

## 野生動物行動による DTN の技術要件に関する検討

安田 真悟<sup>†</sup> ラズバン ベウラン<sup>‡</sup> 崔 舜星<sup>¶</sup> 三輪 信介<sup>†</sup> 篠田 陽一<sup>§</sup>

情報通信研究機構

<sup>†</sup>サイバー攻撃検証研究室 / <sup>‡</sup>テストベッド研究開発室

北陸先端科学技術大学院大学

<sup>¶</sup>大学院教育イニシアティブセンター / <sup>§</sup>情報社会基盤研究センター

## Study of Technology Requirements for Wild Animal Oriented DTN

Shingo Yasuda<sup>†</sup> Razvan Beuran<sup>‡</sup> Sunseong Choe<sup>¶</sup> Shinsuke Miwa<sup>†</sup> Yoichi Shinoda<sup>§</sup><sup>†</sup>CYBER RANGE LABORATORY / <sup>‡</sup>NETWORK TESTBED RESEARCH AND DEVELOPMENT  
LABORATORY

NATIONAL INSTITUTE OF INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY

<sup>¶</sup>CENTER FOR GRADUATE EDUCATION INITIATIVE<sup>§</sup>RESEARCH CENTER FOR ADVANCED COMPUTING INFRASTRUCTURE  
JAPAN ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 概要

FABEE/WAOC Project では森林環境における自然環境、野生動物の生態モニタリングを目的として、センサーネットワークや遅延耐性ネットワーク技術を応用した、動物指向クラウドの構築を目指し研究を行っている。自然環境に設置される固定センサー、動物に取り付ける移動センサーの役割分担、全体のシステム設計・最適化を行う為には実際の想定環境を基にした、システムの検討・検証が必要となる。本稿では、動物の移動モデルとして Homesick Levy Walk を用いて、センサー群の移動・すれ違いをシュミレートし、遅延耐性ネットワークを適用した場合の情報伝播、デバイスの役割分担、時刻同期手法を検討した。

## 1 はじめに

野生動物の生態調査には、音声・映像・行動軌跡・気象などの情報が用いられる。これらの情報は、ねぐらや獣道付近に設置したビデオやマイク、動物に装着させる GPS ロガーや FM 発信器などによって収集される。しかし、これまでの調査手法は人手に頼る部分も多く、観測対象の森林が広範囲に及び観測者が巡回することが困難であったり、放射能汚染などで対象となる森林に観測者が立ち入ることが困難である場合などでは効果的な観測ができない。

この様な安定的な通信が困難な地域でネットワークを構築する為には、遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay/Disruption/Disconnection Tolerant Net-

working) を利用した情報収集・転送技術が提案されている [1] [2]。しかし、DTN の構築に必要な技術や最適な設計は、ノードの移動特性による通信環境の変化や不連続性の時間粒度によって異なり、汎用的な設計はまだない。そこで我々は、森林地域への立ち入り作業を最小限に抑えて長期のモニタリングを可能とする、センサーネットワークや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 (WAOC: Wild Animal Oriented Cloud/Crowd Network) [3] の開発を目指し、ネットワーク設計と技術課題の検討を行っている。動物指向クラウドネットワークを構成するノードは、低消費電力で通信が可能である IEEE802.15.4 [4] を用い、動物をキャリ

アとしてデータを運搬・リレーすることで広域の森林環境でも効率的にデータを収集可能する事を検討している。しかし、野生動物の生態、とりわけ生態の変化を調査するための長期のモニタリングを行う場合、キャリアとなる動物の生態、センサデバイスのバッテリー等、ネットワークを設計する上で考慮すべき事項は多い。また、広域にわたる機器の設置、動物への通信デバイスの装着を行った場合、ソフトウェアの不具合などの改修は困難であり、事前に十分な検証を行って実際の運用を行う必要がある。

本稿では、このようなネットワークにおける、各デバイスの役割や、通信プロトコルを最適化する為に、想定環境を定義して設計に必要なパラメータを導出する手法を検討する。そして、テストケースを基に、WAOC Network を設計する為に必要な自然環境での野生動物の移動をシミュレートし、野生動物行動によるDTNの有効性を検討する。また、シミュレーション結果に基づきWAOC Networkが必要とする通信技術の技術要件を明らかにする。

## 2 関連研究

### 2.1 センサネットワーク

ワイヤレスでの機器制御、環境情報や人の行動等の様々な情報を収集するために、RFIDやBluetooth、IEEE802.15.4を基盤とするZigBee [5]や6LoWPAN [6]を利用して、センサーネットワークを構築し情報を収集・活用する研究が多く行われている。地域児童見守りシステムモデル事業 [7]では、主にRFIDとBluetoothを用いた児童の自動監視を全国各地で行った。しかし、これらのセンサネットワークは、電気やセンサの基地局までのネットワークインフラの整っている環境を想定しており、本稿で想定するような森林環境での長期運用に応用するには、ネットワークインフラや電源の確保、省電力化において課題がある。

### 2.2 動物ウェアラブルデバイス

コンピュータの小型軽量化、低消費電力化によって希少種生物の生態解明をウェアラブルデバイスやリモートセンサを用いて行うBio-Logging Scienceが行われている [8]。これらの研究領域では、動物にGPSセンサカメラなどの機能を持ったウェアラブル

デバイスを動物に装着し情報を収集している。しかし、センサが記録した情報を収集するには、観測者による対象地域の巡回や、航空機などで上空通過する事により、センサの電波到達範囲に接近し情報を収集を行っているため、データ収集にかかる運用コストが課題となっている。

### 2.3 遅延耐性ネットワーク

安定的かつ低遅延なネットワーク接続が困難な極限環境や、移動環境を想定したネットワーク技術として、DTNが提案されている。それぞれのノードに継続的なネットワーク接続性がなくとも、ノード同士のすれ違いなどによる、間欠通信環境でのルーティングによるデータ通信を行えるのが特徴である。DTN上での効率的なルーティングを目的としてEpidemic Routing [9]や、Spray and Wait [10]などの拡散型アルゴリズムや、ProPHET [11]、TCTR [12]等の学習型アルゴリズムなど数多くの研究が行われている。しかし、動物ウェアラブルデバイスや森林環境への適応例は少なく、またノードの役割や通信プロトコル、ルーティング方式の最適な設計は、ノードの移動特性による通信環境の変化や不連続性の時間粒度によって異なり、汎用的な設計はまだない。その為、対象ノードの移動特性、計算量、消費電力特性などに各技術要素の適用性を検証する必要がある。

### 2.4 動物の移動モデル

野生動物の移動過程の予測・推定はこれまで困難であったが、バイオロギング・バイオテレメトリー技術の進化によって明らかになってきている。Levy Walk (Flight) [13]は、人や動物の移動距離の確立分布がべき乗則に従うとした調査結果により提案されている。しかし、人などの家を持つ生物の行動を数日～数年の単位でモデル化を行うためには、帰宅行動を考慮する必要がある。Levy Flightに指定確率に基づいて帰巣行動を取るモデルを追加したHomesick Levy Walk [14]が提案されている。Homesick Levy Walkは人のすれ違い頻度の長期的な観測結果ら導き出されているが、Levy Walkが動物の行動にも見られるとの結果から、ねぐらを持つような動物の移動モデルとしても近似可能であると考えられる。しかし、これまでに明らかになっているこれらの移動モデルには従わない移動パターンを持つ動物もいる

事も指摘されており [15], 種別による違いも大きく, 単一の最適なモデルは無い. その為, さらなる動物の生態観測と研究が期待されている.

## 2.5 ワイヤレスネットワークテストベッド

森林環境への巣穴センサの設置, 動物への首輪センサの設置を行った後, ソフトウェアに何らかの不具合があったとしても, 回収してソフトウェアの改修等を行うことは非常に難しい. その為, 事前にネットワークを構成するソフトウェア群の検証が重要となる. また, WAOC で得られた離散的なデータを解析する為にも, ワイヤレスネットワークのエミュレーション環境が必要となる.

ネットワーク実証実験環境である StarBED [16] では IEEE 802.15.4 等の通信エミュレーション, ユビキタス環境エミュレーション技術を組み合わせたモバイルワイヤレスネットワークエミュレーションテストベッド QOMB の研究を行っている [17]. QOMB は電波環境をエミュレーションするモジュールや通信デバイスのエミュレーションを行うモジュールなどから構成されている. そして, ノードの移動モデルやノイズ源, 障害物をパラメータとして与えることでユビキタス環境での大規模なネットワークエミュレーションを行うことが可能である.

しかし, 現状のシステムは人間が持ち歩くデバイスや車載デバイスを想定した市街地や屋内での環境再現を想定して設計されており, 本研究で必要とする地形やアンテナ地上高による電波電波の変化など森林環境の再現に必要なパラメータを再現する機能はない. 今後, 既知の電波伝搬モデルと地形情報を組み合わせてシミュレーションすることで森林環境での通信エミュレーションにも対応可能なワイヤレスネットワークエミュレーションが行えると期待できる.

## 3 動物指向クラウドネットワークの概要

本研究では, 動物指向クラウドネットワークを実現するために, 図1のような首輪型のデバイスとねぐら近辺に設置する基地局デバイスによって構成されるネットワーク(首輪+ねぐらネットワーク)を提案する. これまでの, ウェアラブルデバイスを用いた計測では, デバイスを回収することでデータを取得

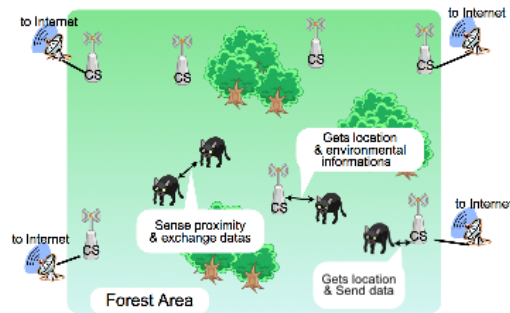


図1: Collar + Cocoon Network

していた為, 人的コストも高く, まだ同一個体の長期観測を行うためにデバイスの寿命を延ばした場合, データ取得までの遅延時間が大きくなる. また故障などでデバイスが消失した場合に, 故障する迄のデータも取得出来なくなる. DTNを用いることで, デバイスを長寿命化し長期観測を行った場合でもデータの取得率を上げる事が可能となり, またデータの取得までの遅延時間も短縮可能する事が出来る.

本研究の対象動物としては, アライグマ, タヌキなどのねぐらを持つ動物を想定している. 動物の生活拠点付近に固定的に設置し, 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ねぐら基地局と呼ぶ. ねぐら基地局は環境情報を取得するセンサと 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, 森林内部に設置するねぐら基地局は外部への定常的なネットワークは確保しない. また, 動物に装着し動物の移動・接触のモニタリングとねぐら基地局の観測データを含めた, データの送信・転送を行うデバイスを首輪ノードと呼ぶ. そして, ねぐら基地局と首輪ノードで構成されるネットワークを首輪+ねぐらネットワークと呼ぶ.

動物の生態や森林の環境情報を解析するために一般的には表1のような情報を収集, 解析する. 様々な解析を行うためには, 多様な情報の情報取得が必要であるが, 食性や, 直接的な死因などの情報は, 糞尿などの収集や解剖を行う必要があり, センサー取

表 1: Informations of Wildlife/Environment

Environment	Temperature, Humidity, Pressure Wind Direction/Speed, Rainfall Air Contaminant, etc.
Wildlife	Movement Pattern, Survival Info Reproductive Activity Contact, Feeding Habit, etc.

集は困難である。一方で、環境情報全般や、動物の移動パターン、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、推定が可能であると考えられる。本研究では、各種センサーで取得可能な情報と、センサーの組み合わせや条件から、推定可能であると考えられる情報をネットワークの設計に取り込み、より多くの情報の収集を可能とするネットワークを目指す。

まず、センサと取得した情報を伝送するネットワークデバイスには以下のような技術要件が必要となる。

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

環境情報は、位置情報とともに定点観測する事で取得可能であるため、センサを立ち木などに固定して設置可能である。そのため、重量の制限は厳しくなくソーラーパネルによる電源供給なども行えるため、消費電力に対する制限も緩く設定できる。それに対し生態情報はそれぞれの個体を継続して観測する必要があるため、動物に首輪などで固定して観測する必要がある。動物ウェアラブルデバイスは、装着している動物へ影響を与えないため、首輪に装着するデバイスの総重量は動物の体重の4~5%以下である必要があるとされている [18]。また、バッテリー・機器の交換のために対象動物を繰り返し捕獲する事も、

捕獲作業のコストや動物への影響から好ましくない。そのため、動物に装着するセンサとネットワークデバイスは小型軽量、長寿命であることが要求される。

一般的に動物の生態観測で利用されている、FM 発信器は、発信機能のみの単機能デバイスであるため、外部観測的に対象動物の位置情報を取得することができるが、対象動物同士の接触、繁殖活動を推定することは困難である。しかし、動物に装着するウェアラブルデバイスに送受信機能を付加する事で、対象動物同士の接触情報をウェアラブルデバイス同士で自律的に取得する事が可能となる。

ねぐらを持つ動物はねぐらや餌場などの拠点を中心とした生活圏を持つ。そのため、環境情報を取得する固定センサは、対象動物の拠点の近くに設置することで動物との接近頻度が高くなり、同時に環境情報の移動性が高くなると考えられる。

この首輪+ねぐらネットワークによって広範囲なエリアで低コスト且つ多彩な情報を取得可能な動物指向クラウドネットワークの構築することが可能であると考えられる。

## 4 技術課題

先行研究で我々は WAOC の技術課題、プロトタイプを用いた森林環境での電波伝播特性を明らかにした [19]。それらの技術課題のうち、ノードの時間同期手法、ルーティングを選定していくためには、想定環境でのノードのすれ違い間隔、情報の伝搬速度の検討が必要となる。本章では、ノードの時間同期・プロトコル要件と移動モデルとの関連性について述べる。

### 4.1 ノードの時間同期

IEEE802.15.4 デバイスの多くは、間欠通信を行い、通信を行わない間はモジュールを Sleep することで消費電力を低減する機能を持っている。電力消費を抑えデバイスの駆動時間を延ばすためには、Sleep 時間を長く設定すれば良いが、デバイスを Sleep している間は、データの送信だけでなく受信も不能になり、必要な情報が取得できなくなる可能性があるため、取得したい情報、必要な情報の特性に合わせて Sleep 時間、Wake 時間を調整する必要がある。我々は先行研究により、観測対象の動物の移動速度や交

尾にかかる時間からノードの Sleep 間隔を設定することが可能であり、平均接触時間または対象動物の交尾の時間の1/2の短い方に合わせて設定するのが妥当であると述べた。

しかし、小型のノードに搭載されるクロック IC のみの精度では温度、電圧、個体差などの揺らぎにより同期状態を維持できない。通常はリアルタイムクロックによる精度向上がはかられるが、気候などの悪条件により年単位で十分な時刻誤差に抑えることは困難であると推測される。日本をはじめとする標準電波の送信が行われている国では GPS モジュールより小型・省電力を実現可能な、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 等を搭載することにより時間同期をする手法も考えられる。しかし、野生動物が行動する森林内地上数十センチといった特殊な環境は標準電波の利用環境としては想定されておらず、また、装着動物の冬眠などにより首輪ノードが長期間穴などに入る場合もあるため、このような LSI 単独で時間同期を行うことは困難であると考えられる。

動物の移動に伴って、高頻度でねぐら基地局と通信が行われる場合、時刻同期は GPS を基準に時間補正機能を有するねぐら基地局の基準信号をにより同期可能である。しかし、対象の動物がねぐらを持たない場合や、基準となるねぐら基地局の密度が十分でない場合には、首輪ノード同士の通信による時刻補正も必要となる。

#### 4.2 ルーティングとデータのライフタイム

森林環境で動物をキャリア(ノード)として DTN を考えた場合、構築されるトポロジ・将来の動作は非決定的である。そして、通信帯域、各ノードのデータ記憶領域に制約があることから、通信コストが下げられ、データのコピー数を抑制できる ProPHET や TCTR 等の学習型アルゴリズムに基づくルーティングが有効であると考えられる。しかし、情報伝播の速度と、端末のメモリ量、情報のライフタイムのバランスによっては、ルーティングプロトコルを単純化し、計算量を減らす方が端末の消費電力上有効である場合もある。そのため、生成される情報量、動物の移動・すれ違いによって得られる情報伝播速度を鑑みて、最適な情報のライフタイムやルーティン

グ手法を検討する必要がある。

## 5 移動・伝播モデル

本章では、動物を対象とした移動モデル、動物・ねぐらノードでのデータ伝播モデルを検討する。

### 5.1 移動モデル

動物をノードとした場合の移動モデルは、種別による違いも大きく、単一の最適なモデルは無い。ノードの移動をシミュレーションする場合、一般的には単純な線形移動や Random Walk 等が用いられる。しかし、生物の移動においては Random Walk とは乖離が有り、実際の行動データの解析からいくつかの動物は Levy Walk [13] に従う傾向があると報告されている。人間においては、帰巢行動(帰宅)があるため、帰巢行動を Levy Walk に組み込んだ Homesick Levy Walk [14] に従う事が報告されている。そこで、本稿ではパラメータ決定用を行う為に既知の推定移動モデルとして、ねぐらを持たない動物は Levy Walk, ねぐらを持つ動物は Homesick Levy Walk を用いた移動推定を検討した。

Levy Walk は1回の直線的な移動距離を  $L$  としたときに、 $L$  の分布  $P(L)$  が、式1の様な、べき乗則に従うとするモデルである。この時の移動軌跡は図2左のようになる。しかし、実際には動物の行動範囲には限りがあり、また種別によって行動範囲も異なる。そこで、本稿では1回の目的地までの移動距離  $L$  を式2を用いて生成することとした。ここで、 $M$  は最大値、 $N$  は最小値、 $rand()$  は0~1の一様分布乱数関数とする。

$$P(L) \propto L^{-\beta}, 1 < \beta < 3 \quad (1)$$

$$L = (rand() \times (M^{-\beta} - N^{-\beta}) + N^{-\beta})^{-\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

Homesick Levy Walk の場合図2中央のように目的地の決定時に一定確率で固定の場所(Home)が目的地となる。そして、活動時間終了後にもねぐらへ帰巢する。野生動物の場合はねぐら以外にも水辺、餌場等の場所が存在すると考えられる。その場合、図2右の様な複数の固定地点を Home として設定するモデルと考えられる。設定した Home 等の固定地点以外の目的地の方向はランダムとする。

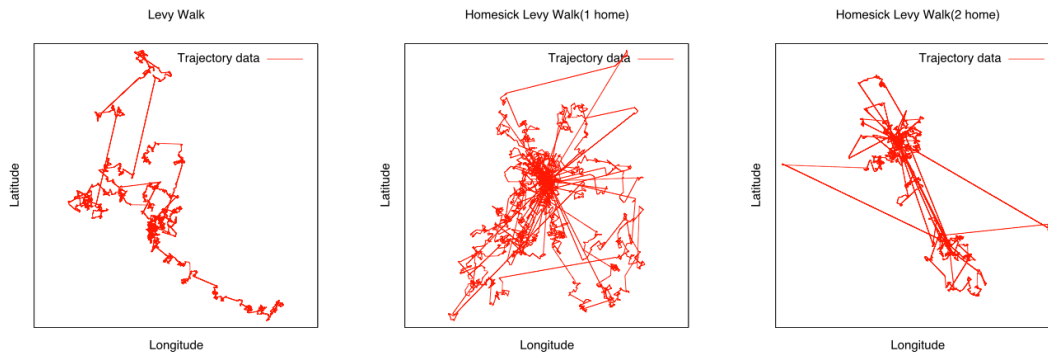


図 2: (Homesick)Levy Walks

### 5.2 データ伝播モデル

データの伝播モデルは、フラッディングでデータ転送した場合、以下のように定義される。総ノード数を  $N$  とする、ある時刻での情報未保持ノード数を  $S$ 、情報保持ノード数を  $I$ 、消失ノード数を  $L$  とする。消失ノードとは、故障や観測圏外へ離脱したノードである。このとき、式3が成り立つ。情報があるノードで生成された場合の情報伝播による、情報未保持ノード数の変化、情報保持ノード数変化、消失ノード数変化は、それぞれ式4-6となる。ここで、 $\gamma$  は単位時間あたりの他ノードとの接触確率と接触時の情報交換成功率の積であり、接触時の転送成功率を  $\alpha$ 、ノードの他ノードとの単位時間あたりの接触回数を  $k$  として式7として得られる。移動モデルから求められる接触回数と、接触時間の平均値を基に“伝播力”，すなわち通信速度や通信成功率などのパラメータバランスが、技術要件としてもとめられる。

$$N = S + I + L \tag{3}$$

$$dS/dt = -\gamma \times (S - S * \theta) \times (I - I * \theta) \tag{4}$$

$$dI/dt = \gamma \times (S - S * \theta) \times (I - I * \theta) \tag{5}$$

$$dL/dt = (S + I) \times \theta \tag{6}$$

$$\gamma = \alpha * k / (S + I) \tag{7}$$

### 6 動物行動に基づく移動シミュレーション

野生動物の長期生態観測技術を行う為には、消費電力の最適化によるデバイスの長寿命化が必須であるが、その為にはデバイスのスリープ間隔や、首輪・ねぐらの各デバイスの役割の最適化を行う必要がある。そのためのパラメータは、対象となる動物の密度、移動モデルによって異なるため、生態が未知の動物であっても、明らかになっている特徴に基づいたシミュレーション、エミュレーションを基に決定する必要がある。本章では、WAOC Network のパラメータチューニングを行うための知見を得るため、既存の移動モデル、動物の生息密度を考慮した DTN の情報伝搬特性の検証を行った。

#### 6.1 想定フィールドのパラメータ

本章で検討した移動モデルに基づき、各ノードのすれ違い・情報の伝搬特性を検証するためには、生息密度(単位面積あたりのデバイス装着个体数)や獣道利用の有無なども重要なパラメータになる。獣道を利用する動物では、市街地の移動モデル同様に“道”が行動範囲を限定するため、すれ違いが発生しやすく情報伝搬の効率が向上する。それに対し、獣道を利用しない動物の場合はより広い範囲を移動するため、すれ違いが発生する確率が低下する。本稿では、アライグマの生態観測を行っている野幌森林公園地域 [20] を参考にシミュレーションを行う各パラメータを設定した。想定観測エリアの広さは、 $5km \times 4km$  の広さの平地とした。本稿ではアライグマを想定としてシミュレーションを行う為、獣道はパラメータ



表 2: Simulation Parameter

Walking Model	Homesick Levy Walk $\alpha : 0.01$ $\beta : 1.5$ max(MALE):2000m max(FEMALE):1500m min : 1m speed : 1m/sec
Number of Animals	100 (MALE:50, FEMALE:50)
Cocoon positions	Random
Area size	2000 ha (5km × 4km)
Time	14 days Active Time: 12 hour / day Rest Time : 12 hour / day

としては用いない。生息密度は、アライグマの低密度状態と定義される密度である 5 頭/km<sup>2</sup> で全生息数は 100 頭と想定した。

### 6.2 シミュレーション

前節までに検討を行った移動モデル、各種パラメータに基づいて動物の空間移動シミュレーションを行った。シミュレーションに用いたパラメータは表 2 に示す。一日の活動時間は 12 時間とし、それぞれの個体の活動時間はおおむね一致していると仮定し、活動開始から 12 時間経過した次の目的地決定時には目的地をねぐらとする設定にした。アライグマのオスとメスでは、行動範囲の大きさに差があることから、オス 50 頭、メス 50 頭を想定しそれぞれ 1 回の目的地計算時の最大長をオス 2000m、メス 1500m とした。移動速度は毎分 1m の一定速度とした。また、シミュレーションは、生息密度に対するデバイス装着个体数の割合による変化も見するために、デバイス装着動物个体数を 100, 50, 25 頭の 3 種類を想定した実験を行った。各デバイス装着動物のねぐらには、ねぐら基地局が設置されている事とし、全体のノード数は 200, 100, 50 ノードである。ノード間の通信が成立(接触)する距離は、先行研究の計測結果 [19] より、100m とした。

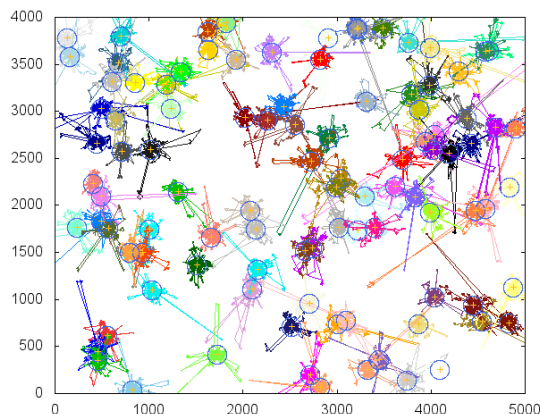


図 3: Trajectory data (1 Day, 100 Nodes)

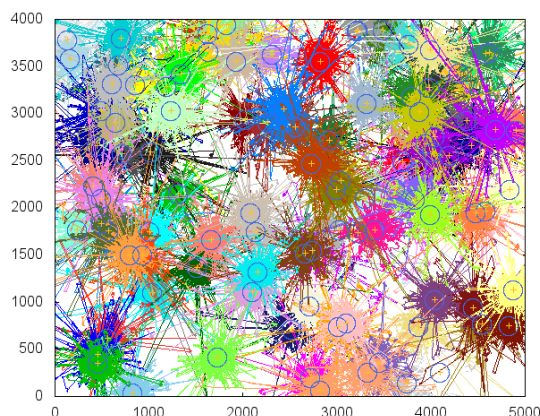


図 4: Trajectory data (14 Day, 100 Nodes)

### 6.3 シミュレーション結果

シミュレーションにより得られた移動履歴 1 日分と 14 日分を描画した物が図 3 と図 4 である。図中の円とその中心点は、個々の動物のねぐらとねぐらを中心とした半径 100m の円を示している。1 日でも他の動物・ねぐらとの接触がある事がわかり、14 日では十分な接触が発生することが確認できる。動物同士の接触、動物とねぐらとの接触回数を計算した物が表 3 である。ねぐらの平均接触時間、平均継続時間は首輪ノードを装着した動物自身のねぐらにあるねぐら基地局との時間は除外している。

対象地域に生息する 100 頭とそのねぐらすべてにデバイスを装着した場合、各ノードは 1 日平均で約 33 回他のノードのねぐら基地局と接触し、他の首輪ノードと約 41 回接触している。装着率 25%(25 頭)の場合であっても、1 日平均 2 回程度他のねぐら基地

表 3: Simulation Result (Average / Day)

Nodes	200	100	50
Node to Cocoon			
Approach Count	33.05	10.15	2.08
Approach Time (sec)	5473.41	2192.5	280.68
Node to Node			
Approach Count	41.23	15.61	4.96
Approach Time (sec)	5584.19	2273.75	545.75

局と接触し、約5回他ノードと接触する事がわかる。各首輪ノードは帰巢時に必ず自身のねぐらに設置されたねぐら基地局と通信が可能であると考えられる。したがって、他のねぐら基地局との接触は、DTN 上での通信機会として重要であり、今回想定した環境であれば、十分に DTN 上で情報が伝播する事が示された。

## 7 技術要件の検討

前章で得られた結果を基に、WAOC に必要な技術要件の検討を行う。

### 7.1 時刻同期手法

シミュレーションの結果から各ノードは1日に数回、自ノードねぐら基地局だけでは無く、他ノードのねぐら基地局とも接触することから、今回想定した環境では、時間同期は首輪ノード同士では無く、ねぐら基地局からの基準信号のみで可能であると考えられる。また、25頭の首輪ノードとねぐら基地局の環境であっても、首輪ノードが他のねぐら基地局と接触することから、Homesick 性が低い、自身のねぐらへの帰巢確率が低い移動モデルを取る生物であっても、時刻同期は可能であると考えられる。

### 7.2 情報の伝播とライフタイム

情報伝播速度と、情報のライフタイムに関する考察を行う。移動・伝播モデルの章で述べた伝播モデルに、移動シミュレーションから得られた値を代入した結果が図5である。なお、接触1回あたりの通信成功率  $\alpha = 0.5$ 、平均消失率  $\theta = 0.0003$ (故障率: 年5%, 域外移動月1頭)として計算している。また、ノード数はねぐらノードを含む 200, 100, 50 ノード

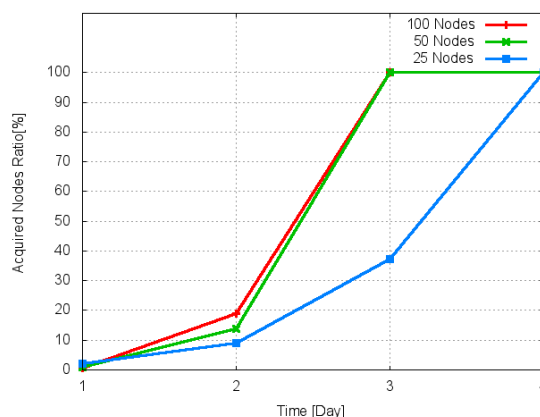


図 5: Data Propagation

表 4: Daily Data Size

Number of Animals	100	50	25
Environment Info (KB)	1440	720	360
Approach Info (KB)	1485.6	257.6	35.2
Total Size (KB)	2925.6	977.6	392.2

である。

100頭すべてにデバイスを装着した場合、2日程度、25頭であっても4日程度で全ノードにデータが伝播する。これらの事から、本稿で想定したエリアとデバイス密度であれば、4日程度のライフタイムで領域内の全ノードにデータが伝播する。これは、情報の到達距離として見た場合、領域の直径に相当することから、実際にはそれ以下のライフタイムで、対外接続が確保されている領域外縁部のねぐらノードまで、データが到達すると考えられる。

### 7.3 通信速度・ルーティングによる転送量削減

ねぐらノードが生成する環境情報のデータは、気温、湿度、風向などのデータであり、1回の情報量は32bit INT 型 10種類として 40Byte 程度、META 情報などを加味しても IEEE802.15.4 の L2 パケット、1パケットで送信可能な 100Byte 程度である。パケットサイズ上限である 100Byte のデータをねぐら基地局が10分間隔で生成し、同様に首輪ノード同士、首輪ノードとねぐら基地局が接触時に接触情報として 100KByte のデータを生成すると仮定をして、ネットワーク内で発生するデータ量を計算した物が表 4



である。1日にネットワーク内で発生する情報量は100頭の場合で3MByte程度であり、25頭にデバイスを装着した場合で400KByte程度である。

情報のライフタイムを25頭の場合でも、全体にデータが伝播される時間4日と仮定した場合1.2MByte～12MByte程度各ノードにストア領域があれば、単純なフラッディングであっても、データ転送が可能であると考えられる。このデータ量は、現在のコンピュータの性能としては十分に小さい。Arduino等の小型組み込みデバイスでは不揮発メモリ領域は数十～数約KByte程度ある事もあるが外部記憶等を搭載する事で、記憶領域を拡張することも可能である。不揮発メモリ領域は書き換え回数に制限があり、データ量の増大は書き換え回数の増加を招く為、ルーティングの最適化を行い情報量の削減を行う必要があるが、伝播情報量とストア領域の関係だけ見た場合、ルーティングによる情報量削減の必要性は低い。

一方で、今回のシミュレーションでは、各ノードが1日に他の首輪ノードやそのねぐら基地局と通信可能となる時間は100首輪ノードの場合で平均で1日約11058秒、25首輪ノードの場合で約826秒であった。IEEE802.15.4の通信速度は低周波数利用時の実効速度で10Kbps程度とされる。その場合各ノード間で通信可能なデータ量は、1日のノード間転送可能情報量は100首輪ノード時で約13.9MByte、25首輪ノード時で1MByte程度となる。この帯域で全データをフラッディングで転送するためには、各ノード間の通信路で、1日の平均実効通信可能帯域の40～60%前後の通信効率を必要とする。このため帯域から見ると全データをフラッディングで伝播するには帯域が不足しており、帯域から考えた場合、ネットワーク全体に伝播する情報量の削減が必要となる。

## 8 まとめ

本稿では、動物生態モニタリング目的として、センサネットワークや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の構築の為に必要な設計パラメータを導出する為に、Homesick Levy Walkを動物の行動モデルとして用いた移動シミュレーションを行った。そして、シミュレーションの結果から、動物

をキャリアとしてデータを運搬・リレーするセンサネットワーク首輪+ねぐら間通信ネットワークにおける情報のライフタイムについての検討を行った。その結果、アライグマをキャリアとして想定したWAOC上では、低密度状態の生息域2000ha、デバイス個体数25頭の場合で4日程度にデータのライフタイムを設定する事で、調査領域内の全ノードにデータが伝播し、Gatewayの役割を持つ調査領域外縁部のねぐらノードであってもデータが到達することが確認された。また、各ノードは1日に数回ねぐらノードと接触することから、時間同期は首輪ノード同士では無く、ねぐら基地局からの基準信号のみで可能である事が示唆された。これらの結果から、野生動物をキャリアとしたDTNが成立し、センサーネットワークとしての有用性が示唆された。

一方で、今回のシミュレーションでは、各ノードが1日に他の首輪ノードやそのねぐら基地局と通信可能となる時間は200首輪・ねぐらノード時で1日平均で約11058秒、50ノードで約826秒であった。WAOC Network上で発生するデータ量を検討した結果、個々のノード間の帯域から見ると全データをフラッディングで伝播するには帯域が不足しており、データの圧縮、ルーティングによるネットワーク全体に伝播する情報量の削減等、ノード間の通信量の削減が必要となる事が明らかとなった。

今後、これらの知見をもとに、必要な要素技術の選定・開発を行い、首輪+ねぐら間ネットワークによる動物指向クラウドネットワークの実現を目指す。

## 謝辞

本論文を書くにあたって有益な助言と協力を頂いた、北陸先端科学技術大学院大学 高信頼ネットワークイノベーションセンター 知念賢一 特任准教授、井上朋哉 研究員、同情報社会基盤研究センター 篠田研究室 明石邦夫氏、東京大学 空間情報科学研究センター 小林博樹 特任助教および関係者各位に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 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. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, Vol. 36, No. 5, pp. 96–107, October 2002.
- [2] K. Kanchanasut, A. Tunpan, A. M. Awal, K. D. Das, T. Wongsaaardsakul, and Y. Tsuchimoto. Dumbonet: a multimedia communication system for collaborative emergency response operations in disaster-affected areas. *International Journal of Emergency Management*, Vol. 4, No. 4, pp. 670–681, 2007.
- [3] FABEE Project. <http://fabee.jp>.
- [4] IEEE802.15.4 WPAN-LR Task Group. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.
- [5] ZigBee Alliance. <http://www.zigbee.org>.
- [6] J. Hui and P. Thubert. IPv6 Datagrams on IEEE 802.15.4, RFC6282. September 2011.
- [7] 地域児童見守りシステムモデル事業事例集. [http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/top/local\\_support/pdf/ict\\_service\\_kids2.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/top/local_support/pdf/ict_service_kids2.pdf).
- [8] I. L. Boyd, A. Kato, and Y. Repoert-Coudert. Biologging science: sensing beyond the boundaries. In *National Institute of Polar Research Spherical Issue, No.58*, pp. 1–14, 2004.
- [9] A. Vahdat and D. Becker. Epidemic routing for parially-connected ad hoc networks. Technical report, Duke University, 2000.
- [10] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C.S. Raghavendra. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In *ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pp. 252–259, 2005.
- [11] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelen. Probabilistic routing in intermittently connected networks. In *Lecture Notes in Computer Science, Vol.3126*, pp. 239–254, 2004.
- [12] 落合秀也, 江崎浩. DTN 環境を想定したトポロジ変化に強いメッセージルーティング. *情報処理学会論文誌*, Vol. 50, No. 9, pp. 2312–2326, September 2009.
- [13] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, and S. Chong. On the levy-walk nature of human mobility. In *Proc. INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 924–932, 2008.
- [14] A. Fujihara and H. Miwa. Homesick levy walk and optimal forwarding criterion of utility-based routing under sequential encounters. *Internet of things and inter-cooperative computational technologies for collective intelligence, Studies in Computational Intelligence*, Vol. 460, pp. 207–231, 2013.
- [15] S. Benhamou. How many animals really do the levy walk? *Ecology*, Vol. 88, No. 8, pp. 1962–1969, Aug 2007.
- [16] StarBED Project. <http://www.starbed.org>.
- [17] R. Beuran, L. T. Nguyen, and Y. Shinoda. QOMB wireless network emulation testbed: Evaluation and case study. In *5th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiN-TECH 2010), in conjunction with MobiCom 2010, Chicago, Illinois, USA,*, pp. 1–8, Sep 2010.
- [18] 板生清. ウェアラブル環境情報ネットワーク技術とその応用. *FED ジャーナル* Vol.11 No.3, pp. 25–33, 2000.
- [19] 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.
- [20] 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, feb 2001.