

ロバスト性を有する WSN 用ルーティングアルゴリズムの提案と実装

指導教員 福田浩章

川部勝也

1. 背景

IoT の普及に伴い、無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) は自然科学、医療、軍事など様々な分野で利用されている。WSN は周囲の環境情報を収集し、その情報を一定間隔でベースステーションに送信する [1]。この場合、ベースステーション付近のノードにトラフィックが集中してバッテリーの消費が多くなる。ベースステーションに繋がるノードがダウンすると、それ以降のデータはベースステーションに送信されなくなる。この問題を解決するために、Distributed Hash Table(DHT)[3] を WSN 上で構築し、負荷を分散する研究がある [2]。DHT は中央サーバが存在せず、純粋な P2P 型のネットワークを実現することができる技術である。管理するデータの識別子をファイル名やファイル自体からハッシュ関数を用いて算出されるハッシュ値で表現する。多くの DHT は $O(\log N)$ で探索が可能で、負荷が一つのノードに偏らない。Chord[7] は DHT の一種で、識別子が時計回りに増加していく論理的なリング状のネットワークを導入している。WSN では物理的な距離が離れているとパケットが届かず、Chord を適用するにはこの問題を考慮する必要がある。本研究では、WSN で Chord を構築するルーティングアルゴリズムについて提案する。

2. 関連研究

2.1 CSN

Chord は論理的なリング状ネットワークを構築するが、リング上でノード同士の距離が近くとも、物理的な距離が遠い場合もある。その場合、パケットが届かない可能性があり、データの検索を保証できない。CSN は物理的に近い距離のノード同士でリングを作り、階層化することでこの問題を解決している。しかし、CSN では管理者が WSN に保存されているデータを検索する前提なので、最上層のノードからしかデータ検索を行えない。

2.2 CMSN

CMSN[5] は CSN をモバイルエージェントの探索用に拡張した研究である。リングに参加しているノード全てからデータ検索を行えるが、検索を行ったあとの結果の返信についてはサポートしていない。さらに、リングの構築には個々のノードがどの位置で、どの階層のリングに属するかを予め決定しておく必要がある。これは、ノードの配置が限定される上、ノード毎に階層の情報を個別にプログラムする必要がある、管理者の負担となる。

本研究の提案するアルゴリズムは、ノードに階層の

情報を持たせず、ノードの配置に応じたリングを構築するルーティングアルゴリズムである。更に、検索時に経路情報を持たせ、確実な検索結果の返信を保証する。

3. リング構築アルゴリズム

3.1 構築手順

前提として、ノードが持つ初期情報は WSN 全体でのクラスタヘッド、最上層のリング参加限界数 (top_limit) とする。ネットワークの構築はクラスタヘッド (N1) がリング構築メッセージをブロードキャストして開始する。メッセージを受け取ったノードのうち、どのリングにも属していないノードは ACK を返す。N1 は受信した ACK の中で物理的に最も近いノード (仮に N2 とする) をリンク先を選び、その旨を N2 に対して通知する。このメッセージには現在のリングに参加しているノード数、クラスタヘッドの識別子、所属する階層の深さの情報が含まれる。自身が所属する階層の深さを $level$ とすると現在参加しているリングの参加限界数 ($limit$) を以下の式 (1)(2) で表す。

$$e = level - 1 \quad (1)$$

$$limit = top_limit / 2^e \quad (2)$$

現在のリングに参加しているノード数が参加限界数未満ならば、同様の手順でリンク先のノードを探索する。これを繰り返し、リングに参加するノード数が限界に到達したか、ブロードキャストに ACK が返ってこなかった時はリングの構築完了メッセージをクラスタヘッドに送信する。この時、リングの終端からクラスタヘッドにパケットが届かない可能性がある。そのため、リングの終端からリング内のクラスタヘッドにパケットを送信する場合のみ、リング内を逆に辿ってパケットを転送することで、パケットの到達を保証する。リング構築完了のメッセージを受け取ったノードは下層のリングを構築するため以上の手順を繰り返す。下層のリング構築を完了すると、同じ階層の隣接しているノードへ下層リング作成のメッセージを送信する。メッセージを受信すると、同様に下層のリング構築を開始する。これを繰り返し最下層のリングまで構築する。

4. ハッシュ値の割当

リング構築後、各ノードにハッシュ値の範囲を割り当てる。ハッシュ値は SHA-1[6] を用いて算出する。まず、最上層では、ハッシュ値の最大値を最上層に参加するノード数で割り、個々に割り当てる。下層では、一つ上の層に属するクラスタヘッドの最大値を下層のリング参加ノード数で割り、同様に割り当てる。これを繰り返し、リングに参加したノード全てに自身の属する

上層と、自身がクラスタヘッドとなる下層での最小値と最大値をそれぞれ割り当てる。

5. データ検索の拡張

自律的なデータの検索を行うためのアルゴリズムと、その検索結果を検索元のノードに返信するためのアルゴリズムについて述べる。検索時、返信時の通信パケットの構成はハッシュ値、経路情報、検索結果から成る。経路情報にはノードの識別子を格納し、長さはノード総数を N 、階層数を M とした時 $2 \cdot M \log N$ となる。経路情報により、検索結果の確実な返信を保証する。以下に検索についてのアルゴリズムを示す。ノードは検索クエリを送信する前に探索する値を自身の最上層での最小値、最大値 (min, max) と比較する。最小以上、最大以下の範囲でなければ経路情報にノードの番号を格納して上層の隣接ノードへクエリを送信する。範囲内であれば、下層での最小値、最大値 (child min, child max) と比較する。下層の範囲内でなければ下層での隣接ノードへクエリを送信する。下層の範囲内であれば、自身の保持するデータを走査し検索結果を経路情報に格納されている識別子を元に返信する。クエリを受信したノードは以上の比較手順を繰り返し、ハッシュ値の範囲を担当するノードに到達するまで繰り返す。

Algorithm 1 データ検索

```

if min <= key <= max then
  if child min <= key <= child max then
    scan data
  end if
else
  insert my information to referer
  send query to child successor
end if

```

6. 検証, 考察

検証には WSN 用 OS である Contiki[8] と付属するシミュレータ, Cooja を用いた。検証用プログラムの実装は C 言語で行った。

6.1 リングの構築

ノードを正方形の領域内にランダムに配置し、配置数と領域の大きさを変え、リングの構築をそれぞれ 20 回行った結果を表 1 に示す。全ての実験で現実的な時間内で確実にリングを構築することができた。リングの参加率がこのような結果となったのはノードの配置によって図 1 のように、リングに参加しているノードの分布が領域内の局所的な部分に集中してしまい、リンクするノードを発見できなくなったためと考える。

配置数 (個)	最上層参加層数 (個)	参加率 (%)	リング参加ノード数 (個)	構築時間 (分:秒)	領域 (縦*横 m)
72	6	30	75%	8:35	200*200
72	8	56	58%	11:42	200*200
144	8	56	52%	12:45	300*300

6.2 データ検索

最上層の参加数を 8 個、階層数を 3 個、合計参加数を 32 個のリングを構築し、全てのノードに 10 回の検索を行わせた。この時に検索後の応答パケットに経路情報を持たせ、それを元に返信する場合と、近くに検索元のノードが存在しなければ近隣のノードをランダムに一つ選び、送信するランダムなマルチホップ通信による応答との消費電力を比較した。その結果を図 2 に示す。消費電力は経路情報をもたせた場合、ランダムなマルチホップに比べて 50% 近く削減されている。WSN は数年に渡る長期間での運用となるため、消費電力の差は運用期間、ノード数によって非常に大きくなると考えられる。従って、結果を検索元のノードに返信するに経路情報を利用するのは有用であると考ええる。

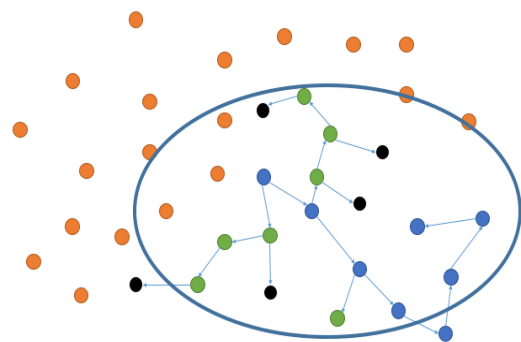


図 1: リングに参加しているノードの分布

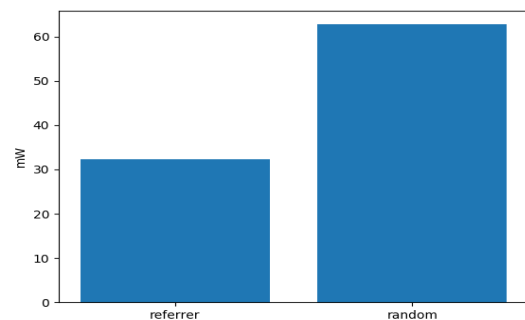


図 2: バッテリー消費量

7. まとめ

本研究では WSN においてノードの配置に応じた動的なルーティングアルゴリズムを実現し、ノードの参加率、検索結果の返信に経路情報を用いた場合の消費電力を比較することで有効性を調査した。今後の課題として、リングが WSN の領域内で均等に分散せず、局所的に形成されてしまったため、参加率が落ちてしまった。そこで、リンク時に返信する ACK に指向性の情報を持たせ、リングの形を制御することでより多くの

ノードの参加を実現する必要がある。

参考文献

- [1] Khan, Imran, et al. "Wireless sensor network virtualization: A survey." *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 18.1 (2016): 553-576.
- [2] Thanh, Vinh Vu, et al. "A survey of routing using dhts over wireless sensor networks." *Proceedings of The 6th international conference on information technology and applications (ICITA 2009)*. 2009.
- [3] 江崎浩: "P2P(ピア・ツー・ピア) 教科書", インプレス R&D (2008-1)
- [4] Ali *et al.*: CSN: A network protocol for serving dynamic queries in large-scale wireless sensor networks, In *Proceeding of the Second Annual Conference on Communication Networks and Services Research*, 2004, pp.165-174.
- [5] Fukuda, Hiroaki, Paul Leger, and Keita Namiki. "CMSN: An Efficient and Effective Agent Lookup for Mobile Agent Middleware." *J. UCS* 22.8 (2016): 1072-1096.
- [6] Xiaoyun Wang, et al. Finding Collisions in the Full SHA-1, *Crypto 2005*
- [7] Stoica, Ion, et al. "Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications." *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 31.4 (2001): 149-160.
- [8] Dunkels, Adam, Bjorn Gronvall, and Thiemo Voigt. "Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors." *Local Computer Networks*, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on. IEEE, 2004.