

スマートコミュニティ向け無線マルチホップ通信 における消費電力削減技術

柳原 健太郎 野崎 正典

近年、情報システム、エネルギー・電力システム、交通システム、公共システムなどが融合した新しい社会インフラとしてスマートコミュニティ¹⁾が注目を集めている。スマートコミュニティには太陽光発電、電気自動車など環境・エネルギーに関わる多種多様な機器が接続することが想定され、各機器間の通信には無線を用いることが予想される。また、機器は広範囲に分布するため、直接無線が届かない機器間の通信が必要となり、途中の機器を経由して接続することになる。本稿ではこのスマートコミュニティを実現するための無線マルチホップ通信をスマートネットワークと定義する。

我々はスマートコミュニティを構成する無線通信ノードが大規模に接続した場合を想定した検討を進めている²⁾。スマートコミュニティの大きな目的の一つは電力利用の効率化であり、スマートネットワーク自身が多く電力を消費することは許容されない。そこでネットワークの消費電力を削減することが重要な技術課題となる。

本稿では、我々が開発したネットワークの構成方法を改良することで通信性能の低下を抑えつつネットワークの消費電力を削減する方式を説明し、シミュレーションによる性能評価の結果、従来の方式と比較して消費電力を3割～5割削減できることを示す。

関連研究

本稿で想定しているスマートネットワークでは、図1に示すように各無線ノードが中継機能を持ち、メッシュ状のネットワークを構成する。ネットワークを構成する各ノードは周辺のノードと経路に関する情報を交換し、パケットの転送先を決定する。転送を繰り返すことで直接通信できないノードとの間の通信を実現することができる。

無線マルチホップネットワークの省電力化に関しては従来から様々な研究が行われている。以下、従来の研究を紹介し、今回の研究との差異について述べる。

ノードが電池で動作する状況が想定されることが多いセンサネットワークにおいては、各ノードの寿命を確保するために全てのノードの消費電力を削減する必要性が高い。また、送信電力の小さい近距離無線においては、マ

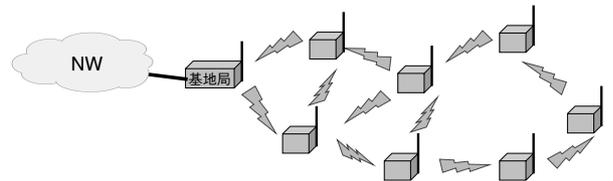


図1 スマートネットワークの例

アイコンなどの無線デバイスの動作に多くの電力を消費するため、受信待機中も受信時とほぼ同じ電力を消費する。そのためノードの無線デバイスを定期的に停止させ、通信時のみ無線デバイスの電源を入れることでノードの消費電力を削減する間欠動作が主に用いられ、様々な手法が検討、開発されている³⁾。

従来の研究成果を用いることで各ノードの消費電力を減少させることができる。しかし省電力化を行ったノードはスリープ時には通信できない。従って省電力化したノードを通過する通信のスループットは大幅に低下し、遅延も増加する。特にマルチホップネットワークで省電力化を行うと中継を行うたびに待機時間が発生し、大幅に通信性能が悪化する。

スマートネットワークは、ノードに接続された機器への制御や、電力消費量の計測などを想定しており、対象となる機器には電力が供給され、多くのノードにも電力が供給されることが期待できる。すなわちノードが省電力動作を行う目的はノードの電池寿命を延ばすことではなく、無線ネットワーク全体が消費する電力を減らすことにある。この場合、個々のノードの消費電力を均等化する必要はなく、通信性能を確保した上で、不必要な電力消費を削減することが求められる。

そこで、我々は通信性能に影響の少ない一部のノードを省電力モードで動作させ、他のノードを通常モードで動作させることで、通信性能と消費電力を両立させる方式を開発した。

このような動作を行うには個々のノードの動作モードを決定する必要がある。無線通信の環境、通信状況、ノードの設置状況などが変化の中で個々のノードの動作モードを手動で設定することは現実的ではない。従っ

て各ノードが周辺の状況、通信状況などから自らの動作モードを自律的に決定する必要がある。

省電力動作端末の自動選定方式

先に述べた背景から、省電力動作端末の自動選定方式の開発を行った。はじめに各ノードの省電力動作を決定する方法を決め、次に省電力効果が大きくなるネットワーク構成を決める方式を開発した。

●省電力動作端末の選定

スマートネットワークでは基地局(外部ネットワークと接続)とノードとの間で通信が行われ、ノード間の通信はあまりないと考えられる。このような状況では、基地局を根とした木構造の通信経路に沿って通信が行われることになる。我々はこのようなネットワークを想定した方式を開発しており、ルーティングの基本部分は開発した方式²⁾を用いている。

木構造の末端にあたるノード(以下末端ノード)では、送受信されるのは自身に関わるデータだけなので通信量が少ない。そこでネットワークの通信性能を維持するために、木構造の末端ノードのみを省電力モードで動作させることとする。この方法は実際の通信量を測定することなく、ネットワークの接続状況だけで簡単に動作モードを決定できるメリットがある。

●ネットワーク方式の改良

本方式を用いて省電力化を行う場合には、末端ノードが多い木構造を作ることが必要となる。一般的なネットワーク方式では末端ノードの数は考慮されない。

木構造のネットワークを構成する場合、各ノードは親となるノードの選択のみを行っている。従来は各リンクに設定されたコスト(以下リンクコスト)を求め、基地局から各ノードまでに用いる全てのリンクのコストの和(以下パスコスト)が最も小さくなるように経路を生成していた。この方法は各ノードが基地局までのコストを最小化するように親を選択することとなり、末端ノードの数を減らすことは考慮されていない。

今回提案する方式では、親を選択することによって中継ノード数が増加するかどうかを考慮したコスト(以下、ノードnの親選択用コスト： $C(n)$)を定義する。各ノードは周辺に存在する直接通信が可能な全てのノードについて $C(n)$ を計算し、コストが最も小さいノードを親とする。この方法によって、転送経路を短くするだけでなく、中継ノード数を減らすことを考慮したネットワークを構成することができる。

本方式においては、全てのノードが定期的に自らの情報を制御パケットとして送信する。制御パケットには自

らの親のID、子のノード数、子の内中継ノードの数、パスコストを含める。

$C(n)$ は以下の式によって求める。

$$C(n) = k \times (P(n) + L(n)) + S(n)$$

$P(n)$ ：ノードnのパスコスト

$L(n)$ ：ノードnとの間のリンクコスト

$S(n)$ ：ノードnを選択した場合の省電力コスト

k：最短経路優先度

kは事前に決定しておく係数であり、消費電力の削減と平均ホップ数のバランスを調整するためのものである。kを十分に大きくすると省電力コストを事実上無効化し、最短経路を作ることを優先した従来の方式と同じ結果となる。一方、kを小さくすることで、省電力コストの及ぼす影響を大きくすることができる。すなわちホップ数を増加させてでも消費電力の削減を優先して動作する。

省電力コストは選択したノードを親とした場合に中継ノードが増加する場合などにペナルティとしてコストを付加する。省電力コストは子として接続しているノード数などによって変化する。

●動作例

本方式の動作例を図2に示す。塗りつぶされたノードが中継ノードを示し、各ノードの数字は基地局までの中継回数を示している。新しいノードが参加したことによって一時的に中継ノードが4台になるが、最終的には初期状態よりも少ない2台になっている。これは経路が迂回することを許容した結果であり、図2の左下ノードは中継回数が2から3に増加している。

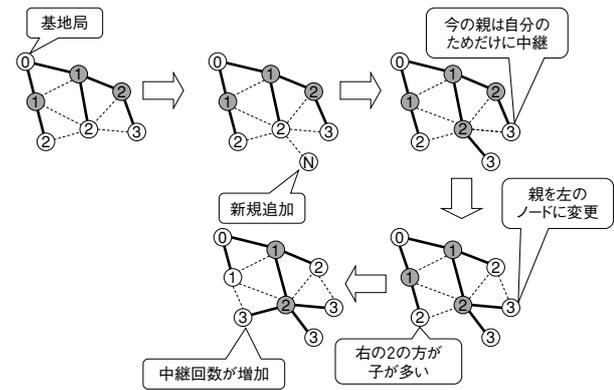


図2 今回開発した方式の動作例

図3(次ページ)は既存の方式(省電力コストを常に0とした状態と等価)を用いて100台のネットワークを構成した例である。図4(次ページ)は図3と同じノードの配置に対して今回開発した方式を用いた例である。左上の0と記載したノードが基地局、太線で接続された四角形が中継

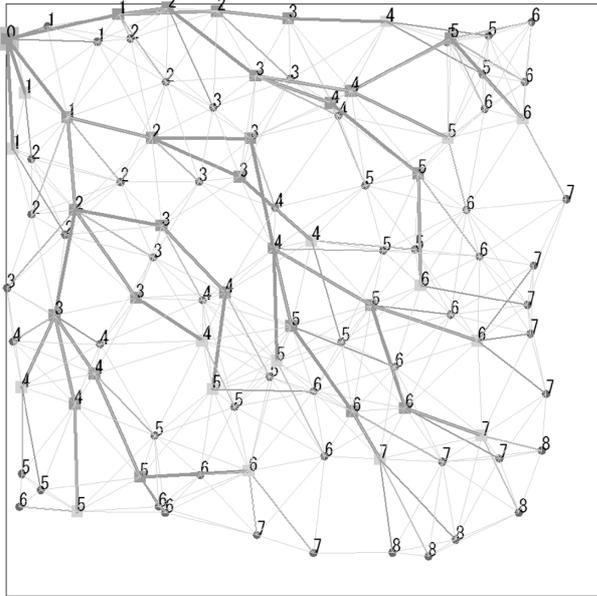


図3 従来方式によるネットワーク構成例

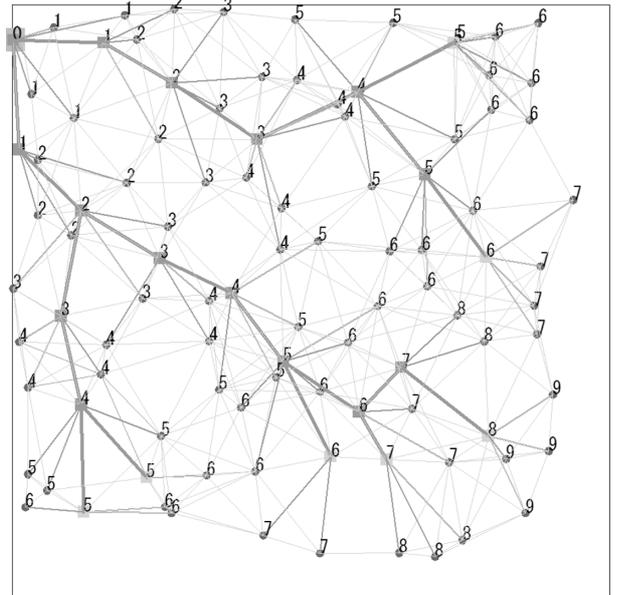


図4 今回開発した方式によるネットワーク構成例

ノード、丸が末端ノードを示す。各ノードに付記した数字は基地局までの中継回数を示す。図3では中継回数を最小化することを優先しているために、近い位置に複数の中継ノードが存在しているのに対し、図4では中継ノード間の距離が離れたネットワークが構成され、中継ノード数が削減されている。中継ノード数は図3では42台、図4で21台であり、消費電力は半分になっている。

一方で、図3の右下端のノードは基地局までの中継回数が8なのに対し、図4では9になっており、中継経路が長くなっていることが分かる。

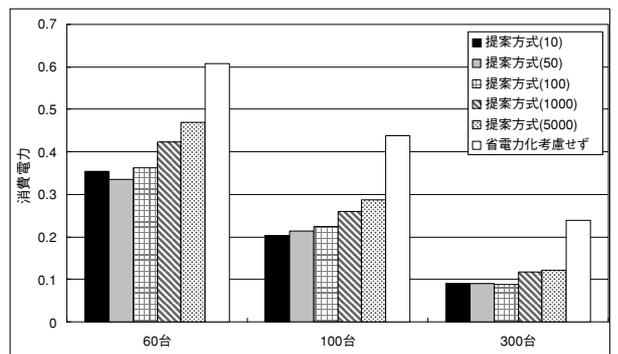


図5 省電力効果の比較

性能評価

今回検討したネットワークの省電力化方式を評価するためにノード密度と最短経路優先度をパラメータとしてシミュレーションを行った。

ノードの配置を同一にし、ネットワークを構成する方式のみを変化させ各方式の消費電力特性を評価した。評価はリンクの切断などは発生しない安定した状態で、十分に時間が経過し、ネットワークが安定した状態で行っている。なお、無線帯域は920MHz帯を用いることを想定しており、通信速度は100kbpsとした⁴⁾。

図5に結果を示す。縦軸は全てのノードがスリープしない場合を1とした消費電力である。横軸はノードの設置密度とkを変化させた結果を示している。凡例の括弧内はkの値である。

まず、ノードを高密度に設置すると提案方式を用いる前の段階で消費電力が大きく削減されていることが分かる。

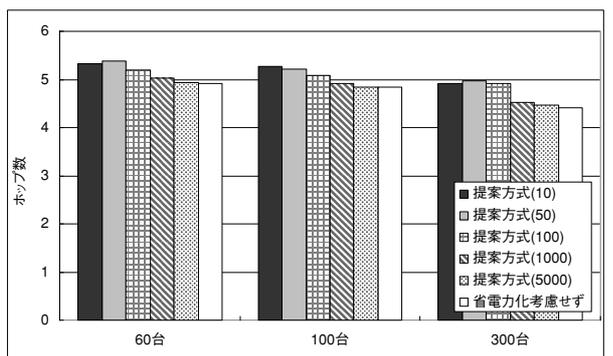


図6 平均ホップ数の比較

何れのノード密度においても提案方式を用いることで、3～5割の消費電力が削減されていることが分かる。また、ノード密度が低い領域においては最短経路優先度を大き

くすると中継ノード数が増加して消費電力が増加することが分かる。ノード密度が高い場合には最短経路優先度を変更してもあまり消費電力に変化がない。これはノードの密度が高いとネットワーク構成の自由度も高くなるため、最短経路優先度が低くても最短経路に近いネットワークを構成することができることによる。

提案方式は中継ノード数を削減するため、経路が長くなる場合がある。この影響を評価するために各方式における平均ホップ数を求めた。シミュレーションの条件は消費電力特性と同じである。

今回のネットワークは各ノードと基地局との間の通信を想定している。省電力モードで動作しているノードは通信経路の末端にあたるノードのみであり、ネットワーク全体の遅延には影響しない(末端に当たるノード宛の下り通信の遅延のみが増加する)。リンクの切断などの影響を除くと、通信遅延はホップ数にほぼ比例するので、ホップ数の評価は通信遅延の評価とほぼ同じ意味を持つ。図6に平均ホップ数の変化を図示した。消費電力特性とは逆の結果になっており、提案方式は省電力化を考慮しない場合と比較して平均ホップ数が増加している。消費電力の削減に伴って、通信経路が迂回していることが分かる。最短経路優先度を小さくした場合にはホップ数が増加し、大きくした場合にはホップ数が減少している。ノード密度が高い場合には変化が少ない点も消費電力特性と同じである。最短経路優先度を小さくした場合、消費電力の削減が3~5割であるのに対して、平均ホップ数の増加は1割程度に収まっており、消費電力の削減と比較すると影響は少ないことが分かる。また、ホップ数の増加が遅延などの通信性能に及ぼす影響はトラフィック量などに依存する。従ってホップ数削減と消費電力削減の優先度を最短経路優先度によって変更できるようにすることで、より様々な状況に対応可能なネットワークを構成することが可能となる。

あ と が き

本稿では通信性能の確保と消費電力の削減を両立させるために、省電力化を考慮したネットワーク構成方式を提案し、シミュレーションによって性能評価を行った。その結果、従来の方法と比較して消費電力を3割~5割削減できることを明らかにした。

謝 辞

本研究は中部電力株式会社との共同研究「省電力マルチホッププロトコルに関する基礎研究」の一環として行われたものである。◆◆

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：次世代エネルギー・社会システム協議会 本格化するスマートコミュニティ実証を通じて見えてきたもの、2011年6月
- 2) 野崎正典, 西村弘志, 久保祐樹, 柳原健太郎, 福永茂：950MHz帯における大規模・高信頼ルーティング方式の開発と評価, 信学技報, USN2010-24, pp.15-20, 2010年10月
- 3) 久保祐樹, 柳原健太郎, 野崎正典：無線センサネットワークの省電力化技術, 沖テクニカルレビュー214号, Vo.:76 No.1, pp.32-35, 2009年4月
- 4) Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 3 : Alternative Physical Layer Extension to support the Japanese 950MHz bands, IEEE 802.15.4d, (2009-4)

筆者紹介

柳原健太郎：Kentaro Yanagihara. 研究開発センタ システム技術研究開発部

野崎正典：Masanori Nozaki. 研究開発センタ システム技術研究開発部