

## センサネットワークのためのトポロジ制御方式の評価

茂木 信二† 吉原 貴仁† 堀内 浩規†

(株)KDDI 研究所†

## 1. はじめに

センサネットワークの利用可能時間を長くするためには、利用可能な電力に限りがあるセンサノードの電力消費の抑制が重要となる。電力消費の主要因はノードが用いる無線の送信電力であり、その低減が有効となる。各ノードが送信電力を増減すると通信範囲が変わりノード間を接続する無線リンクの接続形態(以下ネットワークトポロジと呼ぶ)が変化する。その結果ネットワークの接続性が失われてしまうことがある。

そこで筆者らは各ノードが自律分散的に送信電力を増減しても接続性を確保した上で省電力なトポロジに制御可能とする方式を提案している[1]。本稿ではシミュレーションを用いて提案方式を評価した結果を報告する。

## 2. 従来方式

従来の代表的なネットワークトポロジ制御方式[2]は隣接ノードの位置情報に基づいて送信電力を低減する方式を提案している。送信電力はノード間の距離により一意に決まることを仮定し、その上で接続性が確保できることを示している。しかしながら、そのような仮定は必ずしも成立しないことが実際のセンサノードを用いた実験結果で示されている[3]。よって接続性が失われセンサデータの収集が困難になってしまう問題がある。

## 3. 提案方式の概要

## 3.1 隣接ノードの探索

各ノードは起動するとパケットの広報により隣接ノードを探索する。新たな隣接ノードを発見すると、送信電力を変えて複数パケットを送受信することでそのノードへの必要最小限の無線送信電力を知る。その結果、ノード  $i$  が発見した隣接ノードの識別子  $j$  とそのノードまでの無線送信電力の値  $TP_{i \rightarrow j}$  の組からなるリスト(以下 Connectivity Set(CS)と呼ぶ)を作成する。CS 内で最大の送信電力を用いることで CS 内の全ノードを通信範囲に含むことができることから、各ノードは、自身が用いる送信電力を CS 内の最大値に設定する。

## 3.2 CS の更新手順

各ノードは前節で述べた隣接ノードを探索した後、送信電力が CS 内で最大のノードを順次取り除く以下の手順を実行し、送信電力を低減する。

- (1) CS 内で送信電力が最大のノードを  $X$  とする。
- (2)  $X$  との直接のリンクの経路の有無をネットワーク全体への広報を利用して探索する。
- (3) 探索の結果見つかった経路上のリンクの重み  $TP_{i \leftrightarrow X}$  ( $\{TP_{i \rightarrow X} | \max(TP_{i \rightarrow j}, TP_{i \leftarrow j})\}$ ) が、自身と  $X$  間よりも小さい場合、CS から  $X$  を除く。
- (4) CS のノード数が 1 ならば終了する。CS 中で未終了

*Evaluation of Topology configuration  
for Sensor Network*

†Shinji Motegi, Kiyohito Yoshihara and Hiroki Horiuchi

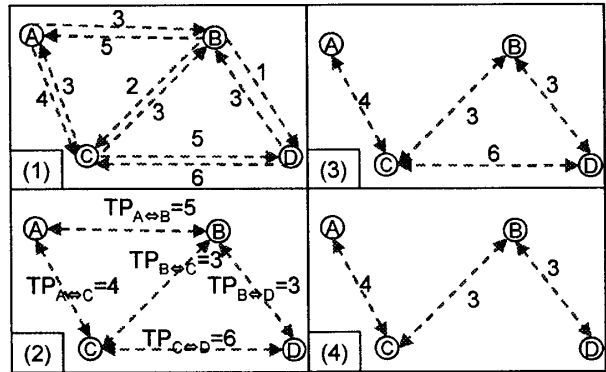


図1 送信電力制御によるトポロジ構成例

のノード数が 1 の場合も終了する。それ以外の場合(1)に戻る。終了したら CS 内のノードに終了を通知する。

例えば図 1(1)の矢印は隣接ノードの探索の結果見つけた隣接ノードへと向かう無線リンクを示し、数字は必要最小限の送信電力を示す。図 1(2)は2ノード間のリンクの重み  $TP_{i \leftrightarrow j}$  を示す。ノード B は、CS の更新手順を実行し自身の CS<sub>B</sub> の中で送信電力が最大のノード X はノード A となる。X との直接のリンクの経路の有無を探索した結果、B は経路 B $\leftrightarrow$ C $\leftrightarrow$ A の存在を知り  $TP_{B \leftrightarrow A} < TP_{B \leftrightarrow C}$ ,  $TP_{B \leftrightarrow A} < TP_{C \leftrightarrow A}$  を満たすことから CS<sub>B</sub> から A を取り除く。ノード B は自身の送信電力をそれまでに使っていた送信電力”5”から更新された CS<sub>B</sub> の中で最大の送信電力”2”へと低減する。これより B は A との直接のリンクは切断するものの(図 1(3)), その代替となる経路の存在を確認していることから A との接続性を確保できる。ノード D も同様の処理で、ノード C を CS<sub>D</sub> から取り除く。その結果、ノード A と D は CS の数が1となり本手順を終了する。またノード B と C は CS 内で本手順が未終了なノード数が 2 つ以上存在しなくなる。これよりそれらは本手順を終了する(図 1(4))。以上の手順を各ノードが自律分散的に実行することでネットワークの接続性を確保した上で送信電力を低減可能となる。

## 4. 評価

## 4.1 評価環境

提案方式により構成するネットワークトポロジの接続性と送信電力の低減効果を評価する。提案方式、従来方式[2]並びに最大の送信電力を用いる方式のシミュレーション・モデルを TOSSIM シミュレータ[4]に実装した。TOSSIM のパケット損失率モデルは、ある1つの無線送信電力の値を用いた実験結果を反映したモデルのみとなっている。そこで Mote と呼ばれる市販のセンサノードを用いて無線送信電力の値を変更して実験を行い、その結果をパケット損失率モデルに導入した。

従来方式[2]は先に行った基本評価[1]でネットワークの接続性を維持することができなくなってしまう結果となった。ネットワークの接続性を確保するためには従来方

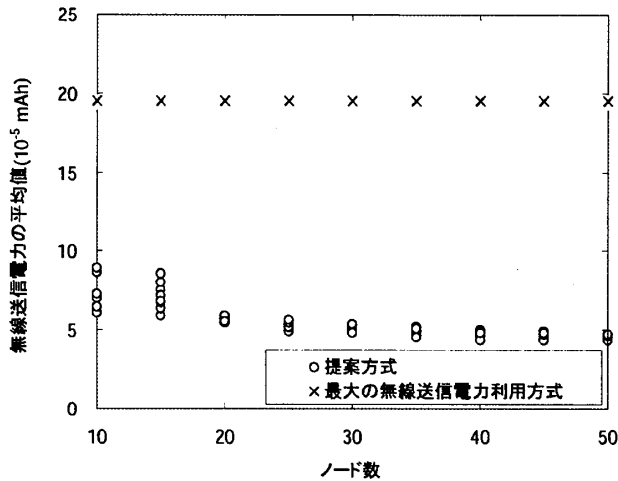


図2 ノード数と無線送信電力

式[2]よりも最大の無線送信電力を用いる方式の方が有効である。よって以下では最大の無線送信電力を用いる従来方式と提案方式とを比較評価する。各ノードが送信電力を増減することで得られるネットワークポロジは、ネットワークを構成するノード数やノードを配置する領域の広さに依存することからそれらを変えて評価を行う。

#### 4.2 評価結果

ネットワークを構成するノード数を変えてシミュレーション評価を行った。ノードを配置する領域は一边が50メートルの正方形とした。ノード数は10ノードから10ノードずつ増加させ50ノードまで変えて、各ノード数のシミュレーションを10回行った。ノードは無作為に領域内に配置した。図2は、ネットワークを構成するノード数と無線送信電力の平均値のシミュレーション結果を示す。図中で1つのプロットは1つのシミュレーション結果を示している。なお全てのシミュレーション結果で提案方式はネットワークの接続性を維持することを確認した。提案方式は最大の送信電力を用いる従来方式に比べ大幅に送信電力を低減する結果を得ている。ノード数が10から25ノードの間で低減率が大きいのは、ノード数が増加しノード密度が高まるのに伴って隣接ノードとの接続に要する送信電力を小さくできるためである。上記の結果は、各ノードがネットワーク全体のノード密度を実際には把握していないものの、ノード密度に応じて自律的に送信電力を最適化できることを意味する。

ノードを配置する領域の広さを変化してシミュレーション評価を行った。配置するノード数は50ノードとした。正方形の領域の一边の長さを50メートルから10メートルずつ増加し150メートルまで変えて、各広さでシミュレーションを10回行った。図3に領域の広さと送信電力の平均値のシミュレーション結果を示す。提案方式は全てのシミュレーション結果においてネットワークの接続性を維持することを確認した。提案方式の送信電力の平均値は領域が広がるに連れて徐々に大きくなっているものの、最大の送信電力を用いる従来方式に比べ大幅に送信電力を低減する結果を得た。

以上から提案方式は無線送信電力を低減する観点から最大の送信電力を用いる従来方式よりも有効と言

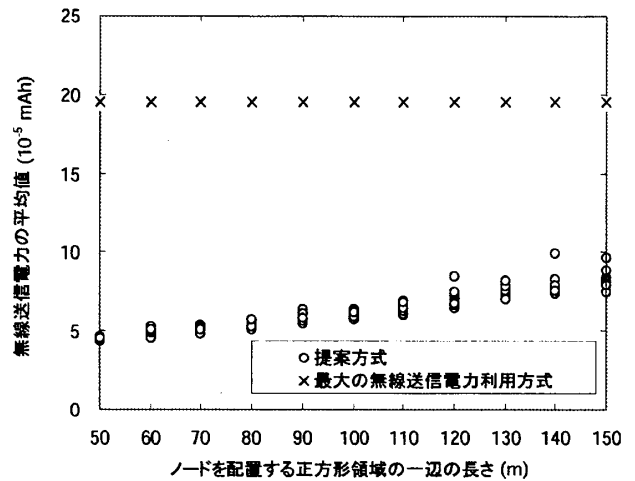


図3 領域の広さと無線送信電力

える。これに加えて、提案方式がネットワークポロジの制御時に消費した電力量の観点からも比較評価する必要がある。具体的には、提案方式はネットワークポロジを制御するための制御メッセージの送受信に伴う電力消費があるのに対し、最大の送信電力を用いる従来方式ではそのような電力消費を必要としない。そこで提案方式がシミュレーション中に用いた制御メッセージを解析した。例えば一边が150メートルの領域では、各ノードが制御メッセージの送受信に消費した電力量は平均0.01mAhであった。その値は一般の電池の初期容量が単三電池では2000mAh程度であることを踏まえると十分に小さいと言える。

以上、提案方式はネットワークの接続性を確保した上で従来方式に比べて無線送信電力を大幅に低減可能であり、更にネットワークポロジの制御に要する消費電力も十分に小さいことから有効であると言える。

#### 4. おわりに

本稿では送信電力を自律的に増減することでセンサネットワークのトポロジを制御する提案方式のシミュレーション評価を行った。その結果、提案方式はネットワークの接続性を確保した上で従来方式に比べ無線送信電力を大幅に低減可能であり、ネットワークポロジの制御に要する電力消費も十分に小さいことを明らかにした。最後に日頃ご指導頂く(株)KDDI 研究所秋葉所長、鈴木執行役員に感謝する。

#### 参考文献

- [1]茂木他, “センサネットワークのトポロジ構成方式の基本評価,” 情報処理学会, 第68回全国大会論文集, pp.3-409-410, 2006.
- [2]N. Li et al., “Topology Control in Heterogeneous Wireless Networks: Problems and Solutions,” Proc. of the IEEE conf. on computer communications, pp.243-254, 2004.
- [3]D. Son et al., “Experimental study of the effects of transmission power control and blacklisting in wireless sensor networks,” Proc. of the IEEE conf. on sensor and ad hoc communications and networks, pp.289-298, 2004.
- [4]P. Levis et al., “TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications,” Proc. of the First ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems, pp.126 - 137, 2003.