステム設計を行なう事により調査手法の実現を目的としている。

- データの送受信機能
- 低消費電力

「データの送受信機能」では、Fig.3.1.1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。特に「低消費電力」や「小型軽量」に関して、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5%以下[20]に制限されており、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た方法が求められる。

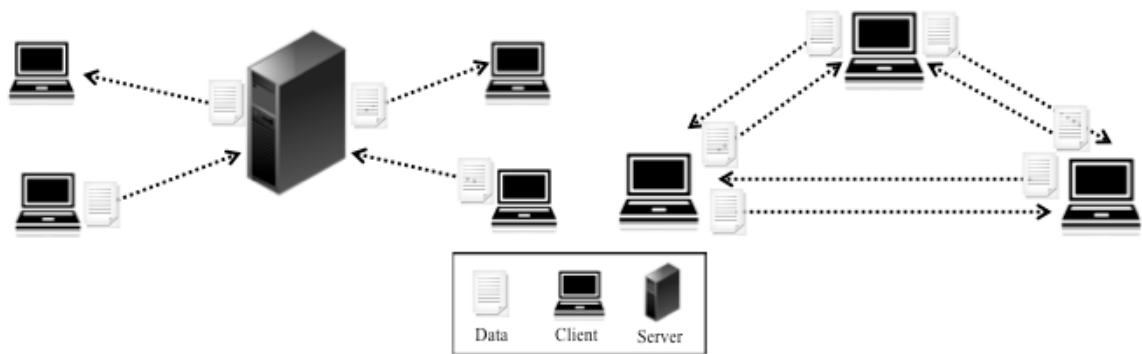


Fig. 3. 1.1 サーバ・クライアント型（左）と Peer to Peer 型（右）

そのために既存研究[24]では、動物行動を考慮した時間同期による間欠通信を提案している。通信を行わない間は通信機器を **Sleep** する（間欠通信する）ことで消費電力を低減する機能を用いた通信手法である。通信機器の **Sleep** 時間を長く設定すれば電力消費を抑え機器の駆動時間を延ばす事が出来るがデータの送受信ができないため、他の動物個体との遭遇時に必要なデータ取得が出来なくなる可能性がある。適切な **Sleep** 時間、**Wake** 時間を設定する必要がある、[24]では生態行動の一つである対象動物の繁殖活動を利用する事で、通信機器の **Sleep** 間隔の設定を試みている。具体的には、交尾時の動物の移動速度と交尾かかる時間から通信機器の **Sleep** 間隔の設定を行なっている。また、上記により設定された **Sleep/Wake** 間隔を互いに同期することで、相互に通信可能な状態に保つことを前提としている。だが、同期の際に **Sleep/Wake** 間隔の基準となる時刻の補正は森林環境かつ動物の装着機器では難しい。気候等の悪条件により年単位で十分な時刻誤差を抑えることができず、電波時計による補正機能を持つリアルタイムクロック **LSI** 等を搭載する事により時間同期をする手法も考えられるが、野生動物の行動する森林内地上数十センチといった特殊な環境は標準電波の利用環境としては想定されていない。

以上の手法は、省電力性を考慮した動物間通信の提案である。しかし、繁殖活動を利用した通信機器の **Sleep** 間隔の設定は、動物によって異なるが年間でも回数は限られる。また、データ転送先が特定の動物に限られるためデータ運搬が途絶える可能性が考えられる。**Sleep/Wake** 間隔の同期に関して、時間同期が行なわれ **Sleep** 間隔がお互いに同期出来た場合でも、他の動物個体との遭遇はランダムであり時間同期による動物間通信の有用性は低いと言える。

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。

- 耐遅延特性
- 効率的なルーティングと小型軽量

- 長寿命

耐遅延特性と効率的なルーティングの技術要件では、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重要な課題として取り扱わない。例えば、Epidemic Routing 方式[51]や Spray and Wait 方式[52]など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[53]、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[13]など、既に基礎的な方式から利用状況や場面に応じた各耐遅延特性を持ったルーティング手法が研究されている。

また、デバイス小型軽量化では、本研究では低消費電力のプロトコル開発によりバッテリー寿命を長持ちさせる工夫を行なっているが、バッテリー自体の検討は本研究の課題として扱わない。理由として、バッテリーはリチウム電池からソーラー式充電電池など使用用途に応じて既に多くの種類が存在しているため、動物への装着機器による特殊性は他の技術要件に比べて考慮する度合いが低いといえる。

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、野生動物に機器を装着する事は、環境庁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、第3章で詳しく述べていくが、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本研究の対象として含まない。

技術要件を改めて整理すると、動物の習性を利用した動物間のデータ送受信と、必要のない通信時間の削減による低消費電力の実現を研究対象としている。例えば、[49]では鶏の体温をデータ送信のトリガーとして、高熱時に体調データを小屋に設置された受信側の通信機器に送信することで低消費電力性を実現させる、効率的な家畜管理手法として提案されている。この手法は、受信側の通信機器と送信側の鶏の間で Fig.3.1.1 のサーバクライアント型に基づいた通信手法が行なわれており、本研究の動物間での Peer to Peer 型の通信方法とは異なる。また、[50]では Peer to Peer 型を用いて、シマウマの生態系調査のためにシマウマ間でデータ送受信を試みているが、指定した時間内（1日に5時間）で定期的なデータ転送を行なう方法に留まっている。以上の先行研究から、動物間のマルチホップ転送だけで完結する、動物の習性行動を利用したデータ送受信機能の研究はなされていない。なぜなら、動物の動作は規則的でないため自動車のようなモビリティモデルとして一般化されておらず、特に動物を集団で捉えた場合の動物個体の動きの知見は、動物行動学分野

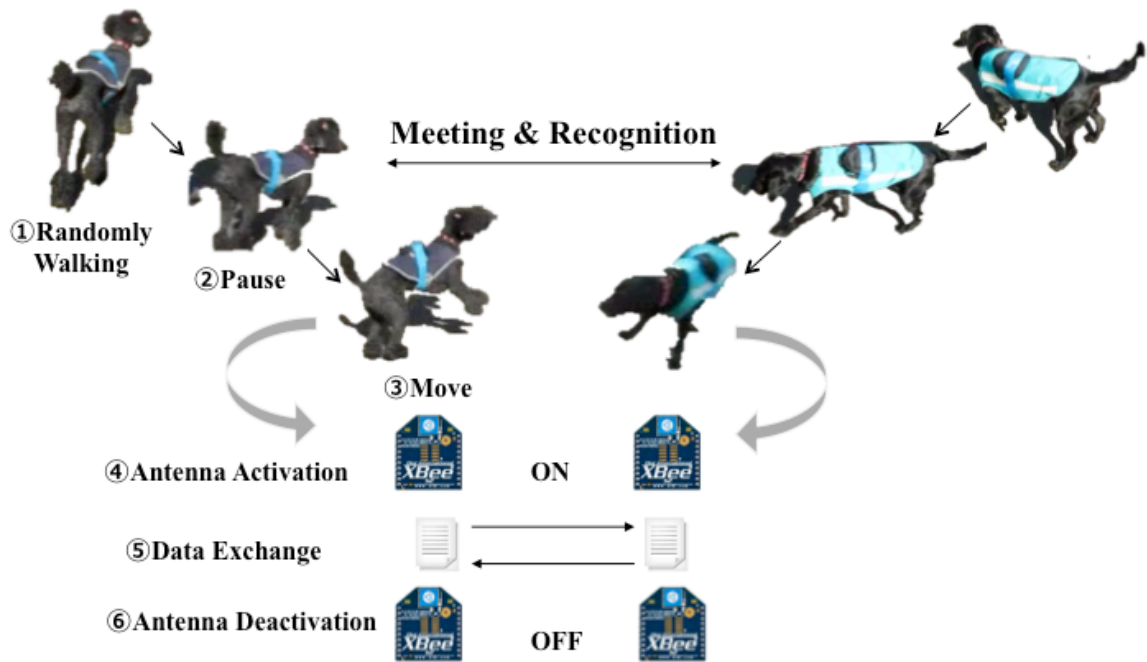


Fig. 3.2.1 動物同士の接触時(すれ違い)における，習性行動を利用したデータ転送の概要
 でも客観的なデータに基づいた解明がなされていないためである．以上の背景から，先行研究で未だに十分な知見がない領域である，動物の習性を利用した動物間のデータ送受信機能を本研究の対象としている．

3.2 本研究の構成

そこで，本研究では動物同士の接触時(すれ違い)に着目した．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，通信機器のWakeの引き金として動物間の間欠通信を実現させる (Fig.3.2.1)．また，動物同士の遭遇履歴を用いることで，通信機器Wake後の双方向のデータ送受信を低消費電力的に実現する．これにより，マルチホップ転送方式による調査手法を用いた「動物間ネットワーク」を実現させ，森林地域（特に調査員の立入りが出来ない）での環境調査負荷を低減させる．

ここまで，既存研究を紹介し，本研究の目的について考察を行なった．ここまでの考察をまとめると，本研究の構成は，

- 3軸加速度センサーによる，動物同士の接触時(すれ違い)の習性行動の分析
- 習性行動を用いた通信機器のWake制御

- 非同期手法によるデータの送受信
- 動物同士の遭遇履歴を用いた受信重み付け

となる。また、既存研究を踏まえた、研究分野に対する本研究の貢献としては、

- 動物の習性行動を利用した、動物間でのデータ転送手法の提案
- 上記手法の実装と環境での評価実験

といった点が挙げられる。

次章以降で、この目的を達成するための手法の提案、アルゴリズムの設計、評価実験、考察について述べていく。

第 4 章

動物の習性を利用したデータ転送手法の提案

4.1 通信機器の Wake 制御

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個体間通信の手法の提案と検討を行う。

4.1.1 3 軸加速度センサーによる行動分析

動物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、閾値により通信機器の Wake 制御を行なう事により効率的なデータ運搬を実現させる。そのために、他の動物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に着目した[21]。例えば、Fig. 4.1.1 はイヌの散歩時における他のイヌ個体と遭遇時の 3 軸加速度センサーのデータである。この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散歩中のイヌに対して吠えていることがデータより判断出来る。このように、取得した 3 軸加速度センサーのデータにより特徴量を算出し、静止や歩行等の動物における単純な行動を把握する事が可能である。

また、他の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. 4.1.2 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。

4.1.2 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. 4.1.3 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。

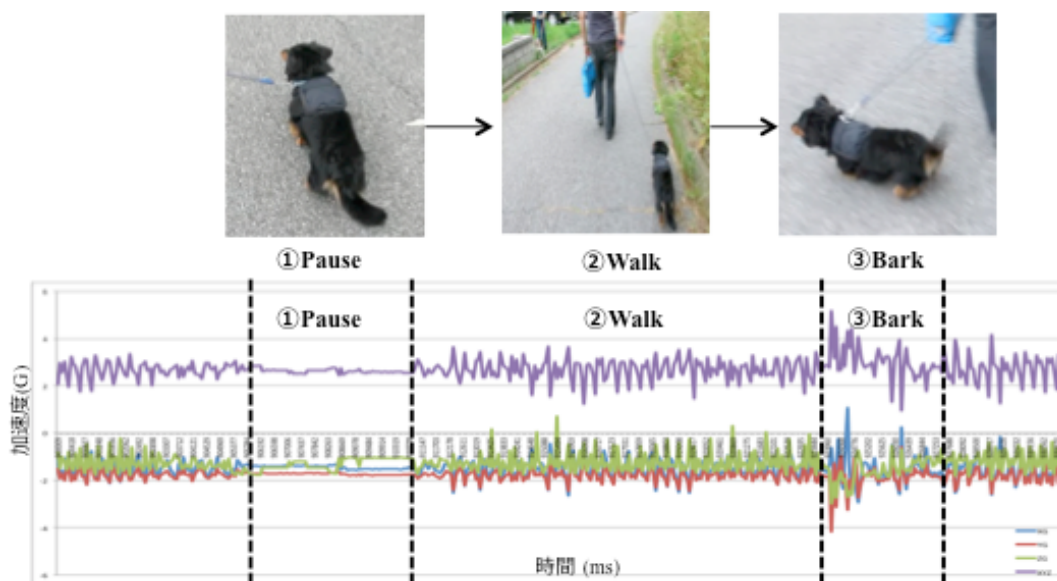


Fig. 4. 1. 1 他のイヌ個体と遭遇した際の動作と 3 軸加速度センサーのデータ比較

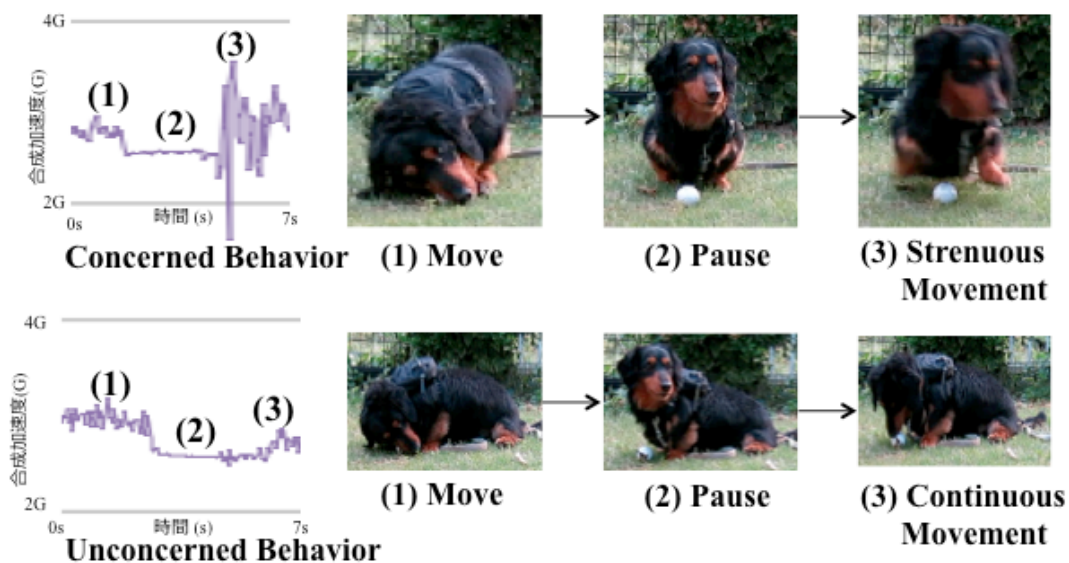


Fig. 4. 1. 2 対象個体の興味により異なる動作比較

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り静止後（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。

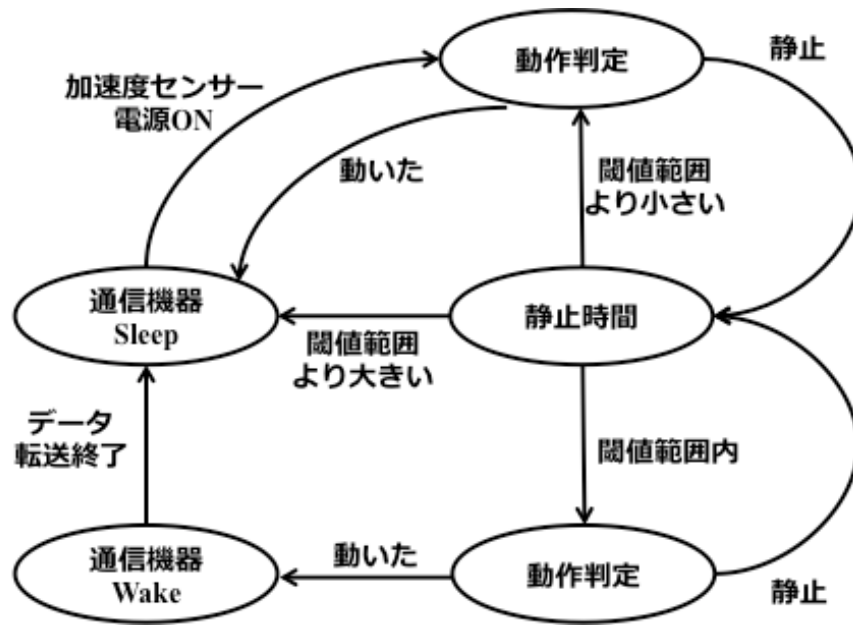


Fig. 4.1.3 通信機器 Wake 制御の状態遷移図

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。

4.1.3 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.4.1.4) . まず，20Hz の頻度[22]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 [4].

$$\|A\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (4.1)$$

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 4.1.2 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.

$$t_0 < t < t_1 \quad (4.2)$$

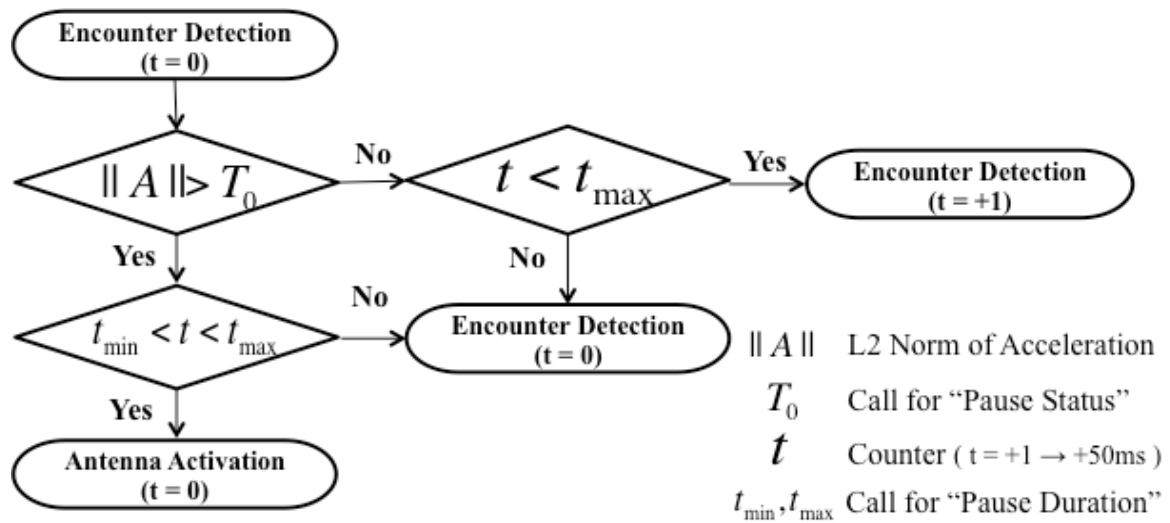


Fig. 4.1.4 通信機器 Wake 制御アルゴリズム

t の静止時間判定で (4.2) 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。

4.2 遭遇履歴を用いたデータ転送

本節では、通信機器の Wake 後における動物の個体間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。

4.2.1 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させて協調させる事で、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[25]。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

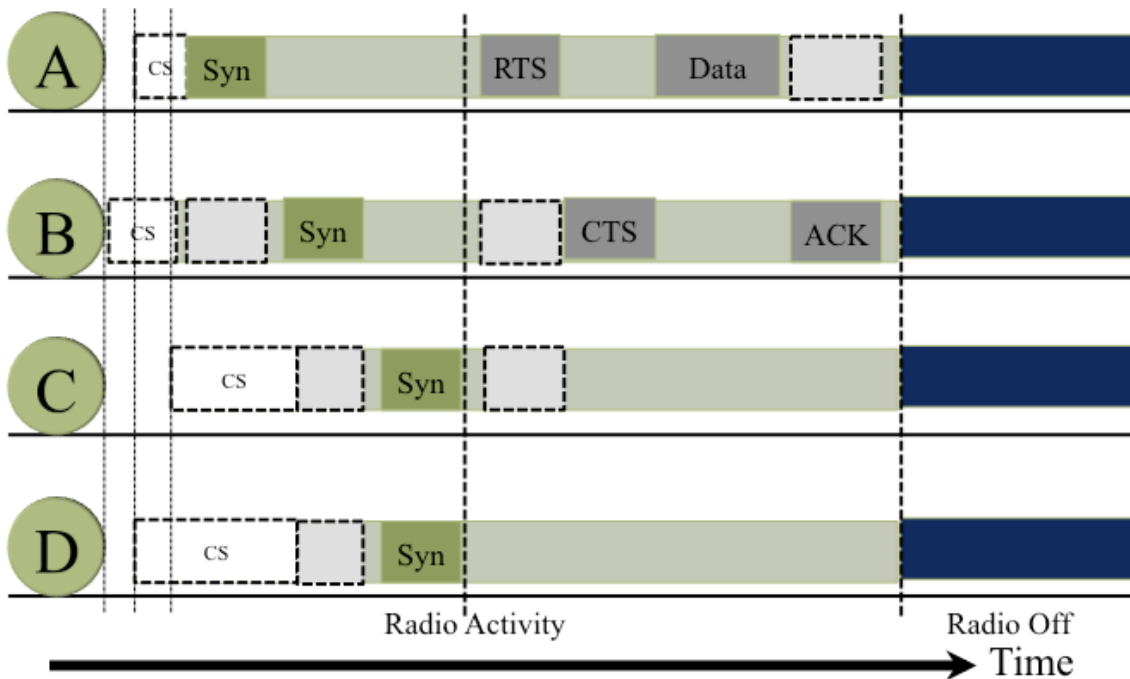


Fig. 4. 2. 1 スケジューリングの同期によるデータ送受信例 (S-MAC)

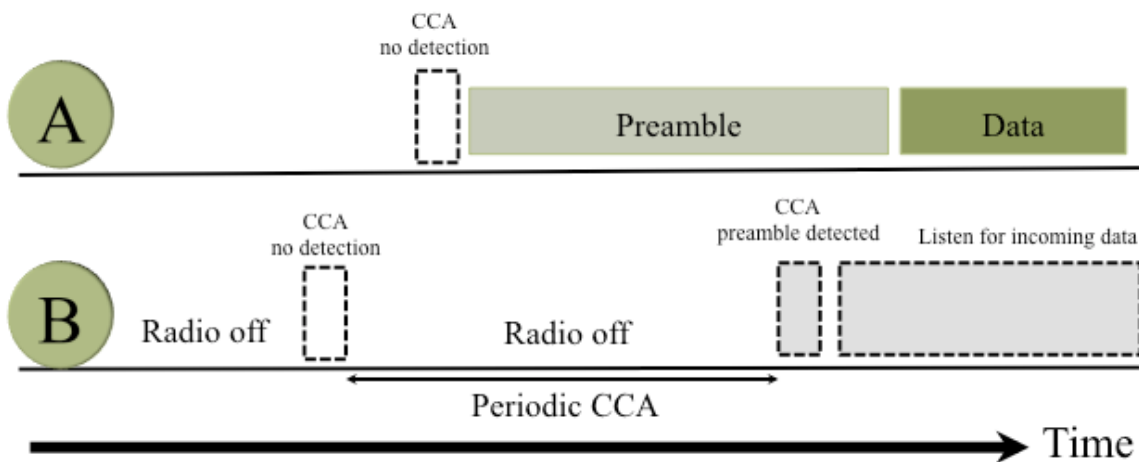


Fig. 4. 2. 2 スケジューリングの非同期によるデータ送受信例 (B-MAC)

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[26]や T-MAC[27]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.4.2.1)。

- 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[28]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.4.2.2)。

第 2 章で述べてきたメッセージフェリー方式は、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なっている。また、マルチホップ転送方式の既存手法も同様にスケジューリングの同期手法を用いて、低消費電力のデータ転送の実現を試みている。

4.2.2 非同期スケジューリング手法によるデータ送受信

4.1 で述べた通信機器 Wake 制御アルゴリズム (Fig.4.1.4) 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 のずれの考慮 (動物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

動物同士の遭遇時、習性行動のタイミングは動物個体によって異なる可能性がある。そのため、習性行動のタイミングが異なる場合に動物間で通信機器 Wake のずれが生じるので、ずれが生じた場合でもデータ転送を行なう手法が必要である。マルチホップ転送方式では、動物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、各動物個体はデータ送信側と受信側の両方の役割を担うため、動物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、動物同士の遭遇は偶発的であり、回数は限ら

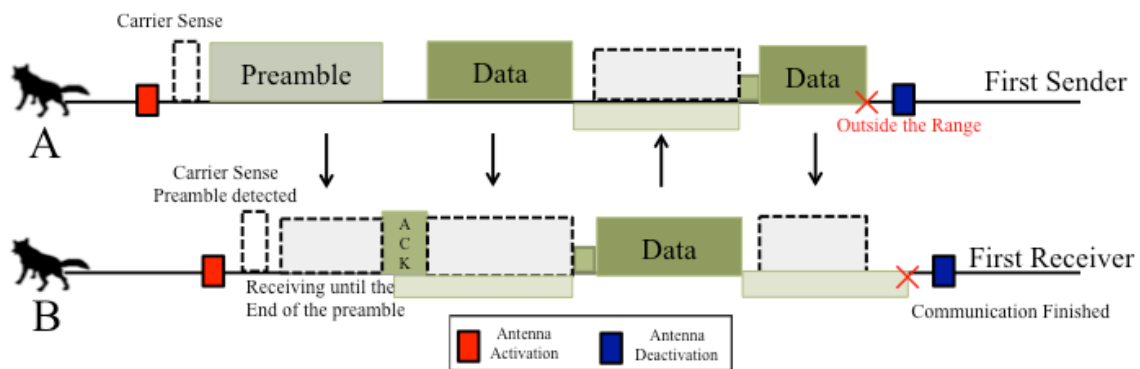


Fig. 4.2.3 動物同士の接触時(すれ違い)の習性行動を利用したデータ送受信

れている。対象とする動物によって異なるが、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、動物同士の接触時(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.4.2.3)。通信機器 Wake のずれを考慮するため、各動物個体はデータ送信前に Preamble を送信することで、動物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動物個体は、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。各動物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。

4.2.3 中継ノードの概念と重み付け

本節では、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、動物間における動物個体差を考慮し、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。

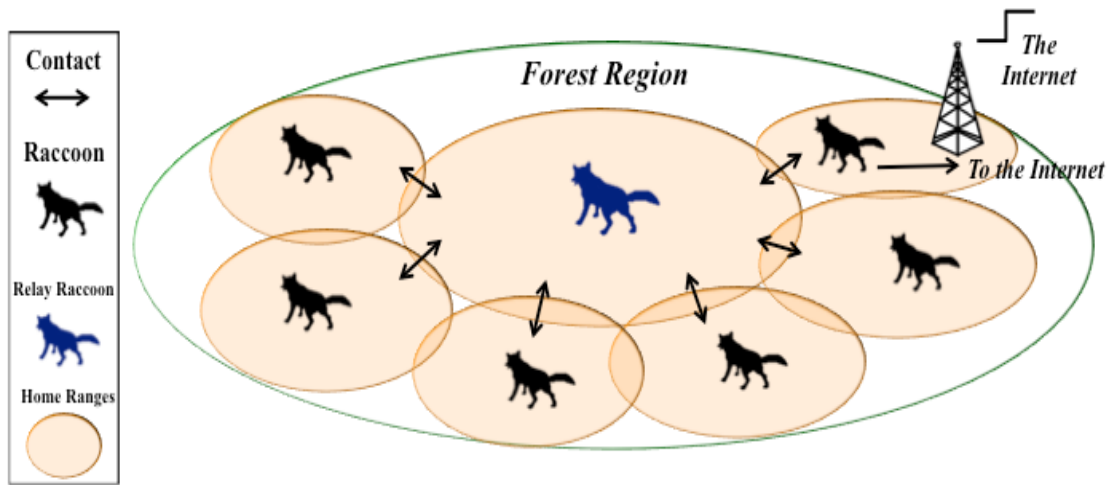


Fig. 4.2.4 最大行動域の広い動物個体に対して中継ノード（リレーノード）の役割を設定

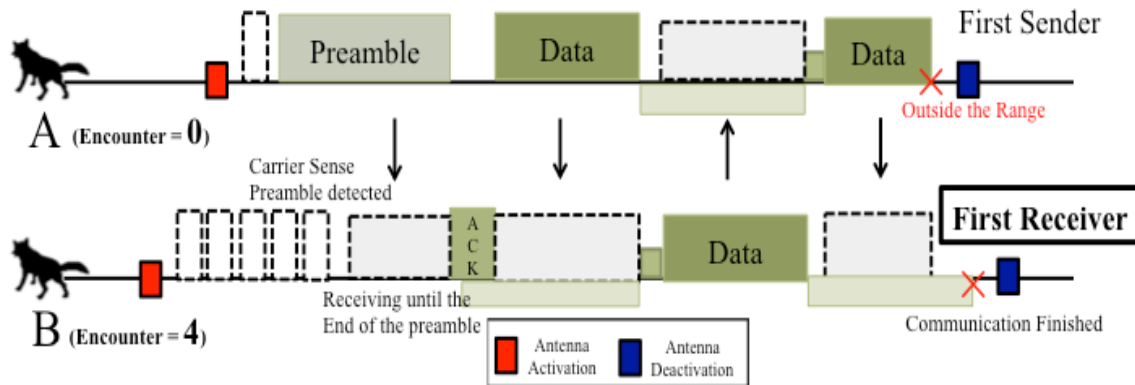


Fig. 4.2.5 遭遇回数が多い動物個体に中継ノード（リレーノード）の重み付け

動物間では個体差が存在する。ヒトと同様に、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、個体によって縄張りの範囲や最大行動域が異なる [18]。この性質を利用して、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）の役割を設定した (Fig.4.2.4)。最大行動域の広い個体程、他の動物個体との遭遇可能性が高くなる事から、最大行動域の広い個体を遭遇回数が多い動物個体として定義し、最大行動域の広い動物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では、最大行動域が個体によって 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 2 章で述べてきたマルチホップ転送方式による調査手法では、各動物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

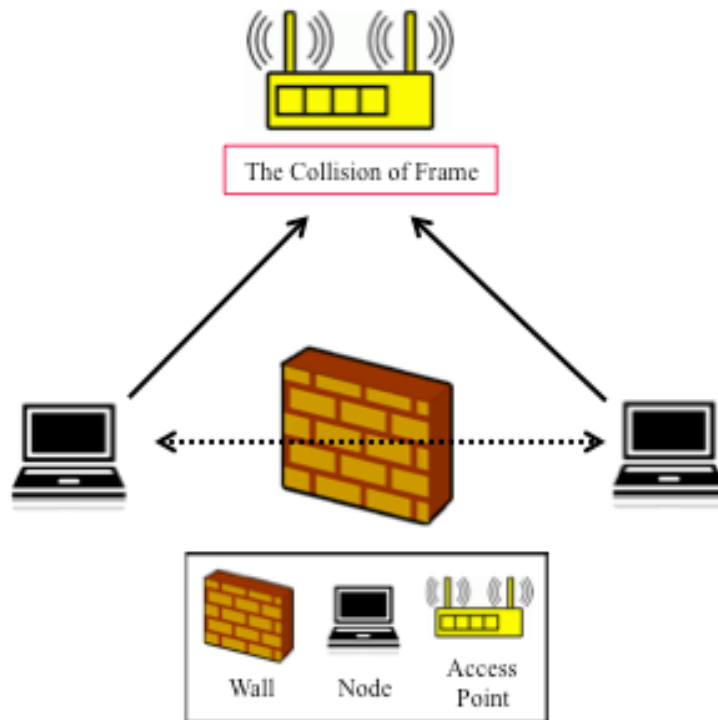


Fig. 4. 2. 6 隠れノード問題が生じる構成

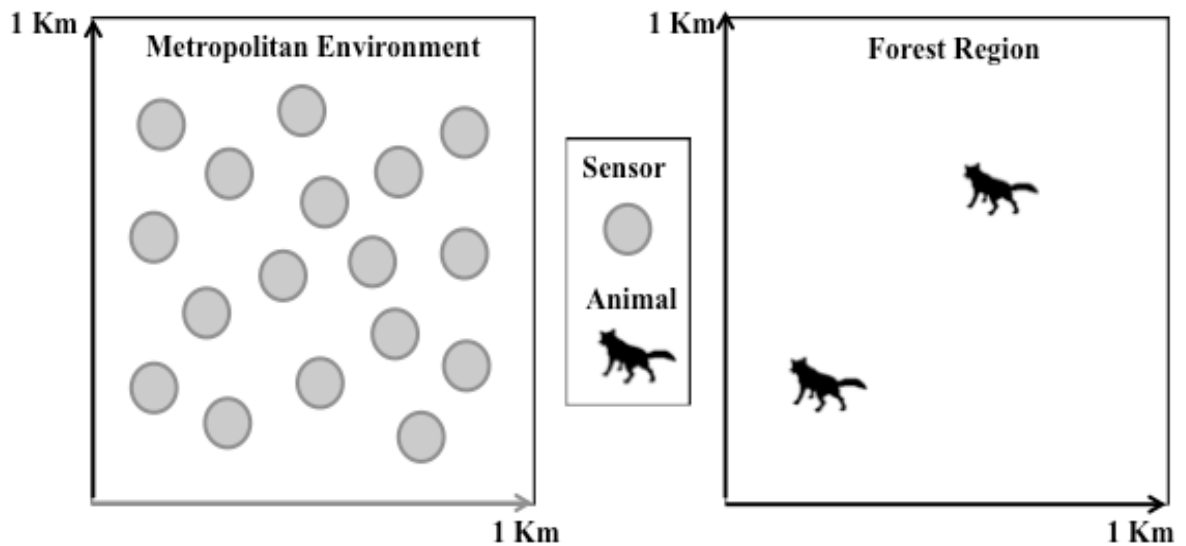


Fig. 4. 2. 7 都市地域と森林地域におけるノードの密度の比較

率的にデータを運搬する仕組みが必要となる。そこで、Fig.4.2.4の最大行動域の広い動物個体（中継ノード）は各動物個体との遭遇可能性が高いので、4.2.2で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.4.2.5）。具体的には、遭遇回数が多い程、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

って、遭遇時のデータ転送時間が短い場合でも、各動物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。新たな動物個体と遭遇した場合や十分なデータ転送時間を確保出来た場合は、より多くのセンシングデータを他の動物個体に転送する事が可能となる。

以上の動物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。

4.2.4 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、他のノードが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[29]。Fig.2.4.6の図では、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[30]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、4.2.1で述べた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
- 各動物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.2.4.7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

考慮すると必要としない。むしろ、動物同士の遭遇時には、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。

第 5 章

フィールドでの評価実験

5.1 はじめに

本章では、第 4 章で述べた提案手法のシステム設計を元に、通信機器の実装方法とフィールドでの評価実験方法を述べていく。

5.1.1 対象動物について(アライグマとイヌ)

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 (Fig5.1.1) . 野生動物に搭載可能なシステム総重量は約 5%以下[20]に定められており、例えば象などの大型動物には 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[32]. 本研究に提案手法の対象とする野生動物は、アライグマを想定している (Fig.5.1.2) . 環境省が発行するアライグマ防除の手引き[31]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[10][18]. こうした背景から、本研究では動物間のマルチホップ転送方式による調査手法として、機器装着する野生動物をアライグマに設定する事で実現可能性を高めている。

そこで、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つ、身近にいる動物であるイヌをフィールド評価の実験として使用した。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 10 年が一般的であり[34], 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[35]. 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を 5 匹用意し、その特徴を Table.5.1.1 に示している。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複数の野生のアライグマ

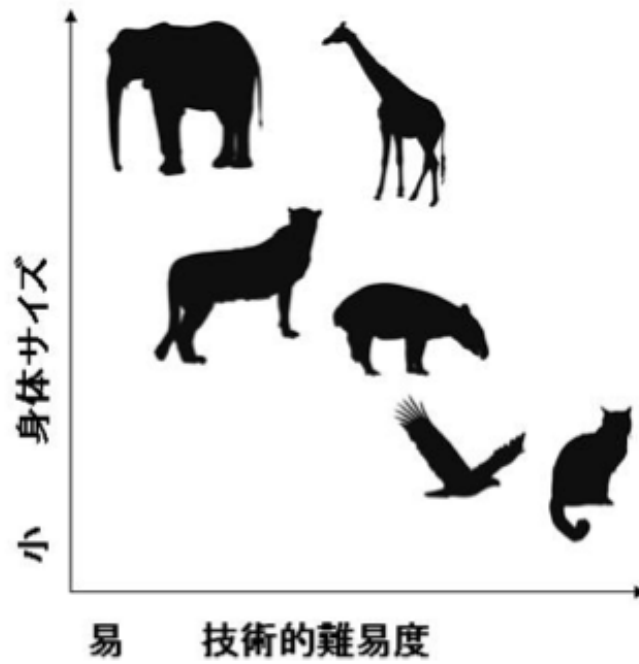


Fig. 5. 1. 1 技術的難易度、身体サイズの関連性 [32]



Fig. 5. 1. 2 水路を通して果樹園に進入するアライグマの群れ [34]

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、本実験のイヌ同士の
 個体差を大きくして実験を行なっている。

<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. 5. 1. 1 実験犬のプロフィール



Dog A



Dog B



Dog C-1



Dog C-2



Dog C-3

Fig. 5. 1. 3 各実験犬の画像

5. 1. 2 装着位置の検討

本節では、動物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を取り付ける装着位置について検討を行なう。

Cat@Log[36]では、猫における機器装着位置の検討（猫ウェアラブル設計）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.5.1.4), GPSの信号受信の安定性、猫のグルーミングの習性を考慮した検討を行なっている。猫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猫に比べると、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、猫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.5.1.4 の(d)の首輪と一体型となっている形となる。マルチホップ転送方式による調査手法でも既に述べられているが、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達成出来る可能性が高い。加えて、森林地域での調査のために数年単位の機器の長期運用が求められるが、これまで述べてきた条件を達成する事で長期的運用が可能であると考えられる。

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.5.1.5)。まだ基礎実験が多いことと、3軸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必要条件となる。以上の理由から、Fig.5.1.6の背中に背負うリュック型を採用した。

5.1.3 使用機器の検討

5.1.2で述べてきたように、森林地域で動物に機器を装着する場合の使用条件は、ヒトが利用する場合と条件が異なり特有の条件が存在する。特に森林地域での長期運用のために、機器の搭載容量に制限があるので、使用機器として低消費電力性を考慮して検討することが重要である。

無線センサノードにおける加速度センサーの消費電力と、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[38]。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最適な通信規格・機器を選定する必要がある。代表

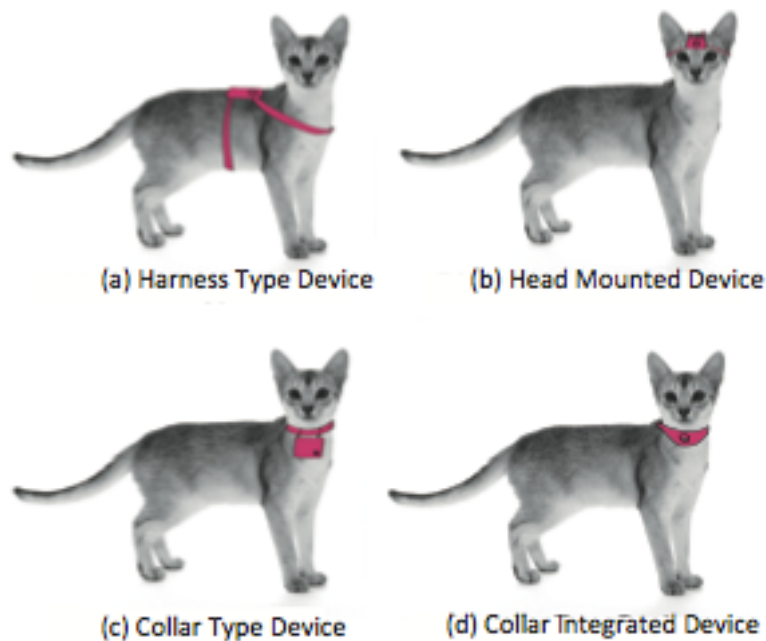


Fig. 5. 1. 4 猫ウェアラブル設計 [32]



Fig. 5. 1. 5 Dog A の装着時の様子（リュック型）

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, [37]で表にされておりここで引用する (Fig.5.1.6). 上記で述べた各通信規格を比較した研究[37]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,

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. 5. 1. 6 Bluetooth, UWB, ZigBee, Wi-Fi の機能比較 [37]

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[39]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.5.1.7) 。Arduino[40]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り

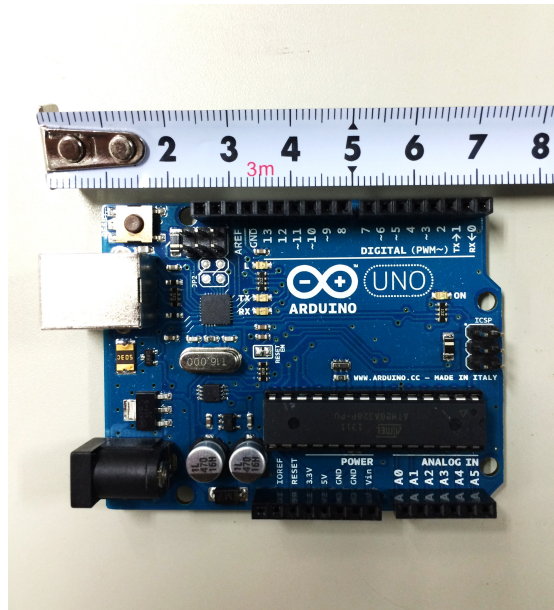


Fig. 5.1.7 Arduino UNO R3

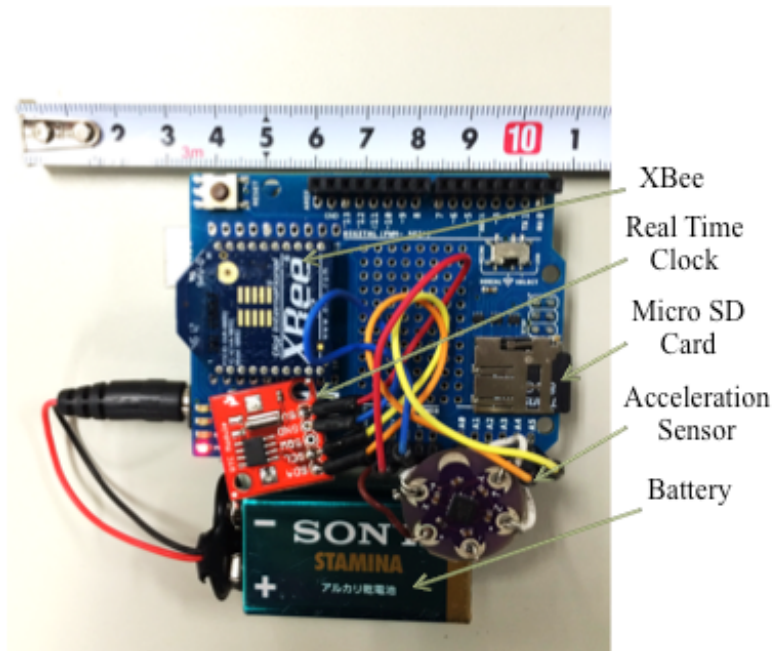


Fig. 5.1.8 使用した各機器

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.5.1.8）．これらのデバイス総重量は 250g であり，各実験犬の体重の 5%以下[18]なので規定内に収まっており，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，実際の習性行動との比較のために Canon

Power Shot SX200 IS を使用してビデオ撮影を行っている。

5.2 通信機器の Wake 制御の予備実験

本節では、通信機器 Wake 制御の有効性を検証するため、Dog A を用いた予備実験の概要とその結果について述べていく。

5.2.1 予備実験の概要

森林地域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 Dog A が自由に動ける状態で実験を行った (Fig.5.2.1)。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った。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 制御の有効性のある検証方法として用いている。また、再現性を検証するために、[42]を参考にこの実験を 30 秒毎に 1 回、1 セット 3 分 \times 5 回行った (合計 30 回)。回転籠法による動物行動の観測 [41]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た。

5.2.2 Wake 制御の評価

本実験では、静止時間の閾値を $1.0\text{s} < t < 10.0\text{s}$ と仮定して評価を行なった。Table 5.1.1 の再現率は、ボールの投げた回数の内、通信機器 Wake 制御アルゴリズムによって検出に成功した割合を示している。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[21]。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、通信機器 Wake 制御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 5.1.1 の適合率は、15 分間における通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる検出回数の内、実際にボールを検出できた回数の割合を示している。合成加速度の閾値 (静止状態

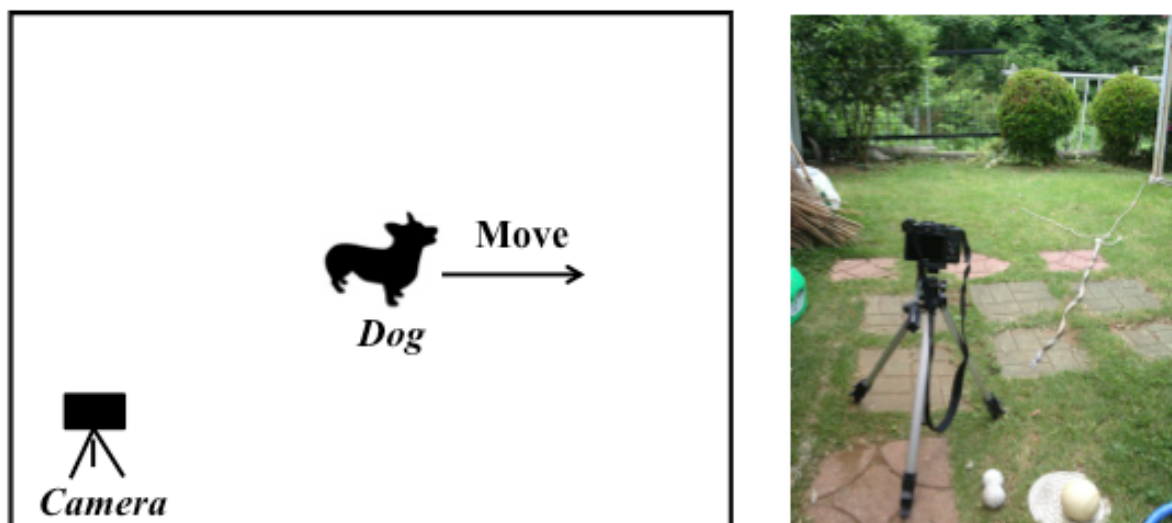


Fig. 5.2.1 通信機器 Wake 制御の予備実験環境

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 5.2.1 通信機器 Wake 制御の実験結果 (合計 15 分で 30 回)

の判定) が高いほど、検出回数が増加するため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。

5.3 データ転送手法の評価実験

本節では、遭遇履歴を用いたデータ転送の有効性を検証するため、Dog B, Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3 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。

5.3.1 評価実験の概要

複数のイヌを用いてイヌ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なった。本実験では、4匹のイヌ（Dog B, Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3）と5名の実験参加者（4人がイヌの散歩、1人は動画撮影）を用いて Fig.5.3.1 に示す 60 m×40 m の駐車場で、各実験参加者がイヌを連れて緑の点線を自由に動き回る方法で実験を行なっている。実験参加者はイヌを連れて自由に動き回り、他のイヌを連れてきた参加者と遭遇した場合には、遭遇したイヌの名前、遭遇時刻、遭遇場所を記録した後、イヌ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分間行なった。5.3.2 以降で説明する各プロトコルを実装した機器を装着し、合計3回の実験を行なった。5.2 で述べた予備実験との比較を行なうため、Dog B は1回の実験で他のイヌとの遭遇回数を計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おらず、各プロトコルの実験毎に他のイヌとの遭遇回数の合計値は異なる。

本実験では、イヌ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.5.3.2）。データの送受信の手順は、①ではイヌは自由に散歩されている状態であり、②でイヌ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4.2 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。

- 複数のイヌを用いた、遭遇時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価
- 各プロトコルでの Preamble フレームの送受信確率の評価（データ転送のための）
- 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

本実験では、5.2 の予備実験と同様に 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。

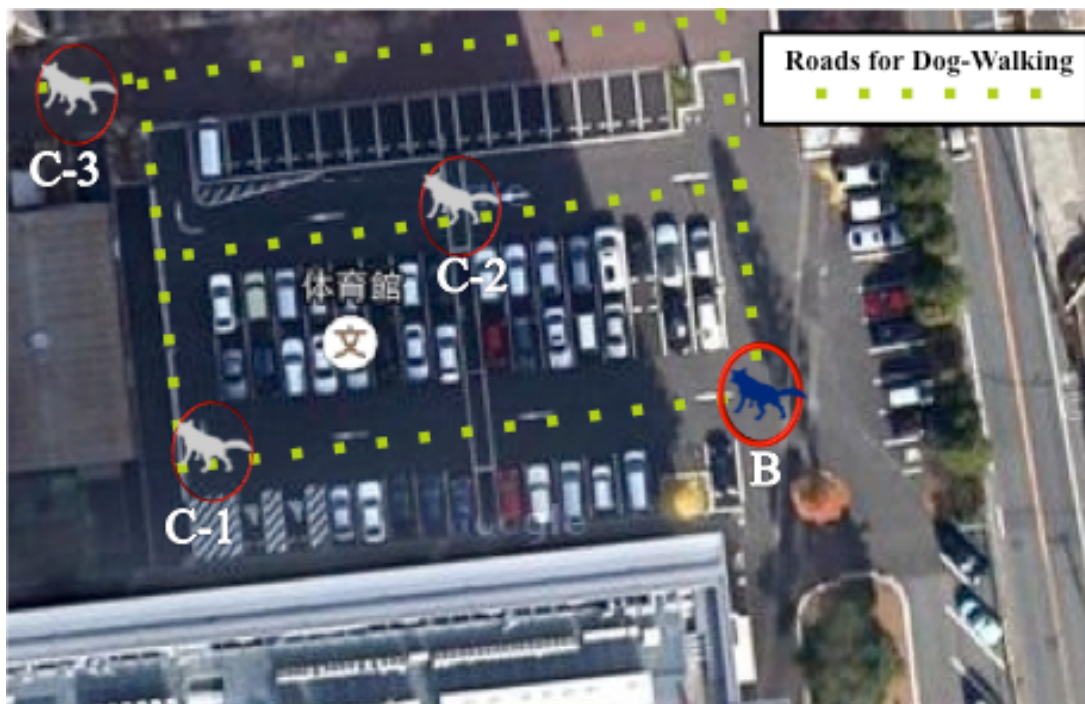


Fig. 5. 3. 1 複数のイヌを用いた実験環境

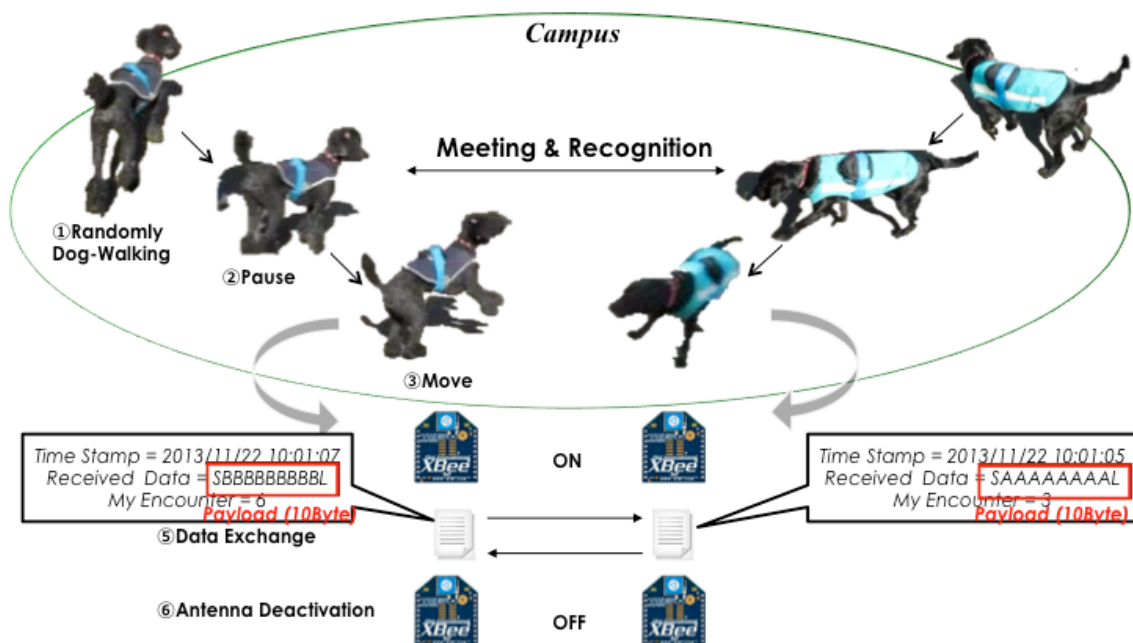


Fig. 5. 3. 2 イヌ同士の遭遇時に習性行動に基づいたデータ送受信の概要

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 = "SBBBBBBBBL"

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= SBBBBBBBBL

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、5.3.2 以降でプロトコル毎に詳しく述べていく。

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, SBBBBBBBBL

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。

CSMA/CA を用いたプロトコルと 2 つの提案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 [39] 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.5.3.3 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 [40][41]。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、図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。4.2.4

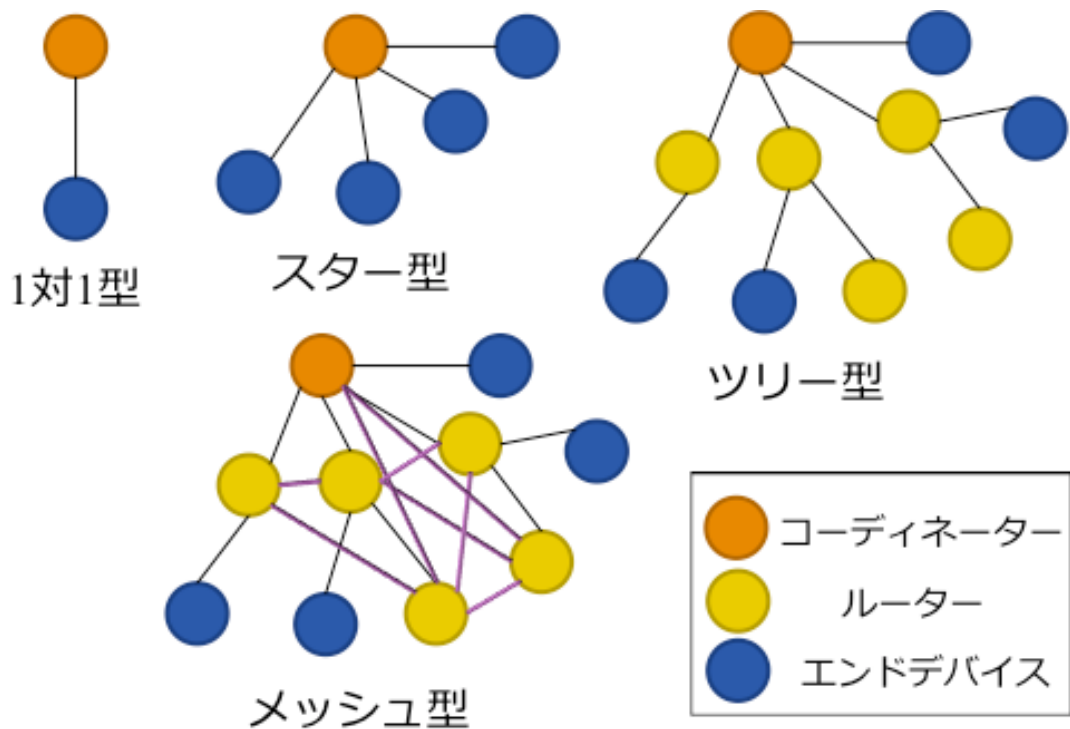


Fig. 5.3.3 無線センサネットワークで見られる 1 対多ノードの通信 [41]

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.5.3.3 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、本研究のマルチホップ転送方式では間欠通信かつ、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。5.3.2, 5.3.3, 5.3.4 の各実験では Dog B をコーディネーター、Dog C-1, C-2, C-3 をルータとして設定している。

5.3.2 CSMA/CA を用いた標準プロトコル

本節では、提案手法との比較に用いた CSMA/CA を利用した標準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

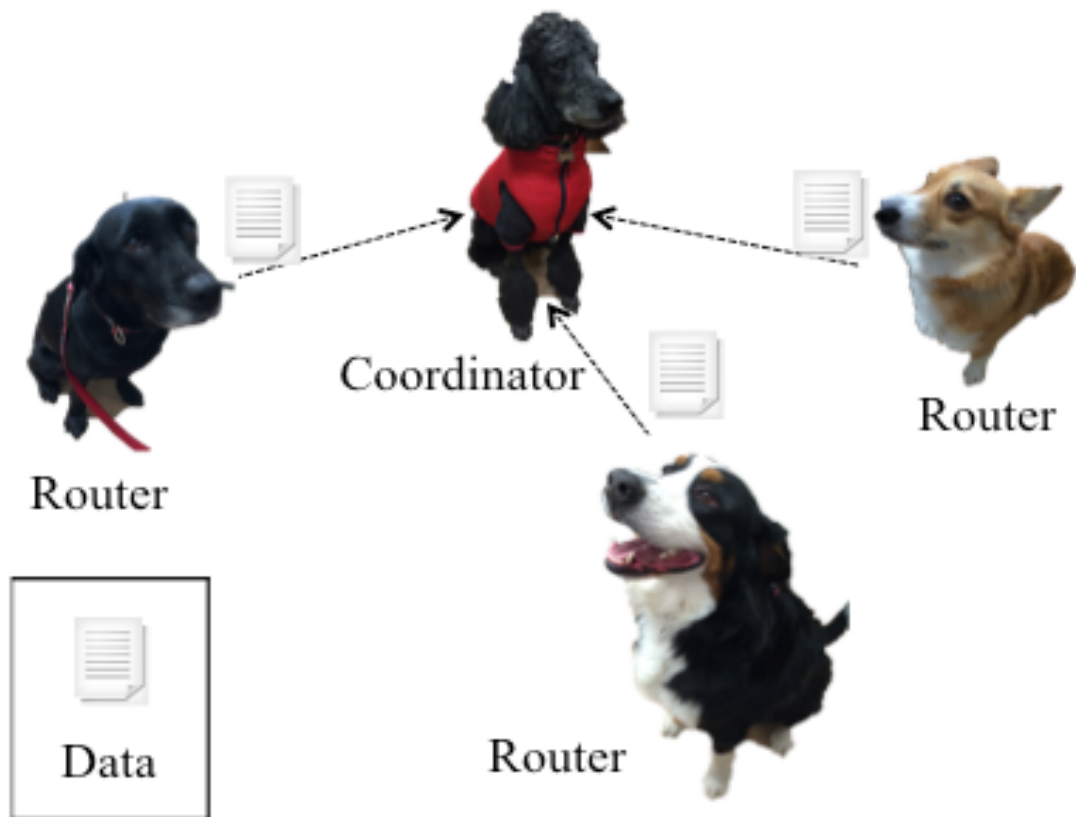


Fig. 5.3.4 CSMA/CA を利用した標準プロトコルのネットワークトポロジー

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調査手法で求められる技術要件は、各動物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.5.3.4)。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なわれる。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なわれる。5.3.2と5.3.3で述べていく提案プロトコルでは、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。

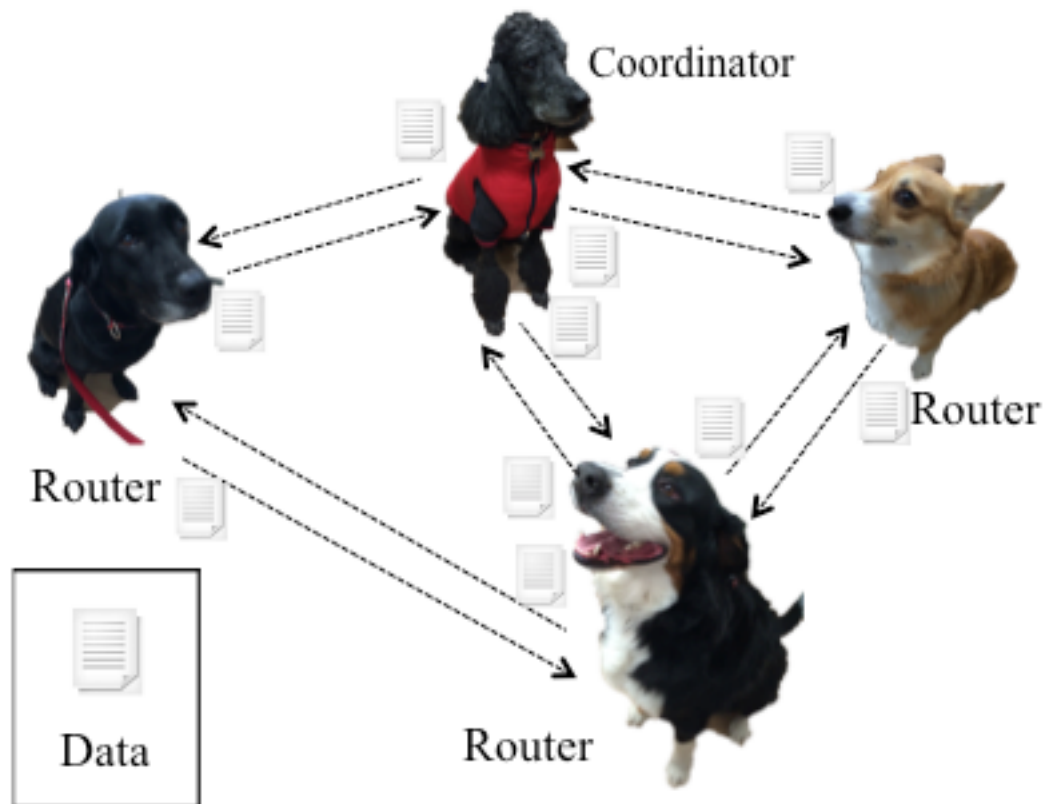


Fig. 5. 3. 5 提案プロトコルのネットワークトポロジー

5. 3. 3 遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル

通信機器 Wake 後のデータ送受信の提案手法である、遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコルについて述べていく。5.3.3 と 5.3.4 では、Preamble フレームの受信回数は他の動物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、5.3.1 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 2 つのプロトコルでは 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.5.3.5)。

本プロトコルは、データ送受信機能の両方の役割と、Preamble フレームの受信回数に応じて Preamble の送受信回数を変化させる手法を用いている。Fig.5.3.6 では動物 A と動物 B が遭遇し、遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコルにより Preamble の送受信を行なっている図である。動物 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、Preamble の送受信回数を定めている。Fig.5.3.6 の図では動物 B は既に 3 回の Preamble フレームを受信しており、Preamble の送受信回数は合計 4 回行なわれる (初期値は 1 回)。一方の動物 A は、Preamble フレームの受信回数は 0 回であり、初期値の 1 回のみ Preamble の送受信が行なわれる。図

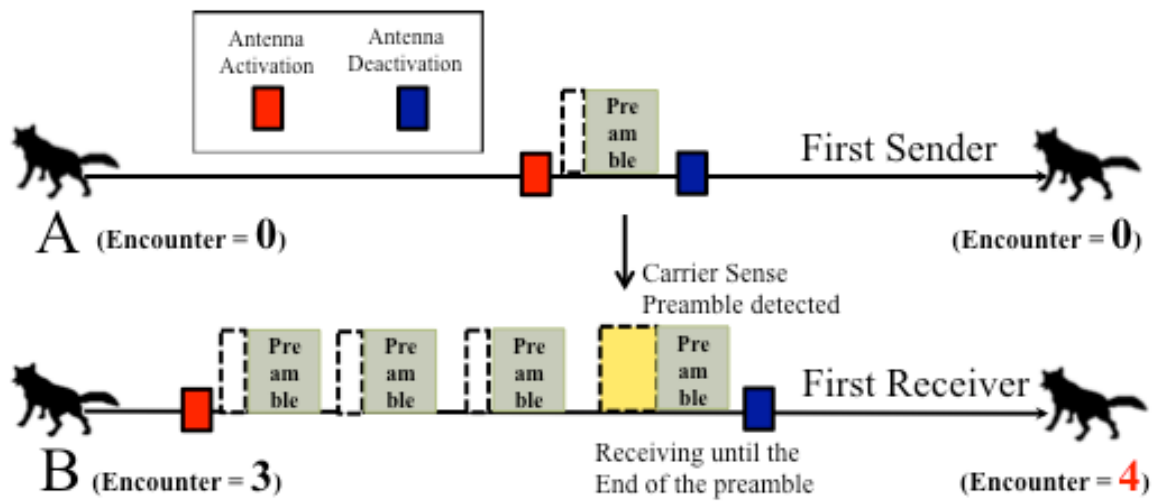


Fig. 5. 3. 6 遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル

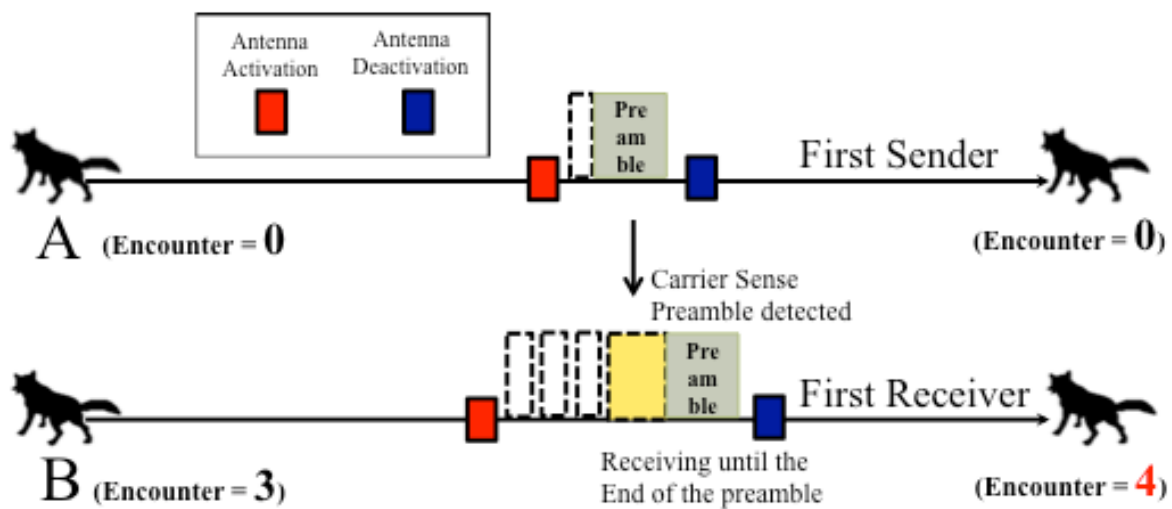


Fig. 5. 3. 7 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル

では、動物 B の 3 回目の Carrier Sense により、動物 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動物 B の受信回数は 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、動物 B の Preamble フレームの送受信回数は 5 回行なわれる。Preamble フレームの送受信後は通信機器を Sleep させる。

ここで、 T_a 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。

$$T_a = (m + 1)(c + f) \quad (5.1)$$

(5.1)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。

5.3.4 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル

通信機器 Wake 後のデータ送受信の提案手法である、遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコルについて述べていく。

本プロトコルは、データ送受信機能の両方の役割と、Preamble フレームの受信回数に応じてデータ送受信前の Preamble の受信回数を変化させる手法を用いている。既に述べた遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコルと比較した場合の特徴として、データ送信前の受信回数だけを変化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動物个体ほど Preamble フレームを受信する確率が高く、4.2.3 で述べた中継ノードの重み付けを行なっている。

Fig.5.3.7 では動物 A と動物 B が遭遇し、遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコルにより Preamble の送受信を行なっている図である。動物 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、Preamble の受信回数を定めている。Fig.5.3.7 の図では動物 B は既に 3 回の Preamble フレームを受信しており、Preamble の受信回数は合計 4 回行なわれる（初期値は 1 回）。一方の動物 A は、Preamble フレームの受信回数は 0 回であり、初期値の 1 回のみ Preamble の送受信が行なわれる。図では、動物 B の 4 回目の Carrier Sense により、動物 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動物 B の受信回数は 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、動物 B の Preamble フレームの受信回数は 5 回行なわれる。Preamble フレームの送受信後は通信機器を Sleep させる。

ここで、 T_b 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。

$$T_b = (m + 1)c + f \quad (5.2)$$

(5.2)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。

5.3.1 データ転送の評価

CSMA/CA を利用した標準プロトコルと提案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 を利用した標準プロトコルで 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、

<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. 5. 3. 1 通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる検出成功の割合

<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. 5. 3. 2 イヌ同士の遭遇時の Preamble フレームの送受信の成功率

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 $T_0 = 0.2$ と仮定して評価を行なっている. 通信時間に関して $c = 220$ ms, $f = 1,000$ ms としめて定め, 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.

$$T_a = T_b \leq 25,000ms \quad (5.3)$$

提案プロトコルでは Preamble フレームの受信回数に応じて, Preamble フレームの送受信または受信回数が増加する. 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り, 想定を越えて通信時間が長くなる可能性が考えられる. (5.3)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.

- 複数のイヌを用いた, 遭遇時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価

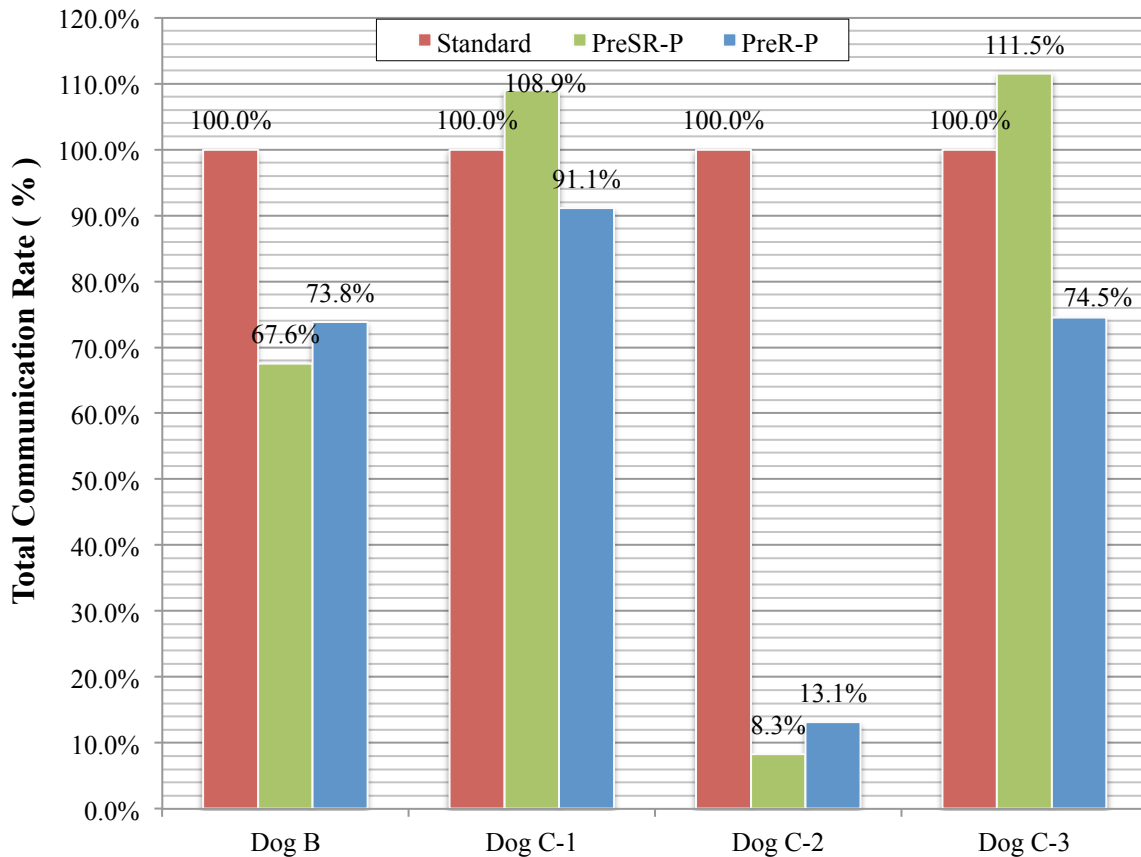


Fig. 5.3.8 各プロトコルでの通信時間の比較

- 各プロトコルでの Preamble フレームの送受信確率の評価
- 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

まず、複数のイヌ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.5.3.1 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、5.2 の実験結果の一部を基準として記載した。表から分かるように、イヌ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[21]。

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.5.3.2 では、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 を用いた標準プロトコル、PreSR-P は遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル、PreR-P は遭遇数に基づく Preamble 受信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

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. 5. 3. 3 各機器における消費電力 [42] [43] [44]

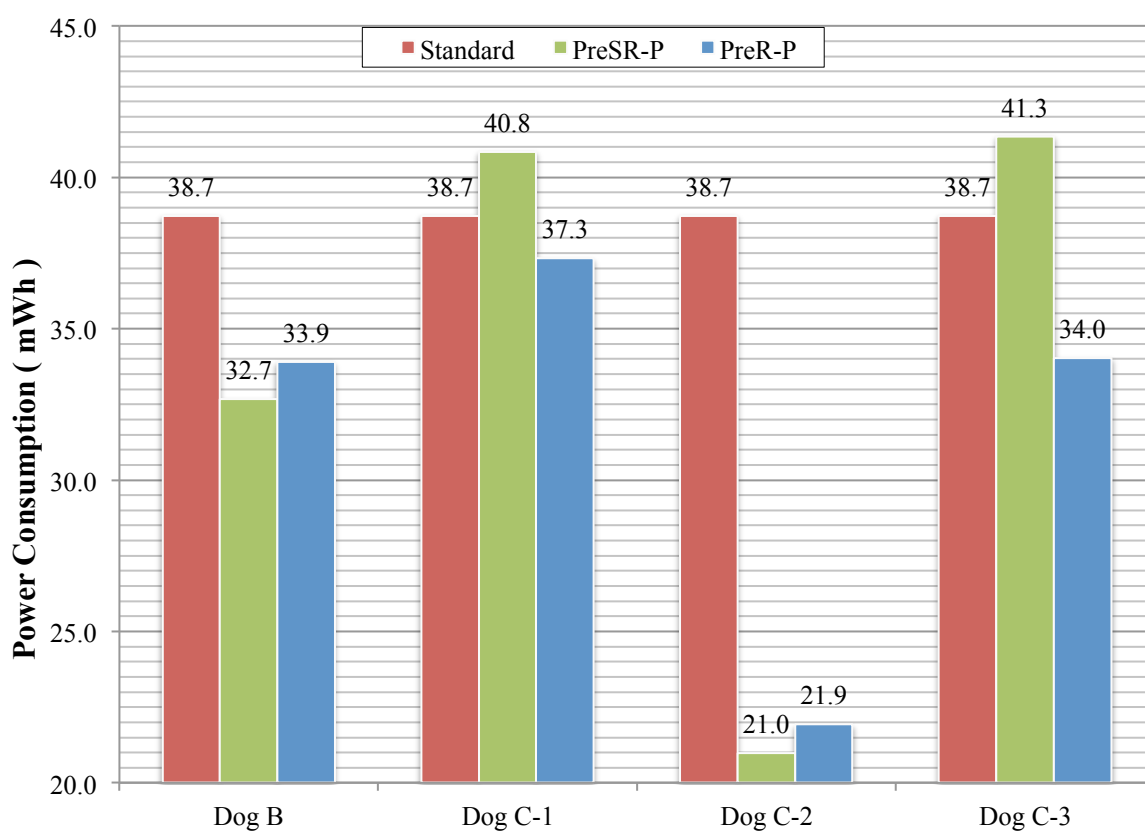


Fig. 5. 3. 9 各プロトコルでの消費電力量の比較

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 5.3.2 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 5.3.8にて、各プロトコルでの通信時間の結果に対して CSMA/CA を用いた標準プロトコルの通信

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、遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル (PreSR-P) では DogC-1 は 108.9%, Dog C-3 は 111.5%と CSMA/CA を用いた標準プロトコル (Standard) と比べて通信時間が増加している。遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) では、各イヌ個体で通信時間が約 13.1%~91.1%であり、イヌ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.5.3.3 の表に記した各機器の仕様から算出した。Table.5.3.3 の表では、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。この表から分かるように、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 5.3.3 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 5.3.9 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まれるため Fig 5.3.2 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、遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) では、CSMA/CA を用いた標準プロトコル (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事から、遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコルが遭遇履歴を用いたデータ転送方法として有効性があると検証された。

以上の結果から、これまで述べてきたマルチホップ転送方式による調査手法における「動物間ネットワーク」の実現のために、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として有効性があると言える。

第 6 章

考察

6.1 評価実験手法に関する考察

本節では、これまで述べてきたフィールドでの評価実験に関して、実験環境や実験犬の実験環境やシナリオの学習について、それぞれ具体的な考察を行なっていく。

6.1.1 実験環境の考慮

本実験では、動物の習性行動を引き出すための実験環境として屋外を選んでいる。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の[45][46]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、本実験の目的では森林地域での環境調査のための手法として動物の習性行動をシステム化するため、想定環境での習性行動の再現性が要求される。そのため、予備実験では屋外かつ周辺が森林近くである場 (Fig 5.1.7) 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、実験中に対象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。動物の習性行動を手法として利用する場合、自然環境で行われている普段の習性行動を把握する必要がある。そのため、動物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。

6.1.2 学習効果の問題

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。複数のイヌを用いた実験では、Dog C-1~Dog C-3 は小さい頃から同じ部屋で育ち、お互いに顔見知りである。一方、Dog B と Dog C-1~Dog C-3 はほぼ初対面の状態で、PreSR、PreR、Standard の順番で本実験を行った。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。

以上のような動物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。フィールドでの実験では、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、動物の場合、特に本研究のように動物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、各イヌ個体を実験前の一定期間は個別で隔離しておく方法などが、動物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[46][47]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。

6.2 通信機器の Wake 制御に関する考察

本節では、これまで述べてきた通信機器の Wake 制御での評価実験に関して、習性行動の再現性や各合成加速度の閾値について、それぞれ具体的な考察を行なっていく。

6.2.1 動物の習性の再現性

6.1.2 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ことで可能性がある。これまでの動物行動学分野ではビデオ動画との比較が用いられてきた[56]評価方法であり、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、動物の習性行動の評価のための新たな基準として利用価値が生まれる。

動物の習性行動の再現性に関して、自由に動ける環境と紐で繋げるような動きに制限を加えている場合では習性行動の再現性に差異が存在する。予備実験では自由に動き回れる環境で実験を行なっており、イヌ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、データ転送手法における実験では、人がイヌをリードで動きや距離に制限を与えた状態で実験を行なっているため、イヌ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。実際に本研究におけるフィールド評価の実験では、イヌが自由に動き回れる状態の予備実験は制限を与えた状態での実験に比べて約 19%以上再現率が高く (Table.5.3.1)、実験環境がイヌ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。

複数のイヌ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。

6.2.2 静止時間と動作判定における閾値の検討

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、通信機器 Wake 制御の予備実験とデータ転送手法の評価実験で $1.0s < t < 10.0s$ に設定している。この値は、これまでの述べてきたように先行研究では十分な知見がなく、Dog A の他の個体時の静止時間を視覚的に判断して設定を行なっている。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、今後最適値のための議論が必要となると言える。

データ転送手法の評価実験における動作判定では、Dog A の予備実験で得られた実験結果から合成加速度の閾値 0.2 を設定している。予備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なっており、それらの値から最適値を算出している。また、データ転送手法の評価実験では Dog A の取得データと最適値を基に、個体差がある Dog B, Dog C-1, Dog C-2, Dog C-3 に設定を行なっている。しかし、実際には装着対象の動物個体毎に、種、大きさ、体重、性別などに基づく予備実験の評価を行なうことでデータ送受信の成功率向上のための最適な動作判定の閾値設定が必要であると言える。

6.3 データ転送手法に関する考察

本節では、データ転送手法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。

6.3.1 データ伝搬性

4.2.3 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.6.3.1, Fig.6.3.2 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、プロトコル毎のイヌ-イヌ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、動物間で相互のデータ転送が行な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したと見なしている。本実験の前提では、動物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、

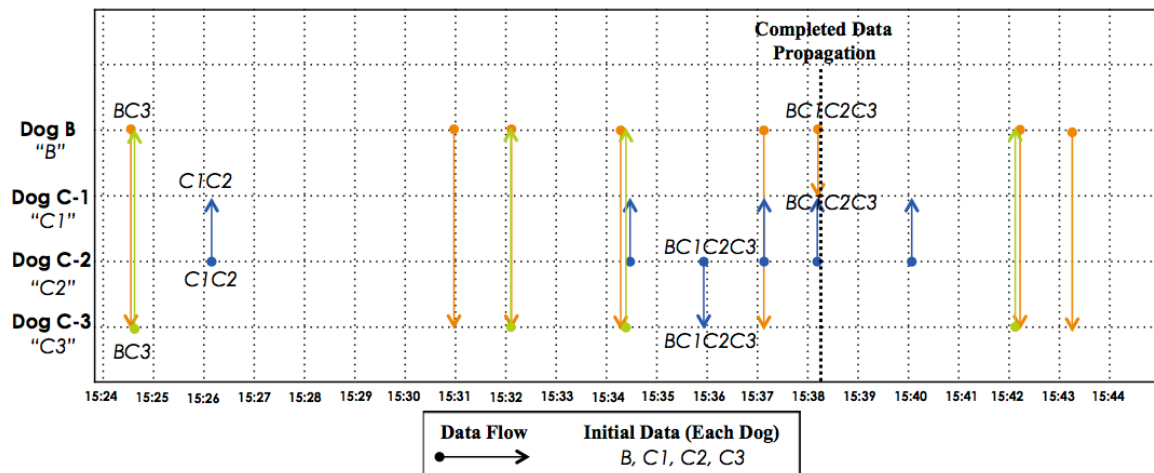


Fig. 6.3.1 遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル (PreSR-P) のデータ伝搬性

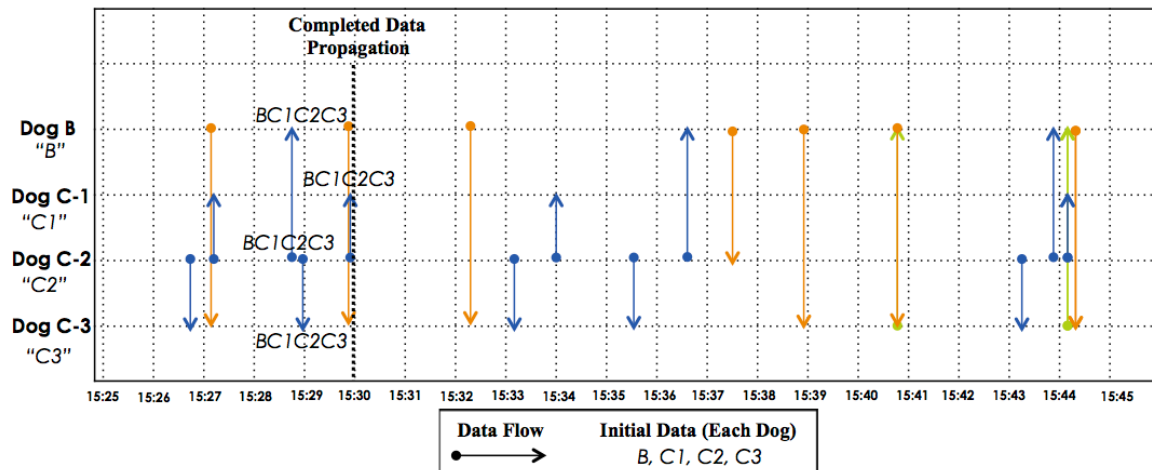


Fig. 6.3.2 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) のデータ伝搬性

Fig.6.3.1, Fig.6.3.2 における動物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、動物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なった遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) が、動物間で効率的なデータ伝搬を実現出来ている事が分かる。遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコルでは約 14 分 7 秒かかったのに対して、遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコルでは約 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、遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコルの実験では Dog C-2 の遭遇回数の母数自体が高いことと (Fig.5.3.2) , 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。

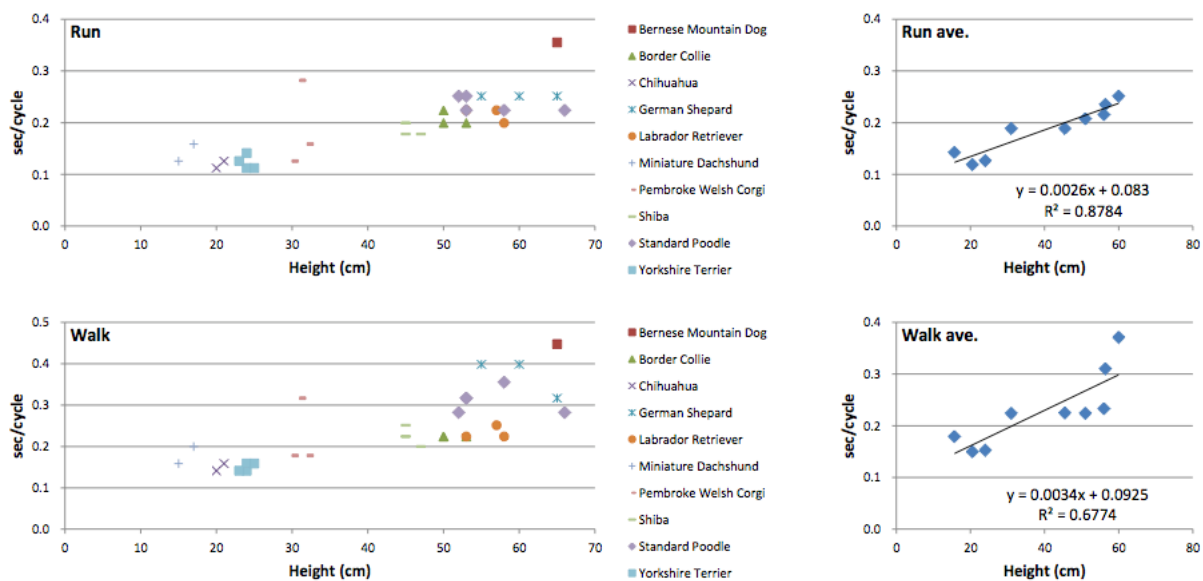


Fig. 6. 3. 3 犬種に歩行，走行で分類した方法で得た合成加速度データの実験結果 [54]

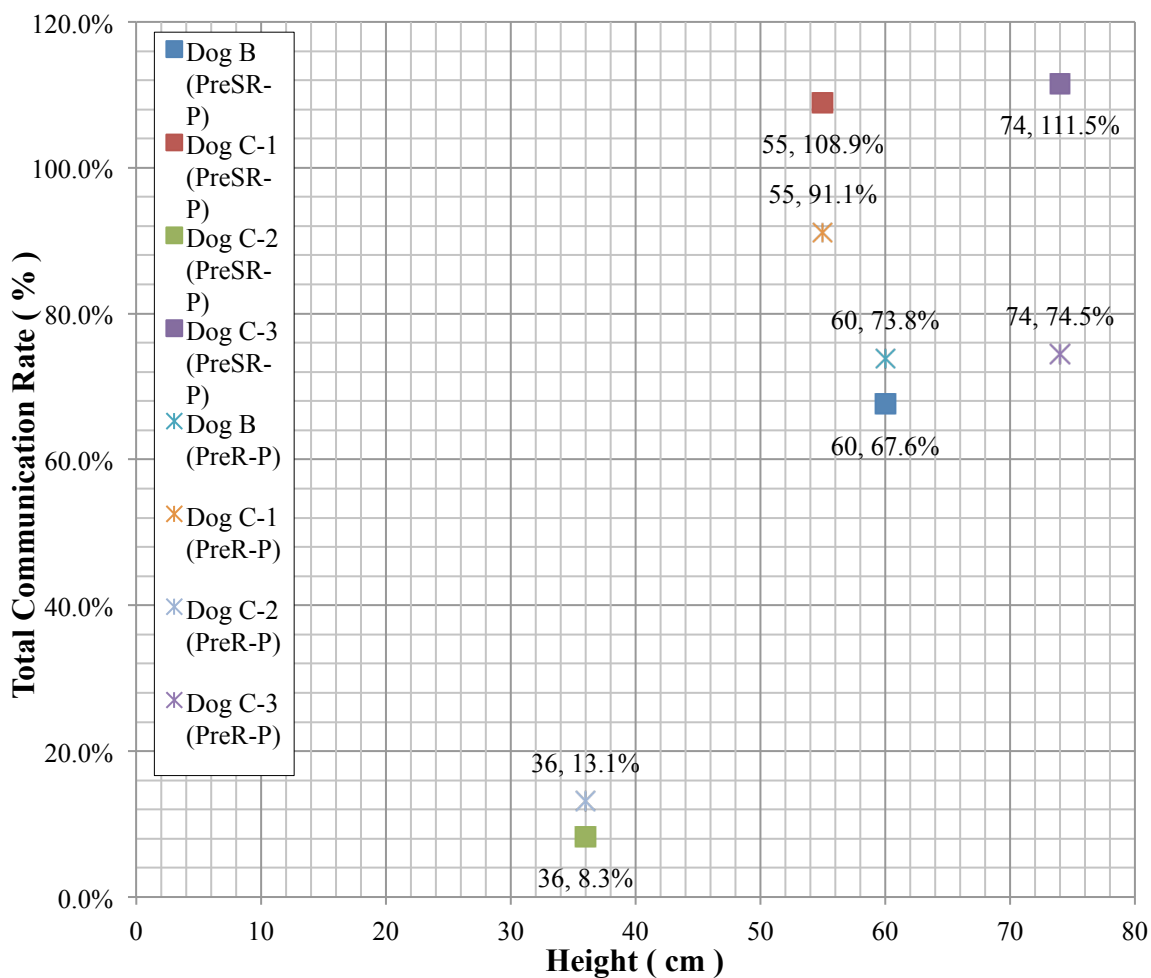


Fig. 6. 3. 4 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) のデータ伝搬性

6.3.2 体高と消費電力量の関係性

実験犬の体高 (Fig.5.1.3) と消費電力の関係性について、先行研究を踏まえた上で実験結果との比較による関係性を述べていく。

麻布大学伴侶動物研究室[54]では、3軸加速度センサーを犬種、個体サイズが違うイヌに装着させて、歩行、走行の2つの動作分類した方法で、合成加速度データの実験結果を得ている (Fig.6.3.3)。Y軸が $\frac{sec}{cycle} = \frac{1}{Hz}$ 、X軸が体高 (cm) となっている。実験結果によると、イヌの体高と3軸加速度センサーのサンプリングレート (Hz) に相関関係が見られることが分かっている。つまり、体高が小さい個体ほど、体高が大きい個体と比べて動作は小さくなるため、サンプリングレート (Hz) は大きくなる。体重は肥満などによって個体差が存在するが、体高は犬種、年齢によりおおよその高さを定める事ができる。

Fig.6.3.4では、Y軸がStandardを100%としたPreSR-PとPreR-Pの合計通信時間の割合、X軸が本実験で用いたイヌの体高である。各プロトコルの仕様は異なるが、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から、イヌ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。Dog BとDog C-1の体重と体高を比較すると、Fig.6.3.5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イヌ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.6.3.4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、サンプル数のイヌが4匹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。

5.1.1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も、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。

6.4 評価実験の結果に基づく定式化

本節では、フィールドでの評価実験の結果に基づき、イヌ-イヌ間通信における、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。

6.4.1 データ伝搬性の定式化

6.3.1で述べた、PreR-Pにおけるデータ伝搬性の定式化を試みる。本実験では、実験開始から約5分3秒で4匹のイヌ-イヌ間でデータ転送が完了すると算出された。ここで、イヌ-イヌ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.6.4.1で示している。

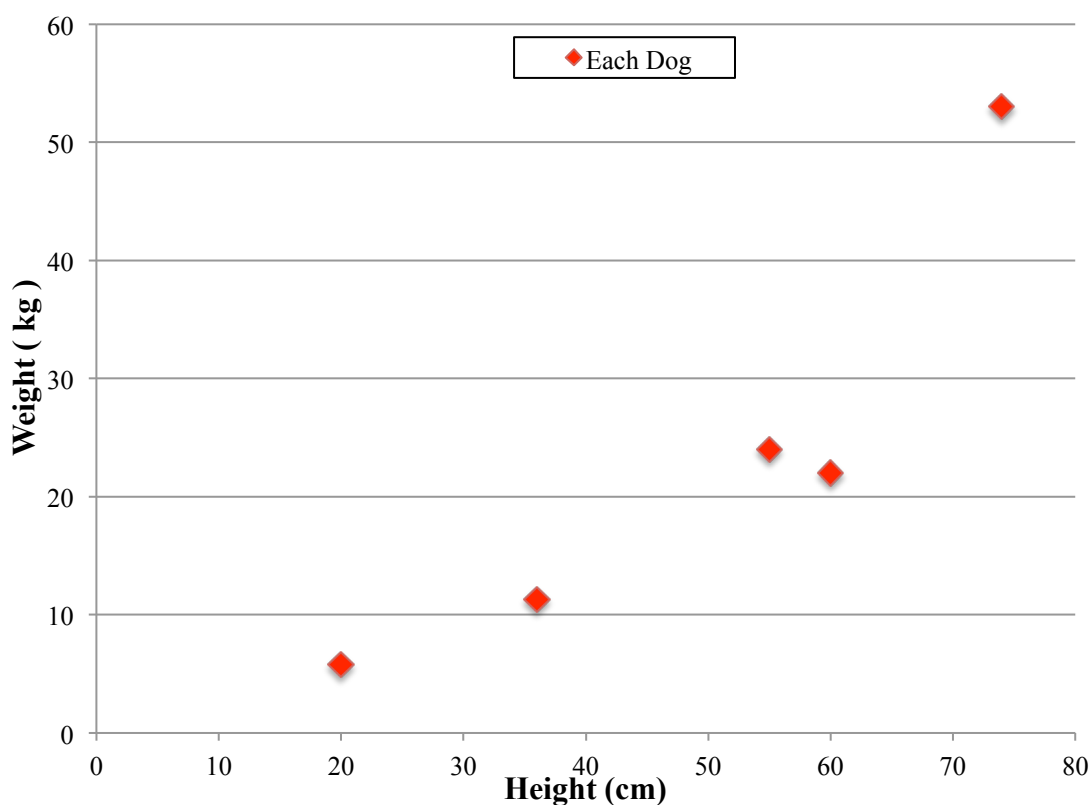


Fig. 6.3.5 各実験犬における体高と体重の関係

<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. 6.4.1 PreR-P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

表より、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匹と設定し、遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) 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。

$$T_p = TP_c \quad (6.1)$$

T_p はイヌ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' を各イヌ個体のデ

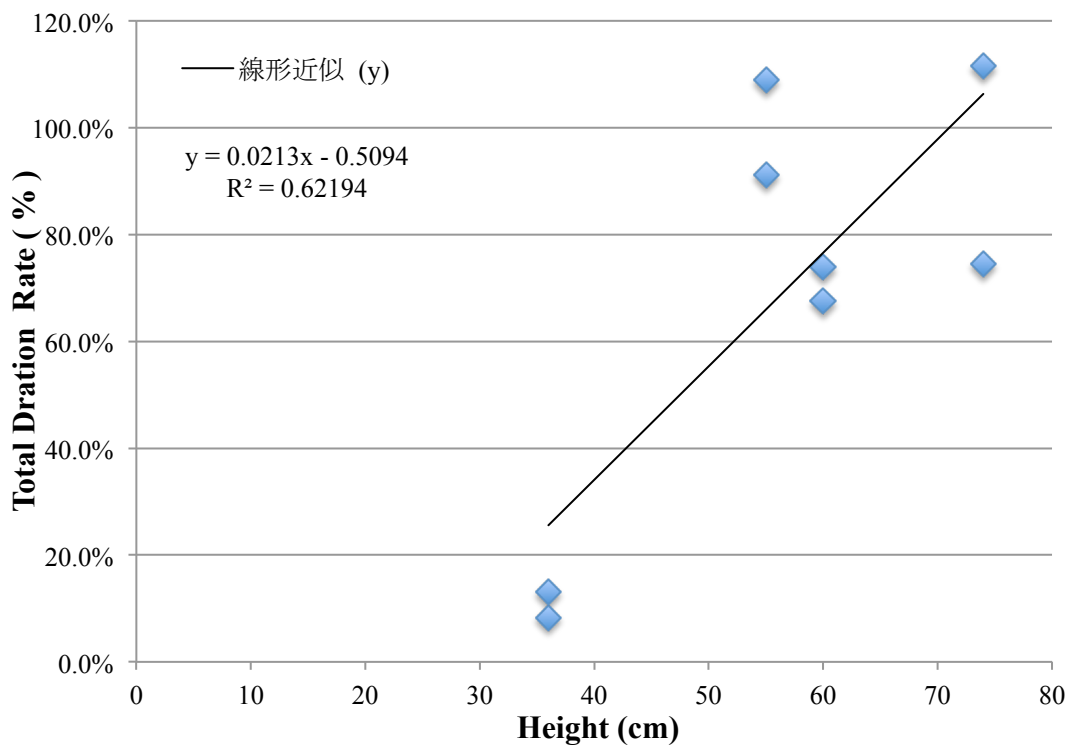


Fig. 6. 4. 1 実験に用いたイヌの体高と通信時間の割合の相関関係

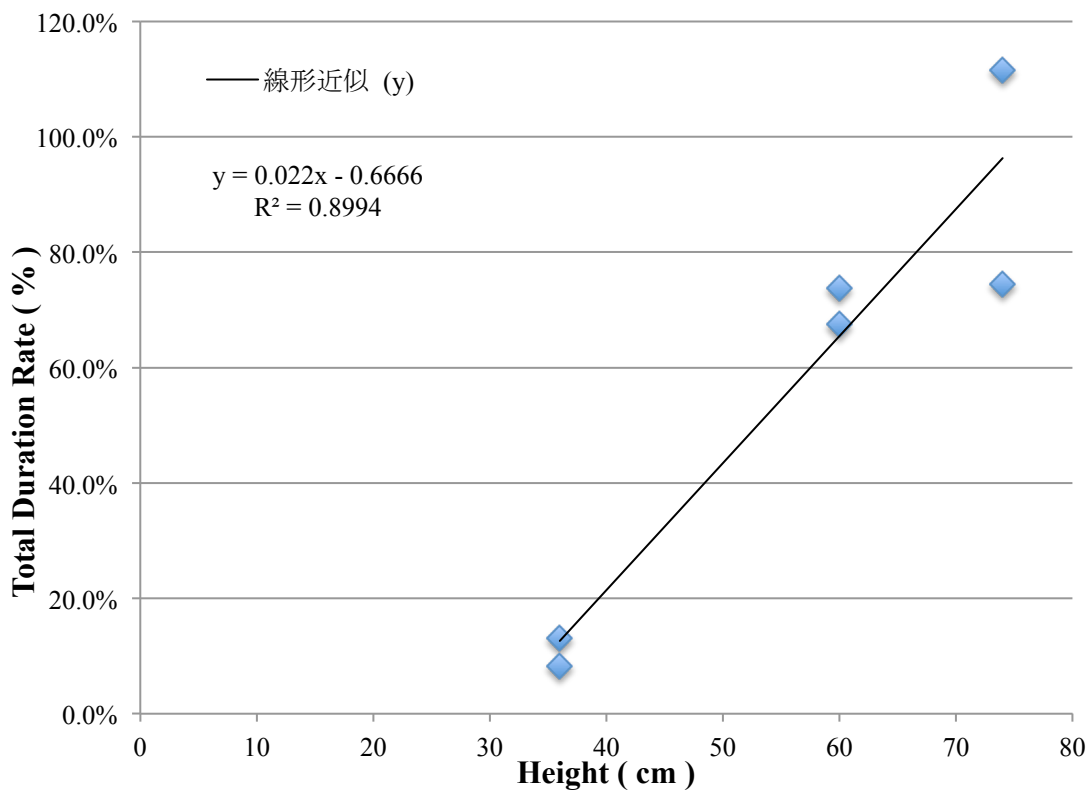


Fig. 6. 4. 2 Dog C-1 のデータを取り除いた, 各イヌの体高と通信時間の割合の相関関係

一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、

$$P_c = \frac{c'}{c} \quad (6.2)$$

となる。

Pre-R-P 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。特に森林地域での環境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。

6.4.2 個体差を考慮した消費電力量の定式化

6.3.2 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、線形近似線を用いて Fig.6.4.1 で示している。この図より、 $R = 0.788631431$ 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、 $R = 0.948369448$ となり強い相関がある。定式化のために、6.3.2 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 と PreR-P の体高と電力消費量の相関関係 (Fig.6.4.2) 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、PreR-P 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 PreSR-P と PreR-P 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.6.4.2 の線形近似式を用いると、5.3.1 のデータ転送評価から CSMA/CA を利用した標準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。

$$T_d = 0.022x - 0.6666 \quad (6.3)$$

となる。 x は体高 (cm) である。

よって(6.3)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。

$$[mWh] = VT(I T_d + I'(1 - T_d)) \quad (6.4)$$

以上の式を用いて、第 7 章の森林地域での環境調査の議論を行なう。

第 7 章

議論

7.1 森林地域における環境調査の拡張

本章では、第 2 章より述べてきた福島第一原子力発電所周辺の放射能汚染された森林地域に対して、本研究の提案手法である動物間マルチホップ転送方式による調査手法の実験結果を基にした式を同地域の環境調査へ拡張させる。現在得られる情報から、同周辺地域における森林地域の生態系調査の推定を行い、実用可能性のための検討と議論を行なう。

7.2 森林地域の環境調査における必要要件の検討

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。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 つに分類を行い、

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[57]の情報より民有林を除いた 86,646ha=866.46km²と仮定した。Fig. 2.1.1 の福島第一原子力発電所周辺の避難指示区域の概念図より、帰宅困難区域、居住移住制限区域、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調査手法の評価となる

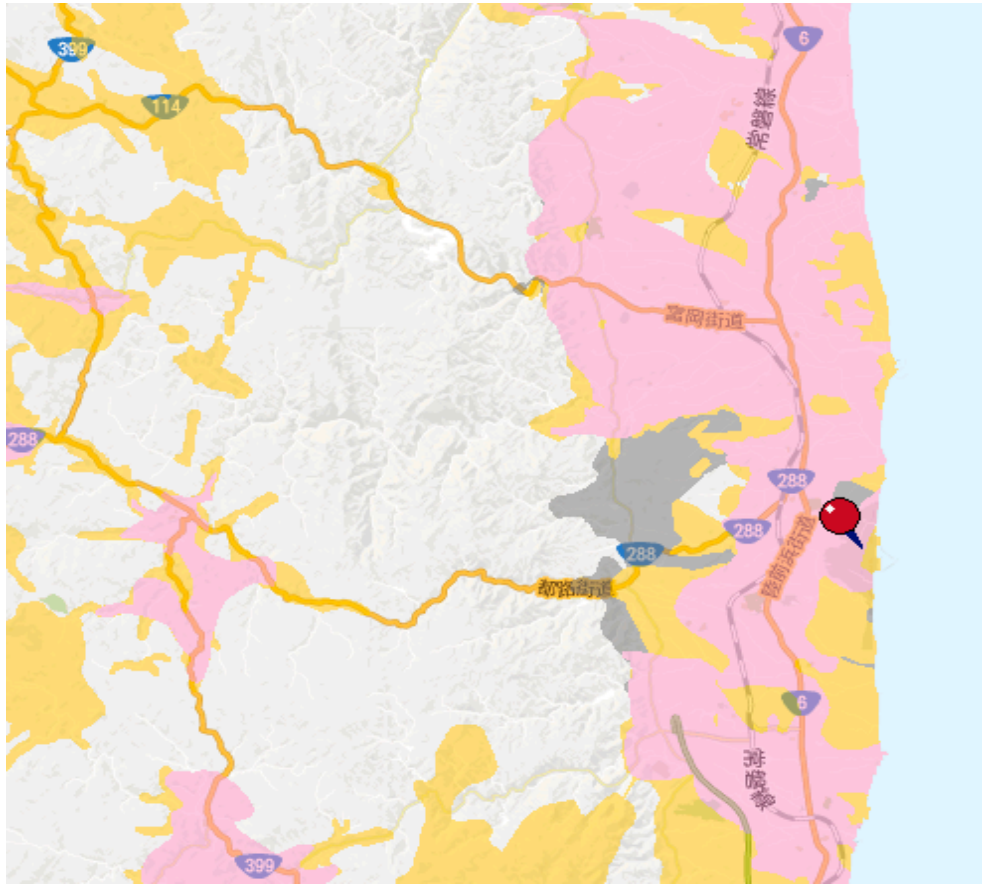


Fig. 7.2.1 2014年1月時点の福島第一原子力発電所周辺のサービス対応エリア [60]

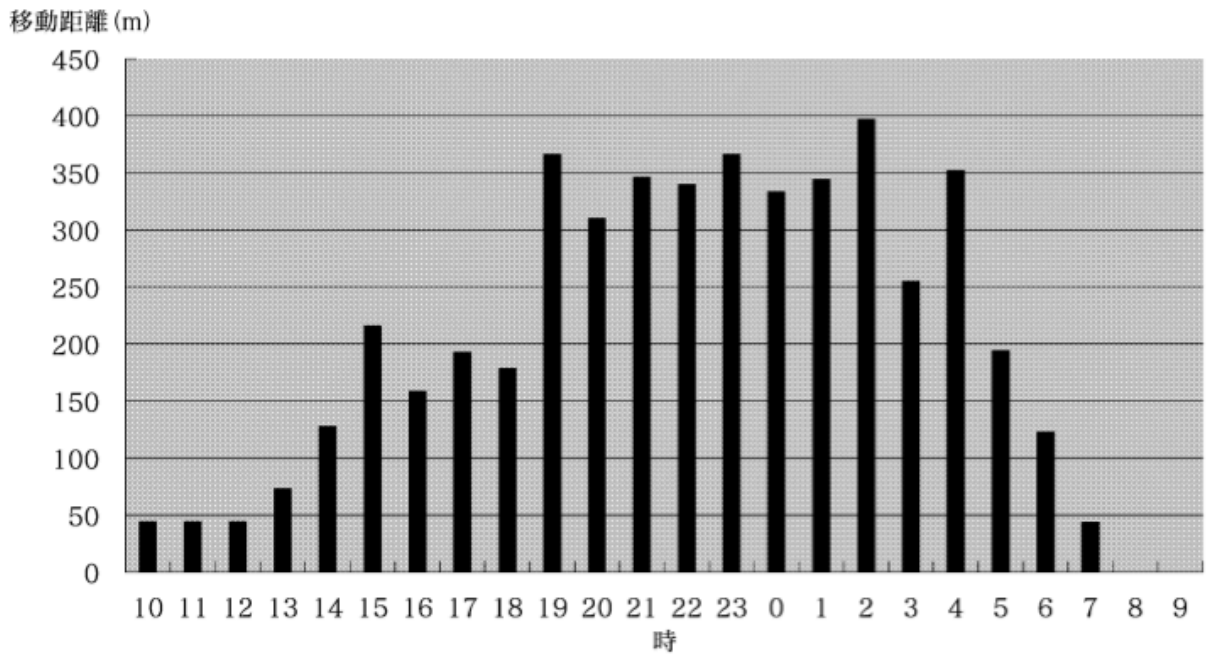


Fig. 7.2.2 メスのアライグマにおける時間別平均移動距離 [18]

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

データ回収のためのねぐら基地局 (Fig.2.3.5) 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。ねぐら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 [58][59][60]。例えば、Fig.7.2.1 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。また、NTT ドコモでは、2011 年 4 月 15 日時点で福島第一原子力発電所 30 キロ圏内の 68 基地局のうち 51 局が復旧している [61]。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、ねぐら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、4.2.2 で述べたように年 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 [18] 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. 7. 2. 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。アライグマは、約 2 年で成獣となり寿命は約 10 年と言われている [61]、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 7~8 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 2 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無い。

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 2 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 [62]。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] 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りにした場合、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。次節では、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。

7.3 センシングデータの伝搬時間の推定

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/月とされている[18]。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。

$$\frac{86,646}{24,576} = 3.525 \leq 4 \quad (7.1)$$

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、各アライグマは各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、(6.1) より、

$$T_p = TP_c = 97.09 \leq 98 \quad (7.2)$$

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。この値について、7.5 の感染モデルで検討を行なっていく。

7.4 森林地域での消費電力量の推定

7.3 の条件に沿って、森林地域での電力消費量の推定を行なう。

6.4.2 で述べた個体差を考慮した消費電力量の定式化より (6.3) の式を用いるが、各実験犬とアライグマの体高の差が大きいため Fig.6.4.1 で近似式を用いる。

$$T_d = 0.0213x - 0.5094 \quad (7.3)$$

7.3 より、5.1.1 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、

$$T_d = 0.1296 \quad (7.4)$$

よって(6.4)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)より下の関係式より求まる。

$$[\text{mWh}] = 19.8 \text{ mW} \quad (7.5)$$

(7.5)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、7.2 で述べたようにアライグマは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。

7.5 動物個体間の感染経路特定モデル

現在、動物間やヒト-動物間の伝染病やウイルス感染などの伝搬は、シミュレーションによって予測はされているが、実測値に基づきどの個体からどの個体へとといった具体的な感染経路を特定する手段はまだ研究がなされていない。動物間、動物-ヒト間といった種を越えた感染経路の特定のために、本研究では Fig.7.5.1 の動物の種を越えた通信モデル（感染経路特定モデル）の設計を想定しており、本研究により同種間の通信手段として確立できた。また、本提案手法では遭遇時の動物が持つ習性行動を利用しており、同種間だけでなくアライグマ-シカ、シカ-鳥などの間でも同様の習性行動が発生することが見られることから、動物の種を越えた動物間通信が可能と推定される。

本章の 7.3 では、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と述べた。現実の動物間の伝搬例として、2010 年の宮崎県で発生した口蹄疫の流行が挙げられる。2010 年春から夏にかけて、宮崎県南部を中心に口蹄疫が流行した[62]。2010 年 4 月頃に発生した口蹄疫は、2010 年 7 月 4 日の終息確認までに感染したまたは感染可能性のある牛、豚、水牛の約 28 万 8 千頭を殺処分した。県内の飼育頭数の内、殺処分された牛は約 22% 、豚は約 24% にのぼり、短期間であったがウイルスの伝搬により被害は大きく拡大した。口蹄疫ウイルスは家畜の伝染病の中でも最も伝染力の強い疾病でもあり、感染しない野鳥、犬、猫、ネズミ、そしてヒトがウイルスを運ぶ「キャリア」となる恐れがあるため、発生地域では移



Fig. 7.5.1 動物の種を越えた動物間通信のイメージ図

動物の種を越えたウイルス伝染が目の見えないところで発生している。そして、その伝搬性は7.3で推定された同種間だけの伝搬スピードを遥かに凌駕し、ほぼ同じ期間の3ヶ月程度で約28万8千頭に及んでいる。つまり、現実的な感染経路の特定のためにはFig.7.5.1で示される、種を越えた動物間通信モデルが必要とされている。

本研究で既に述べてきたように、動物間通信が可能であったとしても体重に対する搭載デバイス容量の制限があるため、Fig.7.5.1の長距離の飛行が可能な鳥類は体重が軽く、バッテリー制限による電池の寿命が困難な技術要件となる。Fig.7.5.1では鳩のような帰巣本能を持つ鳥類を利用し、鳥類がアライグマ、シカを経由して収集したデータの回収を行なうことを想定している。鳩は古くから通信手段の一つ（伝書鳩）として、また第一次世界大戦時中では軍用鳩として利用された実績があること[64]から、伝書鳩として訓練することによりデータ回収可能性が高まると言える。伝書鳩は情報通信分野で冗談構想だと思われていた[65]が、2009年9月9日に南アフリカのIT企業ではが伝書鳩によるデータ伝送を行なった結果、80km先へ4GBのデータ転送を行なった結果、インターネット経由の通信の4%程度の転送時間でデータ転送を実現している[66]。

実用性を高めるためには、電力消費量の多い通信時間の削減が重要な課題となる。従って、本研究の提案手法を用いることにより動物間通信を実現させつつ電力消費量を抑えることで、種を越えた動物間通信の実現可能性が高まる。これまで不可能であった個体間の感染経路の特定により、効率的な伝染性の高い伝染病やウイルス感染の予防・対策が可能となると言えるだろう。

第 8 章

結論

本章では、本研究により得られた成果を総括し、今後の課題について述べる。

第 2 章で触れたように、森林環境における環境調査の必要性を述べてきた。特に 2011 年 3 月 11 日に発生した福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故により、人々への直接的な影響のみならず森林環境における生態系の影響調査が求められている。しかし、既存の環境調査の手法では原則的に調査員の立入りが必要となり、広域調査のための人数の負荷、人の立入りによる生態系への影響、有害鳥獣との遭遇の危険性があり調査負荷が高かった。また、福島第一原子力発電所周辺 20~30 キロ圏内の避難指示区域では調査員の立入り自体が困難であるため、森林環境における生態系の影響調査は進展していなかった。

そこで本論文では、DTN 技術を利用した動物間のマルチホップ転送方式による調査手法に着目し、実現のための技術的な課題の整理、解決のための提案手法、提案手法を用いた評価実験と考察を示した。

既存の調査手法の課題であった「動物個体間のデータ運搬手法」に対して、実現のために「通信機器の Wake 制御」と「データ送受信機能」の 2 つの手法の提案と評価を行なった、動物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、閾値により通信機器の Wake 制御を行なう事で、約 70%以上の再現率で通信機器の Wake 制御を実現させた。一方、「データ送受信機能」では森林環境での実装を想定し、通信機器の Wake のタイミングを考慮した非同期によるデータ送受信と、最大行動域に応じた中継ノードの重み付けの開発を行なった。体重、犬種の異なる 4 匹のイヌを用いた実験結果では、遭遇時でのデータ転送率は約 26.7%~約 66.7%であり、個体によってデータ転送率のばらつきが大きい事から、通信機器 Wake の閾値を個体によって適切に設定する必要があることがわかった。また、消費電力として大きな割合を占めるデータ転送の通信時間では、個体差はあるものの最大 94.1%の通信時間を削減が出来る事が分かり、高い省電力性を示すことができた。通信時間と個体の体高に関係性が見られる事から、個体の体高によって通信機器 Wake の閾値（合成加速度）を適切に設定する事で、通信時間（通信時間）を推定できる可能性があることがわかった。

以上の提案手法と実験結果から、DTN 技術を利用した動物間のマルチホップ転送方式による調査手法に対して、動物同士の接触時(すれ違い時)の効率的なデータ転送を示した事に

より、同手法の実現可能性を高めた。今後の課題として、データ転送率の向上と実際の森林環境化での消費電力の算出が必要になると考えられる。信頼性のあるデータ転送率の基準として、再現性が約 70%以上必要となる。通信範囲を越えた広い場所かつ森林環境に近い環境での再実験、個体の体高に合わせた通信機器 Wake の閾値 (合成加速度) の評価実験、イヌのサンプル数を増やした評価実験により、より精度の高い評価が得られるだろう。

福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故の影響は、数十年単位の長期的な問題として世界から捉えられている。本論文の成果は、福島第一原子力発電所周辺の立入れない森林地域における環境調査手法として、同手法の実現可能性が高まった事で生態系の長期的な影響調査が可能となる日が近づいたことである。

近年の情報通信技術の急速な発展により、動物の生態行動学分野でも情報通信技術の研究利用が注目されている。客観的なデータに基づく動物の習性行動や生態行動の解明が可能になりつつあり、今後も分野を跨いだ相互研究・共同研究が発展していこう。本論文により、情報通信学分野と動物の生態行動学分野を繋ぐ橋渡しになることを願う。

謝辞

本論文は、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 修士課程において、筆者が瀬崎薫教授の元で行った研究をまとめたものです。

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、実験に対する周到な準備の必要性、研究分野での発表方法、留学中の支援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。また、研究テーマに対する有益なアドバイス、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、いつも身近で支えていただいた小林博樹助教にここで深く感謝申し上げます。2013年10月より着任された伊藤昌毅助教より、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木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永澤美保特任助教、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、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.

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への敬愛と感謝の言葉で、本論文を締めくくりたいと思います.

2014年1月27日

中川 慶次郎

発表文献

- 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
- Keijiro Nakagawa, Hihroki Kobayashi, Junya Okuno, Kaoru Sezaki, "Carrier Pigeon-like Sensing system: Animal-Computer Interface Design for Opportunistic Data Exchange Interaction for a Wildlife Monitoring Application", CHI2014 April 29 – May 3, ALT (under review)
- Keijiro Nakagawa, Hihroki Kobayashi, Junya Okuno, Kaoru Sezaki, "Carrier Pigeon-like Sensing system: Animal-Computer Interface Design for Opportunistic Data Exchange Interaction for a Wildlife Monitoring Application", CHI2014 April 29 – May 3, Work in Progress (under review)
- 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, (under review)

参考文献

- [1] 原子力被災者生活支援チーム, “避難指示区域内における活動について”, 平成25年12月改訂版.
- [2] 農林水産省, プレスリリース, “森林内の放射性物質分布状況及び分析結果について(中間とりまとめ)”, 資料4-3, 平成23年9月30日.
- [3] 吉田 聡, 放射線医学総合研究所, “放射性物質の森林生態系での動態” .
- [4] 松島潤、小林博樹、”組み込み型 Linux を用いたイリオモテヤマネコ観察手法の開発” 東京大学大学院工学系・情報理工学系研究科第22回記者会見. 2007年3月9日. 東京.
- [5] 朝日新聞, 朝刊 静岡 1地方, 2007年3月30日.
- [6] 兵庫県森林動物研究センター, “行政職員用ひょうごアライグマ捕獲技術マニュアル(ver1.0)”, 平成23年3月.
- [7] 工藤 岳, 横須賀 邦子, “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 (Japanese Journal of Conservation Ecology), vol.17 : 49-62, 2012年.
- [8] 阿部永, 小林恒明, 石城謙吉, 太田嘉四夫, “北大中川地方演習林鳥類調査報告その1”, 北海道大学農学部 演習林研究報告 = RESEARCH BULLETINS OF THE COLLEGE EXPERIMENT FORESTS HOKKAIDO UNIVERSITY, vol.27(1): 69-77, 1970年7月.
- [9] 野生動物装着型センサノードの伝書鳩指向な空間情報センシング機構の研究:文部科学省 科学研究費補助金 研究活動スタート支援 小林博樹 2012 - 2013.
- [10] Are R. Berentsen, Mike R. Dunbar, and Chadd E. Fitzpatrick, “Raccoon Rabies Research Using Remote Download GPS Collars in an Urban Environment”, Proc. 24th Vertebr. Pest Conf. (R. M. Timm and K. A. Fagerstone, Eds.), Published at Univ. of Calif., Davis. 2010. Pp. 319-321.
- [11] 長戸 理恵, 森下 英美子, 樋口 広芳, 板生 清, “PHSによる野生動物の位置探索”, Information Processing Society of Japan モバイルコンピューティング 12-1, 2000.2.3.
- [12] Artemios G. Voyiatzis, “A Survey of Delay- and Disruption- Tolerant Networking Applications”, JOURNAL OF INTERNET ENGINEERING, VOL. 5, NO. 1, June 2012.

- [13] 小山 由, 水本 旭洋, 今津 眞也, 安本 慶一, “大規模災害時の安否確認システムと広域無線網利用可能エリアへのDTNに基づいたメッセージ中継法”, 情報処理学会研究報告, Vol.2012-DPS-151 No. 29, Vol.2012-MBL-62 No. 29, 2012/5/22.
- [14] Android (<http://developer.android.com/about/index.html>).
- [15] Twitter, (<https://twitter.com/>).
- [16] Tovar. A, Friesen. T, Ferens. K, Mcleod. B, “A DTN WIRELESS SENSOR NETWORK FOR WILDLIFE HABITAT MONITORING”, Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010.
- [17] William A. Searcy & Stephen Nowicki, “The Evolution of Animal Communication: Reliability and Deception in Signaling Systems”, 2005.
- [18] 池田 透, 遠藤 将史, 村野 紀雄, “野幌森林公園地域におけるアライグマの行動圏”, J. RakunoGakuenUniv., 25(2):311~319 (2001).
- [19] 小林博樹, “野生動物を用いた空間情報センシングに関する研究のご紹介”, GIS NEXT, 第40号, 2012/7/25.
- [20] FABEE (Fukushima Acoustic and Behavioural Ecology Exchange), (<http://fabee.jp/>).
- [21] K. A. Houpt, Domestic animal behavior for veterinarians and animal scientists, 5th ed., Wiley- Blackwell, Ames, Iowa, 2011.
- [22] 竹中重雄, “加速時計を用いた犬の活動測定と獣医医療, そして創薬”
- [23] Life+ Nature project: Restoration of raised bog in Lille Vildmose “Raccoon dog with GPS-tracker is popularly known as a “Judas animal”(Naturstyrelsen)”.
- [24] 安田 真悟, 小林 博樹, 崔 舜星, 篠田 陽一, “動物指向クラウドネットワークの設計と課題”, 第13回インターネットテクノロジーワークショップ, 2012.
- [25] 長 健太, 大須賀昭彦, 本位田真一, “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”, ソフトウェアエージェントとその応用論文特集.
- [26] An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin INFOCOM 2002.
- [27] T. van Dam and K. Langendoen. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensornetworks. ACM Sensor Systems, Nov. 2003.
- [28] J. Polastre, J. Hill and D. Culler, Versatile Low Power Media Access For Wireless Sensor Networks. Sensys 04.

- [29] 松田 隆志, 一園 真澄, 三上 真司, 太田 能, 川口 博, 吉本 雅彦, “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”, 電子情報通信学会信学技報, 2006, 04.
- [30] Eustathia Ziouva, Theodore Antonakopoulos, “CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis”, Computer Communications 25 (2002) 313-321, 2001 May.
- [31] アライグマ防除の手引き, 環境省 自然環境局 野生生物課 外来生物対策室.
- [32] Hill Hiroki, Kobayashi, Atsushi Hiyama, Shun Kobayashi, Masako Izawa, Jun Matsushima and Michitaka Hirose, “Wild Theremin: Wildlife Telemonitoring through Remote Microphone and Capacitance Sensors”.
- [33] 身近な動物図鑑: アライグマ - そらいろネット,
(<http://sorairo-net.com/aquarium/animal/araiguma/002.html>) .
- [34] アライグマ対策の手引き, 長崎県農林部 農政課.
- [35] ペットフード協会 (<http://www.petfood.or.jp/data/chart2010/01.html>) .
- [36] Kyoko Yonezawa, Takashi Miyaki and Jun Rekimoto, “Cat@Log: Sensing Device Attachable to Pet Cats for Supporting Human-Pet Interaction”, ACE '09 Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, Pages 149-156.
- [37] Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen, “A Comparative Study of Wireless Protocols:Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) Nov. 5-8, 2007, Taipei, Taiwan.
- [38] Kazuto Shimizu, Masayuki Iwai, and Kaoru Sezaki, Social Link Analysis using Wireless Beaconing and Accelerometer, The 6th. International Workshop on Data Management for Wireless and Pervasive Communications (DMWPC 2013), Spain, 25-28 March, 2013.
- [39] xbee-arduino. (<https://code.google.com/p/xbee-arduino/>) .
- [40] Arduino, (<http://arduino.cc/>) .
- [41] 東京コスモス電機株式会社, “ZigBeeとは” ,
(<http://tocos-wireless.com/jp/tech/ZigBee/ZigBee.html>) .
- [42] XBee/XBee-PRO ZB RF Modules,
(http://www.dexterindustries.com/files/90000976_D.pdf) .

- [43] Analog Device Small, Low Power, 3-Axis ± 3 g Accelerometer ADXL335. (www.analo.com) .
- [44] DALLAS Semoconductor DS1307 64 x 8 Serial Real-Time Clock. (www.maxim-ic.com) .
- [45] 中村 敬太, “回転筆法による動物行動の観測”, 日薬理誌, Vol.74, pp. 671~686 (1978).
- [46] 阿部 康男, 田中 寛, 三島 章義, 小野 継男, “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.
- [47] 長谷川 寿一, “動物行動研究における適応論的アプローチの重要性”, The Japanese Journal of Animal Psychology , 55, 1, 41-44 (2005).
- [48] 環境庁自然保護局 (1997) :人と自然の共生を目指して 環境庁 自然保護局 - その役割と仕事-.
- [49] 伊藤 寿浩, 増田 誉, 塚本 健司, “安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発 - 無線センサーによる鶏健康モニタリングシステム-”, Synthesiology Vol. 3 No. 3 (2010).
- [50] P. Juang, et al., Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet, in Proceedings of the 10th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems, ACM, (2002), 96-107.
- [51] A. Vahdat and D. Becker. Epidemic routing for parially-connected ad hoc networks. Technical re- port, Duke University, 2000.
- [52] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C.S. Raghaven- dra. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking, pp. 252-259, 2005.
- [53] 大西真晶, “空間位置をロケータとするロケーション広告不要ネットワークング手法”, 独立行政法人情報通信研究機構.
- [54] 麻布大学伴侶動物研究室, (<http://azabu.carazabu.com/car/home>) .
- [55] 鶴 正人, 内田 真人, 滝根 哲哉, 永田 晃, 松田 崇弘, 巳波 弘佳, 山村 新也, “DTN 技術の現状と展望”.
- [56] 三家 詩織, 三浦 乃梨子, 武田 庄平, 宇田司, “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”, Animal Behavior and Management, 48(2):79-87, 2012.

- [57] 福島県農林水産部, 平成22年福島県森林・林業統計書.
- [58] ソフトバンクモバイル株式会社 サービス対応エリア,
(http://ppk.mb.softbank.jp/service_area/sp/main.aspx#content-top) .
- [59] KDDI株式会社, (<http://www.au.kddi.com/mobile/area/map/>) .
- [60] 株式会社NTTドコモ サービス対応エリア,
(<https://www.nttdocomo.co.jp/support/area/>) .
- [61] 旭山動物園,
(<http://www5.city.asahikawa.hokkaido.jp/asahiyamazoo/zoo/animal/araiguma.html>) .
- [62] 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.
- [63] 宮崎県口蹄疫対策検証委員会, “2010年に宮崎県で発生した口蹄疫の対策に関する調査報告書”, 平成23年1月.
- [64] 黒岩 比佐子, “伝書鳩 もう一つのIT”, 文春新書.
- [65] RFC 1149 - Standard for the transmission of IP datagrams on avia,
(<http://www.faqs.org/rfcs/rfc1149.html>).
- [66] Reuter, “南アの通信会社、データ伝送の速度で伝書鳩に敗北”,
(<http://jp.reuters.com/article/oddlyEnoughNews/idJPJAPAN-11438220090910>)

付図

2.1.1 福島第一原子力発電所周辺の避難指示区域の概念図 [1]	4
2.2.1 実際の環境調査の様子	6
2.2.2 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	6
2.2.3 GPS ロガーを首輪に装着しているアライグマの様子	7
2.3.1 Delay-tolerant networking によるデータ伝搬の様子 (Node A から Node C)	9
2.3.2 DTN 技術を利用した大規模災害時の安否確認システム [13]	9
2.3.3 DTN 技術を利用した野生鹿の調査と環境情報取得手法	10
2.3.4 動物間マルチホップ転送方式による調査手法のイメージ図	11
2.3.5 アライグマのデータアップロードの様子 (イメージ図) [19]	11
3.1.1 サーバ・クライアント型 (左) と Peer to Peer 型 (右)	14
3.2.1 動物同士の接触時(すれ違い)における, 習性行動を利用したデータ転送の概要	16
4.1.1 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	19
4.1.2 対象個体の興味により異なる動作比較	19
4.1.3 通信機器 Wake 制御の状態遷移図	20
4.1.4 通信機器 Wake 制御アルゴリズム	21
4.2.1 スケジューリングの同期によるデータ送受信	22
4.2.2 スケジューリングの非同期によるデータ送受信	22
4.2.3 動物同士の接触時(すれ違い)の習性行動を利用したデータ送受信	24
4.2.4 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	25
4.2.5 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	25
4.2.6 隠れノード問題が生じる構成	26
4.2.7 都市地域と森林地域におけるノードの密度の比較	26
5.1.1 技術的難易度、身体サイズの関連性 [32]	30
5.1.2 水路を通過して果樹園に進入するアライグマの群れ [34]	30
5.1.3 各実験犬の画像	31
5.1.4 猫ウェアラブル設計 [32]	33
5.1.5 Dog A の装着時の様子 (リュック型)	33

5.1.6 Bluetooth, UWB, ZigBee, Wi-Fi の機能比較 [37]	34
5.1.7 Arduino UNO R3	35
5.1.8 使用した各機器	35
5.2.1 信機器 Wake 制御の予備実験環境	37
5.3.1 複数のイヌを用いた実験環境	39
5.3.2 イヌ同士の遭遇時に習性行動に基づいたデータ送受信の概要	39
5.3.3 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 [41]	41
5.3.4 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	42
5.3.5 提案プロトコルのネットワークトポロジー	43
5.3.6 遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル	44
5.3.7 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル	44
5.3.8 各プロトコルでの通信時間の比較	47
5.3.9 各プロトコルでの消費電力量の比較	48
6.3.1 遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル (PreSR-P) のデータ伝搬性	53
6.3.2 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) のデータ伝搬性	53
6.3.3 犬種に歩行, 走行で分類した方法で得た合成加速度データの実験結果	54
6.3.4 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル (PreR-P) のデータ伝搬性	54
6.3.5 各実験犬における体高と体重の関係	56
6.4.1 実験に用いたイヌの体高と通信時間の割合の相関関係	57
6.4.2 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 ..	57
7.2.1 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 [61] ...	60
7.2.2 メスのアライグマにおける時間別平均移動距離 [18]	60
7.5.1 動物の種を越えた動物間通信のイメージ図	65

付表

5.1.1 実験犬のプロフィール	31
5.2.1 通信機器 Wake 制御の実験結果 (合計 15 分で 30 回)	37
5.3.1 通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる検出成功の割合	46
5.3.2 イヌ同士の遭遇時の Preamble フレームの送受信の成功率	46
5.3.3 各機器における消費電力 [42] [43] [44]	48
6.4.1 PreR-P 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	56