

センサネットワークにおける UCS 中空階層型クラスタリングの提案

菅原康太[†] 高橋修[‡]公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科[†], 公立はこだて未来大学システム情報科学部[‡]

1 背景

近年, ZigBee のような短距離無線通信規格の規格化や MEMS 技術の発達に伴ってワイヤレスネットワーク上で無線通信が可能な小型センサ端末が開発されている。そして, これら小型センサを用いたセンサネットワークに関する研究が行われている。通常, センサネットワーク上で利用されるセンサ端末は電池などの有限電力での動作を行う必要があるため, 電力を効率的に利用しなければ電力切れのセンサが頻発し, ネットワークの維持が困難になり, システムの運用が不可能になる。そのため, 最も重要なテーマとして省電力化によるシステムのライフタイムの延長がある。

2 研究の目的

センサネットワークに対して省電力ルーティングプロトコルを提案することで通常のセンシング活動はもとより近年, 増加している災害現場での救援活動などへの利用も視野に入れてゆく。災害時にはある一定期間内での安定した情報収集が条件であり, センサ端末を逐一, 回収して電源の交換を行うことは設置環境及び交換労力を考慮すれば現実的とはいえない。そのため, 本研究では以下のような目的を設定する。

- 1) センサ端末の個々の省電力化
- 2) センサネットワーク全体でのライフタイムの延長
- 3) 耐故障性

3 研究課題

3.1 従来の研究状況

従来の研究としてクラスタリングとクラスタサイズの 2 点について触れる。クラスタリングとはクラスタと呼ばれる少数のノードで構成されるグループを形成してデータを一か所に集めることで省電力化を図る手法である。最もシンプルなクラスタリングとして LEACH[1]が挙げられる。LEACH ではセンサノード(SN)が確率によってクラスタヘッド(CH)と呼ばれる, 周囲のセンサのデータの集約を行うノードに選出される。その後, 選出された CH は周囲の SN とクラスタを形成し, 集約したデータを直接通信で Sink へ送信する。このプロトコルは CH が直接 Sink へデータを送ることによる電力消費の大きさとセンシングエリアの規模の制限が欠点と言える。これらの欠点を補う手法としてクラスタの階層化とマルチホップを取り入れた階層型クラスタリングがある。階層化クラスタリングの例として hEPAS[2]が挙げられる。hEPAS は階層数 h での多重階層のクラスタを形成する。この手法では各階層のクラスタ内でデータ集約を行うことでネットワーク全体での総消費電力の削減を図っている。また, 又吉ら[3]の研究では上述 hEPAS の問題点として無駄な遠回り経路構築を必要とする CH の選出の可能性とマルチホップによる HotSpot 問題を指摘した上で CH 選出に距離 d による重み付け確率の適応を提案している。

一方, クラスタサイズの研究として UCS[4]が挙げられる。UCS では通常はクラスタサイズが一律に等しいのに対して Sink からの距離でエリアを 2 分割し, 内と外のエリアでクラスタサイズを変える手法である。この手法でのシミュレーション結果として従来の等しいクラスタサイズプロトコル(ECS)と比較して CH のデータ集約効率の 10-30%の向上が見られた。

3.2 要件と課題

省電力に加えてライフタイム延長のためにネットワーク全体の消費電力の均一化が必要であり, HotSpot 問題の軽減として Sink 付近での消費電力の削減を中心としたルーティングアルゴリズムの設計が課題である。耐故障性はクラスタリングを行うことですでに一定の要件を満たすため, 本研究では課題として考慮しない。クラスタリングでは形成されたクラスタ内で CH が平均値, 最大・最小値, 標準偏差などの集約情報を保持し, 送信するため, クラスタ外へは故障センサの有無, ルーティング情報などの集約情報以外のデータが流れずに影響を与えないためである。

Proposal of Fistulous Hierarchical Clustering with Unequal Cluster Size

[†]Kouta Sugawara · The graduate school of Future University Hakodate, Systems Information Science

[‡] Osamu Takahashi · Future University Hakodate

4 ルーティングアルゴリズムの提案

4.1 提案システムの概要

本研究では, Sink を中心としたセンシングエリアを対象とする。ルーティングアルゴリズムは 3.1 節を基にした表 1 の比較から, 階層型クラスタリングを選択し, 又吉らのものをベースとして設計する。センシングエリア内では Sink からセンシングエリア端までの距離を a とし, a を t_1, t_2, t_3 で 3 分割した 3 つのエリア A_{t1}, A_{t2}, A_{t3} で構成させる(図 1)。 A_{t2}, A_{t3} のエリアでは従来の UCS と同様にエリアごとでクラスタサイズを変えてクラスタを形成し, 新規に追加した A_{t1} のエリアではクラスタを形成せず, エリア内でのデータ集約を行わない。

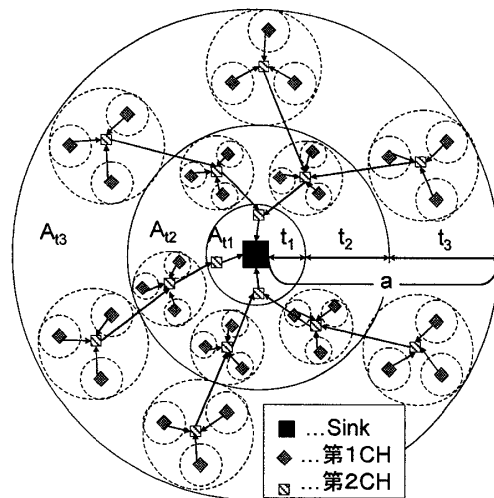


図 1 提案手法のセンシングエリア構成

4.2 提案システムの前提条件

本提案方式では MICAz などのセンサ端末を対象としている。そのため, 移動性は従来研究と同様に Sink 及び SN にはないものとする。2 章での今後の適応環境を考える上で設置箇所からの移動が困難であることが想定されるため, 条件として不足ではないと考える。また, 各センサの初期電力は一律に等しく, センシングでの消費電力は MICAz 消費電力内訳[5]から考えないものとする。

4.3 HotSpot 問題の軽減方法

本提案方式では Sink に最も近い A_{t1} エリアではクラスタリングを行わない。このエリアは Sink から直接通信が可能な 0 ホップ SN で構成され, センサはセンシングを行って直接 Sink へ自身のセンシングデータを送信するセンシングノードと 1 つ外の A_{t2} エリアの CH から集約データを受信し, 自身のセンシングデータと共に Sink へセンシングデータを送信する中継ノードから構成される。これは HotSpot 問題の原因が Sink に近づくほどマルチホップによる送受信の負荷が増加することと各クラスタ形成処理, 送受信及びデータ集約処理と考えられるためである。

4.4 ライフタイム延長の実現方法

クラスタリングによるセンサネットワークでの消費電力は HotSpot 問題も影響し, Sink へ近づくほど大きくなる。そのため, 上述 4.3 節にある A_{t1} エリア適応による HotSpot 問題軽減に加え, クラスタリング手法に階層型クラスタリングを用いる。適応理由として新原ら[6]によるシミュレーション結果からクラスタリング手法に階層型クラスタリングを用いることで非階層型クラスタリングに比べ約 34%の消費電力改善が示されているため, A_{t1} エリア適応時同様の効果が得られると予測されるためである。

表 1 クラスタリングの比較

	LEACH	hEPAS	文献[1]又吉ら
プロトコル	非階層型クラスタリング	階層型クラスタリング	階層型クラスタリング
メトリック	ラウンド, 確率	確率	距離ベース確率
利点	•direct, multi-hop より省電力	•非階層型より省電力	•遠回り経路による無駄な消費電力を削減
欠点	•ラウンド制による余計な電力消費 •少電力残余ノードの CH 選出の可能性	•HotSpot 問題の発生 •遠回り経路構築の可能性	•Sink 付近での無駄なクラスタリングによる電力消費
特徴	•所属先クラスタは電波強度で選択	•ラウンド制の廃止	•hEPAS に距離 d に基づいた確率を用いた改善手法

4.5 アルゴリズム設計

本提案方式での CH の交代タイミングは確率及び電力残余と関連付ける。ラウンド制を用いない理由として各 SN があらかじめ設定されたフェーズ状態遷移を繰り返すことで CH の立候補から通信までを行っているため、電力残余の変化にリアルタイム対応できない、必要以上のリクラスタリングの発生で無駄な電力を消費する、などの問題点が存在するためである。また、クラスタ選択を行う際のメトリックとして「最も近い CH」と「最も電波強度が強い CH」の2つに大別することができる。極端な状況を想定すると「最も近いが、電波強度が弱く、送信が2回必要なCH」と「距離は遠めであるが、電波強度が強く、送信が1回で済むCH」の2つのクラスタの存在が考えられる。以下に2回送信の送信電力に対して、1回送信の送信電力がどのくらいの距離まで下回るかを比率として示す(図2)。

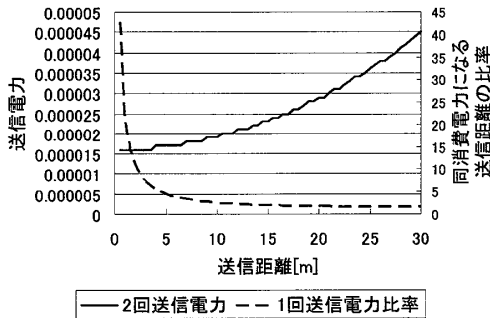


図 2 消費電力比率

図2より、15m 付近までは2回送信の距離に対して平均で6.01倍、最高42.8倍の距離まで1回送信の方が消費電力を抑えられる。それ以降は平均1.44から1.51倍の距離までは1回送信の方が消費電力を抑えることができる。つまり、CHとの距離が5m未満は5.42倍の距離まで、5m以降は1.4倍までなら遠くても電波強度の強いCHを選ぶ方が消費電力を抑えることができる。このことからクラスタの選択は電波強度から選択する。

さらに、At1 エリアでは中継ノードとセンシングノードが混在するため、密度が高い場所では複数のノードが中継ノードになる必要がなく、1ノードが中継を行うことで、その場所を通るルーティングの維持率を高く保つことができる。

4.6 処理の流れ

本節では4.5節に基づくクラスタ形成から送信までの処理の流れについて述べる。なお、hを最大階層数、kiをi階層でのCH数、pを確率、disを2点間の距離、denを密度と定義する。

i) 第1段階i階層CH選出

第1段階i階層のCHを確率 $p_{1i}(d_{is})$ で選出する。

$$p_{1i}(d_{is}) \in [k_i/k_{i-1}] \quad (i=1,2,\dots,h) \dots(1)$$

ii) 第1段階i階層クラスタ形成依頼

選出されたCHが周辺ノードへ自身のクラスタへの参加を、自身の位置情報GIDを付加したうえで要請メッセージとしてクラスタ半径 b_i に送信する。ここで、IDは各SNに割り当てられた一意な番号とする。

$$b_i = 2a/\sqrt{k_i} \dots(2)$$

iii) 第1段階i階層クラスタ形成

各クラスタからの要請メッセージを受信したSNは電波強度が最も強いCHのクラスタを選択し、クラスタ参加メッセージを返信する。

iv) 第2段階i階層CH選出

第1段階i階層クラスタ形成終了時、どのクラスタにも属さないSNの中から以下の式3を満たす確率 $p_{2i}(d_{is})$ でCHを追加で選出する。

$$p_{1i}(d_{is}) + p_{2i}(d_{is})(1 - p_{1i}(d_{is})) \left(1 - \frac{p_{1i}(d_{is})b_i^2}{a^2} \right)^{k_i-1} = \frac{k_i}{k_{i-1}} \dots(3)$$

v) 第2段階i階層クラスタ形成依頼・形成

クラスタ形成依頼・形成は第1段階i階層時のものと同様とする。

vi) i階層データ集約

クラスタ内のSNから受信したセンサデータを圧縮率 γ で圧縮する。

vii) At1 エリア中継ノード選出

At1 エリアに存在するノードから確率 $p(d_{is}, d_{en})$ で選出する。

viii) エリア間通信

エリア内の各最高層CHが内側エリアのCHへ向けて送信する。

ix) Sink-At1間通信

At1 エリア内の中継ノードがSinkへ向けて送信する。複数の中継ノードが同じデータを受信した場合を考慮し、Sinkとの距離を基に待ち時間を設定する。待ち時間経過後、Sinkへの送信を開始する。待ち時間中に他中継ノードからの送信を検知した場合、送信待ちを解除し、データを破棄して送信を中止する。

5 考察

本方式ではSink付近でのクラスタリング処理がHotSpot問題の要因と考えられるため、クラスタリングで行われるクラスタ参加の要請メッセージの送信とクラスタ形成の処理にかかる消費電力を削減することが可能である。しかし、その影響でHotSpot発生箇所の外側のエリアに負荷が増えることが予想される。そのため、UCSを導入することで2つのエリアのクラスタサイズを自由に設定できるため、外側のエリアに消費電力の比重を置くように調節して非クラスタリングエリアからくる負荷を分散することが可能となる。クラスタサイズのパラメータは実験を通して調節する必要がある。

以上から、センシングエリア全体での消費電力の削減と偏りの制御によるライフタイムの延長が可能になると考えられる。

6 今後の課題

基本実験ではセンシングエリアの規模、センサ数を考慮し、シミュレータによる基礎実験及び評価を行う。評価項目として各階層での総消費電力、Sinkからの距離毎の平均消費電力、非カバー率、ホップ数を想定している。比較ルーティングプロトコルとして直接通信、マルチホップ、LEACH、hEPASを考えている。

参考文献

- [1] W. R. Heinzelman et al., "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol.1, No.4, Oct. 2002, pp.660-669
- [2] Y. P. Chen et al., "Energy-Efficient Data Aggregation Hierarchy for Wireless Sensor Networks," Second International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks (QSHINE '05), pp.7, 2005
- [3] 又吉哲次 他, "多重階層型センサネットワークにおける集約センサの選択手法の評価," 電子情報通信学会技術研究報告書, vol.106, No524, pp.11-16, 25 Jan. 2007
- [4] S. Soro et al., "Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks via Unequal Clustering," 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS '05), 2005
- [5] Crossbow, "MPR2400J/MPR2600J/420/520 MIB User's Manual," クロスボ社, Jan. 2008.[PDF]. Available:http://www.xbow.jp/mpmib.pdf. [Accessed Jun. 18, 2008].
- [6] 新原電馬 他, "省電力化のための階層型センサネットワークにおけるクラスタサイズ制御に関する研究," 2007