

# 中山間地域の巡回車両による 高齢者みまもりデータ収集法の提案

本田 美輝<sup>1</sup> 山口 弘純<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

**概要:** センシングやネットワークの最新技術を家庭内に導入することで、人々が健康面や精神面で見守るためのスマートホームが普及しつつある。一般に、家庭内で推定した行動情報や見守りデータ（以下、データ）は最終的にインターネットを通じてクラウドサービスに集約することが前提とされる場合が多いものの、特に高齢者宅ではインターネット環境を導入していないことが多く、一部の中山間地域では携帯電話網の不感地帯も存在する。本稿ではこのような地域において、各家庭から得られる情報を、地域を巡回するコミュニティバスや物資配達車両等によって収集する手法を提案する。本手法ではデータ収集のために省電力で動作し広域をカバーすることが可能な LPWA を用いており、さらに家庭内に設置したノードを経由することで、巡回車両が通過する道から速く離れた場所に存在する家庭の情報も収集することを可能にしている。システムプロトタイプを実環境に導入し、提案手法の評価を行ったため、それを報告する。

## 1. はじめに

センシングやネットワーク技術の向上にともない、その技術を家庭内に導入し、より豊かで快適な暮らしを可能にするスマートホームが普及しつつある。スマートホームでは、家電や設備機器を自動制御することで省エネルギー化や利便性向上を図る事例が多い。また、日本を始めとした先進諸国においては急速に高齢化が進んでおり、日本では2035年には3人に1人が65歳以上になると予想されている。さらに、人口が少ない過疎地域の市町村数は全国の市町村数の4割以上という報告がある。このような社会的問題を背景に、特に独居高齢者の生活を見守り、健康状態や日常生活パターンを把握する研究も盛んに行われている。

我々の研究グループでも家庭内の行動モニタリングに関する研究を進めている。例えば [1,2] では、人感センサーとワットモニターによる行動学習に基づいて人々に活発で自発的な日常行動を促すことにより、家庭内行動のみえる化やエネルギー効率化、同居者のコミュニケーション促進などを図る方法論を提案しており、[3] では、行動学習に必要な訓練データを居住者に簡単な質問をすることで得るフィードバック学習法を提案し、高齢者への負担が少ない家庭内行動推定を実現している。またインターネットを介して推定した1日分の行動結果をタイムテーブル形式に表



図1 中山間地域

示するシステムを構築している。

一般に、家庭内で推定した行動情報や見守りデータ（以下、データ）は最終的にインターネットを通じてクラウドサービスに集約することが前提とされる場合が多い。しかし、図1のような中山間地域を中心とし、特に高齢者宅ではインターネット環境を導入していないことが多く、例えば2017年現在で85歳以上のインターネット普及率は25%を下回っているという報告もある [4]。主な理由は設置や通信にかかる費用であると想定されるが、一部の中山間地域ではLTE/3Gの電波不感地帯も存在しており、携帯網を利用したデータ送信も不可能な場合もある。

これに対し本稿では、省電力で広域をカバーすることが可能なLPWA (Low Power Wide Area) を使用し、中山間地域を巡回する新聞配達やコミュニティバス等の定期運行車両を介して見守りや行動把握データを収集する手法を

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University,  
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

提案する。提案手法では、見守りや行動把握の対象となる家屋内に設置したノード（以下、固定ノード）と車両に搭載したノード（以下、巡回ノード）間でLPWA通信を介してデータを収集する。LPWAの中でもライセンス不要な920MHz帯を利用するLoRa [5] を利用し、家屋や森林が点在する中山間地域での低コスト長距離通信を行うワイヤレスセンサーネットワークの構築を目指す。

巡回車両はコミュニティバスや物資配達車両のような定期的に決められた経路を走行するものが代行することを前提としている。そのため、通信可能エリアを車両が通過しない固定ノードが存在することも十分に考えられる。このような直接データを収集できない位置にある固定ノードに対し、提案手法では近接する固定ノード間でマルチホップ通信によるクラスタを形成し、クラスタ内でデータを共有することで、クラスタ内のいずれかの固定ノードが巡回ノードに対しデータを送信する仕組みを採用する。

また、中山間地域では、集落間の距離が大きく離れていたり、森林等で遮られていることが多く、クラスタが複数生成されることも想定されるとともに、同一クラスタ内の複数の固定ノードが同時に巡回ノードにデータを送信可能となる可能性もある。一方、見守りや行動把握の観点からは、すべての固定ノードからできるだけ公平にデータを回収できることが望ましいといえる。この観点から、巡回ノードはどの固定ノードからどれだけのデータを受け取ることで、結果として公平なデータ回収を行えるかを考慮し、受信すべきデータとその送信固定ノードを選択することが望ましい。提案手法では巡回ノードの通信履歴から、どのノードとの通信が可能かの期待値を計算し、全固定ノードから少なくとも1回データを受信するまでの時間を最小とするような問題を定式化し、それを実現するプロトコルを設計開発している。

上記の通信プロトコルを実装し、大阪大学キャンパス内、および地方自治体の協力のもとで実際の中山間地域5世帯に実装したシステムを設置してデータ回収実験を実施した。ランダムに通信固定ノードを決定する方法と比較し、提案手法は最大で13%の収集率向上が図れている。

本稿の構成は以下のとおりである。2章では、既存のワイヤレスセンサーネットワークに関する既存研究について紹介した上で、本研究の位置付けについて述べる。3章では、我々が提案する高齢者見守りシステムの概要、データ収集環境、並びに機能について述べる。4章では、同システムの近接固定ノード同士のクラスタリング手法、巡回中の通信プロトコル、および通信する固定ノード決定法について述べる。5章では、実環境から得た通信ログを用いて提案手法のデータ収集率をベース手法と比較して評価し、その結果を述べる。6章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 LoRa ネットワーク

IoT (Internet of Things) の普及を背景に、省電力で動作する広域な無線通信システムとしてLPWA技術が近年注目を集めている。その一つであるLoRaWANにおいても、キャパシティ評価 [6] やスケール評価 [7] が盛んに実施されている。例えば、[8] では、大学キャンパス全域を対象とした学生の健康状態のモニタリングを実施するために、LoRaの活用を検討している。[9] では、LoRaがスマートシティにおける基盤通信システムとして導入されたことを想定した場合、どの程度の端末密度で運用可能かを検証している。同実験の結果から、3.8ヘクタールあたり120ノード程度で運用可能できることが確認されている。さらに、IoTを前提としたスマートシティアプリケーションにおけるLoRaの活用事例も多く見られ、[10] は郊外でのLoRaの活用を検討している。

中山間地域でLoRaを活用する場合、建物や樹木、地形的起伏が電波伝搬に大きな影響を与えるため、見通し条件がよい場合とは特性が大きく異なる。我々の研究グループでは、そういった環境においてLoRaの測定実験を行った結果、最大で約1.8kmの通信が可能であったことを確認し、単純な通信距離でなく、建物や樹木などの障害が電波強度を大きく減少させる原因であることを確認している [11]。

### 2.2 メッセージフェリー

提案手法は家庭内の固定ノードと巡回ノードによって遅延/途絶耐性ネットワーク (DTN: Delay/Disruption Tolerant Networks) を構築している [12]。DTNは継続的なネットワーク接続が不可能な状況に耐える通信技術を広く捉えたものであり、DTNにおける通信プロトコルに関する研究の一つにメッセージフェリーがある [13]。メッセージフェリーはネットワーク内のある経路を移動するフェリーノードを利用して効率的なデータ転送を行う方式のDTNモデルである。

文献 [14] では、複数のフェリーノードを用いてリレー形式でデータを転送する手法を提案し、リンク遅延を最小化するための各フェリーノードのスケジューリングアルゴリズムを提案している。文献 [15] では、災害によってネットワークが切断された際の通信確保の必要性を背景に、フェリーノードとしてドローンを用いた通信プロトコルを提案している。ドローンは自由な経路を選択できる利点があり、通信遅延やパケット損失率を最小にするための最適な経路を探求している。しかし、国内でドローンを飛行させる場合はその飛行可能エリアは操縦者が目視できるエリアに限られており、自動操縦をする場合は特別な許可が必要であるため、本研究のような森林や住宅が点在して見通し

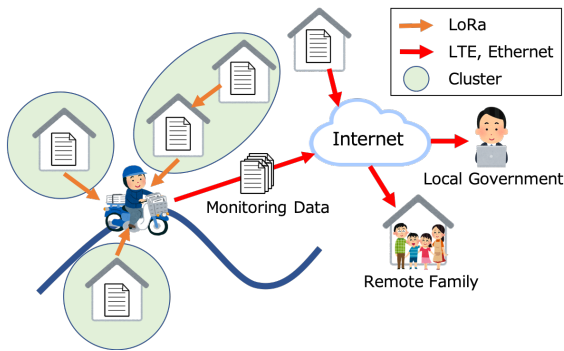


図 2 見守りシステムの概要

がよくない中山間地域で日常的に見守りデータを収集する際にドローンを用いることは現時点で実現へのハードルは高い。

これらの研究はいずれも、フェリーノードは自由にネットワーク内を移動可能であることや、固定ノードの位置情報が既知である前提のもとで、データ転送の遅延最小化を達成するルーティングを主な課題として取り組まれている。

### 2.3 本研究の位置付け

本研究では以下の点で目的が異なる技術の確立を目指している。まず、中山間地域を走行する車両を巡回ノード（フェリーノード）とし、決められた経路を移動することを前提とする。また、巡回ノードの通信範囲に位置しない固定ノードも存在するため、それらからのデータ回収方法が課題となる。さらに、巡回ノードは移動中に通信を行うことから、各固定ノードが巡回ノードと通信できるタイミングは限られており、LoRaを利用するため、データの送信量に関する制約も厳しい。さらに、[11]より巡回ノードの通信距離は周囲の環境によって動的に大きく変化することが考えられ、各固定ノードから巡回ノードまでの距離をもって、通信範囲内にいるかどうかを判断するのは困難であることから、本研究では各固定ノードの位置情報は利用していない。本研究はこれらの前提のもと、各固定ノードのデータを取りこぼしを最小に抑えて収集することを目的とし、巡回ノードが走行中に通信する固定ノードを、動的にスケジューリングすることを課題として捉えており、なるべく少ない巡回でデータを収集することを目指している。

## 3. 高齢者見守りシステム

高齢者が多く住む中山間地域では、「新聞や郵便がたまっている」、「電灯がつけっぱなしになっている」といった高齢者の少し気掛かりな点を近くの住民同士が協力して発見し、電話によって通知するという方法で高齢者の見守りを行っている自治体が多い。また、自治体の職員が直接高齢者宅に赴くことで見守りを行なっているケースもある。これは高齢者の異常をいち早く検知することは困難であり、人的コストも高い。これに対し、センシングによって居住者

の日々の行動パターンや活動量を把握できれば、通常と異なる行動パターンや活動量であることを自動で素早く検知し、事前に最悪の事態を回避することができるかと我々は考えている。また、1章で述べたように、中山間地域はインターネット環境が整っておらず、かつLTEの不感地帯となる家庭が数多く存在する。そこで、我々は中山間地域において、家庭内で日常行動推定を行い、巡回車両によって推定した情報を見守りデータとして収集するシステムを提案している。

図2は我々が提案する地域見守りシステムの概要図である。本項では、見守りデータ収集について述べるため、行動推定の詳細については文献[3]を参照されたい。本システムでは、巡回の時間帯は決められており、巡回によるデータ収集は一日に数回の頻度で行う。また、巡回ノードのみがインターネットに接続されていることを前提としており、インターネット環境がない家庭に対して、巡回車両が中山間地域を走行することでデータを収集し、サーバに送信する。家庭内の固定ノードはインターネットに接続されている必要はないが、インターネットに接続されている家庭の場合は直接サーバにデータを送信する。サーバに送信されたデータは最終的に、地方自治体や遠方に住む家族へ表示される。このデータは1日前の行動推定によって取得した1日前の情報である。具体的にはアプリケーションにも依存するが、時間帯毎の活動量を表す数段階のレベル（活発～低調）情報を、最低限の1日の見守りデータとして想定している。先述したように通常と異なる行動パターンや活動量であることを自動で素早く検知したいため、今回は全固定ノードからの見守りデータを1日に1度収集することを目標として定めている。

本システムは地域を走行するコミュニティバスや物資配達車両等の定期的に決められた経路を走行する車両が巡回車両を代行する想定であるので、巡回車両の走行経路は基本的には固定であるが、経路が変更される場合も許容する。この巡回経路付近に存在しない固定ノードは、巡回ノードと直接通信できない可能性がある。これに対し、提案手法は近接する固定ノード同士でクラスタを事前に生成しておき、クラスタ内のノード間を巡回経路付近までマルチホップでデータを伝送することでデータ収集を可能にしている。そのため、巡回経路の条件として全ての固定ノードに対して見守りデータがマルチホップで巡回経路付近に到達可能である必要がある。これは巡回経路付近まで到達不可能なノードが存在するとそのノードのデータを収集することは物理的に不可能であるからである。

最後に、提案するデータ収集法の特徴を以下に述べる。まず、クラスタ生成について、各固定ノードは自動で周囲のノード情報を取得することによってクラスタを自動生成する仕様のため、導入前に他の固定ノード情報を所有しておく必要がなく、設置だけで稼働可能なシステムを実

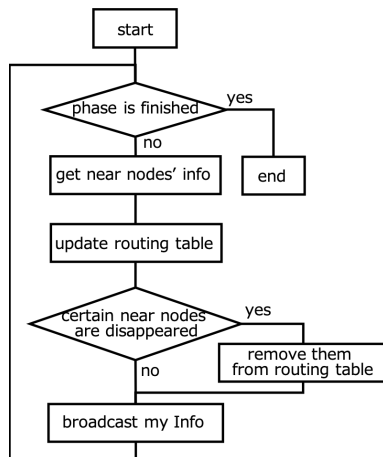


図 3 クラスタ生成フェーズにおける固定ノードの挙動

現している。また、提案手法では車両が巡回する時間帯外に、クラスタ内の固定ノードは見守りデータを事前に共有し、冗長性を持たせている。こうすることで、固定ノード間のマルチホップ通信に要する時間を巡回時に割かない工夫をしている。さらに、我々は複数の固定ノードが同時にデータを送信する際に発生する衝突を回避したり、データの取りこぼしを最小限に抑えたりするための巡回ノードと固定ノード間の通信プロトコルを提案している。クラスタ生成と巡回時の通信プロトコルの詳細については4章で説明する。

#### 4. データ収集アルゴリズム

本章では巡回車両によるデータ収集法について述べる。提案手法では、固定ノード同士が自律的にクラスタを生成するフェーズ（クラスタ生成フェーズ）、車両が巡回する前にクラスタ内でデータを共有するフェーズ（準備フェーズ）、車両が地域を巡回して固定ノードからデータを収集するフェーズ（収集フェーズ）からなる。準備フェーズでは、クラスタ内で共通のルーティングテーブルを使用して、各固定ノードから得られるデータをクラスタ内全てのノードに転送、保持させるという単純な処理のみを行なっているため説明は割愛する。以下に、クラスタ生成フェーズ、並びに収集フェーズにおける、固定ノード、および巡回ノードの通信プロトコルについて説明する。

##### 4.1 クラスタ生成フェーズ

クラスタ生成フェーズでは、車両が巡回しない時間帯に近接する固定ノード同士が自律的にクラスタを生成する。各固定ノードは自身のID、ルーティングテーブル、近接ノード情報を保持している。ルーティングテーブルは各固定ノードのIDでリンク状況を表すものである。導入初期は各固定ノードは独立しており、ルーティングテーブルと近接ノード情報は保持していないものとする。図3は本フェーズにおける固定ノードの処理をフローチャートで表

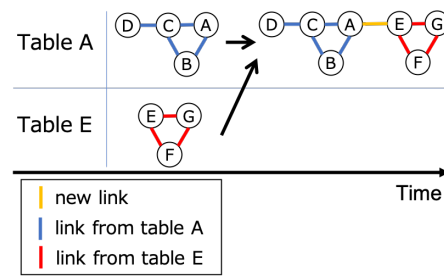


図 4 ルーティングテーブル更新

したものである。本フェーズでは、各固定ノードは以下の4つの処理を自律的に行い、フェーズが終了するまで繰り返す。

- 近接ノード情報取得
- ルーティングテーブル更新
- 特定近接ノード削除
- 自身のノード情報をブロードキャスト

まず、周囲に存在する固定ノードからのノード情報を受け付ける。ノード情報には送信元ノードID、送信元ノードが保持するルーティングテーブル、前の巡回で巡回ノードと通信したかどうか（真偽値）、現在時刻情報を含む。ここで、前回に巡回ノードと通信していた場合は、自身の現在時刻情報を更新する。これは各固定ノードはインターネットに接続されていないために生じる時間のずれを修正するために行なっている。後述するが、収集フェーズにおいて、固定ノードは巡回ノードから正確な現在時刻情報を取得している。

次に、取得した近接ノード情報が空でない場合、これを用いて自身のルーティングテーブルを更新する。図4に、ルーティングテーブル更新の例を示す。現在、クラスタが2つ存在し、仮にノードAがノードEからノード情報を取得したとする。この時、まずノードAはノードEとのリンクを新たに作成する。次にノードEのルーティングテーブルを統合し、自身のルーティングテーブルを更新する。この時、ノードEはノードAの存在をまだ検知していないため、ルーティングテーブルを更新しないことに注意されたい。

一方、クラスタから特定のノードが離脱した場合もルーティングテーブルを更新する必要がある。これは近接ノード情報の最新取得時刻を見ることで離脱したかどうかを判定する。最新取得時刻からある時間が経過した時にクラスタから離脱したと判定し、ルーティングテーブルから該当するノードを削除する。この時に、到達不可能となったノードも同時に削除する。最後に、自身のノード情報をブロードキャストする。ノード情報については近接ノード情報取得の説明時に先述したので説明は割愛する。

このようにして、各固定ノードは近接ノード同士で共通のルーティングテーブルを自律的に作成していき、同クラスタ内のノードは同じルーティングテーブルを保持するこ



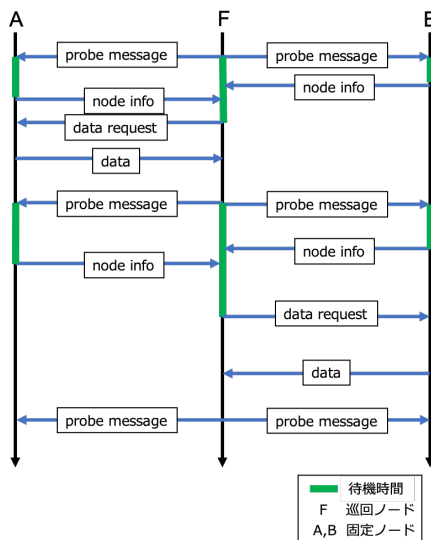


図 5 収集フェーズの通信プロトコル

### アルゴリズム 1 固定ノードの挙動

```

while phase_is_continued() do
  msg ← getFerryMessage()
  updateCurrentTime(msg.now)
  if msg.type = probe_msg then
    wait(msg.Δt × rand(0, 1))
    sendNodeInfo()
  else if msg.type = data_req then
    sendData(msg.req_ids)
  end if
end while

```

### アルゴリズム 2 巡回ノードの挙動

```

Initialize Δt ← wait_time
while phase_is_continued() do
  broadcastProbeMessage(Δt)
  nodes ← getNodes(Δt)
  if |nodes| ≠ 0 then
    request_node ← decideRequestNode(nodes)
    sendDataRequest(request_node)
    data ← getData()
    storeData(data)
  end if
end while

```

とでクラスタを生成していく。

## 4.2 収集フェーズ

収集フェーズでは、巡回ノードが走行中に固定ノードからデータを収集する。図 5 は、本フェーズの通信プロトコルである。アルゴリズム 1, 2 はそれぞれ巡回ノード、固定ノードの挙動を示したものである。本フェーズでは、巡回ノードが固定ノードにメッセージを送信することによって固定ノードの動作を制御している。

固定ノードの挙動について、各固定ノードは自身の ID、ルーティングテーブル、近接ノード情報に加えて、巡回ノード ID と準備フェーズ時に得たクラスタに属する全固

定ノードの最新のデータを保持する。巡回ノード ID は導入時に設定されているものとする。固定ノードは、巡回ノードからプローブメッセージを受け取った場合、指定された最大待機時間 ( $msg.\Delta t$ ) に乱数  $rand$  ( $0 < rand < 1$ ) をかけた時間だけ待ってから自身のノード情報を送信する。こうすることで、通信衝突確率を下げる工夫をしている。一方、データリクエストを受け取った場合は指定された固定ノード ID ( $msg.req\_ids$ ) のデータを送信する。このようにして、データが送信される時は他のノードは必ず待機している状態になるため衝突は発生しない。

巡回ノードの挙動について、巡回ノードはクラスタ情報、巡回時に取得した周辺固定ノードのシーケンス情報を保持する。クラスタ情報は、どの固定ノードがどのクラスタに属しているかを保存しており、収集したデータ情報も含まれている。シーケンス情報は、プローブメッセージによって得た通信履歴であり、周辺固定ノード ID の時系列データである。これは巡回ごとに生成され、過去の巡回によって得たシーケンス情報も保持する。導入初期はクラスタ情報やシーケンス情報は空である。巡回ノードは以下の 4 つの処理をフェーズが終了するまで繰り返す。

- プローブメッセージによる周辺固定ノード情報取得
- 通信するノードの決定
- データリクエスト送信
- データ取得・保存

まず、プローブメッセージをブロードキャストし、レスポンスとして周辺の固定ノードからノード情報を受け付ける。プローブメッセージには、現在時刻情報と待機時間が含まれ、ノード情報には、送信先 ID、通信強度、ルーティングテーブルが含まれる。取得したルーティングテーブルを用いて自身が持つクラスタ情報を更新する。

次に、取得したノード情報から、通信強度がある閾値より大きいノードを絞りこみ、それらを通信可能固定ノードとして、現在のシーケンスの末尾に追加する。取得した通信可能固定ノードの中から、データを取得するために通信するノードを決定する。通信ノード決定アルゴリズムの詳細については後述する。

決定後はそのノードに対してデータリクエストを送信する。収集するデータの優先度に関して、クラスタ内の各固定ノードのデータが収集されなかった巡回回数を覚えておき、回数が多い順にデータを取得するように、データリクエストに各ノードのデータ取得優先度情報を含ませている。最後に、固定ノードから送信されたデータを保存する。

### 4.2.1 通信ノード決定アルゴリズム

図 6 は巡回ノードがクラスタ A と B が存在する地域を移動している様子であり、タイムスロット  $t = k$  では  $A_1$  と  $B_1$ ,  $t = k + 1$  では  $B_2$  と通信可能である状況を表している。仮に  $t = k$  で  $B_1$  を通信相手として選択した場合、 $t = k + 1$  以降はクラスタ A に属するノードと通信できな

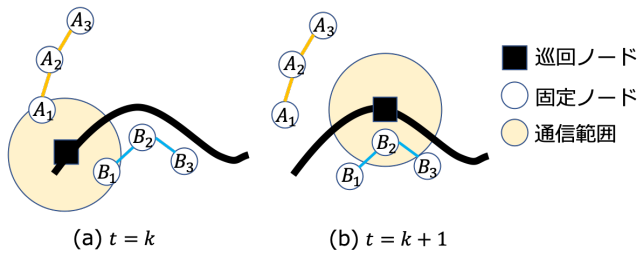


図 6 走行による巡回ノードの通信範囲の変化例

いたため、クラスタ  $A$  のデータを取りこぼしてしまう。一方、仮に  $t = k$  で  $A_1$  を選択した時、 $t = k + 1$  で  $B_2$  と通信することが可能であり、両クラスタのデータの公平な収集が期待できるため、 $t = k$  では  $A_1$  を選択する方が適当と考えられる。上記のような適切な選択を実現するためには、将来に通信可能なノードを予測した後に、データ取りこぼしを最小にするように通信ノードを決定する必要がある。これらを踏まえた上で、以下に通信ノードを決定手法について説明する。

まず、予測シーケンスを推定する手法について、クラスタ、並びにシーケンスを以下に定義する。

$$Cluster_i = \{x_{i,j} | 1 \leq j \leq n_i\} \quad (1)$$

$$T(t, x_{i,j}) = \begin{cases} 1 & (x_{i,j} \text{ is transmissible at } t) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

$$X_{k,t} = \{x_{i,j} | T(t, x_{i,j}) = 1\} \quad (3)$$

$$seq_k = (X_{k,1}, X_{k,2}, \dots, X_{k,t_k}) \quad (4)$$

クラスタ  $Cluster_i$  は固定ノード  $x$  の集合であり、その数は  $n_i$  個である。タイムスロットを  $t$  として、 $X_{k,t}$  は  $k$  番目の巡回において、 $t$  回目のプローブメッセージ送信時の通信可能固定ノードの集合であり、 $T_k(t, x_{i,j})$  は  $x_{i,j}$  が通信可能固定ノードかどうかを表す論理式である。したがって、シーケンス  $seq_k$  は  $X_{k,t}$  の時系列データで表せる。仮に現在を  $k$  番目の巡回として、 $t$  回目のプローブメッセージによって  $X_{t,k}$  を取得したとする。巡回経路が過去の巡回経路と等しい場合、現在のシーケンスは過去のシーケンスと類似している可能性が高い。そこで、現在のシーケンス  $seq_k$  と、過去  $k-1$  個の各シーケンスとの類似度  $sim$  を計算し、過去のシーケンスから類似シーケンスを求める。

$$sim\_seq = \arg \max_{1 \leq q \leq k-1} sim(seq_k, seq_q) \quad (5)$$

なお、ここでは  $sim\_seq$  が  $q$  番目の巡回時のシーケンスとする。類似度の算出について、現在のシーケンスは基本的に巡回途中なので前方部分しかないことから、提案手法では部分シーケンスデータの類似度を求めるのに適したジャロ・ウィンクラー距離を採用している [16]。次に  $sim\_seq$  と  $seq_k$  を前方から比較していき、現在点に相当する位置  $t'$  を特定し、現在の通信可能固定ノードと  $t' + 1$  以降の類似

シーケンスを用いて予測シーケンス  $pred\_seq$  を生成する。

$$pred\_seq = (X_{k,t}, X_{q,t'+1}, \dots, X_{q,t_q}) \quad (6)$$

その後これを用いて通信するノードを決定する。以下に変数を定義する。

- $D_i$  : クラスタ  $i$  からのデータ量の未取得分
- $d(t)$  : タイムスタンプ  $t$  で通信できるデータ量
- $p(t)$  : タイムスタンプ  $t$  で通信成功する確率

なお、 $D_i$  は過去の巡回で取得できなかったデータ量も含む。これらの変数が与えられた時、以下の変数が定義される。

$$S_i(t) = \begin{cases} 1 & (Cluster_i \text{ is selected at } t) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

$$E_i = \sum_t S_i(t) \times d(t) \times p(t) \quad (8)$$

$$\phi_i = D_i - E_i \quad (9)$$

$S_i(t)$  はタイムスロット  $t$  にクラスタ  $i$  に属するノードが選択されるかどうかを表す論理式である。 $E_i$  はクラスタ  $i$  に属するノードの将来に収集されるデータ量の期待値である。 $\Phi_i$  はクラスタ  $i$  に属するノードの将来に収集せずに残るデータ量の期待値である。これらの変数を用いて線形計画により、 $S_i(t)$  の値を決定する。以下に制約条件式を示す。

$$\forall t \sum_i S_i(t) \leq 1 \quad (10)$$

$$\forall i \sum_t S_i(t) \times d(t) \leq D_i \quad (11)$$

$$S_i(t) = 0 \text{ (if nodes of } Cluster_i \text{ don't exist at } t) \quad (12)$$

$$\phi_i \leq \Phi \quad (13)$$

条件式 10 は、任意のタイムスタンプ  $t$  において、同時に 2 つ以上のクラスタは選択しないことを示す。条件式 11 は、任意のクラスタに対して、収集するデータ量は  $D_i$  を超えないことを示す。条件式 12 は、タイムスタンプ  $t$  における予測シーケンスの通信可能固定ノードの集合にクラスタ  $i$  の要素が含まれない場合、選択不可能なので  $S_i(t) = 0$  となる。条件式 13 は任意のクラスタに対し、 $\phi_i$  は変数  $\Phi$  で最大値を抑えられていることを示す。

これらの制約条件式のもとで、以下の目的関数を最小化するような  $S_i(t)$  値を求める。

$$\Phi + \sum_i \phi_i \quad (14)$$

$\Phi$  と  $\sum_i \phi_i$  を最小化することで、クラスタ間で収集に偏りが生じないようにし、かつなるべく多いデータ量を収集することを保証している。このようにして  $S_i(t)$  の値を求め、 $X_{k,t}$  の中から  $S_i(t) = 1$  になるクラスタに属するノードで、かつ一番通信強度が大きかったノードをデータをタイムスロット  $t$  で収集するノードとして決定する。

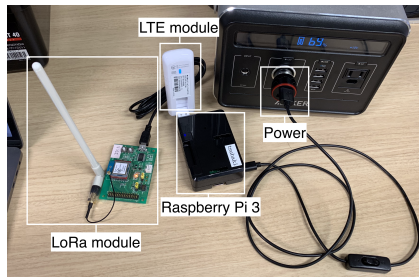
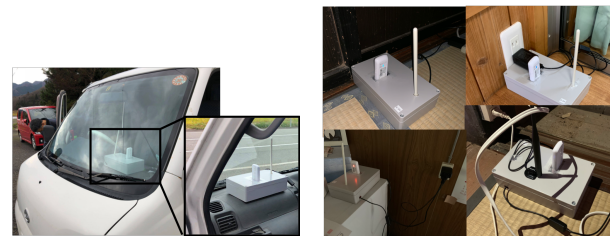


図 7 巡回ノードのプロトタイプ



(a) 巡回ノード (b) 固定ノード

図 11 実験の様子 (兵庫県豊岡市)

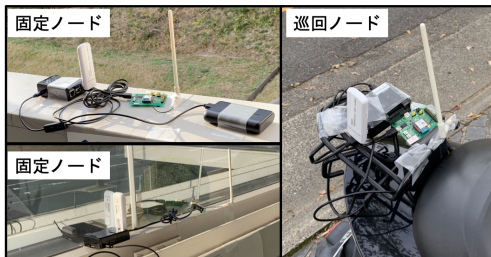


図 8 実験の様子 (大阪大学)

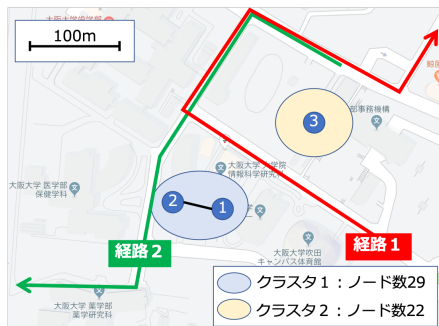


図 9 巡回経路 (大阪大学)

表 1 経路・提案手法別の収集率

経路	手法	全体	クラスタ 1	クラスタ 2	分散
経路 1	提案手法	89.2 %	91.4 %	86.4 %	2.5
	ベース手法	86.6 %	83.1 %	91.3 %	4.1
経路 2	提案手法	88.3 %	91.3 %	72.7 %	9.2
	ベース手法	75.4 %	99.2 %	44.0 %	27.3

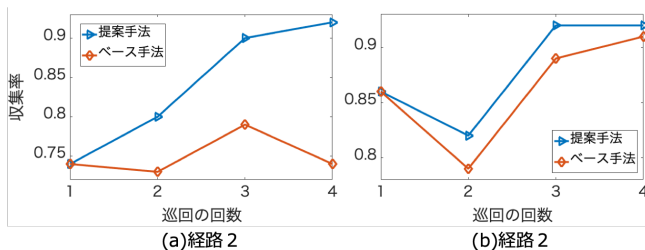


図 10 初期導入時の収集率の変化

## 5. 評価

提案手法の性能を評価するために、上記の提案手法を実装し、実環境において収集する実験を行なった。図 7 は開発した巡回ノードのプロトタイプである。Raspberry Pi 3 内で上記のアルゴリズムを実行し、LoRa モジュールを制

御する仕様になっている。本実験は大阪大学構内で行なったものである。図 9 に示す 2 つの経路をそれぞれ 4 回巡回した。図のように固定ノードは 3 つ設置し、2 つのクラスタを生成した。また、ノード数を増やすために、各固定ノードは仮想固定ノードが接続されており、全体でクラスタ 1 は 29 個、クラスタ 2 は 22 個のノードで構成されている。通信固定ノード決定の際に用いる  $d(t)$  と  $p(t)$  の値は今回は一定としている。また、巡回ごとに各固定ノードは 1 つの仮の見守りデータを生成している。さらに、一度で 6 個分 (6 家庭分) の見守りデータを送信できるという設定のもと収集を行なった。走行経路について、経路 1 は終始全固定ノードが巡回ノードと通信可能であったのに対し、経路 2 は前半は全固定ノードと通信可能であったが、後半はノード 3 と通信不可能であった。比較手法として、通信できるノードからランダムで選択する手法をベース手法として評価した。

表 1 は経路・手法別の全体並びにクラスタ毎の平均収集率、および全固定ノードのデータ収集率の分散値を示している。収集率は見守りデータの収集数を生成された見守りデータ数で割ったものである。なお、それぞれ 10000 回繰り返した平均をとっている。また、4 回の巡回で得た通信履歴を過去のシーケンスとして、予測シーケンス推定に用いている。今回の実験では、一度の巡回におけるプローブメッセージ送信回数は、経路 1、経路 2 ともに平均 7.75 回であったことから、理論上一度の巡回で最大平均  $7.75 \times 6 = 46.5$  個分 (全体の約 91%) のデータを受信できると言える。これを全体の収集率の理論値として評価する。両経路とも、提案手法はベース手法よりも収集率が高く、理論値に近い結果となった。また、分散も提案手法の方が小さいことから、クラスタに偏りがなく収集できることが示された。経路別に見ると、経路 1 は収集率に大きな差は出なかった。これは、終始全固定ノードが巡回ノードと通信可能であり、どの地点でどのノードを選択しても十分な収集ができる状況であったと考えられる。これに対し、経路 2 は提案手法がベース手法より収集率が約 13% 高い結果となった。これは後半はクラスタ 2 の固定ノードと通信できず、前半にクラスタ 1 の固定ノードと通信しなければ収集不可能ということを示唆している。

図 10 は初期導入時における巡回毎の収集率を表してい

る。過去の巡回の通信履歴を利用することにより、巡回の回数を繰り返すに連れて、提案手法は収集率が概ね向上する傾向を掴んでいることがわかる。特に、経路2は収集率の向上が著しく、3回目の巡回で約9割の収集率となった。このことから、本手法は導入初期時や巡回経路が変更された時でも、数少ない巡回回数で最適なノードを選択できるようになることを示せた。

以上より、提案手法は1日に最低2回巡回することで全固定ノードからデータを収集可能であることが示されたが、巡回経路や固定ノードのネットワークポロジに依存して収集率が変化することが考えられるので、シミュレーションを含めてさらなる実験を重ね、本手法の妥当性を検証していく必要がある。現在、兵庫県豊岡市にて、地域を走行する新聞配達車両に巡回ノードを搭載し、中山間地域5世帯に固定ノードを設置した実証実験を行っている。図5はノード設置の様子である。先の研究[11]でLoRaモジュールのアンテナ高を上げるほど、通信距離が長くなるという知見を得たのだが、実際の設置にあたり、アンテナ高を確保する場所がほとんどなかった。現在はそのような状況においても、見晴らしが良い場所で最大約500mほど離れた位置でも通信できることを確認したとともに、上記の提案手法の動作も確認できた。

## 6. まとめ

本稿では、中山間地域を巡回する車両が各家庭からの見守りデータを収集する方法を提案した。また、プロトタイプを実装し実環境で実験を行い、提案手法の性能を評価した。本手法ではクラスタ間で見守りデータを共有することから、今後はプライバシーの問題に考慮した手法について検討するとともに、巡回時の天候などの外部環境の通信への影響についても調査し、さらに多くのシナリオのもとで実験を重ねることで本手法の妥当性を検証していきたい。

## 謝辞

実験にご協力いただきました世帯の皆様、新聞会社様にお礼申し上げます。また、本研究の一部はJSPS科研費JP26220001の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] 中村笙子, 志垣沙衣子, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫: 大衆の生活ノウハウの定量化とモデル化によるスマートライフ支援システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 8, pp. 1621–1633 (2015).

[2] Nakamura, S., Shigaki, S., Hiromori, A., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: A Model-based Approach to Support Smart and Social Home Living, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '15)*, pp. 1101–1105 (online), DOI: 10.1145/2750858.2805835 (2015).

[3] Honda, Y., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Daily Ac-

tivity Recognition based on Markov Logic Network for Elderly Monitoring, *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC 2019)*.

[4] 厚生労働省: 平成30年 情報通信白書インターネットの利用状況, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd252120.html>.

[5] LoRa: LoRa Alliance, <https://www.lora-alliance.org/>.

[6] Mikhaylov, K., Petaejaevaervi, J. and Haenninen, T.: Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology, *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, pp. 1–6 (2016).

[7] Wixted, A. J., Kinnaird, P., Larijani, H., Tait, A., Ahmadinia, A. and Strachan, N.: Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks, *2016 IEEE SENSORS*, pp. 1–3 (2016).

[8] Petjirvi, J., Mikhaylov, K., Hmlinen, M. and Iinatti, J.: Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring, *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, pp. 1–5 (2016).

[9] Bor, M. C., Roedig, U., Voigt, T. and Alonso, J. M.: Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?, *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '16*, New York, NY, USA, ACM, pp. 59–67 (2016).

[10] Iova, O., Murphy, A. L., Picco, G. P., Ghio, L., Molteni, D., Ossi, F. and Cagnacci, F.: LoRa from the City to the Mountains: Exploration of Hardware and Environmental Factors, *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, USA*, pp. 317–322 (2017).

[11] 梶田宗吾, 小倉且也, 本田美輝, 山田遊馬, 山口弘純, 東野輝夫, 高井峰生: 電波不感地帯における生態系モニタリング利用に向けたLoRaWANの性能調査とドローン活用, 第26回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 1–7 (2018).

[12] Benamar, N., Singh, K. D., Benamar, M., El Ouadghiri, D. and Bonnin, J.-M.: Routing protocols in vehicular delay tolerant networks: A comprehensive survey, *Computer Communications*, Vol. 48, pp. 141–158 (2014).

[13] Bin Tariq, M. M., Ammar, M. and Zegura, E.: Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes, *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, ACM, pp. 37–48 (2006).

[14] Roy, S., Tomasi, D., Conti, M., Bhusal, S., Roy, A. and Li, J.: Optimizing Message Ferry Scheduling in a DTN, *Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MobiWac'18*, New York, NY, USA, ACM, pp. 113–117 (online), DOI: 10.1145/3265863.3265884 (2018).

[15] Harounabadi, M., Bocksberger, M. and Mitschele-Thiel, A.: Study on the Network Architectures for Message Ferry Networks with Multiple UAVs, pp. 59–63 (online), DOI: 10.1109/ICUFN.2018.8436660 (2018).

[16] Cohen, W., Ravikumar, P. and Fienberg, S.: A comparison of string metrics for matching names and records, *Kdd workshop on data cleaning and object consolidation*, Vol. 3, pp. 73–78 (2003).