

無線センサネットワークにおけるゴシップ手法を拡張した 低消費電力情報散布手法の提案及び評価

國本 倫平^{†1} 久松 潤之^{†1}

概要: 無線センサネットワークを構成するセンサノードにおいて、ノードが消費する電力のうち、無線通信による情報の送受信により消費する電力の割合は、非常に大きい。無線センサネットワークを構成するノードの多くは、バッテリー駆動であるため、長時間稼働させるためには、不要な無線通信を抑制する必要がある。しかし、無線センサネットワークにおける、代表的な情報散布手法であるフラッディング手法、そして、ゴシップ手法は、不要なメッセージの送受信があり、電力を不必要に消費する問題がある。そこで、本稿では、無線センサネットワークにおける新たな情報散布手法を提案する。提案手法では、常に送信確率を一定とするゴシップ手法を拡張し、送信確率を変化させることにより、不要なメッセージの送受信を抑え、消費電力を削減する。また、提案手法は、隣接ノードがブロードキャストしたメッセージを、送信したメッセージに対する確認応答として用い、メッセージの散布に失敗したと考えられる場合は再送することで、高い情報散布率を実現する。これに加えて、メッセージが既に散布されていると考えられる場合、提案手法はブロードキャストを行わないため、消費電力を抑制することができる。シミュレーションによる性能評価から、全ての手法で、送信距離を増加させると情報散布率が上昇する事がわかる。しかし、フラッディング手法、ゴシップ手法は、送信距離を増加させた場合、消費電力が急激に増加する。一方、提案手法は、無線の送信距離を増加させた場合でも、消費電力はほとんど増加しない。よって、提案手法は若干の消費電力上昇で、情報散布率が大きく向上することを示す。

キーワード: センサネットワーク, 省電力, 情報散布

Energy-efficient Information Dissemination Based on Gossip in Wireless Sensor Networks

RIMPEI KUNIMOTO^{†1} HIROYUKI HISAMATU^{†1}

Abstract: Power-saving is one of the important issues in wireless sensor networks and many studies on power-saving in wireless sensor networks have been done. In this paper, we tackle the issue of the energy-efficient information dissemination in wireless sensor networks. We propose method of disseminating information while optimizing electric power consumption in wireless sensor networks. Our new dissemination method employs gossiping and uses the message that a node broadcasted and received from the neighbor nodes as the acknowledgement for the successful dissemination to the neighbor nodes. We evaluate our proposed method by simulation. As a result, it is found that the electric power consumption of the proposal method in the entire network is much smaller than that of the other methods. Furthermore, we show that the farther the transmitting distance of the wireless radio wave becomes, the more efficiently our method can disseminate information to the network.

Keywords: sensor network, energy efficiency, information dissemination

1. はじめに

近年、半導体技術の進歩により無線端末の小型化が進み、それに伴って無線センサネットワークへの注目が高まっている。無線センサネットワークは、周囲の状況をモニタするセンサを備えたノードを多数配置し、データ収集用のノードであるシンクノードに対して、センサノードが観測したデータを送信する。これらのノードは、無線通信によって、ノード同士がネットワークを自立的に形成しており、無線 LAN のアクセスポイントや携帯電話の基地局のような、固定の通信拠点を必要としない。小型の無線ノードを配置するのみで、情報の収集、散布を容易に行うことができることから、農業や工業といった様々な分野への活用が期待されている。本稿では、無線センサネットワークにおける情報散布の問題に取り組む。

無線センサネットワークを構成するノードのうち多くが、バッテリー駆動である。センサーノードにおいて、メッセージの送受信によって消費する電力は、ノードが消費する電力に対して大きく、その消費電力は、ノードの消費電力全体の約半分を占める場合もある [1]。よって、各ノードが情報散布のために、メッセージの送受信を大量に繰り返した場合、短時間でバッテリーが枯渇する。これは無線センサネットワーク全体としての稼働時間の減少につながる。無線センサネットワークにおいて、不要なメッセージの送受信を抑制する情報散布手法が必要である。

無線センサネットワークにおける、従来の代表的な情報散布手法として、フラッディング手法が挙げられる [2]。フラッディング手法による情報散布では、まず、送信ノードが隣接ノードに対して、メッセージをブロードキャストする。メッセージ受信した隣接ノードは、それが初めて受信するメッセージであれば、そのメッセージをブロードキャストする。これを繰り返すことによって、始点ノードが送信したメッセージを、ネットワーク全体に散布する。

しかし、フラッディング手法では、隣接ノードの状況を考慮せずに、送信ノードはメッセージをブロードキャストする。そのため、隣接する全てのノードが、既にメッセージを受信しており、ブロードキャストする必要がない場合においても、送信ノードはメッセージをブロードキャストする。その結果、受信済みのメッセージを繰り返し受信することになり、送信ノードは電力を不必要に消費する。

そこで、フラッディング手法の不要なメッセージの送受信を行う問題を改善する、ゴシップ手法が提案されている [3]。ゴシップ手法では、メッセージの転送に対して、確率的な要素が導入されている。具体的には、これまでに受信したことがないメッセージを受信した時、そのノードは一定の確率で隣接ノードにブロードキャストする。これに

より、フラッディング手法と比較して、各ノードにおけるメッセージの受信回数が減少し、その結果、消費電力は減少する。しかし、ネットワークの状況、メッセージの配信状況によって、適切な送信確率は変化する。しかしながら、ゴシップ手法は、常に一定の確率でメッセージを転送するため、不要なメッセージの転送が発生し得る。また、適切な送信確率に満たない場合、十分な数のノードがメッセージを持っていない、散布開始から間もない時点で、ブロードキャストが中止され、情報散布率が大きく悪化する。

本稿では、無線センサネットワークにおける新たな情報散布手法を提案する。ゴシップ手法では、メッセージの送信確率は常に一定だが、提案手法は、始点ノードからのメッセージのホップ数により送信確率を定める。周囲の状況によった適切な送信確率を設定することで、不要なメッセージの送信を抑え、消費電力を削減する。

また、提案手法は、自ノードがブロードキャストしたメッセージに対して、それを受信した隣接ノードが、ブロードキャストするメッセージを確認応答として用いる。確認応答を十分な数受け取れない場合、送信ノードが再びメッセージをブロードキャストする。これにより、棄却率が高いネットワークにおいて、高い情報散布率を実現する。また、メッセージをブロードキャストする前に、同じメッセージを隣接するノードから受信した時点で、メッセージが既に周辺のノードに散布されていると考え、ブロードキャストしない。

ノードが正方格子上に配置された環境において、シミュレーションにより性能評価を行う。パケット棄却率が高いネットワークにおいて、フラッディング手法、ゴシップ手法と比較して、提案手法は、情報散布率が、大きく向上することを示す。また、無線の送信距離を伸ばすと、情報散布率が大きく向上することを示す。しかし、無線の送信距離を伸ばすには、消費電力の増加が一般に必要な。提案手法は、フラッディング手法、ゴシップ手法と比較して、送信距離に対する消費電力の増加幅が小さいことを示す。さらに、ノードがランダムに配置された環境でのシミュレーションを行い、提案手法は、現実のネットワークの配置に近い場合でも、有効であることを示す。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2 章では、本論文の関連研究を述べる。3 章では、我々が提案する情報散布手法を述べる。4 章では、シミュレーションによる提案手法の性能評価を行い、提案手法の有効性を示す。最後に、5 章では、本論文のまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

すでに、ゴシップ手法の研究は行われている。例えば、[4] では、ゴシップ手法の拡張を行っている。この手法では、メッセージを発信したノードからの一定距離にあるノードまでは、ブロードキャストする確率を 1 とし、メッ

^{†1} 現在、大阪電気通信大学
Presently with Osaka Electro-Communication University

セージ数を削減しつつ、高い散布率を達成できることを示している。しかしながら、ネットワーク品質の悪い環境、すなわち、棄却率が高い場所を想定しておらず、そのような場所では散布率が低くなることが予想される。また、無線の送信距離そして、消費電力に関する検討がない。

[5]では、情報を散布する際にクラスタ型の階層化ネットワークを構築し、そのネットワーク上で効率的なメッセージ転送手法を提案している。しかしながら、階層化ネットワークを構築、また維持する際のメッセージは、考慮されていない。また、[4]と同様に、無線の送信距離そして、消費電力に関する検討がない。

また、[6]では、電波強度を基にした情報散布手法を提案している。この手法では、受信ノードがメッセージを受信した際、送信ノードからの距離があればあるほど、受信電力が小さくなることを利用し、送信ノードから離れたノードほど、早くメッセージのブロードキャストを行う。その結果、ネットワーク全体として、少ないメッセージ転送回数により、ネットワーク全体への情報散布が可能となっている。しかしながら、この研究では、棄却率が比較的低いことを想定している。本稿では、応答確認を採用しており、棄却率が高いネットワークにおいても、高い散布率が期待でき、さらに、再送の分、余分なメッセージ転送があるが、ネットワーク全体としての消費電力の増加が小さい。

3. 提案手法

フラッディング手法では、各ノードがメッセージを複数回ブロードキャストした場合、隣接するノードがメッセージを受信する機会が増える。そのため、劣悪なネットワーク環境においても、高い情報散布率が期待出来る。しかし、その反面、不要なメッセージの送受信が発生し、各ノードの消費電力の増加が予想される。

ゴシップ手法では、すべてのノードは一定の確率で、メッセージをブロードキャストする。ブロードキャスト時に一定の確率でブロードキャストを中止することにより、フラッディング型の情報散布手法と比較し送信回数を削減することができる。

ゴシップ手法では、送信確率を下げる程、送信回数を削減することができる。しかし、十分な数のノードがメッセージを持っていない、散布開始から間もない時点で、ブロードキャストが中止されてしまうと、情報散布率が大きく悪化する。しかし、散布開始直後にブロードキャストが中止されないよう、メッセージ送信確率を上げた場合、情報散布率が悪化する問題は解決されるが、十分に送信回数を削減できない。送信確率を一定にするのではなく、十分な数のノードにメッセージの散布が完了した後は、送信確率を低下させることにより、高い情報散布率と送信回数の削減が両立できると予想できる。

そこで、提案手法では始点ノードからのホップ数を基に、

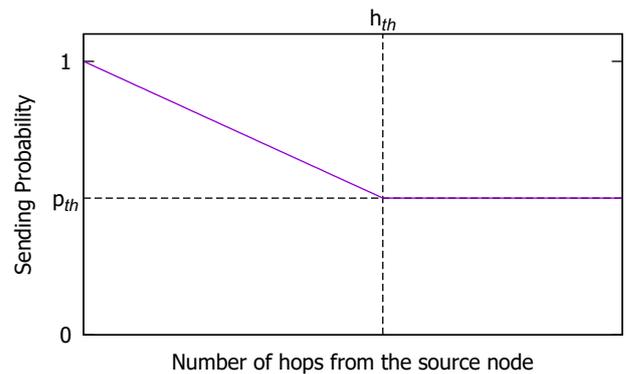


図 1: 受信したメッセージをブロードキャストする確率

Fig. 1 Message broadcast probability

メッセージをブロードキャストする確率を変化させる。式(1)、および図1に、提案手法がメッセージを送信する確率 p を示す。

$$p = p_{th} + \max\left\{\frac{(hop - h_{th}) \times (1 - p_{th})}{1 - h_{th}}, 0\right\} \quad (1)$$

ただし、 p_{th} は最小送信確率、 h_{th} は最小送信確率となる最小ホップ数、 hop は現在の始点ノードからのホップ数である。提案手法では、始点ノードからのホップ数が近い場合、送信確率 p は高くなり、始点ノードから離れホップ数が h_{th} に近づくほど送信確率 p は p_{th} まで低下する。

さらに、提案手法は、自ノードがブロードキャストしたメッセージを、隣接ノードから受信した時、それを確認応答と考える。これにより、提案手法は、隣接ノードのメッセージの受信状況に応じた、パケットの送信が可能である。その結果、提案手法は、不要なメッセージの送受信を抑制することによって、各ノードにおける消費電力を抑制しつつ、情報散布率を高めることが期待できる。

提案手法では、散布するメッセージを持ったノードがブロードキャストする。メッセージのブロードキャスト後、ノードは時間 T の間、待機する。隣接ノードから、ブロードキャストしたメッセージを、待機時間内に α 回受信した時、隣接ノードに対するメッセージの散布に成功したと、送信ノードは判断する。

メッセージのブロードキャスト後に、待機する時間 T を、次式により定める。

$$B = (2^{macMaxBE} - 1) \times aUnitBackoffPeriod$$

$$T = (SIFS + LIFS + B + CCA) \times symboltime$$

ただし、SIFS, LIFS, macMaxBE, aUnitBackoffPeriod, symboltime は、IEEE 802.15.4 のアクセス制御である CSMA/CA において、パケットの衝突を回避するために定められているパラメータである

また、 α は確認応答として用いるメッセージ受信回数の閾値である。隣接ノードから、 α 回ブロードキャストしたメッセージと同一のメッセージを受信したとき、隣接ノード

ドに対するメッセージの散布に成功したと判断し、それ以降、送信ノードは同じメッセージのブロードキャストを行わない。

一方、提案手法は、送信ノードがブロードキャストしたメッセージと、同じメッセージを時間 T の間に α 回受信できなかった場合、隣接ノードに対するメッセージの散布に失敗したと判断する。この場合、送信ノードはメッセージを再ブロードキャストする。

提案手法では、最大で β 回、メッセージの再ブロードキャストが行われる。再ブロードキャストしたメッセージと同じメッセージを、 α 回受信した場合、隣接ノードに対するメッセージの散布に成功したと判断し、それ以降、送信ノードは同じメッセージのブロードキャストを行わない。

また、 β 回再ブロードキャストを行っても、再ブロードキャストしたメッセージと同じメッセージを、 α 回受信できなかった場合、送信ノードは付近にノードが存在しないと考え、タイムアウトする。タイムアウトが発生すると、それ以降、送信ノードは同じメッセージのブロードキャストを行わない。

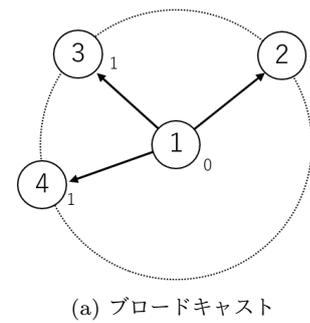
図 2 に、提案手法を用いた情報散布の例を示す。なお、実線による円がノード、ノード内の数字がノード番号、ノード付近の数字がメッセージの受信回数である。また、破線はノードの通信可能範囲、点鎖線のノードは、そのノードがブロードキャストを行わないことを示す。提案手法のパラメータは $\alpha = 2, \beta = 1$ とする。また、説明の簡単のため、送信確率は常に 1 とする。

まず、図 2(a) では、散布するメッセージを持つ、ノード 1 がメッセージをブロードキャストする。メッセージのブロードキャスト後、ノード 1 は時間 T だけ待機する。ノード 1 がブロードキャストしたメッセージは、ノード 2、ノード 3、そしてノード 4 に、初めて到着するものである。そのため、そのメッセージをノード 2、ノード 3、そしてノード 4 がさらにブロードキャストする。

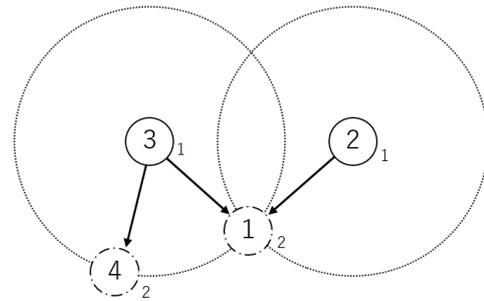
図 2(b) では、ノード 2、ノード 3 が、ノード 4 より先にブロードキャストした場合、ノード 2 からのメッセージは、ノード 1 に届く。メッセージを 2 回隣接ノードから受信したノード 1 は、確認応答とする受信回数 α を満たすため、メッセージの散布に成功したと判断し、以降ノード 1 はそのメッセージのブロードキャストを行わない。

また、この場合、ノード 3 のメッセージが、同じメッセージをブロードキャストする予定であるノード 4 に届く。この時、ノード 4 は、確認応答とする受信回数 α を満たすため、既にブロードキャストするメッセージが周辺に散布されていると判断し、以降ノード 4 はそのメッセージのブロードキャストを行わない。

ノード 2、ノード 3 は、ノード 1 から受信したメッセージをブロードキャスト後、時間 T だけ待機する。しかし、ノード 1、ノード 4 はブロードキャストを行わないため、



(a) ブロードキャスト



(b) ブロードキャストの中止・再送

図 2: メッセージの散布の様子

Fig. 2 Process of a message dissemination in the proposed method

ノード 2、ノード 3 は、確認応答とする受信回数 α を満たせない。そのため、待機時間終了後、メッセージを再度ブロードキャストする。再送回数 β は 1 回であるため、再度ブロードキャストしたのち、タイムアウトする。

4. シミュレーションによる性能評価

本章では、シミュレーションにより、提案手法の情報散布率、ネットワーク全体での消費電力量を評価する。シミュレーションは、センサノードを二次元正方格子に配置した場合と、正方形領域上へのランダムに配置した場合の、2種類のネットワークモデルで行う。

4.1 シミュレーション環境

シミュレーションに用いるノードは、Mono Wireless の TWELITE DIP [7] を想定する。また、無線の周波数を 2.44 [GHz]、送信レートを 250 [Kbit/s]、パケットサイズを 127 [Byte] とし、メッセージは全て単一のパケットに収まるとする。電源電圧を 3.3 [V] とし、メッセージ受信時に流れる電流を 14.7 [mA] とする。送受信アンテナは Mono Wireless の TWE-AN-P4208-10 [8] を想定し、利得は 2 [dBi]、また、ノードの最低受信感度は -96 [dBm] とする。

無線の送信距離を 200, 300, そして、400 [m] とし、いずれの場合においても、受信感度が -96 [dBm] となるような送信出力を定め、センサノードの消費電力を求める。本稿では、ノード間に障害物、および、反射物がないと仮定

し、電波の減衰が自由空間損失モデルに従うとする。この場合、送信ノードが送出した波長 λ の電波が距離 d 離れた受信ノードに到着した場合の伝搬損失 $L_p(d)$ は、式 (2) で与えられる。

$$L_p(d) = (4\pi d/\lambda)^2 \quad (2)$$

送信アンテナの利得を G_t 、受信アンテナの利得を G_r 、最低受信感度を P_{r_m} とすると、各距離 d において必要な送信出力 $P(d)$ は、式 (3) で与えられる。

$$P(d) = G_t + L_p(d) + G_r \quad (3)$$

各距離において必要な送信出力 $P(d)$ から、送信の際に流れる電流を求める。なお、TWELITE DIP は各送信出力における電流量が提供されていないため、性質が近い LSI の仕様書 [9] で提供されている値から、多項式近似により求め、無線の送信距離が 200, 300, そして、400 [m] の場合、送信時に流れる電流はそれぞれ、8.24, 12.09, そして、13.05 [mA] とする。また、1 回の送受信時に流れる電流 I [A], 電圧 V [V], パケットサイズ L [bit], 転送速度 r [bit/s] を用いて、消費電力量 J [J] は、式 (4) で与えられる。

$$J = I \times V \times \frac{L}{r} \quad (4)$$

散布するメッセージは、ランダムに選んだ 1 ノードから発生する。そのメッセージを、それぞれフラッディング手法、ゴシップ手法、そして提案手法を用いて、ネットワーク全体に散布する。なお、フラッディング手法は送信回数を 1 回とし、ゴシップ手法の送信確率は 80 [%], 送信回数は 1 回とする。提案手法は、最小送信確率 p_{th} を 50 [%], 最小送信確率となるホップ数 h_{th} を 50 とする。また、提案手法の再送の判断に用いる、確認応答の閾値 α を 2 回、再送回数 β を 1 回とする。

この環境において、各手法のシミュレーションを、送信距離を 200, 300, そして、400 [m], 棄却率を 0, 10, 20, 30, 40, 50 [%] とし、2500 回行い、情報散布率、ネットワーク全体の消費電力量の平均値を求める。

4.2 センサノードを二次元正方格子上に配置した場合のシミュレーション

本章では、一辺 200 [m] の二次元正方格子、 100×100 が存在し、センサノードを二次元正方格子上に配置した環境でシミュレーションを行う。

図 3 に、無線の送信距離を 200, 300, そして、400 [m] とし、通信時のメッセージ棄却率を変化させた場合のフラッディング手法、ゴシップ手法、および提案手法の平均情報散布率を示す。図 3(a) から、提案手法は他の手法と比較すると、棄却率が増加した場合の情報散布率の低下が小さいことが分かる。これは、フラッディング手法及びゴシッ

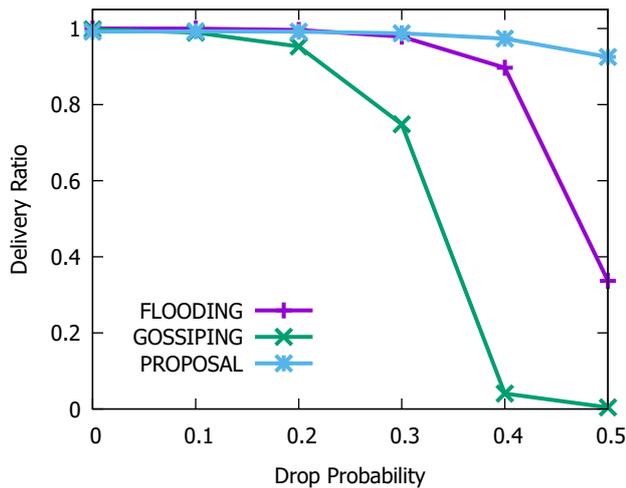
プ手法は一度しかメッセージのブロードキャストを行わないのに対し、提案手法は隣接ノードに対するメッセージの散布に失敗したと判断した際、再送を行うためである。

さらに、フラッディング手法にくらべ、ゴシップ手法の情報散布率が低いことが分かる。これは、ゴシップ手法は一定の確率でメッセージのブロードキャストを中止するため、高い棄却率の中でかろうじて受信に成功したノードでさえも、メッセージのブロードキャストを中止しているためである。

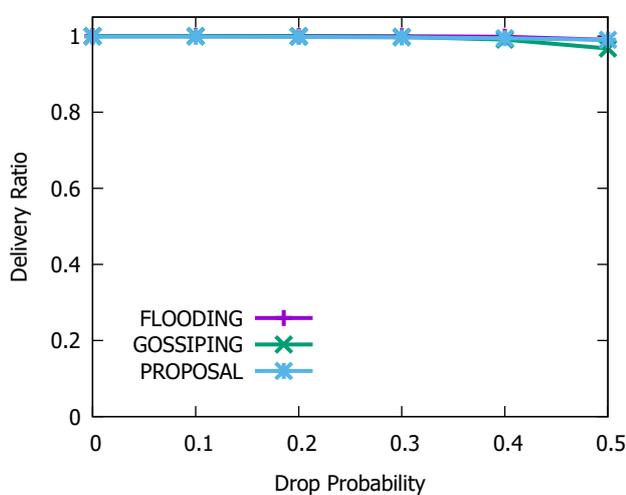
図 3(a)–(c) から、すべての手法が、無線の送信距離が長くなるにつれて、棄却率が高い領域においても、高い情報散布率を達成することが分かる。これは、無線の送信距離が長くなるほど、一回の送信でメッセージを受信できるノード数が増加するためである。

図 4 に、棄却率を 0, および 0.5 とし、無線の送信距離を変化させた場合において、情報散布率が 0.95 以上になる時の、フラッディング手法、ゴシップ手法、及び提案手法における、ネットワーク全体の平均消費電力量を示す。この図から、棄却率が高い場合、消費電力量が少ないことが分かる。これは、1 回の送信で受信するノード数が減少し、ネットワーク全体での受信回数が減少しているためである。また、フラッディング手法、ゴシップ手法は、無線の送信距離が増加すると、消費電力量が急激に増加していることが分かる。これは、無線の送信距離を増加させるため、送信出力を増加させているため、メッセージの送信に必要な消費電力が増加しているためである。一方、提案手法は、無線の送信距離を増加させた場合においても、ネットワーク全体の消費電力量の増加が少ないことが分かる。これは、提案手法は、隣接ノードからブロードキャストする予定のメッセージを一定回数受信した場合、同一のメッセージが、既に周辺に散布されていると判断し、ブロードキャストを中止するためである。無線の送信距離が増加した場合、同一のメッセージを受信する機会が増え、ブロードキャストを中止する回数が増加する。

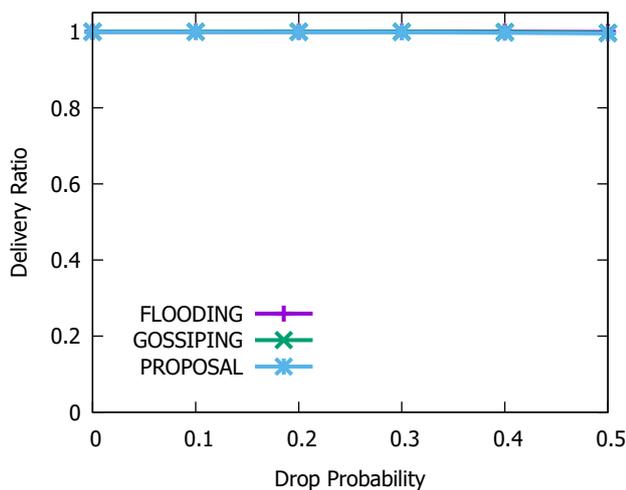
また、棄却率 0 で無線の送信距離 200 [m] の場合、棄却率 0.5 で無線の送信距離 300 [m] の場合は、提案手法がゴシップ手法と比較して、消費電力量が多いことが分かる。これは、提案手法は既にブロードキャストするメッセージが周辺に散布されていると判断した場合、ブロードキャストを中止するためである。周辺に散布されているかを判断する基準が、隣接ノードから同一のメッセージを一定回数受信することであるため、無線の送信距離が増加した場合、同一のメッセージを受信する機会が増え、ブロードキャストを中止する回数が増加する。しかし、通信可能範囲が短い、棄却率が高いなどの理由で、同一のメッセージを一定回数受信することが少ない場合は、ブロードキャストを中止する回数が減り、また再送も行われるため、ゴシップ手法と比較して、ネットワーク全体の消費電力量が増加する。



(a) 無線の送信距離 200 [m]



(b) 無線の送信距離 300 [m]



(c) 無線の送信距離 400 [m]

図 3: ノードを二次元正方格子に配置した場合のシミュレーション結果:情報散布率

Fig. 3 Information delivery ratio with nodes arranged in square lattices

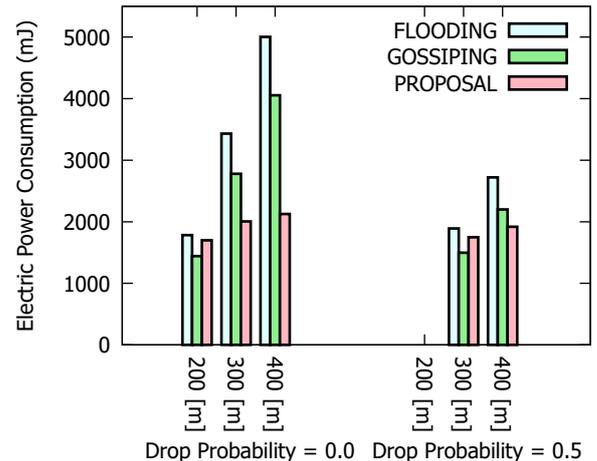


図 4: ノードを二次元正方格子に配置した場合のシミュレーション結果:ネットワーク全体の消費電力

Fig. 4 Total electric power consumption with nodes arranged in square lattices

4.3 センサノードをランダム配置した場合のシミュレーション

本章では、一辺 4,000 [m] の正方形領域上に、ノードをランダムに配置した環境でシミュレーションを行う。図 5 に、ノードを 1000 台、無線の送信距離を 200, 300, そして、400 [m] とし、棄却率を変化させた場合の、フラッディング手法、ゴシップ手法、及び提案手法の情報散布率を示す。

図 5(a) から、提案手法の情報散布率は他の手法と比較すると、棄却率が低い領域では、フラッディング手法、ゴシップ手法と比較して、低い、棄却率が高い領域でもあまり変動が見られないことが分かる。これは、提案手法は既にブロードキャストするメッセージが周辺に散布されていると判断した場合、ブロードキャストを中止するためである。周辺に散布されているかを判断する基準が、隣接ノードから同一のメッセージを一定回数受信することであるため、通信可能な範囲にノード数が多い場合、同一のメッセージを受信する機会が増え、ブロードキャストを中止する。そのため、棄却率が増加し、周囲のノードから同一のメッセージを受信する機会が減少すると、情報散布率が増加する。

また、すべての手法が、棄却率が 0.3 以上の領域において、棄却率の増加に伴い情報散布率が減少しているが、ゴシップ手法は、他の手法と比較して、情報散布率が急激に減少していることが分かる。ゴシップ手法は、ブロードキャストを一定の確率で中止するためである。一方、提案手法は隣接ノードに対するメッセージの散布に失敗したと判断した際、再送を行う。メッセージの散布に成功したかを判断する基準が、自らが送信したメッセージと同一のメッセージを、隣接ノードから一定回数受信することであ

るため、棄却率が増加し、同一のメッセージを受信する機会が減ると、再送を行う機会が増加する。

図 5(b), (c) から、無線の送信距離を長くすることで、すべての手法において、棄却率が高い領域においても、高い情報散布率を維持することがわかる。これは、無線の送信距離内に存在するノードが多く、棄却率が高い場合においても、メッセージを受信する機会が多いためである。

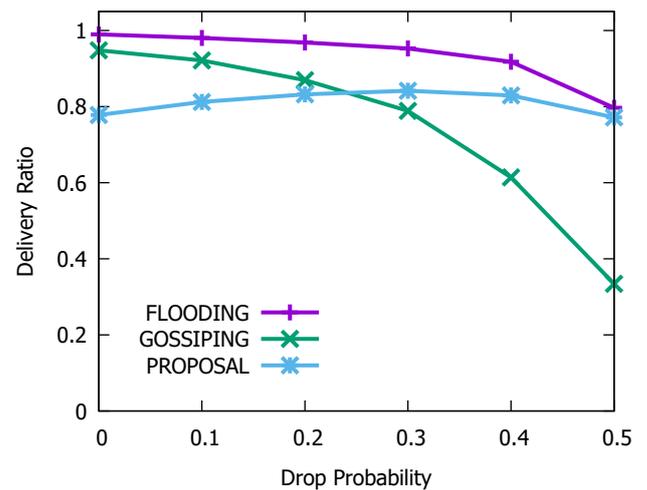
図 6 に、図 5 と同様の環境で、ノードを 1500 台に増加させた場合の情報散布率を示す。この図から、ノードの台数を増加させ密度が増えた場合、図 5(b), (c) と同様に、情報散布率を高く維持できることが分かる。これは、無線の送信距離を増加させた場合と同様に、無線の送信距離内に存在するノード数が十分に多いためである。

図 7 に、棄却率を 0, 0.5, ノードの台数 2000 台とし、無線の送信距離を変化させた場合のフラッディング手法、ゴシップ手法、及び提案手法における、ネットワーク全体の消費電力量を示す。この図から、まず、提案手法は、フラッディング手法、ゴシップ手法と比較すると、すべての無線の送信距離及び棄却率で、ネットワーク全体の消費電力量が少ないことが分かる。また、提案手法は送信出力によるネットワーク全体の消費電力の変動が、少ないことが分かる。これは、提案手法は既にブロードキャストするメッセージが周辺に散布されていると判断した場合、ブロードキャストを中止するためである。周辺に散布されているかを判断する基準が、隣接ノードから同一のメッセージを一定回数受信することであるため、通信可能な範囲にノード数が多い場合、同一のメッセージを受信する機会が増え、ブロードキャストを中止する回数が増加する。これにより、送信出力の増加により 1 回のメッセージの送信に必要な消費電力は増加するが、ネットワーク全体では、送信回数が減少し、また受信回数も減少するため、消費電力量の増加が少なく抑えられる。

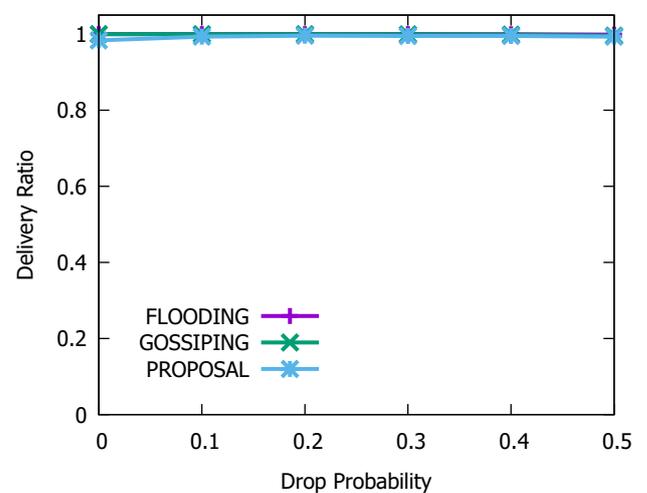
4.4 シミュレーション結果のまとめ

二次元正方格子上にノードを配置したシミュレーションでは、すべての手法において、無線の送信距離が増加するほど、棄却率が高い環境においても、情報散布率は向上した。さらに、現実のネットワークの配置に近い、ノードをランダム配置したシミュレーションを行い、提案手法は、正方格子上に配置した場合と、同様の性質を示すことがわかった。

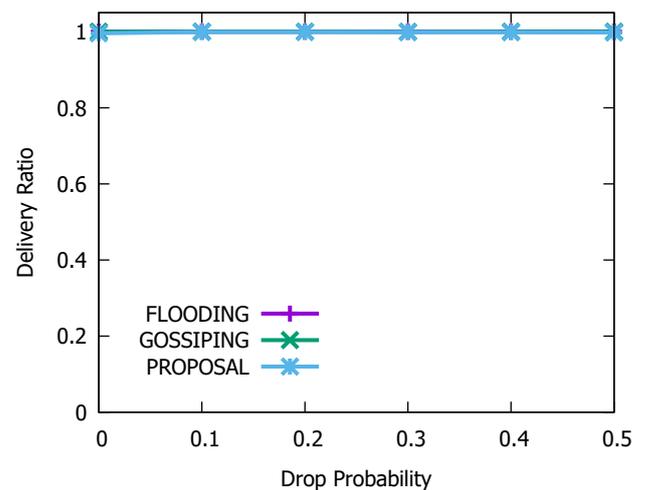
フラッディング手法、ゴシップ手法では、無線の送信距離を増加させると、ネットワーク全体の消費電力量が非常に増加する。一方、提案手法の場合、フラッディング手法、ゴシップ手法と異なり、各ノードがメッセージを受信する機会が増加するほど、メッセージの送信回数が減少するため、より大きな電力を用いて送信距離を増加させても、効率的な情報散布が可能となり、ネットワーク全体での消費



(a) ノード数 1000 台 無線の送信距離 200 [m]



(b) ノード数 1000 台 無線の送信距離 300 [m]



(c) ノード数 1000 台 無線の送信距離 400 [m]

図 5: ノードをランダムに 1000 台配置した場合のシミュレーション結果:情報散布率

Fig. 5 Information delivery ratio with 1000 randomly located nodes

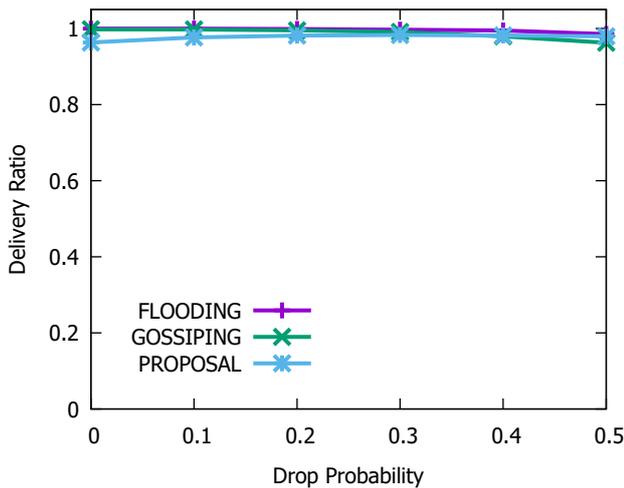


図 6: ノードをランダムに 1500 台配置した場合のシミュレーション結果:情報散布率

Fig. 6 Information delivery ratio with 1500 randomly located nodes

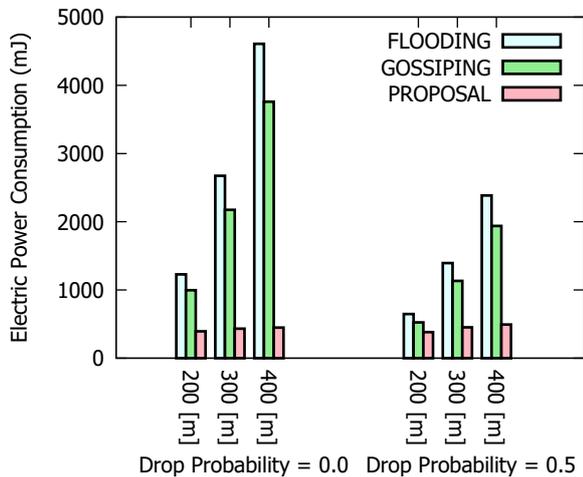


図 7: ノードをランダムに配置した場合のシミュレーション結果:消費電力量

Fig. 7 Total electric power consumption with randomly located nodes

電力量はほとんど増加しない。つまり、提案手法は、既存の手法とは異なり、ネットワーク品質の悪い環境において、ネットワーク全体の消費電力をほとんど増加させず、高い情報散布率を達成できることがわかった。

5. まとめと今後の課題

本稿では、既存の手法であるゴシップ手法を拡張した、無線センサネットワークにおける新たな情報散布手法を提案した。ゴシップ手法では一定となっている送信確率を、始点ノードからのホップ数を考慮した適切な送信確率を設定し、不要なメッセージの送信を抑制する。また、ノードが隣接ノードのブロードキャストを受信した時、送信したメッセージの確認応答とみなす。確認応答が得られなかった場合、メッセージの再送を行うため、棄却率が高い環境

において情報散布率が向上する。シミュレーションによる性能評価から、提案手法は、フラッディング手法、ゴシップ手法と比較して、より大きな電力を用いて送信距離を増加させても、ネットワーク全体の消費電力量の増加が少ないことを示した。提案手法を用いることで、ネットワーク品質の悪い環境において、高い情報散布率を達成しつつ、ネットワーク全体の消費電力をほとんど増加させないことが可能である。

今後の課題としては、各パラメータを変更し送信回数をより削減すること、実機で計測し評価することが挙げられる。現在、両者に取り組んでいる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15K21515, および, Dayz 株式会社の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Agarwal, Y., Schurgets, C. and Gupta, R.: Dynamic Power Management using On Demand Paging for Networked Embedded Systems, *Proceedings of the 19th Asia and South Pacific Design Automation Conference 2005*, pp. 755–759 (2005).
- [2] Dalal, Y. and Metcalfe, R.: Reverse Path Forwarding of Broadcast Packets, *Communications of the ACM*, Vol. 21, pp. 1040–1048 (1978).
- [3] Hedetniemi, S., Hedetniemi, S. and Liestman, A.: A survey of gossiping and broadcasting in communication networks, *IEEE Networks*, Vol. 18, pp. 319–349 (1988).
- [4] Haas, Z. J., Halpern, J. Y. and Li, L.: Gossip-based ad hoc routing, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 14, No. 3, pp. 479–491 (online), DOI: 10.1109/TNET.2006.876186 (2006).
- [5] Yang, Z., Wu, W., Chen, Y. and Zhang, J.: Efficient Information Dissemination in Dynamic Networks, *2013 42nd International Conference on Parallel Processing*, pp. 603–610 (online), DOI: 10.1109/ICPP.2013.74 (2013).
- [6] Hisamatsu, H., Hasegawa, G. and Murata, M.: Energy-efficient information dissemination based on received signal strength in wireless sensor networks, *2015 IEEE International Workshop Technical Committee on Communications Quality and Reliability (CQR)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/CQR.2015.7129080 (2015).
- [7] Mono Wireless Inc.: TWE-LITE. available at <https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-LITE/MNO-PDS-TWE001L-JP.pdf>.
- [8] Mono Wireless Inc.: TWE-AN-P4208. available at <https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-ANTENNAS/omni/TWE-AN-P4208.pdf>.
- [9] NXP Semiconductors.: JN5169. available at <http://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/JN5169.pdf>.