

動物を利用した環境調査のための 遭遇検知による効率的なデータ転送手法の提案

伊藤 昌毅¹ 中川 慶次郎^{1,†1} 小林 博樹² 瀬崎 薫^{1,2}

概要：本研究では、DTNを用いた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。また動物同士の接近回数から個体ごとの最大行動域を推定し、データ交換の優先度を変えることでより拡散しやすいデータの中継を行う。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。本研究では福島第一原子力発電所周辺地域を対象に想定し、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、人が立ち入ることが出来ない場所における長期的な環境調査の手法を確立をめざしている。本稿では、提案手法を実装し、イヌを利用した実験において遭遇の認識や送受信の可否、消費電力の評価などを通して提案手法の有効性を実証した。

Data Transmission Protocol for Environmental Monitoring Leveraging Animal Behavior

MASAKI ITO¹ KEIJIRO NAKAGAWA^{1,†1} HIROKI KOBAYASHI² KAORU SEZAKI^{1,2}

1. はじめに

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る事例が可能になっている。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行われている。こうした手法によって、これまで明らかにされてこなかった様々な自然環境や動物の活動が観測できるようになったが、ほとんどの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。

本研究では、福島第一原子力発電所周辺地域の森林地域を対象とした環境調査を目的に、そのための調査手法の確立を目指している。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、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]。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]

¹ 東京大学 生産技術研究所
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8505, Japan

² 東京大学 空間情報科学研究センター
Center for Spatial Information Science, the University of Tokyo, Kashiwa, Kanagawa 277-8568, Japan

^{†1} 現在、シスコシステムズ合同会社
Presently with Cisco Systems G.K.

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。

しかしながら、現在でも周辺 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おり、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必要になっている。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ような一般的な手法が困難であるだけでなく、情報技術を用いた環境調査でも、前述のような調査員を必要とする環境調査は実施が困難である。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。

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。

2. 関連研究

本節では情報技術を活用した環境調査手法を概観し、調査員の立入りを必要としない調査手法の可能性を検討する。

2.1 情報技術による環境調査

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。東京大学秩父演習林では、設置した機器気象センサーによる環境情報の取得や赤外線カメラによる動物行動の観察が行われている。これに加えて、静電気容量にて動物の検知を行なうテルミン機器を設置し、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も行われている [4]。通信機器の小型化や省電力化により、動物自身に機器を装着させて生態行動を把握する試みも行われている。PHS による野生動物の位探索の研究 [4] 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。陸生哺乳類では、コロラド州の

National Wildlife Research Center によって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が行われている [5]。しかしこれらの既存手法では、機器の設置やデータの回収のために調査対象となる環境への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。

2.2 DTN による環境調査

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、データ転送としてストアアンドフォワード方式を用いることで信頼性のあるデータ転送を実現する通信方式である。DTN は当初惑星間の通信を実現する技術として研究が始まったが、大規模災害時に携帯電話の基地局が倒壊した場合の代替の通信や通信インフラが不十分な発展途上国での通信など通信インフラが劣悪な環境下での通信方式としても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の通信手法に適用出来る可能性がある。

DTN 技術には幾つか方式があるが、メッセージフェリー方式 [6] での先行研究である野生鹿の調査と環境情報取得の手法 [7] 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し、設定した時間に巡回する、通信機器を搭載した自動車やヘリコプターに取得データを送信することでデータを収集する手法が提案されている。この手法では従来の環境調査と比べて、調査員の数や動植物への接触を減らす事が可能であり、無線センサーから通信機器へ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も可能となる。しかし、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は残っており、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 動物をキャリアとする環境調査

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 [8][9]。「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。

同じく DTN 技術を利用する文献 [10] では、動物にセンサーを取り付け、動物をキャリアとしてデータを運搬し、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している (図 1)。動物としてアライグマを想定し、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取り付ける。単独行動時には、捕食活動や縄張りの見回りのために自身の行動域 [8] 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

サでデータを収集する。動物同士の接触時(すれ違い)には、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。このように、動物の個体間接触と集団行動の習性をシステム設計に取り入れ、センシングやデータ運搬や回収の役割を動物に担わせることで、調査員による森林地域の立入り作業を必要としない、長期的な環境調査が可能になる。

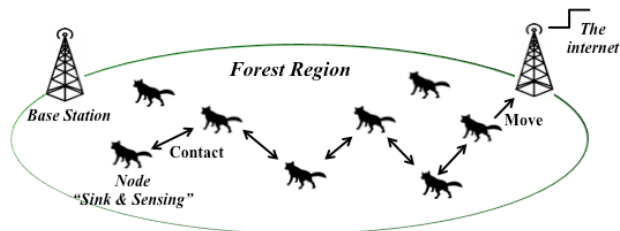


図 1 動物間マルチホップ転送方式による調査手法のイメージ図

3. 動物の習性を利用した動物間のデータ送受信

本研究では、動物にセンサを取り付け、DTN 技術を利用してデータをリレーする事で広域の森林環境を収集する手法を採用し、環境調査を実現するための基礎技術を開発する。各動物個体がセンサを持ち観測を行い、個体同士の遭遇時にデータを交換することで、最終的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、調査員を介さずにデータを回収する。DTN 技術の研究自体は広く行われているが、動物に取り付けた機器を対象とした研究はほとんど行われていない。そのため、本研究では特に以下の技術課題に対して動物の特性に対応した技術開発を行う。

動物同士の遭遇の認識技術

動物同士の遭遇は頻繁に起こるわけではなく、またその時の振る舞いも明らかになっていないといえない。消費電力の大きい通信機器を常に稼働させるのは不適切であるので、低消費電力で動物同士の遭遇を認識し、その時だけ通信を開始する仕組みが必要である。

通信可能時間が不定でも機能するデータ交換手法

動物同士が出会い、通信可能な距離にいる時間は短いと考えられ、またその時間も明らかではない。そのような場合でも、システムが機能するのに必要な通信を実現する仕組みが必要である。

低頻度の遭遇回数でも有効なデータ転送手法

動物同士の遭遇回数は少ないと考えられるが、その中でもなるべく多くのデータを回収する必要がある。DTN ではデータを交換することで拡散させ届けるが、動物個体の移動パターンなども考慮し、より効率的にデータを交換す

る仕組みが必要である。

一方で、耐遅延特性と効率的なルーティングに関しては、先行研究で既に多くの検討がなされているため本稿では議論しない。例えば、Epidemic Routing 方式 [11] や Spray and Wait 方式 [12] 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 [13]、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 [14] 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おり、これらの技術を本研究においても応用できると考えている。

4. 提案手法

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(図 2)。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。

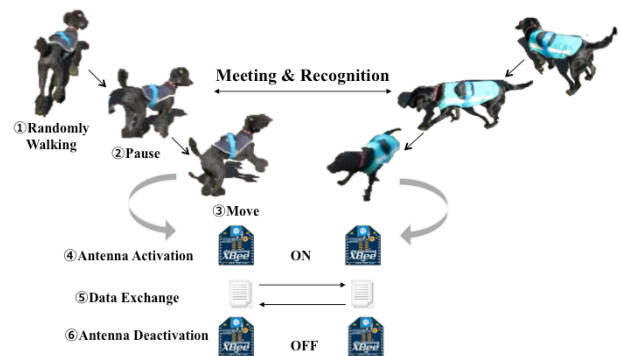


図 2 動物同士の接触時(すれ違い)における習性行動を利用したデータ転送の概要

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。

4.1 動物個体同士の接近検出

本研究では、3 軸加速度センサーで動物個体同士の遭遇を認識し、その時に通信機器の Wake 制御を行なう事により効率的なデータ運搬を実現する。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、動物の習性行動に基づくアルゴリズムを開発した [15]。図 3 はイヌの散歩時に他のイヌ個体と遭遇した

時の3軸加速度センサーの合成加速度である。遭遇を認識するための静止時間があつた後、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読み取れる。そこで、3軸加速度センサーのL2ノルム $\|A\|$ を20Hzの頻度で取得し、閾値 T_0 を用いて動物の静止状態を判定する。静止と判定された場合は、経過時間 t を静止時間の閾値の下限 t_0 と上限 t_1 と比較し、条件時間内で静止状態から動作状態に移行した場合に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。それぞれの閾値は個体の習性、生息環境や対象個体に対する興味や関心に応じて異なるため、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。

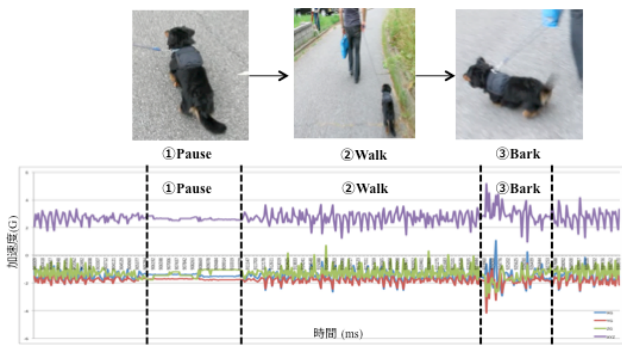


図3 他のイヌ個体と遭遇した際の動作と3軸加速度センサーのデータ比較

4.2 遭遇履歴を用いたデータ転送

通信開始後のデータ転送の際には、遭遇した個体間の行動の違いにより通信開始時刻がずれることを考慮する必要がある。その上で、送信と受信の順序を決定し、継続的にデータ転送を実現する必要がある。そのため、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(図4)。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。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。なお、基本的に1対1通信を想定するうえノードの密度が低いため、隠れノード問題に関しては今回は考慮しない。

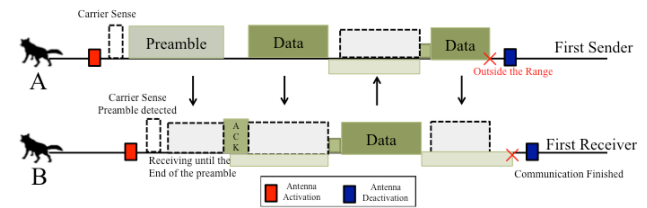


図4 動物同士の接触時(すれ違い)の習性行動を利用したデータ送受信

4.3 中継ノードの概念と重み付け

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を行う。同じ種の動物でも、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に個体差がある[8]。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の違いが存在することが報告されている。このため、最大行動域が広い動物個体が中継ノード(リレーノード)の役割を担うよう、他の動物個体との遭遇回数が多い個体がデータ送受信の際データ受信側になりやすい仕組みを取り入れる。遭遇回数が多い程Carrier Senseの回数を増やすことで、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。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、ねぐら基地局へのデータ到達可能性が高まる。

5. 評価実験

5.1 対象動物について

本研究では、対象とする野生動物にアライグマを想定している。アライグマは環境省より1994年から有害鳥獣に指定され、2005年からは特定外来生物として戦略的な防除が計画されている。一般的な野生動物の捕獲は原則的に禁止されているが、免許があればアライグマは捕獲が可能であり、既にGPSロガーを装着した先行研究は存在する[5][8]。そのため、機器を装着する野生動物をアライグマに設定した。一方、評価実験において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、イヌを使用した。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[16]、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[17]。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匹用意した。犬種や体重，体高，雄雌に差を持たせ，野生のアライグマの個体差を想定した実験とした。

5.2 使用機器

実験では，Arduino UNO R3 を基盤機器として使用し，通信には ZigBee を使用した (図5)。Arduino はハードウェアのプロトタイプ開発に広く利用される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を拡張でき，XBee を利用することで ZigBee 通信が利用できる。また加速度センサーは Lily Pad の3軸加速度センサー (ADXL335) を使用し，データは専用シールドに搭載されている Micro SD に保存している。また，実験の正確な記録のために，リアルタイムクロック (DS1307) 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 (図6)。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 [8] 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。

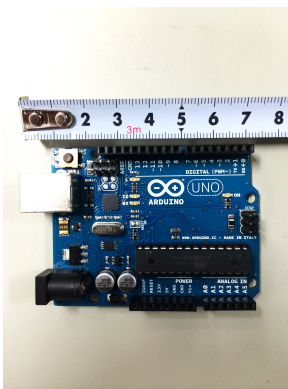


図5 Arduino UNO R3

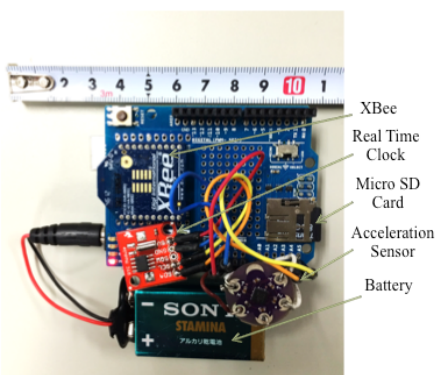


図6 使用した各機器

5.3 Wake 制御の予備実験

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予備実験を行った。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。この実験を30秒毎に1回，1セット3分×5回行った (合計30回)。実験では3軸加速度センサーの特徴量の取得に加えて Dog A の認知行動を動画撮影により把握した。

実験では，静止時間の閾値を $1.0s < t < 10.0s$ と仮定し，静止状態の判定に用いる合成加速度の閾値を変化させ評価を行なった。表1に結果を示す。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であり，閾値が0.2のときボールの検出成功率は約89%であり，高い再現性があると言える。適合率は，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。適合率は閾値が0.2のときに21%と高くなく，合成加速度の閾値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ることがわかる。

表1 通信機器 Wake 制御の実験結果 (合計15分で30回)

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%

5.4 データ転送手法の評価実験

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) を用いて図7に示す60m×40mの駐車場にて，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。それぞれのイヌに機器を装着し，合計3回の実験を行なった。Dog B は予備実験と同様1回の実験で他のイヌとの遭遇回数を計30回と定め他のイヌについては遭遇回数を定めていない。

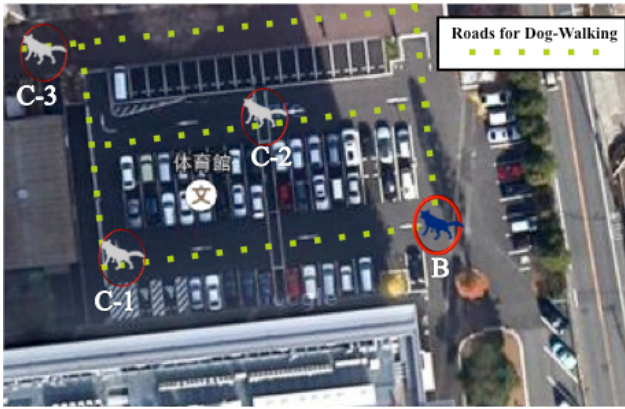


図 7 複数のイヌを用いた実験環境

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る。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、Encounter (Ent) としてその数を記録する。提案するプロトコルで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 AT モードを利用する。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。図 8 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 させて、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る。図 8 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。図では、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。

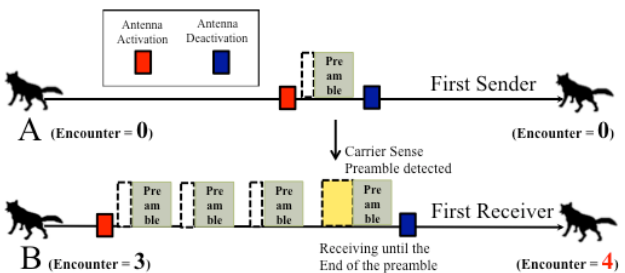


図 8 遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコル

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る。既に述べた遭遇数に基づく Preamble 送受信プロトコルに対して、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個体ほど Preamble フレームを受信する確率が高くなり、中継ノードの重み付けを実現している。図 9 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。図 9 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。

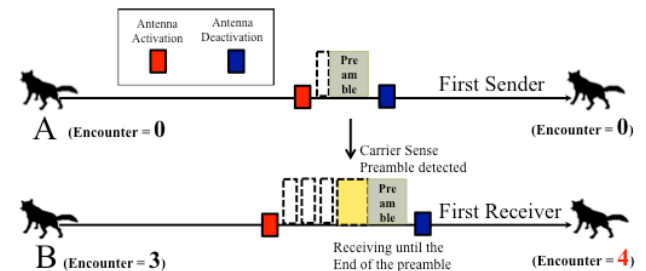


図 9 遭遇数に基づく Preamble 受信プロトコル

実験では、Carrier Sense の Idle 時間を 220ms、Preamble フレームの送信時間を 1,000ms とする。また通信機器 Wake 制御アルゴリズムにおける静止時間の閾値を $1.0s < t < 10.0s$ 、静止判定の合成加速度の閾値 $T_0 = 0.2$ と仮定した。また、比較のために XBee ライブラリ [18] を使用して実装した CSMA/CA を用いたプロトコルも用いている。

5.5 評価

まず、イヌ同士の遭遇時の通信機器 Wake 制御アルゴリズムの評価を表 2 に示す。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 [15]。

次に、各プロトコルでの Preamble フレームの送受信確率

表 2 通信機器 Wake 制御アルゴリズムによる検出成功の割合

Threshold for Synthetic Acceleration	Dog A vs Balls	Dog B vs Dog C-1,2,3 (ex.1)	Dog B vs Dog C-1,2,3 (ex.2)
≤ 0.2	89.2%	70.0%	73.3%

の評価を行なう。表 3 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。ただし Standard では送受信のノードが固定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、Dog B 以外は表には記載していない。提案手法では、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。

表 3 イヌ同士の遭遇時の Preamble フレームの送受信の成功率

Proposed Protocol for Data Exchange	Dog B	Dog C-1	Dog C-2	Dog C-3
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

各プロトコルでの通信時間を述べていく。図 10 に、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%としたグラフを示す。Dog C-2 では提案プロトコルにより通信時間を大きく削減出来ているが、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、プロトコル毎の通信時間の比較から、20 分間における消費電力を表 4 に記した各機器の仕様から算出し、図 11 に示した。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。図 10 の通信時間の比較と傾向は似ており、通信時間と消費電力量の相関があることが分かる。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であることが示された。

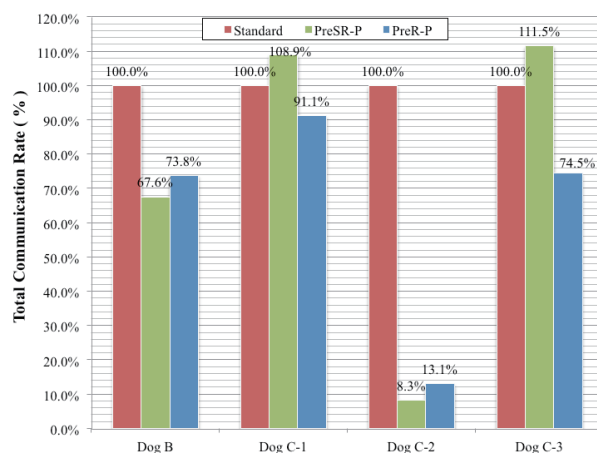


図 10 各プロトコルでの通信時間の比較

表 4 各機器における消費電力

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 μA (3 V)

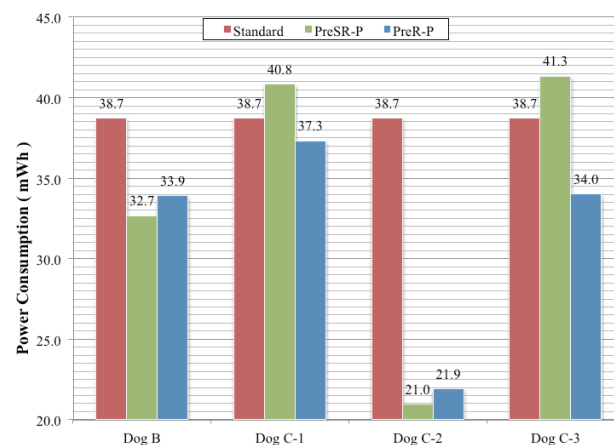


図 11 各プロトコルでの消費電力量の比較

6. おわりに

本稿では、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ことから、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ことから、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。本研究の成果は、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共同研究が進展していこう。この研究が、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

実験に協力いただいた麻布大学伴侶動物学研究室の永澤美保特任助教、片山真希氏他研究室の皆様へ感謝します。

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 edition (2013).
- [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 (2011).
- [3] 吉田 聡：放射性物質の森林生態系での動態，放射線医学総合研究所。
- [4] 小林博樹：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 (2012-2013).

- [5] Berentsen, A. R., Dunbar, M. R. and Fitzpatrick, C. E.: Raccoon Rabies Research Using Remote Download GPS Collars in an Urban Environment, *Proceedings-Vertebrate Pest Conference* (2010).
- [6] 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, *IEICE Communications Society Magazine*, Vol. 2011, No. 16, pp. 16.57-16.68 (2011).
- [7] Tovar, A., Friesen, T., Ferens, K. and McLeod, B.: A DTN wireless sensor network for wildlife habitat monitoring, *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010 23rd Canadian Conference on, IEEE*, pp. 1-5 (2010).
- [8] 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, 酪農学園大学紀要. 自然科学編, Vol. 25, No. 2, pp. 311-319 (2001).
- [9] : FABEE (Fukushima Acoustic and Behavioural Ecology Exchange), <http://fabee.jp/>.
- [10] 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).
- [11] Vahdat, A., Becker, D. et al.: Epidemic routing for partially connected ad hoc networks, Technical report, Technical Report CS-200006, Duke University (2000).
- [12] Spyropoulos, T., Psounis, K. and Raghavendra, C. S.: Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks, *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, ACM, pp. 252-259 (2005).
- [13] 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, 第5回 広域センサネットワークとオーバレイネットワークに関するワークショップ (2011).
- [14] 小山由, 水本旭洋, 今津真也, 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, pp. 1-7 (2012).
- [15] Houpt, K. A.: *Domestic animal behavior for veterinarians and animal scientists*, John Wiley & Sons (2011).
- [16] 長崎県農林部農政課: アライグマ対策の手引き (2014).
- [17] : ペットフード協会, <http://www.petfood.or.jp/data/chart2010/01.html>.
- [18] : xbee-arduino, <https://code.google.com/p/xbee-arduino/>.