

論文

マルチレイヤ中間ノード装置のルーティング制御法

中川 善継^{*1)} 入月 康晴^{*1)} 山口 隆志^{*1)}

Multi layer control applied middle-routing node in wireless sensor network

Yoshitsugu Nakagawa^{*1)}, Yasuharu Irizuki^{*1)}, Takashi Yamaguchi^{*1)}

Today, monitoring using wireless sensor networks is being utilized in many fields including environment, welfare and agriculture. In particular, wide spread coverage of sensing of outside regions is known to cause operational problems such as cost and traffic reliability when transmitting information from a density covered region. Clustering is an efficient method to collect data and many such studies have been carried out. In this study, we construct representative nodes in a small range clustered sub-network that can transmit interactively with a nucleus network. We focus on the middle-routing nodes which bridges between two different layers of the network. The middle-routing nodes both collect data in the cluster and transmit the data between clusters which efficiently transmit the data across the whole wide region of a network outside.

キーワード：無線センサネットワーク, モニタリング, マルチレイヤ, 中間ノード

Keywords : Wireless sensor network, Monitoring, Multi layer, Middle-routing node

1. はじめに

無線センサネットワーク技術は、人感・温湿度・照度・ジャイロなどのセンサ情報を多地点から定期的に収集しホスト側で分析、制御し応用する技術の一つである。近年ユビキタス社会の実現に向けて、電力制御を行うスマートエナジ(SE)や遠隔からの家電制御を目的としたホームオートメーション(HA)の製品とそのシステムが話題となっている。また、福祉高齢社会を反映し無線センサネットワーク技術を活用した都市課題の解決に関する研究が進められている。その中で注目されるものとして、病院等建物内において患者のモニタ情報から異常を検知する事や、患者からの緊急メッセージを音声等の連絡手段を使わず迅速に伝達する手段の開発、更に独居高齢者が増える中、生活安否を活動の中から見守るサービスの普及があげられる。この様に、無線センサネットワーク技術は、屋内環境をはじめ地域や敷地内の防災、防犯、監視、環境データ収集を目的としたモニタリングにおいて有線によるネットワークと比べ敷設の自由度、コスト面のメリットからその適用範囲を広げている。

屋外を対象とする無線センサネットワークの活用においては、行政や自治体が主となる環境モニタリングや災害時における通信インフラの一部として主に利用されている。例えば、センサを広範囲に配備して地殻の微振動をモニタリングし地震発生を予知するためのデータ、豪雨による川の水位上昇から氾濫の危険性を判断し周辺住民へ避難警報

を発令するためのデータなど、平時から収集するシステムとして採用されている⁽¹⁾。産業用途においても、農作物の生育監視や工場内の車両通行往来など特定された範囲で、それぞれの目的に応じた監視システムに幅広く採用されている⁽²⁾。

一般に、屋外の活用においてはデータを伝搬する距離が電信柱のように延伸し、かつ伝搬経路が放射状に広がる事が想定されることから、データを収集する地点に近づくに従い伝送トラフィックの不均衡が発生して、伝送の信頼性が低下する原因となり得る。また、センサの敷設がより広域な範囲に及ぶ場面においては、センシングエリアを分割しそれぞれ代表ノードとなる地点がデータを集約し、そこから3G回線などを利用してインターネット網にあるデータセンタに送信する手法が用いられる。このようなシステムでは、他エリアのデータの取り込みは、データ伝送負荷の増大やそれに伴う伝搬遅延、通信の干渉が発生する原因となる。今後より広範囲にセンサが設置されるに従って伝送到達の信頼性の低下が懸念される。

本研究では、広域なエリアをクラスタとして分割し、クラスタ単位で集約したデータをクラスタの代表ノード間を結ぶもう一つ別の無線センサネットワークを利用して、エリア間を転送させる階層構造(マルチレイヤ)を持つ。これにより前述の他クラスタ内の伝送負荷や干渉を防ぎデータ伝送を効率化し、広域センシングのデータを伝搬させる仕組みを提案する。

2. 関連研究

無線センサネットワークはネットワークを構成するノー

事業名 平成23年度 基盤研究
*1) 情報技術グループ

ド間でデータを伝搬 (Hopping) させるために、ハードウェアレベル、ソフトウェアレベル双方で制御を行う。この時、複数経路でノード間でデータが伝搬するマルチパスや、ノード間で無線通信するためのコネクションを複数確立するマルチチャンネル通信により、より複雑なデータ伝送を実現し通信システムの性能を向上させる研究がなされている。従来研究によれば、あるノードが複数の相手ノードからデータフレームを収集する場合に不通信の相手ノードが待機する時間を短縮する手法としては、収集する側のノードとの間で不通信を把握するためのリクエストとして通信ハンドシェイクを使う方式、ノードが近接して通信干渉を回避する、あるいは通信オーバーヘッドを低減するために複数チャンネルを使い分ける方式が提案されている⁽³⁾。この場合、ノードが相手と通信する時間的な機会を増やす事ができ、その結果、通信スループットが向上する事が期待できるが、制御が煩雑となる。また、指向性を動的に制御可能なスマートアンテナを用いた研究によれば、送信側ノード周辺にあるノードに受信干渉を与えず、目標とするより遠方のノードへ電波を照射しデータを伝送する事が可能な技術である⁽⁴⁾。この場合、遠方の目標となる位置、方角が既知である事が条件であり、場合によっては敷設の自由度が損なわれる可能性がある。

本研究はこれらの手法の利点を複合的に活用する事を特徴とする。第一にマルチチャンネルを使い、クラスタを代表するノードがクラスタ内のセンサノードからデータを収集するチャンネルと、収集したデータをクラスタ外へ転送するチャンネルとを使い分ける。また、収集するクラスタ内のネットワーク層 (クラスタレイヤ) とクラスタ間を結ぶネットワーク層 (基幹レイヤ) の2階層のマルチレイヤ構造とする事で遠方のノード、クラスタの代表ノード間を伝搬させ目的地へとデータ伝送する事を実現する (図1)。

前述の従来技術を融合する事で、本研究の新規性を見出している。特徴の違いとして、従来技術は単一ネットワークを広域化するのに対し、提案手法では別のネットワークから成る階層構造となっている。

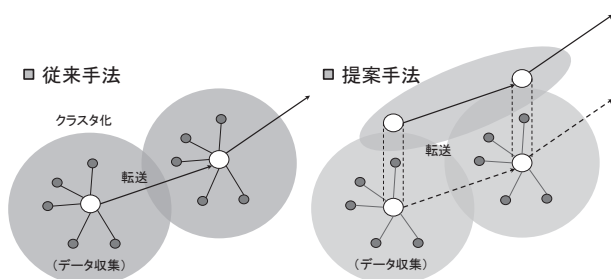


図1. 無線センサネットワークの広域化概念図
従来手法 (5 Hop), 提案手法 (3 Hop, 2 Hop)

ここでクラスタの代表ノードは、小規模なクラスタレイヤとそれより広範囲な基幹レイヤとを接合する中間ノードとして位置しており、本ノードをマルチレイヤ中間ノード装置と呼ぶ。

3. 提案手法

3.1 データの収集と転送 中間ノードの配下にあるクラスタレイヤのネットワークは、クラスタ内のセンサ情報を中間ノードが収集するためのネットワークである。クラスタレイヤのネットワークは任意のトポロジを構成する事が可能であるが、データ収集の信頼性と厳密性が求められる場合を除いて、シンプルなルーティングを実装する事が可能なスター型、あるいはクラスタツリー型が適当である。クラスタ内にあるセンサノード及びルーティングをつかさどる中継ノードは、IEEE802.15.4規格のPHY, MACプロトコルと、更に上位層のネットワークプロトコルを使ってデータを伝搬させる。例えば、センサネットワーク通信方式として普及している ZigBee を使って実装する事ができる。

クラスタネットワークが群をなし、互いにその代表ノードである中間ノード同士がおのおのに隣接するクラスタネットワークと連結する形状の代表として、メッシュトポロジがある。各中間ノードには収集されたデータが蓄積されている。伝送する経路が一意に決められるツリートポロジでは、局所的に経路途中にある中継地点に負荷が集中する場合、経路選択の柔軟性、自由度がないとしてネットワーク構成に何らかの欠陥があると見なされる。メッシュトポロジではこうした伝送路の過度な負荷を回避するルーティング機能が実装されている場合が多い。

本研究においては、中間ノード配下のクラスタレイヤネットワークと中間ノード同士を連結するメッシュネットワークによりこれまでより規模の大きな無線センサネットワークによるデータ伝送を構築する。

従来手法において、中間ノード及びルーティング経路に位置するノードでは、データの収集と収集したデータの転送処理は同時に行えない。一方、提案手法では中間ノードにおいて、複数ノードからデータを収集するシーケンスと中間ノードからデータを転送するシーケンスを同時に実行可能であり、従来方式に比べ密なデータ伝送が実現可能となる (図2)。これは収集と転送にかかる無線通信のチャンネルが異なるためである。中間ノードにおいては、中間ノード配下の無線送受信と中間ノード間の無線送受信を行うことで、収集と独立して効率的に転送をスケジューリングする事が可能となる。このとき、中間ノードが2つの異なるネットワークレイヤに介在するための要件は、互いに非同期的なネットワークにデータをのせかえるデータバッファを持つことと、配下のクラスタレイヤネットワークを管理する管理テーブルを持つことである。

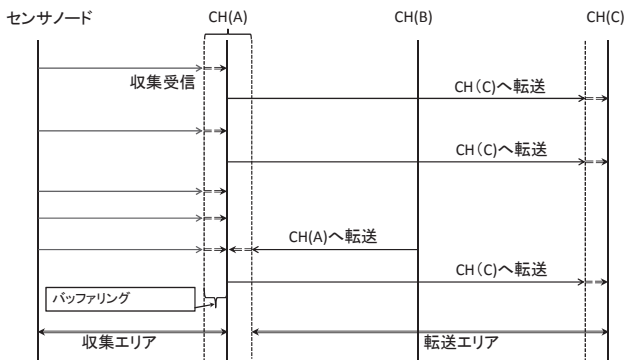
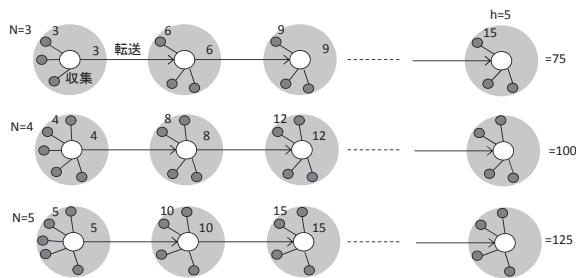


図2. 中間ノード装置における収集/転送シーケンス

3. 2 ホッピング数の削減とデータ伝送効率 データ伝送効率を定量的に評価するにあたり，評価トポロジをあらかじめ規定する必要がある。一般にネットワークを構成する前のノードが点在しているだけの状態からノード間を一つ一つ連結する事でネットワークを構成する事ができるが，シンプルなものから複雑な接続までとりうる場合が多岐に渡る。従来手法における代表的なネットワークとして，クラスタ間リレーホッピングがある。この方式は，中間ノードの様にクラスタ内にあるセンサ情報を収集し隣接するクラスタへデータを転送し伝搬させていくものであり，中間ノード間ホッピングという点では提案手法と変わりがない。ただし，クラスタ内とクラスタ間の伝送チャンネルが共通である事から，クラスタ内の受信とクラスタ外への転送が排他で行われる事が相違点となる。

クラスタ内のセンサ数を一定としクラスタ間をホッピング（伝搬）して目的ノードに到達するまでに必要な資源の対比を図示したものを図3，図4に示す。この様に，評価トポロジを規定する事で，各図において期待される資源を数式で表す事ができる。

□ (従来手法) クラスタ間リレーホッピング



各クラスタをホッピングして最終ノードに到達する資源 = $\sum_{k=1}^h N \times k + \sum_{k=1}^{h-1} N \times k$
 N: クラスタ内ノード数 h: ホッピング数

図3. 従来手法 (リレー方式) のホッピングによる伝送量資源

クラスタ内ノード数 N，1ホッピング単位のホッピング数 h における各クラスタにあるセンサ情報が目的ノードに到達する従来手法での伝送資源は式 (1) で表わされる。

$$P = \sum_{k=1}^h N \times k + \sum_{k=1}^{h-1} N \times k \dots\dots\dots (1)$$

□ (提案手法) クラスタ間リレーホッピング (ホッピング数削減)

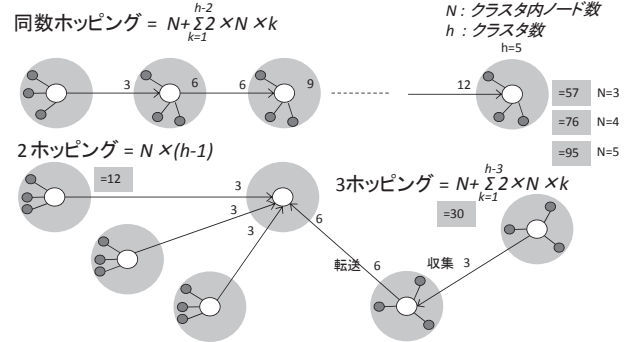


図4. 提案手法 (マルチレイヤ方式) のホッピングによる伝送量資源

一方，同数ホッピングした提案手法での伝送資源 (式2) で表わされる。

$$P = N + \sum_{k=1}^{h-2} 2 \times N \times k \dots\dots\dots (2)$$

従来手法では，隣接するクラスタから見た場合，転送元となる中間ノードはクラスタ内のノードの一つとして取り扱われるが，提案手法では，クラスタ内でデータを1点で収集するツリートポロジとは別のトポロジを選択する事が可能で，基幹レイヤでメッシュネットワークを構築し転送する事ができる。このため基幹レイヤでの転送先が1ホップ単位以上の送信出力とし，一度にホップする間隔が増える事でホッピング数を削減する事ができる。ホッピング数が増える事で連結する形状が変わる事によって最終ノードに到達する資源の数式 (2) は適用できなくなるが，本提案手法の特徴としてホッピング数が削減されるに伴い目的ノードに到達する資源の数を減らせる効果がある。

4. 所要伝送時間短縮の定量的評価

4. 1 評価手順 本研究の定量的効果を示すにあたり，表1に示すパラメータを用いてシミュレーション評価を行う。この時，図5で表すホッピングモデルを評価対象とし，全てのセンサノードが1回データを伝送するのに必要とする時間を1タームとして，伝送量に対する経過時間を算出し評価した。

表1. 評価に用いた形容詞

ノード転送量	5 ms/回 (1.2 kbit/ max)
クラスタ内センサノード数	10 (総数50)
ホッピング数	5 (従来法) 2または3 (提案手法)
送受交替割合	50 %

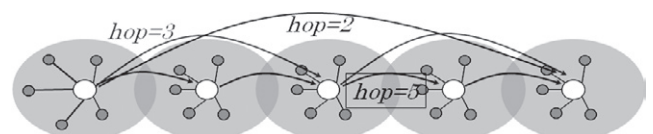


図5. 評価対象とするホッピングモデル
従来手法 (5Hop)，提案手法 (3Hop, 2Hop)

4.2 評価結果 伝送量に対する経過時間を算出し評価した結果を図6に示す。リレー方式による従来手法に対して、提案手法はホップ数を削減しつつスケールメリットを出す事ができる事から、その削減例として3ホップ、2ホップでの算出を行った。

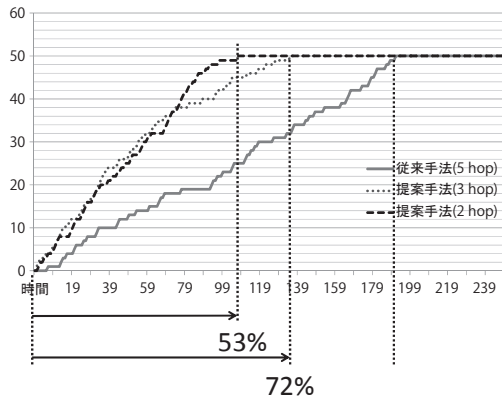


図6. 従来手法と提案手法との伝送効率の対比
従来手法 (5 Hop), 提案手法 (3 Hop, 2 Hop)

従来手法による所要時間推移とその達成時間を100%とした。提案手法におけるホップ数を削減した例として従来比5ホップから3ホップへ削減した場合で72%, 2ホップへ削減した場合で53%となる。式(2)で与えられる静的な効率との相違として、データの送受信を切り替える時に考慮すべきタイミングがある。これは、送信するノード側と受信するノード側が共に無線通信の呼を確立する必要があるためである。送信するノード側が送る時点において受信する側が他ノードから受信しているか他のノードへ送信中である可能性があるため、送信するノード側では待機時間となる。シミュレーションではこれが発生する確立を50%と仮定した。ネットワークを構成する各ノードのこうした振る舞いはガウス分布を持つと仮定した複雑な資源算出を行う事が好ましい。

5. まとめと今後の課題

周辺のセンサデータをひとまとめに収集するクラスタに分割して周辺のセンサ情報のデータを収集し、各クラスタを代表する中間ノードを連結して別の基幹レイヤのネットワークを構成するマルチレイヤ無線センサネットワーク方式の提案を行った。従来は縦列によるホッピングであり、収集・転送の各負荷の増大が無線通信の衝突・干渉の原因であった。これに対し提案手法では、クラスタ内通信とは別の通信チャネルを使用し、データの収集と転送を分離する事で、広域化に不可欠な通信ホップ数を削減する事ができる。また、効率的な伝送を実現する事をシミュレーションにより示した。

本研究の中で行ったシミュレーションにおいては、広範囲に点在するノードがクラスタ分割後も均一に散在し、どのクラスタのネットワーク負荷も均一であると仮定した。ところが、実際のネットワークにおいては局所的に負荷が

高まるボトルネックノードや、マルチフェーシングなどの無線通信をする上で障害となる環境の違いが存在する。これらの課題をテーマとした現象の推論やその解決について議論する事が重要である。

マルチレイヤ中間ノード装置は無線センサネットワークを使って広域にデータ伝送させる基本技術であり、今後、付加技術を実装する可能性を有している。その一例として、無線センサネットワークにおけるネットワーク上でのエネルギー効率を考えたデータ負荷を削減するために、データ収集地点となる中間ノードにおいて集計関数(合計, 最大/最小, ヒストグラムなど)を適用する研究と融合させる事ができる⁽⁵⁾。これらがもたらす結果として、ネットワークで送受信されるデータ量を大幅に減らし、帯域幅の消費量及びエネルギー量を削減することが可能となる。これらの手法については、センサノードから送信されるデータ項目にアクセスできる必要がある。この場合、主にプレーンテキストでデータを送信する事が多いため、外部からの盗聴に関する脆弱性が指摘されている。セキュリティ面での信頼性を向上させるための研究の継続、発展が期待できる。
(平成25年7月22日受付, 平成25年8月14日再受付)

文 献

- (1) K.K. Khedo, R. Perseedoss, and A. Mungur: "A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System", International Journal of Wireless & Mobile Networks, Vol.2, No.2 (2010-5)
- (2) 戸部義人: 「無線センサネットワークの技術動向」, 信学論B, Vol.J90-B, No.8, pp711-719 (2007)
- (3) 間瀬憲一, 阪田史郎: 「アドホック・メッシュネットワーク ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて」, pp.116-124, コロナ社(2007)
- (4) 坂本浩, 渡辺正浩, 満代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, 「S-UNAGI: スマートアンテナを用いた階層型センサネットワークの実装」, 「マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム」
- (5) W.S. Zhang, C. Wang, and T.M. Feng: GP2S: Generic Privacy-Preservation Solutions for Approximate Aggregation of Sensor Data. In: Proc of 6th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing Society Press, pp.179-184 (2007)