

密な無線センサネットワークにおける 管理コストを考慮したデータ配送方式

小島祥平^{†1} 吉廣卓哉^{†2}

近年、環境モニタリングや防災、防犯など様々な分野でセンサネットワークを用いた研究がなされている。センサネットワークにおいて、特に環境モニタリングで使用する場合は、電源のない屋外にセンサノードを配置する必要があるため、機器はバッテリー駆動が前提である。そのため消費電力を考慮する必要がある。しかし、現実にセンサノードを管理することを考えると、全てのセンサノードに対して定期的にバッテリーを交換するような管理方法では、管理コストの面で現実的ではない。本研究では、比較的密な無線センサネットワークにおいて、定期的にバッテリーを交換するセンサノードの数を最小化するようなデータ配送方式を目指す。このためには、データを中継するノード以外の消費電力を極力低減してバッテリー交換なしに長期間の動作を実現したうえで、データ中継ノードの数を最小化するような配送木を構築する必要がある。本研究では、そのような動作を実現するデータ配送方式の枠組みを示したうえで、自律分散的に配送木を構築するプロトコルを提案する。

On Wireless Sensor Networks that Reduce Management Cost

Shohei Kojima^{†1} Takuya Toshihiro^{†2}

1. はじめに

近年、無線通信技術の高性能化や CPU の小型化また低価格化が進んでいる。これにより無線通信機能を持った小型センサを用いてネットワークを構成して、各センサによって得られたデータを無線マルチホップ通信により収集する WSN (Wireless Sensor Network) の研究が進められている。WSN では、他の無線マルチホップネットワークにはない特徴がある。まず、ネットワークの通信スループットは低くても良い一方で、データ収集の信頼性は向上したい要求がある。また、各センサノードは必ずしも電源に接続できず、多くの場合にバッテリー駆動が前提となる。センサノードをバッテリー駆動にすることで、センサの設置場所を選ばないセンサの配置が可能となるが、その一方で、通信あるいはデータ処理に要する消費電力を低く抑えた長寿命なネットワークの実現が求められる。

実用的な無線センサネットワークの実現に向けた省電力なセンサネットワーク技術の研究は数多く行われている。最も有効な方法の一つに、MAC プロトコルの省電力化がある[1][2][3][4][5][6][7]。これらは、低いスループットで良いセンサネットワークにおいて、受信可能状態で待機する代わりに定期的にスリープすることで、待機電力を削減してセンサノードの消費電力を削減する。これらの省電力 MAC プロトコルによってセンサネットワークの消費電力を従来の IEEE802.11 等比べて大幅に削減し、動作時間

を延ばすことができる。しかし、これらの MAC プロトコルでは、データ送信時には、送信ノードと受信ノードの両方がウェイク (スリープしていない) 状態でなければならず、そのタイミング同期が必要である。この処理は相応の電力消費を必要とするため、実用的に見ると、これらの MAC プロトコルだけでは、電力消費の低減は十分ではない。

一方、センサノードが環境から電力を得る (充電する) 技術も存在し、太陽光パネルだけでなく、人や車、電波等による振動を電力に変えることで、センサノードの長寿命化を実現できる可能性がある[8][9][10]。しかし、現時点では、それらの技術によって得られる電力は僅かであり、また、天候等の環境要因に左右されるため、センサノードを長期にわたって安定的に維持することは困難である。太陽光のみを用いてバッテリーレスなセンサネットワークを構築する試みも現れているが、その通信能力や安定性は限定的であり、用途が大きく限定される[11]。

本研究では、多数のセンサノードで構成される密なセンサネットワークを長期的に維持することを目標として、バッテリー交換の頻度をできるだけ抑えた無線センサネットワークの通信方式を提案する。提案手法では、センサノードを、データを中継するノードとしないノードに分類し、中継しないノードは受信待ち時間を最低限に抑えることで、待受電力消費を極限まで抑えバッテリー交換が不要になるように長寿命化する。一方、データを中継するノードは消費

^{†1} 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

^{†2} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

電力が大きくなるため、定期的なバッテリー交換を必要とする。ネットワーク管理の手間を最小限に抑えるためには、中継ノードの数を最小化することが望まれる。本研究では、中継ノードの数ができるだけ小さくなるようなデータの配送木を自律的に構築することで、バッテリー交換の手間を最小限に抑える。

本論文は以下のように構成される。第2章で本研究に関連する技術や研究を説明する。第3章ではネットワーク全体での電力消費を低減する経路を構築する提案手法について述べる。第4章では提案手法の性能を評価するため、独自のシミュレータに提案手法を実装しシミュレーション実験を行った結果を述べる。最後に第6章で本研究についてまとめる。

2. 関連研究

本研究では、管理コスト最小化の観点から、全体的には消費電力を低く抑えると同時に、定期的なバッテリー交換が必要な中継ノードの数を最小化するようなデータ配送木を自律的に構築し、維持するようなセンサネットワークの実現を目指している。

全体的な消費電力の削減手法としては、センサネットワークを対象としたMAC層プロトコルが活発に研究されている[1][2][3][4][5][6][7]。これらは、ノードを定期的にスリープさせながら、タイミングを合わせて隣接ノード間のデータ通信を行うことで、通信データ量に見合った低い消費電力で信頼性のある通信を実現する。S-MAC[1]、T-MAC[2]、B-MAC[3]、X-MAC[4]は、送信ノード主導のMACプロトコルである。例えばB-MACは、センサノードが一定時間毎にスリープとウェイクを繰り返し、送信時にはその時間間隔よりも長いプリアンブルを送ることでデータの受信を可能にする。これに対して、RI-MAC[5]、RC-MAC[6]は、受信ノード主導のMAC層プロトコルである。受信ノードが定期的にビーコンを送信し、送信したいフレームを持つノード(送信ノード)は、ビーコンを受信した時にフレームを送信することで、効率的な資源の利用を実現する。無線センサネットワークのMAC層プロトコルは、文献[7]のサーベイを参考にされたい。

一方、本研究では、中継ノードの数を最小化するようなデータ配送木の構築を目指す。センサネットワークにおけるデータ配送木の構築に関する研究も多数存在する。Luoらは、複数存在する最短路木の中から、センサネットワークの生存時間を最大化するような配送木を構築するアルゴリズムを提案した[12]。Kuoらは、屋内の電源が接続されたセンサネットワーク等を対象として、ネットワーク全体の消費電力を最小化するような配送木を構築するアルゴリズムを提案した[13]。また、Gnawaliらは、ノードの故障等によるトポロジの変化に柔軟に対応し、パケットループを防ぐ動的な経路制御プロトコルCTPを提案した[14]。し

かし、本研究のような、管理コストの最小化を目的として、中継ノード数を最小化する配送木はこれまでに考えられていない。なお、本研究で考える配送木は、長時間スリープするノード数を最大化する方法でもあるため、文献[12]で目指すような、ネットワーク全体の消費電力の低減にも貢献できる通信方式でもあると考えられる。

3. 提案手法

3.1 想定する無線センサネットワーク

本研究では、無線通信機能とセンシング機能を持った多数のセンサノードとセンシングデータを蓄積する役割を持った複数のシンクノードで構成されているセンサネットワークを想定する。観測領域内にセンサノードは密に配置されていると仮定する。複数のシンクノードが存在しても良いが、以後は簡単のため、シンクノードの数が1つである場合について述べる。また、各ノードでは定期的にセンシングデータが発生し、そのセンシングデータを他のセンサノードが中継し、マルチホップ通信によりシンクノードに集約する。送信電力はどのノードも一定の値をとることを想定する。また、提案手法はMAC層のプロトコルとは独立であり、任意のMACプロトコルと共存できるように設計する。ただし、通常のMACプロトコルの範囲として、データの配送にはACKによる送達確認を行い、ブロードキャスト通信にはACKを返さないことを前提とする。

3.2 提案手法の概要

本研究では、ノードが密に配置されているセンサネットワークにおいて、定期的なバッテリー交換にかかる手間を最小限に抑えるセンサネットワークの実現手法を提案する。本研究では、データを中継するノード(中継ノードと呼ぶ)の数を最小限に減らすようなデータの配送木を構築し、この配送木に沿ってデータをシンクに収集する。その上で、この配送木においては葉にあたる、データを中継しないノード(非中継ノードと呼ぶ)はデータ受信をほとんど必要としないため(トポロジの変化時とAckフレームの受信時にのみ必要となる)、データの送信時以外のほとんどの時間をスリープさせることにより受信電力を低減し、ノードの寿命を大幅に延ばす。このように、提案手法では、(i)効率的な配送木の構築と(ii)非中継ノードに極端なスリープ状態を導入することにより、管理コストを低減する。

(i)効率的な配送木の構築は、2つの手順から成る。まず、定期的な制御メッセージの送信により、各ノードがシンクノードまでの距離(ホップ数)を把握する。つまり、各ノードは、現在把握している自分の(シンクノードまでの)距離を制御メッセージに含め、定期的に送信する。各ノードは、周囲のノードから受信した制御メッセージから、自分のシンクノードまでの(最短)距離を計算する。全てのノードがこの動作を繰り返すことで、最終的には、全ての

ノードがシンクノードからの正しい距離を把握できる。

次に、各ノードは次ホップを決定する。このために、制御メッセージに、単位時間あたりの送信パケット数を含める。この送信パケット数は2ホップ先まで転送され、全てのノードは、2ホップの距離にある全てのノードの送信パケット数を把握できる。この情報を基に、各ノードは、自分よりも距離が1だけ小さいノードの中から、最も送信パケット数が多いノードを次ホップとして選ぶ。この方法により、通信を特定のノードに集中させた効率の良い配送木を自律分散的に構築できる。

しかし、この方法では、近くに複数の中継ノードが配置されてしまうこともあり、効率を上げる余地がある。よって、より効率の高い配送木を構築するために、提案手法では、中継ノードの配置パターンに応じて中継ノードの選択を調整する。このために、各ノードは、自分の単位時間あたりパケット送信数と周囲の配置パターンから「優先度」を計算し、これを制御メッセージで広告する。「優先度」は、そのノードがどの程度、次ホップとして選ばれるべきかを表している。各ノードは、単位時間あたりの送信パケット数の代わりに、優先度が高いノードを次ホップに選ぶことで、効率的な配送木を構築する。

(ii)非中継ノードに極端なスリープ状態を導入する処理の概要を説明する。提案手法の枠組みでは、各ノードは、「初期化モード」「通常モード」「スリープモード」の3状態のいずれかをとる。初期化モードでは、前述の通りに経路を構築し、一定時間後に通常モードに遷移する。通常モードでも初期化モードと同様の動作を行い、配送木を調整しながらパケットを配送する。通常モードと初期化モードの違いは後述する。通常モードのノードが、一定時間の間に他のノードからデータパケットを受信しなかった場合に、スリープモードに移行する。スリープモードでは、基本的にはスリープするが、一定時間毎にウェイクして、中継ノードにデータを送信する。ネットワークの状態を知るために、データ送信後に僅かな時間だけ受信待機する。ノードが、故障等のトポロジ変化を検知すると、初期化モードに遷移する。初期化モードでは、通常モードと同様の動作をするが、周囲の、通常モードとスリープモードの全てのノードにメッセージを送信し、初期化モードに遷移させる。つまり、トポロジ変化時には、ネットワーク上の全てのノードが初期化モードに遷移し、配送木を再構築する。

上記のように配送木の構築と状態遷移を行うことにより、配送木の葉ノードのスリープとトポロジ変化時の配送木の再構築を両立させる。その結果、葉ノードは、送信時以外は電力を使わないことで、基本的にはバッテリー交換が不要になり、中継ノードのみのバッテリー交換によりネットワークを維持することができる。

3.3 シンクノードまでの距離の把握

まず、次ホップの決定に必要となるシンクノードまでの距離の把握方法を説明する。本手法ではシンクノードまでの距離をホップ数として測る。多くのセンサネットワーク構築手法と同様に、全てのノードが隣接ノードに定期的に制御メッセージを送信する。そのメッセージに、自身のシンクノードまでの距離を格納する。初期状態では、センサノードはシンクノードまでの距離情報をもっておらず、その場合は制御メッセージへの距離の格納を行わない。またシンクノードだけが初期状態で距離を0として持っている。

シンクノードまでの距離を把握するために、各ノードは一定時間毎に制御メッセージを送信する。制御メッセージには、そのノード n_s が把握している、 n_s のシンクまでの距離 $d(n_s)$ が格納される。そのうえで、制御メッセージを受信したノード n_r は以下のように動作する。

受信したメッセージに格納されている距離 $d(n_s)$ と自分が保持する距離 $d(n_r)$ を比較する。 $d(n_r)$ がまだ設定されていないか、 $d(n_s) + 1 < d(n_r)$ であれば、 $d(n_r) = d(n_s) + 1$ とする。そうでなければ、何もしない。全てのノードがこの手順を繰り返すことにより、最終的には、全てのノードが自分の正しい距離を把握できる。

動作例を説明する。多数のセンサノードからのデータを1つのシンクノードに収集する場面である。まず、シンクノードが自分の距離0を格納して制御メッセージを送信する。これを受信したノードは、自分の距離を1に設定する(図1)。これらのノードは、定期的に送信する制御メッセージに距離1を格納する。同様に、そのメッセージを受信したノードは、受信した距離1に1を加えて、自分の距離を2に設定する。これを繰り返すことで、全てのノードが正しい距離を把握できる(図2)。なお、ノードが故障する等の理由で正しい距離が変わることがある。これには、自分の距離を設定する元となったノードからの制御メッセージが一定期間届かなければ、自分の距離を初期値(無設定)に戻す、等の処理で対応できる。

3.4 次ホップの決定

次に、シンクノードまでの次ホップの決定方法を説明する。提案手法では、次ホップを決定するために、「優先度」という概念を導入する。優先度とは、どの程度次ホップに選ばれるべきかを表し、ノード s の優先度を P_s と表すことにする。優先度としては、そのノードの単位時間あたりパケット送信数を用いるが、より効率の良い配送木を構築するために、通信パターンに応じた値の加算を行う。各ノード s は、シンクノードまでの距離 $d(v)$ が自分よりも1だけ少ない、つまり $d(v) = d(s) - 1$ である隣接ノードの中から、優先度が最も高いノードを次ホップとして選び、全てのデータパケットをその次ホップに送信する。

各ノード s は、自分の通信を監視しており、一定時間毎に、

単位時間あたりの送信パケット数 T_s を更新して保持する。 T_s は定期的な送信制御メッセージに格納され、隣接ノードに周知される。ノード s の隣接ノードの一つを n とすると、 n は s から受信した値 T_n も自分の制御メッセージに含めて隣接ノードに周知する。その結果、 T_s は s から2ホップ以内の全てのノードに周知される。すなわち、各ノード s の隣接ノードの集合を $N_1(s)$ 、2ホップ離れたノードの集合を $N_2(s)$ とおくと、 s は $v \in N_1(s) \cup N_2(s)$ である全てのノード v に対して、送信パケット数 T_v を把握できる。

基本的には、各ノード s は優先度として、自分の送信パケット数 T_s を用いる。しかし、このように計算した優先度では、配送木の中で、中継ノードの間の距離が近くなりがちであるため、周囲の通信パターンに応じて、優先度に定数 I を加算する。定数 I は、送信パケット数と比べて十分大きな値をとるように設定する。具体的には、ノード s の優先度 P_s は次の式で表される。

$$P_s = \begin{cases} T_s + I & (\text{条件に合致する場合}) \\ T_s & (\text{そうでない場合}) \end{cases}$$

ここで考慮する周囲の通信パターンに関する条件は3つある。まず定義を行う。ノード s の隣接ノード $v \in N_1(s)$ で、 $d(v) = d(s)$ を満たすもののうち、送信パケット数 T_v が最大であるノードを $v_1^{(1)}$ 、2番目に大きいノードを $v_1^{(2)}$ と表す。同様に、距離が2ホップであるノード $v \in N_2(s)$ の中で、 $d(v) = d(s)$ を満たすもののうち、送信パケット数 T_v が最大であるノードを $v_2^{(1)}$ 、2番目に大きいノードを $v_2^{(2)}$ と表す。また、距離が2ホップ以下であるノード、すなわち $N_1(s) \cup N_2(s)$ に含まれ、 $d(v) = d(s)$ を満たすノードの送信パケット数の合計を T_2^{sum} と表す。ところで、 $N_2(s)$ に含まれるノードの送信パケット数は、 $N_1(s)$ に含まれるノードによって報告されることになる。ノード s が $v \in N_2(s)$ の送信パケット数 T_v を保持しているとき、この値を報告したノードを $r(v)$ と表す。以上の定義の下で、上記の通信パターンに関する条件を以下に示す。ここで、 L は事前に設定する(0,1)の範囲をとる定数であり、送信パケット数が十分多いかどうかを判定するしきい値である。

パターン(i) : $T_s < LT_2^{sum}$ かつ $T(v_1^{(1)}) \geq LT_2^{sum}$ かつ $T(v_1^{(2)}) \geq LT_2^{sum}$

パターン(ii) : $T_s < LT_2^{sum}$ かつ $T(v_1^{(1)}) \geq LT_2^{sum}$ かつ $T(v_2^{(1)}) \geq LT_2^{sum}$ かつ $r(v_1^{(1)}) \in N_1(s)$

パターン(iii) : $T_s < LT_2^{sum}$ かつ $T(v_1^{(1)}) < LT_2^{sum}$ かつ $T(v_2^{(1)}) < LT_2^{sum}$

これらのパターンの意図を、図を用いて説明する。

まず、はじめにパターン(i)の意図を、図3を用いて説明する。図3(a)は、ノードXに中継ノードが二つ隣接している状況である。この状況では中継ノードの間の距離を十分に離して配置できておらず、ネットワーク内の中継ノード数が冗長になる可能性がある。この場合には、ノードXはパ

ターン(i)の条件を満たし、状況を解決するために優先度 P_X を $P_X = T_X + I$ とする。優先度 P_X が上昇した状況が図3(b)である。これにより P_X は周囲のどのノードよりも大きくなり、ノードXが次ホップとして優先して選ばれる。こうして、2つ存在していた配送経路がノードXに引き寄せられ、中継ノードがひとつに纏められる。これにより、中継ノードの数を減らし、周囲に存在している他の中継ノードからの距離を離すことができる。

次に、パターン(ii)の意図を、図4を用いて説明する。図4(a)は、ノードXに中継ノードが一つ隣接しており、そのノードから、送信パケットが多い別の中継ノードの情報を受け取った場面である。この状況でも、パターン(i)と同じように、中継ノードが距離を離して配置できておらず、中継ノード数が冗長であると考えられる。このとき、ノードXはパターン(ii)の条件を満たすため、優先度 P_X を $P_X = T_X + I$ とする。優先度 P_X が上昇すると、図4(b)のようになる。中継ノードの一つをXに引き寄せ、2つの中継ノード間の距離を離すことができる。ここで、ノードAの上部にもノードXと同様のノードが存在する場合には、中継ノードをAの上部に引き寄せ、さらに距離をとることができる。

最後に、パターン(iii)の意図を、図5を用いて説明する。図5(a)は付近に中継ノードが配置されていない状況である。この状況を制御メッセージによりはじめに把握できたノードAがパターン(iii)の条件を満たし、優先度 P_X を $P_X = T_X + I$ とする。優先度 P_X が上昇した状況が図5(b)である。ノードXがより次ホップとして選ばれるようになり、周囲よりもパケット送信量の大きい中継ノードとなる。

このように、各ノードが周囲の通信状況を把握して、その状況に応じて自身の優先度を変更することにより、経路が修正されて、より良い配送木となる。

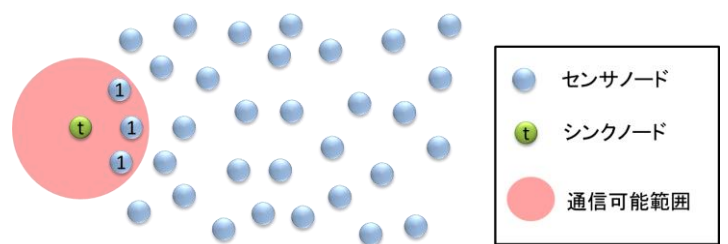


図1:シンクノードからのメッセージ送信

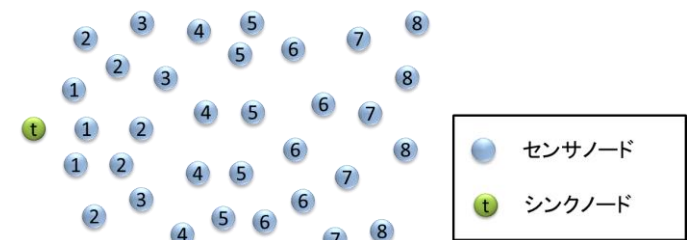


図2:シンクノードからの距離の把握

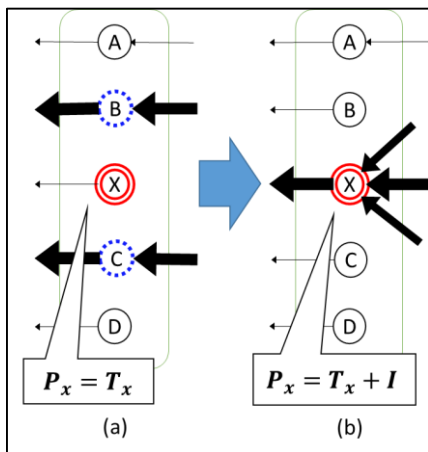


図 3:パターン(i)の経路修正

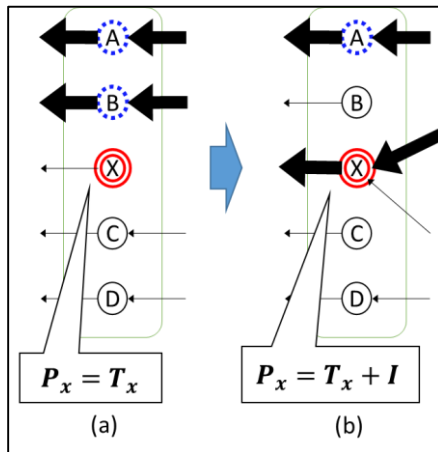


図 4:パターン(ii)の経路修正

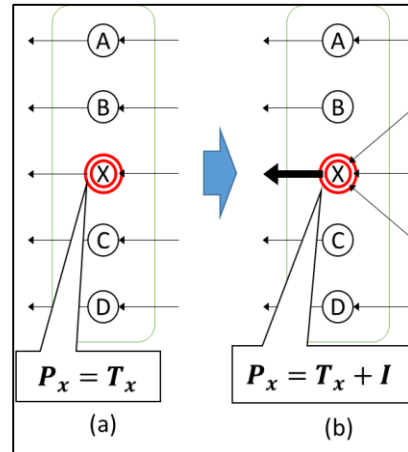


図 5:パターン(iii)の経路修正

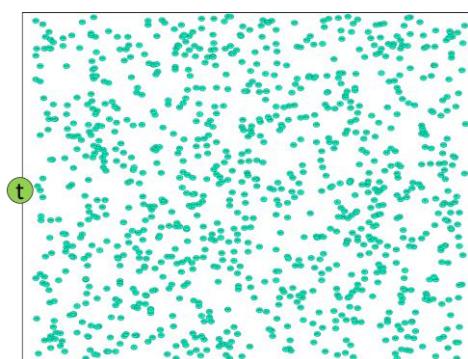


図 6:ノードの初期配置

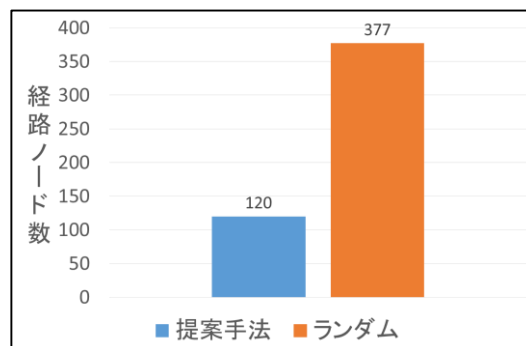


図 7:中継ノード数

4. 評価

4.1 実験シナリオ

提案手法が、ネットワーク全体の管理コストをどの程度低減できるかを評価するために、シミュレーション実験を行った。スリープ可能なノード数を最大化したいため、中継ノードの数を評価指標とする。つまり、中継ノードの数は少ないほど良い。シミュレーション実験にあたり、プログラミング言語 C++でシミュレータを自作した。

500×500[m]の正方形領域に 1000 個のノードをランダムに配置し、シンクノードは左辺中央に 1つ設置した(図 6)。各ノードは一定時間毎にデータを発生する。つまり、各ノードは、単位時間あたり 1 のデータを発生させ、シンクノードに送信する。各ノードの通信可能範囲は半径 50[m]の円とする。この状態で、提案手法と、各ノードがランダムに次ホップを選んだ場合(以後、ランダム法と呼ぶ)とを比較した。

4.2 結果と考察

提案手法とランダム法の中継ノード数を図 7 に示す。ランダム法と比較して、中継ノード数を大幅に減らすことができることがわかる。これにより、提案手法はバッテリー交換が必要な中継ノード数を減らし、管理コストを低減でき

ることがわかる。

次に、提案手法により構築された配送木を図 8 に、ランダム法の配送木を図 9 に示す。配送木のノードは、シンクノードまでの距離によって色分けされており、単位時間あたりのパケット送信数が多いほどリンクを太く表示している。この図からも、中継ノード同士がある程度の距離を離して配置されており、提案手法が効率的な配送木を構築したことがわかる。ただし、対象ネットワークにおける最小の中継ノード数が不明であるため、最適性の評価については今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究では比較的密な無線センサネットワークにおいて、中継ノード数を低減する手法を提案した。また、自作のシミュレータを用いて提案手法の評価実験を行った。シミュレーション実験の結果、提案手法は次ホップをランダム選択した場合に比べて、中継ノード数を大幅に削減できることを確認した。

今後の課題は、配送木の最適性の評価だけでなく、提案するような管理コストの低いネットワークを実現する具体的な MAC プロトコルの提案、具体的な消費電力量の見積、ノード故障時の経路復旧法の具体化など、多岐にわたる。

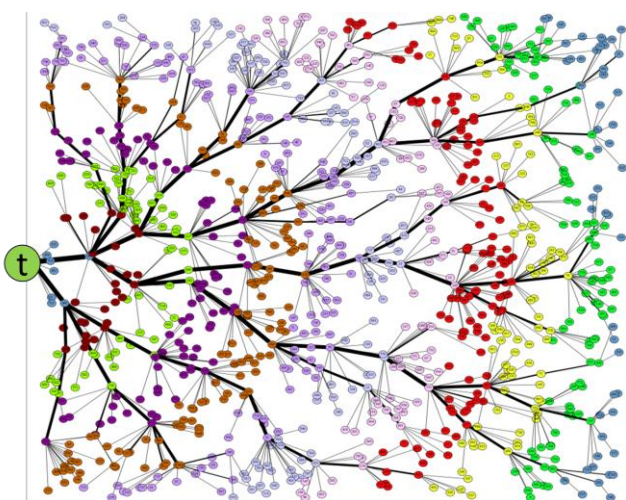


図 8:提案手法による配送木

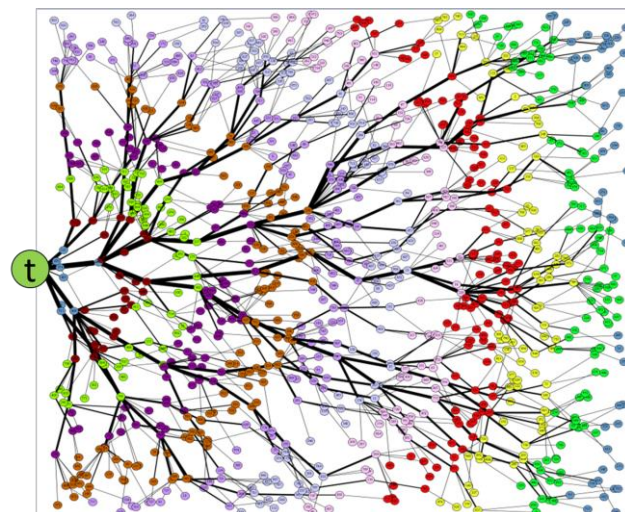


図 9:ランダム決定による配送木

参考文献

- 1) W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 21st Conference on Computer Communications (INFOCOM'02), 2002.
- 2) T. van Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03), pp. 171-180, 2003.
- 3) J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, In Proc. of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04), pp.95-107, 2004.
- 4) M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '06), 2006.
- 5) Y. Sum, O. Gurewits, and D. B. Johnson, "RI-MAC: A Receiver-initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '08), pp.1-14, 2008.
- 6) P. Huang, C. Wang, L. Xiao, "RC-MAC: A Receiver-Centric MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS'10), 2010.
- 7) P. Huang, L. Xiao, M.W. Mutka, and N. Xi, "The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No.1, 2013.
- 8) C. Park and P.H. Chou, "Ambimax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-supplu Wireless Sensor Nodes," in Proc. of the IEEE SECON'06, 2006.
- 9) P. Dutta, J. Hui, J. Jeong, S. Kim, C. Sharp, J. Taneja, G. Tolle, K. Whitehouse, and D. Culler, "Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Deployments," In Proc. of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '06), pp. 407-415, 2006.
- 10) S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," IEEE

Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No. 3, pp443-461, 2011.

- 11) 猿渡俊介, 森戸貴, 南正輝, 森川博之, "バッテリーレス無線センサネットワークと省メモリ型データ収集プロトコル," 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No.1, pp.1-14, 2014.
- 12) D. Luo, X. Zhu, X. Wu, and G. Chen, "Maximizing Lifetime for the Shortest Aggregation Tree in Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 30th Conference on Computer Communications (INFOCOM'11), 2011.
- 13) T.W. Kuo and M.J. Tsai, "On the Construction of Data Aggregation Tree with Minimum Energy Cost in Wireless Sensor Networks: NP-Completeness and Approximation Algorithms," In Proc. of the 31st Conference on Computer Communications (INFOCOM'12), 2012.
- 14) O. Gnawali, R. Fonseca, K. Jamieson, D. Moss, and P. Levis, "Collection Tree Protocol," In Proc. of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '09), 2009.