

DTN 環境において任意地点でデータ回収を可能にする シンクノード機能割当方式

岸田隆祐^{†1} 塚田晃司^{†2}

概要：近年、気象データの収集を初め、地震や土砂崩れのような自然災害への対策など、様々な用途においてセンサの利用が進んでいる。しかし、電力・通信インフラが十分に整備されていない山間部などの地域では、各種センサを設置してもデータの回収は人手に頼らねばならず、回収にかかる負担は大きくなる。本研究ではセンサネットワークを構築し、作業をするために山に入る車を、無線通信を行う回収車として利用する。想定環境では、移動経路、作業場所ともに複数あるため、従来のようにシンクノードの設置場所を決めることが困難であると考え、最終的にデータを集約するシンクノードの役割を、複数のノードから停車位置に合わせて選択できるセンサネットワークを提案する。

キーワード：センサネットワーク, DTN, シンクノード

Assign roles of sink-node to gather data at any point in DTN environments

RYUSUKE KISHIDA^{†1} KOJI TSUKADA^{†2}

1. はじめに

近年、気象データの収集を初め、地震や土砂崩れのような自然災害への対策など、様々な用途においてセンサの利用が進んでいる[1]。また、動植物の研究や教育を目的とした観察のためのカメラやビデオなども設置されており、センサデータと同様に回収する必要がある[2]。しかし、人々の暮らす場所を外れた地域は、電力・通信インフラが十分に整備されておらず、断続性が高く大きな伝送遅延が生じる劣通信環境となっている。このような状況では、各種センサを設置してもデータの回収は人手に頼らねばならず、回収にかかる負担は大きくなる。こうした環境下でも、データの高い到達性を実現する遅延耐性ネットワーク(DTN: Delay Tolerant Networking)の研究が盛んに行われている。

日本において、電力・通信インフラの整備が行き届いていない地域の多くは中山間地域と呼ばれる地形である。センサが設置される場所についても、気象条件などの要因によって容易に近づくことができない、危険が伴うといった問題がある。これらのような回収の負担が軽減されなければ、センサの設置が進まず、必要なデータを取ることができない、または回収が進まず活用されないといった本来の目的の達成が望めない。

本研究の想定環境として、和歌山県古座川町にある「北海道大学北方生物圏フィールド科学センター森林圏ステーション和歌山研究林[3]」(以下、研究林)をモデルに進めて

いく。センサが設置されている場所は電力が供給されておらず、太陽光発電によって補われている。また、インターネット接続が可能なエリアから孤立しており、業務に携わっている人々の拠点である事務所と設置場所には距離があるため、センサネットワークを構築しても回収のためには必ず近づく必要がある。

こうした環境において、センサデータ回収に向かわなければならない車をメッセージフェリーとして利用する。フェリーと各種センサが無線通信を行うことでデータを回収し、事務所まで運ばせる。しかし、山間部での移動は容易ではない上に敷地も広大なため、全ての設置場所を毎回訪れなければならないというのは、本来の業務に支障をきたす。

また、センサネットワークを構築し、シンクノードに集めていてもその場に必ず立ち寄るとは限らず、樹木といった障害物のある環境で近くを通過するだけでは満足な回収ができない可能性がある。わざわざ立ち寄ることなく、安定して長時間にわたり通信を行えるのは、人々が業務に携わっている間に車を停めているときである。そのため、停車位置に近い端末にシンクノードの役割を担わせることで、回収にかかる負担の低減を目指す。

2. 関連研究

メッセージフェリー方式は、移動端末をフェリーノードとして使用し、効果的なデータ転送を行う転送方式である。メッセージフェリー方式は、災害時における救助活動のための情報共有、広域エリアのセンシングなど、様々な状況で使用可能である。また、隔たれたエリア間を移動する端

^{†1} 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering Wakayama University

^{†2} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering Wakayama University

末に収集したデータを運搬させることで、情報の共有が実現できる。

[4]では、メッセージフェリーを用いる最も単純な想定環境として、位置が既知である固定ノードに対する単一フェリーの経路決定手法を提案している。メッセージフェリングでは、フェリーの経路長がメッセージの遅延時間、配送率などのパフォーマンスへの影響が大きいことから、全ての固定ノードを最短時間で巡回するための経路を、巡回セールスマン問題 (TSP) の近似的なアルゴリズムを用いることで決定している。

また、[5]では、移動ノード数や移動経路に応じて、回収できるセンサデータに偏りが生じる問題について、収集量の偏りの低減する手法を提案している。センサノード毎に、収集が容易なノードと難しいノードを分類し、クライアントが発行するクエリからフィルタを作成する。そのフィルタの情報を共有し、ノード毎にセンサデータの拡散の上限を設けることで、収集の難しいセンサノードが生成するセンサデータのサーバへの到達性を高めている。

これらのように、メッセージフェリーに関する研究では、絶えず移動を続けることが前提となっているものが多い。しかし、本研究は、1章で述べたように、長時間一か所に留まることを前提とするため、それに対応するものが必要となる。

3. 提案システム

3.1 提案手法の目的

本研究は、インターネットに接続することが可能なエリアから離れた場所にセンサが設置された環境を想定している。人里から離れた山間部において、気象観測用のセンサや、動植物の観察を目的としたカメラやセンサからデータの回収を行うための手段が必要となる。

本研究の目的は、想定環境のような場所において林業などに携わる人々にとっての負担を、日々の業務で使う車で個別にセンサを回らずに済み、かつ作業場所とは異なる所で停車せずに回収を行えるようにして、軽減することである。

一つひとつのセンサを個別に回らないためには、センサ同士で通信を行い、情報を集めるセンサネットワークが必要となる。既存のセンサネットワークの手法では、大容量のバッファを持つシンクノードを設置し、センサデータを1ヶ所に集めてから最終的な回収が行われるという手法がとられていた。しかし、日常の業務で必ず停車する場所というのが定まっていない場合では、シンクノードを設置すべき場所を決めることが難しくなる。また、シンクノードの設置された場所と作業場所が異なる際には、作業場所へ向かうものとは別の移動が必要となり、負担が大きくなる。そこで、センサー一つひとつに対して回収を行わずに済み、かつ、事前にシンクノードを設置する必要がない回収

手法として、業務内での駐車場所に近いノードに、シンクノードの役割を担わせることを考えた。センサネットワーク内でのシンクノードの機能を、駐車位置に合わせて割り当てることによって、どの位置からでも回収できるセンサネットワークの実現を図る。

3.2 提案手法の概要

本研究は、インターネット接続地域から孤立したセンサを想定している(図1)。そこで、提案手法は、孤立したセンサネットワークに接近する車をメッセージフェリーとして活用する。

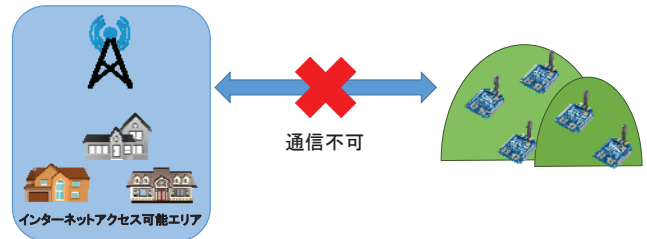


図1 通信が届かないエリアのセンサ

想定環境では、地形や樹木を初めとした障害物の影響を考慮し、フェリーである車と各センサの通信は、車の移動中には行わず、安定した通信の見込める停車中に行うようにする。駐車場所に近いノードにシンクノードとしての役割をさせることで、少ない停車回数で多くのセンサデータの回収を目指し、目的である負担軽減を図る。

停車してからの処理は、大きく分けてビーコンによるシンクノードの決定、シンクノードからの距離を表す優先度の設定、優先度に基づくセンサデータの転送がある。回収を行う車は停まるとビーコンを発信し、受け取ったノードがシンクノードの役割を担う。そのノードから順に、優先度の設定とそれを促すパケットのブロードキャストを行う。また、その優先度に従ってセンサデータを転送していくことで、シンクノードまで届くようにする。

3.2.1節では、ビーコンを用いたシンクノードの決定から、各ノードに優先度を設定する手順を、3.2.2節では、センサデータの転送から車が離れた後の処理の手順をそれぞれ説明する。

3.2.1 優先度設定

データを回収する場所を、任意の地点に変更するためには、駐車位置をネットワークに伝える必要がある。駐車位置に近いノードを、シンクノードと決定するためには、車が停車したときに発信するビーコンを用いる。ビーコンは、車が停止してから一定間隔で発信され、受信したノードが役割を担うようにする。

次に、それぞれのノードに対し、シンクノードからの距離を表す指標として利用する優先度を設定していく。この優先度は、データの転送時にシンクノードとは逆の方向にパケットが流れてゆくことを防ぎ、不要なトラフィックの

増加を防ぐために必要となる(図2).

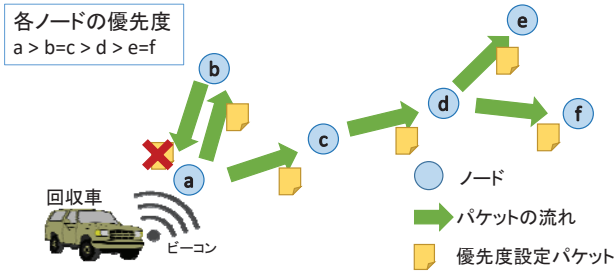


図2 優先度決定時の概要

優先度の設定は、シンクノードから順に行き、各ノードが自身の設定を終えると、周囲のノードに対して優先度を設定するためのパケットをブロードキャストしていく。送信される情報には、送信側ノードの優先度とシンクノードからのホップ数をカウントする変数が含まれている。設定を終えたノードは状態遷移を行うことで、シンクノードから順に高い優先度を設定していくことができる。優先度の設定が行われる際の全体の構成を、図3に示す。

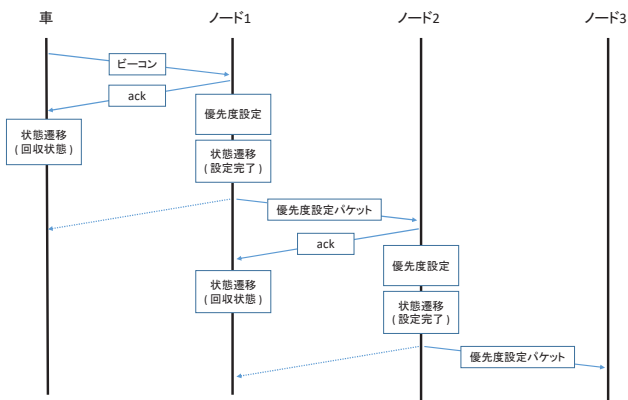


図3 優先度決定時の構成

各ノードの優先度の初期値は最低値とするため、優先度を設定済みのノードの方が高い優先度となるため、未設定のノードは必ず受信が可能となる。

この手法によって、任意の地点で停車中にデータの回収を行えるため、長時間にわたる通信の安定が見込め、回収率の向上を目指すことができる。

3.2.2 データ回収

3.2.1 節の処理によって優先度の設定を終えたノードは、センサが取得した情報の転送を開始する(図4).

センサデータを送信する際に、ノードに設定した優先度の値をパケットに付加する。送信ノードの優先度がわかることによって、優先度の比較を行うことができるので、シンクノードから遠い方向からのパケットを受信し、優先度の高いシンクノード方向からのパケットを破棄することが可能になり、シンクノードへの情報の流れをつくることができる。つまり、受信したノードは、パケットの取捨選択

を行うことで、シンクノードから遠ざかる方向へと流れることを防ぐ。センサデータの転送が行われる際の全体の構成を、図5に示す。

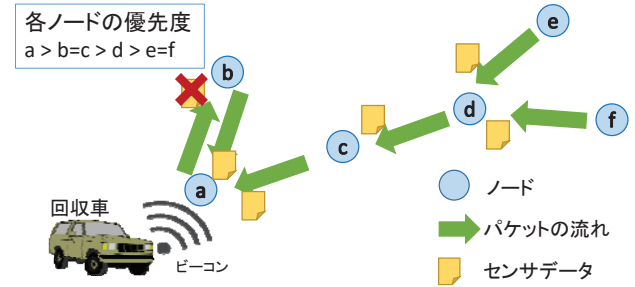


図4 データ回収時の概要

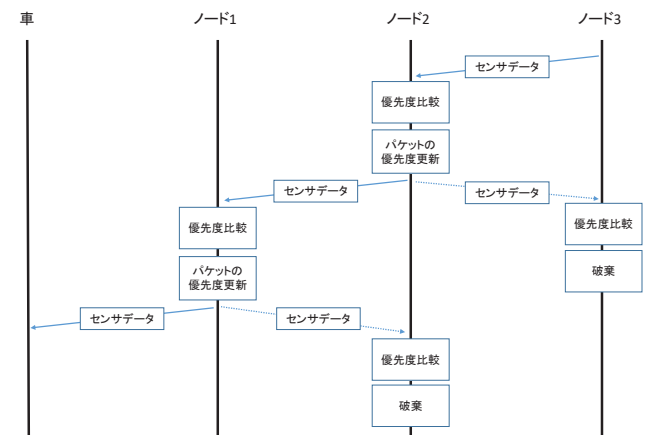


図5 データ回収時の構成

また、シンクノードの役割は、次に新たに別のノードがビーコンを受信し、優先度の設定を行うためのパケットが送信されてくるまで、同じノードが担い続ける。回収車が来ていない状態でも事前に集めておくことで、連続して回収場所が同じである場合の回収時間を短縮できる。回収場所を変更した場合は、優先的に転送することで時間的に古いデータから回収することができ、長期にわたって残されることを避けられる(図6).

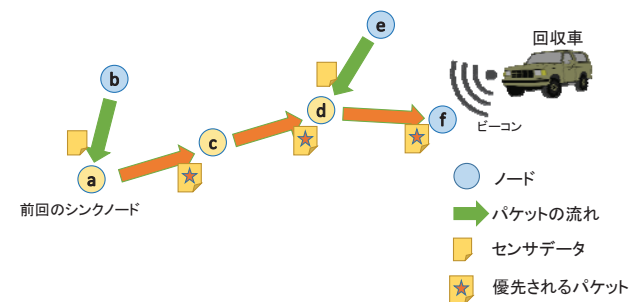


図6 シンクノードが変更された場合の概要

新たに別のノードがシンクノードの役割を与えられ、ネットワーク全体の優先度を再設定する際に、元のシンクノードは、事前に集めたデータを優先的に転送させるための

準備をする。次のシンクノードまでの中継ノードが、優先的に転送する状態になるための特殊なパケットを作り、その状態で優先させるかどうかを判定するためのフラグを、集めたデータ全てに立てておく。これによって、中継ノードは、元のシンクノードに集められたデータを優先的に新しいシンクノードまで転送する。これは、過去のデータの回収を優先することによって、集めたデータの解析をする際に欠けている部分が出ないように、また、新たに観測したデータによって失われてしまわないようにするためである。

3.3 システム構成

各ノードは、大きく分けて3つの状態があり、その状態遷移によって処理が変わる。3つの状態は、初期状態、優先度設定の状態、データ回収の状態である。

まず、初期状態は、全てのノードの優先度が最低値で同じ値をとっている。この時、センサデータの転送は行われず、ビーコンあるいは優先度設定のパケットのみ受信でき、優先度設定の状態に移行する。次に、優先度設定の状態では、受信したパケットの優先度と自身のノードの優先度を比較し、優先度の設定を行うかを決める。優先度の設定を終えると、周囲のノードに転送し、次のデータ回収の状態に移る。最後に、データ回収の状態では、ノードに転送できるデータがあれば、自身の優先度の値を付加し、通信可能な距離内のノードに転送する。受信した側のノードは、パケットの優先度と自身のノードの優先度を比較し、破棄するかどうかを判定する。破棄せず保存した場合は、そのデータ転送を行えるようにフラグを立てる。

3.4 ノード内の処理

本節では、各ノードの処理について状態遷移の段階に分けて述べる。3.4.1節ではノードがそれぞれの優先度を設定する際の処理を、3.4.2節ではセンサデータを転送する際の処理を説明する。

3.4.1 優先度設定

初めに、優先度設定が完了し、センサデータの転送が可能になるまでの各ノードの状態遷移について説明する。回収車は、3種類の状態遷移を行い、通信を行わない「移動状態」、停車しシンクノードを決めるための「ビーコン発信状態」、そして、センサデータの回収を行う「回収状態」である。これによって、それぞれの状態に適した動作をさせることができる(図7)。

続いて、センサノードについて説明する(図8)。センサノードは、初期状態から、ビーコン、または優先度設定用のパケットを受信した場合に、パケットの内容に基づいて優先度の設定を行い、設定完了状態に変化する。そして、自身の優先度の設定を完了し、次のノードへ優先度設定用のパケットを配信すると、データ回収状態へと変化し、センサデータの転送を行えるようになる。このとき、優先度の設定ができていない初期状態でセンサデータを受信した場

合は、状態遷移は行われない。

また、特殊な条件として、回収車の停車位置が変わり、シンクノードの役割が変更された場合、元のシンクノードと、そこから新たにシンクノードとなったノードまで中継を行うノードのみ、「優先転送状態」を用いる。これは、回収車が離れている間に蓄えられたデータを、優先的に回収するために利用するためである。

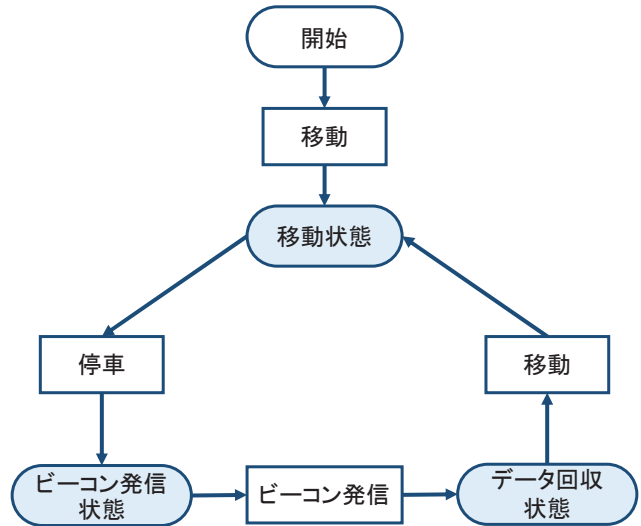


図7 回収車の状態遷移

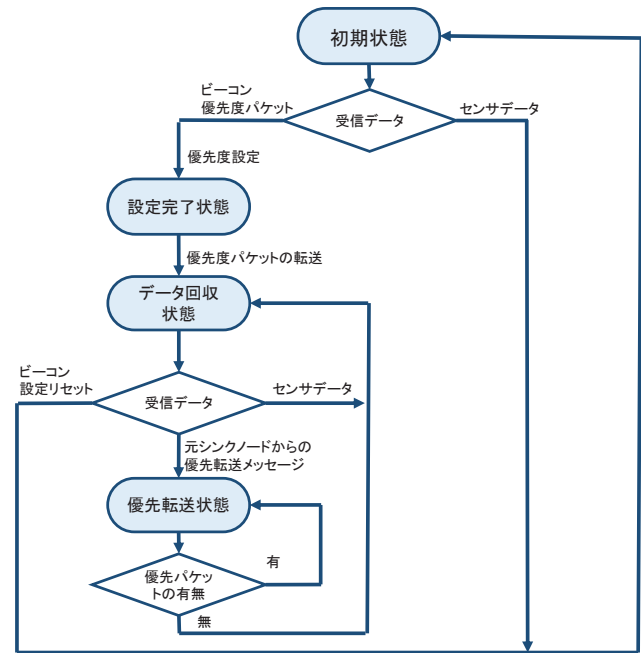


図8 センサノードの状態遷移

センサノードは状態によって、パケットを受信する際に、優先度の比較を行い、そのデータを保存し転送するべきか破棄するべきかを判定する。優先度の設定は、シンクノードから順番に近いほど高い値となるように行われる。

3.4.2 データ回収

次に、優先度の設定を終えたノードによる、センサデー

タ回収のための情報伝達の流れについて説明する。優先度の設定を終えたノードは、データ回収状態になり、センサデータの転送が可能になる。それぞれのセンサが保持しているデータの送信を行うかどうかを判定するフラグをそれぞれの情報に設定しておく。送信は、通信可能な距離内にいる全てのノードに対してブロードキャストで行われるため、優先度の比較を行うことによって、さらに転送を行うために受信すべきなのか、あるいは転送すべきではないため破棄するのかを判定する。これによって、シンクノードとは異なる方向へ情報が流れるのを防ぐ(図9)。

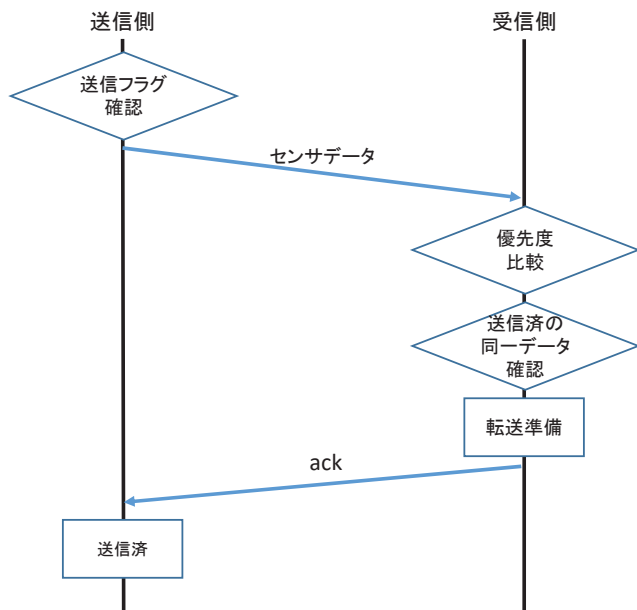


図9 センサデータ転送処理

い移動中はデータの回収を行わず、停車中に実行する。移動経路、停車位置はランダムで選択するように構築している。

シミュレーションを行うエリアは、和歌山県古座川町の研究林の一部の、1200m四方の区画を想定している(図10)。センサノードは50個設置されているものとし、各ノードの通信可能距離内には必ず最低1つのノードが存在していることを前提とする。また、車の移動経路、および停車位置は、実在する道路や作業場所などを考慮して設定した。移動速度は、時速30kmとする。

本研究では、問題を簡単にするために、山に入る車は1台のみとする。また、1日の業務は1つだけであるとし、短時間で他の場所に移らないものとして実験を行った。

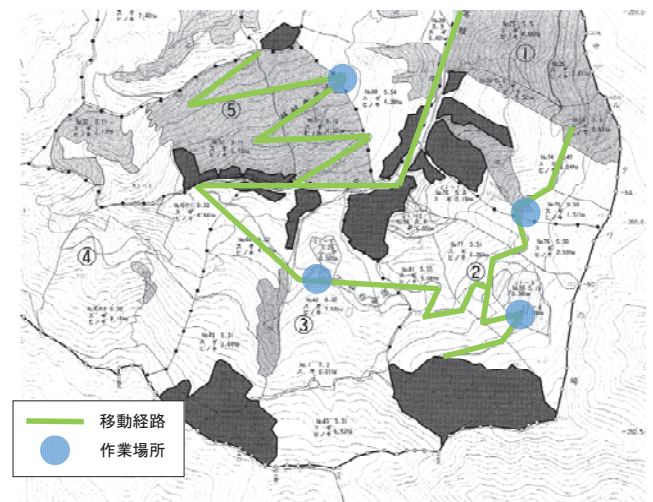


図10 シミュレーションエリア

4. シミュレーション評価と考察

提案システムにおけるデータ回収の有用性を評価するために、従来の固定されたシンクノードを用いた手法との比較を行う必要がある。しかし、実機を用いた実験では、正確に比較を行えるだけの通信環境や移動の再現性を実現するのは困難である。そこで、本研究では、C言語を用いて実装した独自のシミュレータを用いて、シミュレーション評価を行った。

4.1 シミュレータの仕様

中山間地域の孤立したセンサネットワークから、林業など他の目的で山に入る車にデータを回収させることを想定して実装を行う。車の移動は林道を通るため縦横無尽には動けないが、道路にはいくつかの分岐があるので常に同じではない。さらにその選択は日によって変化するため、ノードが事前に把握することはできないものとする。また、その移動経路内においても、作業場所すなわち停車位置も複数存在するものとする。

メッセージフェリーとしての役割を果たす車は、周囲に障害物の多い環境のため安定して通信を行える可能性の低

4.2 シミュレーション環境

山間部の孤立したセンサネットワークに対し、近づく車にデータを回収させるモデルを想定して、シミュレーション環境を設定する。センシングデータを保有する固定ノードと、移動経路および停車位置がランダムな車を想定して設定する。

実験に先立ち、大学付近でWi-FiとXBeeの通信距離と通信強度の測定を行った(図11)。また、それぞれの通信方式における、受信待機時と通信状態での消費電力を表1に示す。

測定結果から、Wi-Fiで約180m、XBeeで約150mの通信を行えていることを確認した。一般的に電波の受信強度が-80dBm以下では安定した通信が行うことができないと言われている。また、想定環境のように木々や地形の影響を受ける場所では不安定になりやすい。

そのため、シミュレーションでは、ノード間の通信プロトコルは断定しないが、この測定結果、および消費電力の差を考慮し、XBeeの性能に基づいて通信距離を70mと設定した。

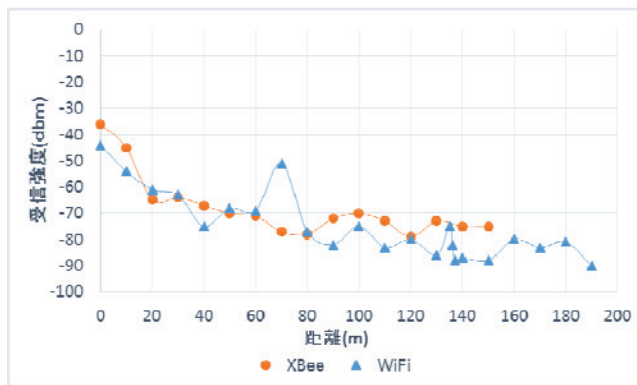


図 11 大学付近での測定結果

表 1 XBee と Wi-Fi の消費電力の測定結果

	待機状態	通信状態
XBee	0.95 W	1.28 W
Wi-Fi	1.45 W	1.78 W

また、回収するデータは、1 時間おきに各ノードはセンシングを行ったものとして、それぞれのノードにデータを追加していく。シミュレーション環境に設定した値をまとめたものを表 2 に示す。

表 2 シミュレーション環境

通信距離	70 m
伝送速度	40 kbps
車両移動速度	30 km/h
移動経路	規定経路からランダム選択
停車箇所	4
ノード数	50 個
情報数	6000
シミュレーション時間	5 日
試行回数	50 回

4.3 シミュレーション実験

4.3.1 目的

提案システムにおけるデータ回収の性能評価を行うために、既存のシンクノードを設置したセンサネットワークとの比較を行う。センサデータの回収を意識しない独立した移動と停止を行う車を用いて回収を行い、その情報量を確認することで、提案システムの有用性を検証する。

4.3.2 方法

5.1 節、5.2 節で述べたシミュレータの仕様、シミュレー

ション環境において、センサデータ回収の性能比較を行う。性能比較として、シミュレータ内で発生したセンシングデータの総量のうち、回収できた情報量を比較する。比較対象として、従来のシンクノードを設置したセンサネットワークを想定する。シンクノードの設置場所は、予め設定した車の停車位置のうちの 1 つの近くとする。また、車の移動経路、および停車位置はランダムであるため、シミュレーション時間は 5 日とし、50 回試行することで確認を行い、評価をする。

4.3.3 結果

シミュレーション実験における、発生させた情報量と回収できた情報量から、従来手法と比較して提案手法の有用性を検証する。提案手法の移動はランダムに行い、従来手法では比較として同じ移動をさせて、回収できた情報量を比較した。発生させた情報量と回収した情報量の平均値、および標準偏差を表したグラフを、図 12 に示す。

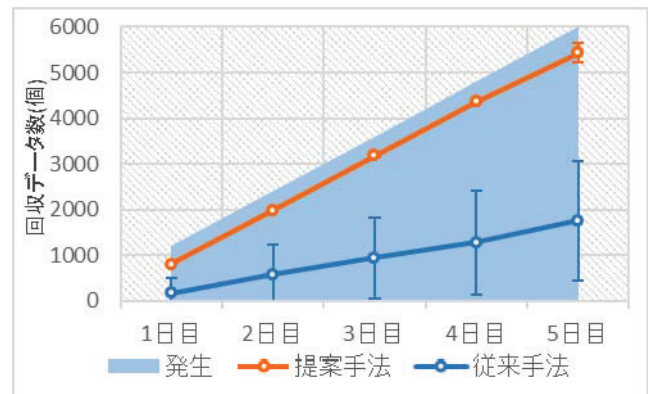


図 12 回収できた情報量の比較

この結果から、提案手法では、停車位置が変化しても安定して過半数のセンサデータを回収できていることが確認できた。従来の手法では、シンクノードを設置した場所で停車したかどうかによって、回収率が大きく変動してしまう。シンクノード付近で停車しなければ、その日の回収は全く行われないため、回収率は低くなってしまふ。

4.4 考察

シミュレータを用いた評価実験によって、提案システムのセンサデータ回収方法の有用性について検証した。既存のシンクノードを設置したセンサネットワークと比較することによって、データの回収を意識しない山中での移動において、提案システムが有効であるということが確認できた。従来のシンクノードを固定してデータを集めておく手法では、一度に大量のデータを回収できる一方で、回収するためには毎回移動経路に制約が課される。そのため、今回想定したような環境において、データの回収を意識しない移動をさせた場合では、回収率に大きな差が見られた。このことから、データの回収が、それを意識せず業務に取り組む中で行っているため、負担が軽減されると考えられる。

しかし、停車位置が変わり、シンクノードを担うノードが変更された場合は、ネットワーク上でデータが往復することとなり、不要な通信が発生してしまう。車が離れている間にシンクノードの役割をしていたノードに蓄えられたデータを、次に車が来たときに回収するまでに要した平均時間のグラフを図 13 に示す。

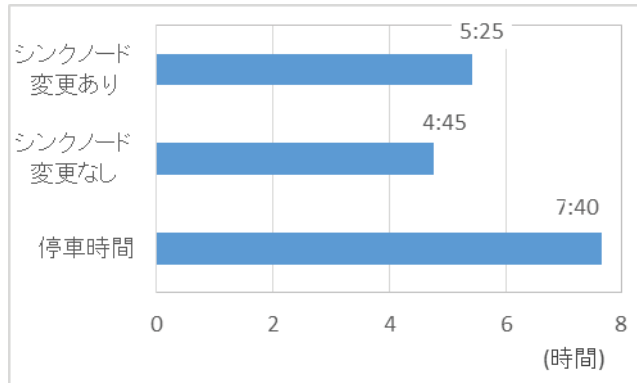


図 13 回収に要した時間の比較

シンクノードが変更されると、離れている間に蓄えられたデータを回収するのに、平均 40 分ほど多く時間が必要となってしまう。そのため、停車中に生成されるデータもあるために、時間内に回収できないデータがわずかに残ってしまうという課題がある。シンクノードの変更が繰り返された場合は、徐々に回収できなかったデータ数が増えてしまうため、時間とともに回収量に差が大きくなることが確認できた。

5. おわりに

5.1 まとめ

本論文では、中山間地域の中でも、特に電力・通信インフラの完備されていないような環境におけるセンサネットワークから、データの回収を行う人の負担を軽減するために、任意のノードに対してシンクノード機能の割当方式の提案を行った。孤立した環境からデータを活用する場所まで運ぶメッセージフェリーの役割を果たす車が必要となるが、山中ではデータの回収以外にも多くの業務が存在するため、両方向うには負担が大きくなる。そこで、業務中に長時間停車している状況に着目し、車に近いノードにシンクノードの役割をさせることで、従来の手法と比べて、回収を意識しない車の移動においても高い回収率を実現できることを確認した。

5.2 今後の課題

本研究におけるシミュレーション実験の想定環境では、回収車が 1 台だけであることや、1 日の停車位置が 1 ヶ所であること、バッテリーや消費電力を考慮しないという制約を設けていた。そのため、実際の環境に合わせ切れていない点があった。また、山間部のように障害物の多い環境において、実機による実験を行い、検証する必要がある。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 15K00127 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] “総務省 平成 27 年版情報通信白書”.
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/pdf/27honpen.pdf>
- [2] “環境教育のための森林情報基盤・サイバーフォレスト”.
<http://cf4ee.nenv.k.u-tokyo.ac.jp/drupal7/>.
- [3] “北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター 森林圏ステーション 和歌山研究林”.
<http://www.za.ztv.ne.jp/hokudai/new-home/new-index.html>
- [4] Wenrui Zhao and Mostafa Ammar: Message ferrying: Proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks, IEEE, pp.308-314, 2003.
- [5] 松高聡史, 松浦知史, 猪俣敦夫, 藤川和利: DTN 環境を考慮した高密度センサネットワークにおける収集率に応じたセンサデータ収集手法の提案と評価, 信学技報, IA2011-78, pp.77-82, 2012 年