

特別研究報告

題目

ポテンシャルルーティングに基づく無線センサネットワークにおける
下り方向通信の実現手段の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

豊永 慎也

平成 24 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

ポテンシャルルーティングに基づく無線センサネットワークにおける下り方向通信の実現
手段の提案と評価

豊永 慎也

内容梗概

無線センサネットワークにおいては、多数のセンサノードがセンシングしたデータをシンクノードに届けるため、通信形態は多対一となる。このような、センサノードからシンクノードに対してデータを送るという上り方向の通信を実現する手法は数多くある。一方で、シンクノードから特定の位置に存在するセンサノードに対してクエリや特別な命令を送るといった下り方向の通信に対する要求がある。シンクノードにデータを集めることを目的とした多くのルーティング手法は、上り方向の多対一の通信形態を前提としているため、下り方向の通信に適用することができない。

本報告ではポテンシャルルーティングを用いて、シンクノードからセンサノードへの下り方向のルーティングを実現する手法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションによって評価する。ポテンシャルルーティングでは各ノードはポテンシャルとよばれるスカラー値をもち、その値に基づいてルーティングを行う。このとき各センサノードはシンクノードに近いノードほどポテンシャルが低くなるように自身のポテンシャルを決めており、自身よりもポテンシャルが低い隣接ノードを次ホップとして選択することによって、シンクノードへとデータを届けることができる。この方式では、ポテンシャルの値に残余電力やトラフィック量を反映することによって、小さなオーバーヘッドで負荷分散や低遅延な通信を実現できるため、電池の容量に限りがある無線センサネットワークにおいて優れた特性を有している。しかしながら、ポテンシャルルーティングを用いて下り方向のルーティングを行うとき、各センサノードのポテンシャルの値が一意に定まっている保証はなく、シンクノードのように最小値をとっていないため、宛先ノードにデータを届けることはできない。

そこで本報告では、マルチシンク無線センサネットワークを対象として、それぞれのシンクノードごとにポテンシャル場を構築し、複数のポテンシャル値の組み合わせを用いることによって各センサノードを一意に識別し、任意のノードへの到達を目的としたルーティング手法を提案する。提案した手法について、計算機シミュレーションにより、パケット損失率が 0.1 以下の場合にデータの到達率が 90% 以上であることを示した。

主な用語

センサネットワーク、ポテンシャルルーティング、下り方向の通信、シミュレーション

目次

1	はじめに	6
2	関連研究	8
3	ポテンシャルルーティングの概要	11
3.1	基本動作	11
3.2	既存のポテンシャル場の構築方法	11
4	ポテンシャルルーティングに基づく下り方向の通信手法	13
4.1	既存のポテンシャル場の構築方法で下り方向の通信を行うときに生じる問題	13
4.2	提案手法の概要	14
4.3	ポテンシャルを用いたノード識別子の割り当て手法の提案	15
4.4	ノード識別子を用いたルーティング手法の提案	17
4.5	シミュレーションによる評価	18
5	提案手法における問題点とその解決方法	23
5.1	TTL 超過によるパケット破棄の問題とその解決方法	23
5.1.1	拡散方程式を用いて構築したポテンシャル場の形	23
5.1.2	宛先ノードを次ホップとして選択しない問題とその解決方法	24
5.1.3	宛先ノードの隣接ノードを次ホップとして選択しない問題とその解決方法	26
5.1.4	ルーティング方法を変えることによって解決する方法	29
5.2	タイムアウトによるパケット破棄の問題とその解決方法	30
5.3	シミュレーションによる評価	32
6	おわりに	41
	謝辞	42
	参考文献	43

図目次

1	ポテンシャルルーティングを用いたシンクノード宛のデータ通信の概要	11
2	拡散方程式を用いて構築したポテンシャル場	13
3	ポテンシャル場を用いた下り方向の通信の問題点	14
4	ポテンシャルの組み合わせによるノード識別	16
5	基本性能評価	21
6	ポテンシャル場に特徴的な形が表れるトポロジーの例	24
7	シンク A からのホップ数とポテンシャル値の関係	25
8	宛先ノードを次ホップとして選択しない問題の例	26
9	宛先ノードがノード密度の小さい領域に存在する場合の問題	27
10	上り方向の通信と下り方向の通信の競合	31
11	ポテンシャル場の構築方法を変更した場合の性能評価	34
12	ルーティング方法を変更した場合の性能評価	36
13	基本手法においてデータパケットを届けることができないノードが存在する トポロジーの例	38
14	ルーティングを切り替える方法でノード 38 にデータパケットを送る場合の転 送経路	39
15	ポテンシャル場の構築方法を変更する方法でノード 38 にデータパケットを送 る場合の転送経路	40

表 目 次

1	データの発生モデル	20
2	各手法に用いるパラメータ	33
3	データパケットが届かないノードを宛先とした場合の packets 到達率	35

1 はじめに

近年、無線ノード同士が自律的にネットワークを形成するアドホックネットワークに対する関心が強まっている。その中で、複数のセンサノードが無線によるネットワークを形成する無線センサネットワークでは、特別なインフラストラクチャを必要とせずにセンシング情報を収集することが可能なため、その汎用性に注目が集まっている。情報収集を行う無線センサネットワークでは、複数のセンサノードがセンシングしたデータをシンクノードに届ける、上り方向の多対一の通信形態となるルーティングアルゴリズムが多く提案されている [1-7]。一方でアプリケーションによっては、シンクノードから特定の領域に存在するセンサノードに対してクエリや制御メッセージを送ることによって、センシングしたデータを要求すること、あるいはセンサノードが観測周期を変更することを可能にするような下り方向の通信に対する要求がある [8]。

ポテンシャルルーティングは上り方向の通信のために提案されたルーティング手法であり、局所的な情報交換のみで動作するためスケラビリティが高く、省電力化、負荷分散に効果があることが知られている [4]。容量が有限のバッテリーで駆動するセンサ端末を用いる無線センサネットワークにおいては、省電力化は重要な課題であり、ポテンシャルルーティングは無線センサネットワークに適したルーティング手法である。ポテンシャルルーティングでは各ノードはポテンシャルとよばれるスカラー値をもち、その値に基づいてルーティングを行う。各ノードは自身および通信範囲内に存在するノード (隣接ノード) のポテンシャルや残余電力、シンクノードまでのホップ数などの局所情報を元にして自身のポテンシャルを決定する [4, 5, 9]。このとき各センサノードはシンクノードに近いノードほどポテンシャルが低くなるように自身のポテンシャルを決めており、自身よりもポテンシャルが低い隣接ノードを次ホップとして選択することによって、シンクノードへとデータを届けることができる。ポテンシャルルーティングはプロアクティブ型のルーティングプロトコルであるが、隣接ノード間の局所的な情報交換のみで実現することが可能であるため、他のプロアクティブ型リンクステートルーティングプロトコルに比べてオーバーヘッドが小さい。さらに、このポテンシャルの値に残余電力やトラフィック量を反映することによって、それぞれのノードの負荷が分散され、ネットワーク全体の長寿命化が行われている [4, 5]。しかし、ポテンシャルルーティングではシンクノードから特定の領域のセンサノードに対してクエリや制御メッセージを送ることを想定していないため、下り方向の通信に適用できない。

そこで本報告では、ポテンシャルルーティングを用いたマルチシンク無線センサネットワークを対象として、ポテンシャル場を用いた下り方向の通信を実現する方法を提案する。既存のポテンシャルルーティングにおいて、下り方向の通信を行う場合、宛先ノードと同じポテンシャルの値をもつノードが存在する可能性があり、各ノードはどの隣接ノードにデー

データを転送すれば宛先ノードに近づくか判断することができない。そこで本報告では、それぞれのシンクノードごとにポテンシャル場を構築し、それぞれのポテンシャル場におけるポテンシャル値の組み合わせを観測領域内の仮想的な座標として使うことにより、宛先ノードを一意的に識別する。すなわち、仮想的な座標における距離を定義し、宛先ノードに近づくようなノードを次ホップとして選ぶことによって、任意のセンサノードへとデータを届ける下り方向の通信を実現する。しかし、この方法で下り方向の通信を行うとき、シンクノードからのデータが届かないノードが存在する。この問題を、ポテンシャル場の構築方法やルーティング方法を変更することによって解決する。これらの提案手法によって、シンクノードから特定のセンサノードにクエリや制御メッセージを届けることができるようになる。さらに、すべてのシンクノードは有線ネットワークでつながっていることを想定しており、シンクノード間通信を経由することによって任意のセンサノードから任意のセンサノードへとデータを届けることが可能となり、ポテンシャルルーティングの汎用的な利用が期待できる。

本報告は、以下のような構成となっている。初めに2章で関連研究について述べ、3章では、ポテンシャルルーティングの基本動作と、既存のポテンシャル場の構築方法について説明する。4章ではポテンシャルの値の組み合わせに基づく下り方向の通信を実現する手法を提案し、シミュレーションによって評価する。5章では、4章で述べた手法を適用した場合に生じる問題点を挙げ、それを解決する方法を提案し、シミュレーションによって評価する。最後に、6章に本報告のまとめを述べる。

2 関連研究

無線マルチホップネットワークにおいて任意のノード間の通信を実現しているルーティングプロトコルには様々な手法が提案されている。フラッディングやゴシッピングではデータを各センサノードが伝播することによって宛先ノードにデータを届けることが可能であり、実装も容易である [10, 11]。フラッディングでは、各ノードがブロードキャスト通信することにより、すべての隣接ノードへとデータを転送する。隣接ノードは受信したデータを過去に受信、転送したことがなければブロードキャスト通信によりさらに隣接ノードへと転送する。このような全隣接ノードへの情報転送を繰り返すことにより、情報はいずれ全ノードに伝達される。ゴシッピングでは、データの転送に確率的な要素を導入することにより、ネットワーク内のデータの到達性を保ちつつ、フラッディング型の手法におけるデータの転送数を抑制することができる。しかし、フラッディングやゴシッピングでは、特定の領域に存在するノードのみを宛先ノードとする場合に無駄なデータの転送が多くなる。

すべてのノードがルーティングテーブルをもつことによって任意のノード間の通信を実現することが可能であり、このようなルーティングプロトコルはルーティングテーブルの構築方法からリアクティブ型のルーティングプロトコルとプロアクティブ型のルーティングプロトコルに大別される。リアクティブ型のルーティングプロトコルは、通信要求がないときにはルーティングテーブルを保持しておらず、通信要求が発生したときにのみ一時的にルーティングテーブルを構築する手法である。無線センサネットワークでは、ほとんどのノードが電池で駆動されている。そのため頻繁に通信要求が発生しない場合には、ルーティングテーブルを保持するためのメッセージ交換を減らすことができるため、電力消費を減らすことができる。例えば Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV)[12] では、センサノードで通信要求が発生したときに Route REQuest (RREQ) メッセージをフラッディングし、宛先ノードが自分宛の RREQ メッセージを受信したときに Route REply (RREP) メッセージを送信ノードに送り、中間ノードが経路を構築することによって任意のノードとの通信を実現できる。しかしながら、AODV のようなリアクティブ型のルーティングアルゴリズムは送信ノードで通信要求が発生してから宛先ノードがデータを受信するまでの遅延時間が大きく、定期的に通信が発生するようなアプリケーションであれば、通信のたびに経路を探すことには無駄が多い。そのため、遅延に制約があるアプリケーションや定期的な通信が発生するアプリケーションにおいては適さない。プロアクティブ型のルーティングプロトコルは、通信要求が発生する前にそれぞれのノードがルーティングテーブルを構築し、維持する手法である。すべてのノードが通信要求が発生する前にルーティングテーブルを保持しているため、通信要求が発生したときに即座にフォワーディングすることができ、低遅延の通信を実現できる。例えば、Optimized Link State Routing (OLSR)[13] では通信を行う前にすべ

てのノードが経路情報を共有することで、任意のノードとの通信を実現している。しかし、OLSRでは全てのリンクに関する情報を定期的に交換し、ネットワーク全体で共有することが必要となるためスケーラビリティに欠ける。そのため、多数のセンサノードを用いる大規模なネットワークにおいては、ネットワーク全体のルーティング情報を共有するようなプロアクティブ型ルーティングは適さない。

他の実現方法として、位置情報を用いたルーティングアルゴリズムを用いることでも、任意のノードとの通信を実現することが可能である。位置情報として物理的な位置情報を用いた手法と仮想的な位置情報を用いた手法があり、いずれの手法も局所的な位置情報の交換のみで任意のノード間の通信を実現することができる。物理的な位置情報を用いる手法では、宛先ノードまでの距離や宛先ノードが存在する方角といった情報を用いて任意のノードに対する通信を実現している [14]。しかし、精度の高いノードの位置情報が必要とされるため、センサノードに位置情報を取得するための新たな機器を備え付ける必要がある。また、データを転送するためには送信ノードが宛先ノードの位置を知るための機構が必要となる。一方で、仮想的な位置情報を用いる位置情報を用いたルーティングアルゴリズムでは、位置情報を取得するための機器を必要とせずに位置情報を用いたルーティングを行うことができる [15, 16]。文献 [15] では、3つの起点となるノードが制御パケットをフラッディングすることで仮想的な座標を構築したうえで位置情報を用いたルーティングアルゴリズムを用いる Virtual Coordinate assignment protocol (VCap) という手法が提案されている。しかし、VCapではGPSなしで位置情報を用いたルーティングを行うことができる仮想座標を構築することを目的としており、同一ホップ数をもつノードの区別を行なっておらず、特定のノードを宛先ノードとしたルーティングについては考慮していない。

ポテンシャルルーティングは上り方向の通信を目的として提案されたルーティング手法であり、各ノードは隣接ノードとの情報交換に基づく局所的な行動決定によりデータの転送を行うためスケーラビリティが高く、省電力化や負荷分散にも効果があることが知られている [4]。ポテンシャルルーティングでは各ノードはポテンシャルとよばれるスカラー値をもち、その値に基づいてルーティングを行う。各ノードは自身および隣接ノードのポテンシャルや残余電力、シンクノードまでのホップ数などの局所情報を元にして自身のポテンシャルを決定する [4, 5, 9]。このとき各センサノードは基本的にはシンクノードまでのホップ数が小さいノードほどポテンシャルが低くなるように自身のポテンシャルを決めており、自身よりもポテンシャルが低い隣接ノードを次ホップとして選択することによって、シンクノードへとデータを届けることができる。ポテンシャルルーティングはプロアクティブ型のルーティングプロトコルに分類できるが、隣接ノード間における非常に少ない量の情報交換のみで上り方向の通信を実現することが可能であるため、他のプロアクティブ型リンクステートルーティングプロトコルに比べてオーバーヘッドが小さい。さらに、このポテンシャルの値に

残余電力やトラフィック量を反映することによって、それぞれのノードの負荷が分散され、ネットワーク全体の長寿命化が行われている [4, 5]。

本報告では、ポテンシャルルーティングの無線センサネットワークにおけるこれらの有効性に着目し、ポテンシャルルーティングを拡張することで下り方向の通信を実現する手法を提案する。以降の章では、提案手法を文献 [3] で提案されているポテンシャルルーティングに対して適用するが、本報告における提案手法は文献 [3] のポテンシャルルーティングに限らず、既存のポテンシャルルーティングに対して適用可能なものである。

3 ポテンシャルルーティングの概要

3.1 基本動作

本報告におけるセンサネットワークはマルチホップ転送を前提としており、各ノードはパケットの中継処理を行う。ポテンシャルルーティングでは、ネットワークを構成しているノードやリンクがポテンシャルというスカラー値をもち、その値に基づいてルーティングを行う。各ノードは隣接ノードと、ポテンシャルを計算するための情報（ポテンシャル情報）を定期的に交換することで、隣接ノードの最新のポテンシャル情報を保持している。この情報にはポテンシャルの値や残余電力、シンクノードまでのホップ数などが含まれ、各ノードは自身および隣接ノードのポテンシャル情報をもとに自身のポテンシャルを決定する。このとき、シンクノードまでのホップ数が小さいノードほどポテンシャルの値が小さくなるように各センサノードが自身のポテンシャルの値を決定すると、自身よりもポテンシャルの値が小さくなるような隣接ノードを次ホップとして選ぶことによってシンクノードにデータを届けられる（図1）。既存の研究におけるポテンシャルルーティングでは、このようなポテンシャル場を隣接ノードとの局所的な情報交換のみで構築することを可能としており、ノード数に対してスケーラビリティがある。

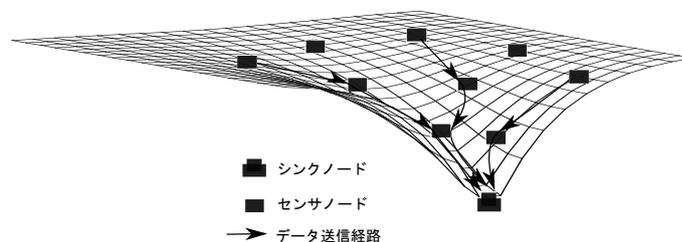


図 1: ポテンシャルルーティングを用いたシンクノード宛のデータ通信の概要

3.2 既存のポテンシャル場の構築方法

文献 [3] では、マルチシンク無線センサネットワークを対象としてポテンシャル場を構築している。文献 [3] では、熱源が置かれた熱伝導体における温度勾配と無線センサネットワークにおけるポテンシャル場の勾配との類似性に着目して、拡散方程式をポテンシャル場の構

築に用いている。拡散方程式は偏微分方程式 (1) によって表され、位置 x における時刻 t の拡散物質の量 ϕ を定める。

$$\frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} = D \Delta \phi(x, t). \quad (1)$$

文献 [3] では、式 (1) をセンサネットワークに適用するために拡散方程式を離散化している。離散化した拡散方程式は式 (2) で表される。ここで $\phi(n, t)$ はノード n における時刻 t のポテンシャルを表しており、 $Z(n)$ はノード n に隣接するノード集合を表している。このとき各ノードのポテンシャルは、自身の直前のポテンシャルと隣接するノードの最新のポテンシャルから計算される。 $D(n)$ は近隣のポテンシャルによる自身のポテンシャルの変動の大きさを表す定数である。ただし、 $D(n)$ の値が大きい場合にポテンシャルが振動する問題があり、文献 [3] ではポテンシャルを収束させるために $D(n)$ を $\frac{\epsilon}{|Z(n)|}$ に設定し $0 < \epsilon < 1$ と設定している。

$$\phi(n, t+1) = \phi(n, t) + D(n) \sum_{k \in Z(n)} \{\phi(k, t) - \phi(n, t)\}. \quad (2)$$

ポテンシャルの値の範囲は $\phi_{min} \leq \phi(n, t) \leq \phi_{max}$ であり、シンクノードのポテンシャルの値は最小値の ϕ_{min} である。また、ネットワーク全体のポテンシャルがシンクノードのポテンシャルと同じ値に収束してしまうことを防ぐために、文献 [3] ではネットワークの末端に存在するノードのポテンシャルの値を最大値の ϕ_{max} とする境界条件 (3) を定義している。

$$\phi(n, t) = \phi_{max}, \forall n \in N_{edge}. \quad (3)$$

N_{edge} はネットワークの末端に存在するノードであり、その要素であるノード n は以下の条件のいずれかを満たす。

$$H(n) > H(k), \forall k \in Z(n), \quad (4)$$

$$H(n) \geq H(k) \cap belong(n) = belong(k), \forall k \in Z(n). \quad (5)$$

$H(n)$ はノード n から最小ホップで到達可能なシンクノードまでのホップ数であり、 $belong(n)$ はそのシンクノードの ID である。3 個のシンクノードが存在するネットワークにおいて、この方法でポテンシャル場を構築するとポテンシャル場は図 2 のようになる。このようにポテンシャル場を構築することによって、ポテンシャルの値が小さくなる隣接ノードを次ホップとして選択することで、センサノードからシンクノードへの通信を実現している。しかし、シンクノードからセンサノードに対してクエリや制御メッセージを送ることは想定しておらず、ポテンシャルルーティングによるシンクノードから特定の領域のセンサノードへの下り方向の通信は不可能である。

次章では、既存のポテンシャルルーティングにおいて下り方向への通信が不可能である理由を具体的に説明した上で、複数のシンクノードが構築する、複数のポテンシャル場を用いた下り方向の通信を実現する手法について説明する。

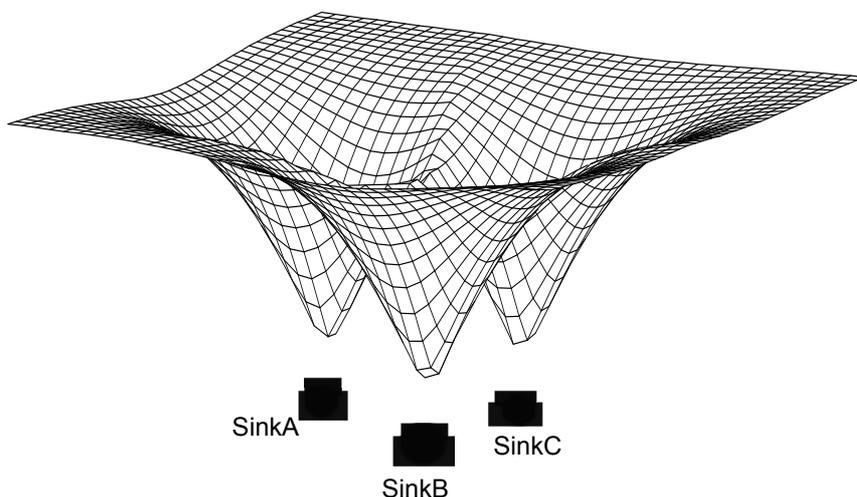


図 2: 拡散方程式を用いて構築したポテンシャル場

4 ポテンシャルルーティングに基づく下り方向の通信手法

4.1 既存のポテンシャル場の構築方法で下り方向の通信を行うときに生じる問題

既存のポテンシャル場では、シンクノードのポテンシャルの値が最も小さくなり、シンクノードまでのホップ数が小さいノードほど小さな値をとるという条件を満たすように構築されている。しかし、この条件では同じポテンシャルの値をもつセンサノードが複数存在する可能性があり、局所的な情報しかもたないセンサノードはどの隣接ノードにデータパケットを転送すれば宛先ノードに届くのかは分からない。そのため、ポテンシャルの値が宛先ノードのポテンシャルの値に近づくように次ホップを選ぶルーティングでは、図 3 に示すようにまったく異なるノードにデータパケットが届く可能性がある。本報告で提案する下り方向の通信を実現する手法は以下の 3 点を満たす必要がある。

1. 宛先となるノードが一意に定まること
2. 送信元となるシンクノードが宛先ノードと宛先ノードの識別子の対応を知っていること
3. その識別子を用いることで、データパケットを宛先ノードまで届けることが可能であること

この手法に必要な機能として、各センサノードを識別するために複数のポテンシャル場を構築してその組み合わせを割り当てる機能と、そのポテンシャルをもつノードへデータパ

ケットを送る機能を以降で説明する。

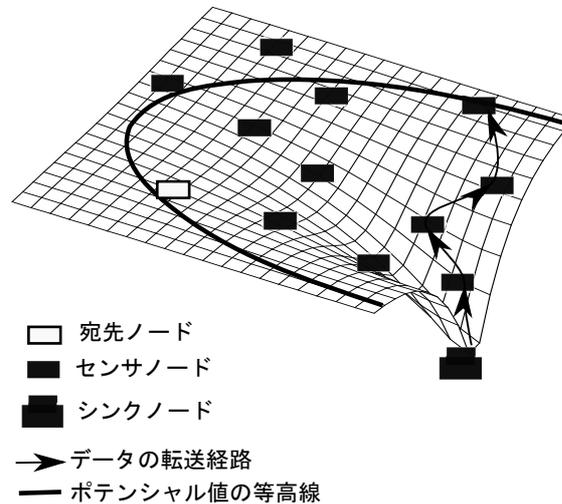


図 3: ポテンシャル場を用いた下り方向の通信の問題点

4.2 提案手法の概要

ポテンシャル場を用いた下り方向の通信を実現するためには、まず各センサノードを一意に識別できるポテンシャルを割り当てることができるようなポテンシャル場が必要となる。このようにポテンシャルの値をもとにした、一意にセンサノードを識別するための値をノード識別子と呼ぶことにし、ノード n のノード識別子を $P(n)$ と定義する。この $P(n)$ を用いた提案手法の概要を以下に示す。

1. 各センサノードはポテンシャルの値からノード n のノード識別子 $P(n)$ を求める
2. 上り方向の通信を行うときに、自身のノード識別子をデータパケットに含めることによって、シンクノードが各センサノードのノード識別子を記憶する
3. ノード n_1, n_2 について、 n_1 と n_2 が近いほど $P(n_1)$ と $P(n_2)$ から定まる関数 $D(n_1, n_2)$ の値が小さくなるように D を定める
4. この D を用いて次ホップの選択を行うことで、ルーティングすることが可能となり、各センサノードは宛先ノードと隣接ノードの D の値が小さくなるような隣接ノード

を次ホップとして選ぶことで最終的に宛先ノードにデータパケットを届けることができる

4.3 ポテンシャルを用いたノード識別子の割り当て手法の提案

図2に示したポテンシャル場では、同じポテンシャルの値をもつノードが複数存在する可能性があり、その中の一つである宛先ノードにデータパケットを確実に届けることはできない。そこで、複数のシンクノードがそれぞれ異なるポテンシャル場を構築して、各ノードはそれぞれのポテンシャルの組み合わせをノード識別子として用いる。個々のポテンシャル場におけるポテンシャルの値はシンクノードまでのホップ数が小さいノードほど小さくなり、ホップ数が大きいノードほど大きくなるため、ポテンシャルの値は基本的にはシンクノードからの仮想的な距離とみなすことができる。よってポテンシャルの組み合わせは仮想的な座標と考えることができ、この座標をノード識別子として用いてルーティングを行う。 i 個のポテンシャル場が構築されたとき、ノード n におけるノード識別子 $P(n)$ は i 個のポテンシャルの値の組み合わせとなるため、式(6)で表すことができる。式(6)の右辺は i 個のポテンシャル場それぞれのポテンシャル値の組み合わせである。

$$P(n) = \{p_0, p_1, \dots, p_{i-1}\}. \quad (6)$$

すべてのノードはノード識別子 $P(n)$ をもち、この値が宛先ノードの $P(n)$ に近づくように次ホップを決定する。シンクノードが k 個配置されたネットワークを考え、さらにポテンシャル場は k 個構築されることとする。このとき、相異なるポテンシャル場では相異なる単一のシンクノードのポテンシャルだけが ϕ_{min} をとり、それ以外のシンクノードのポテンシャルは ϕ_{max} となるようにする。こうすることで、 k 個のポテンシャル場はそれぞれ k 個のシンクノードからの仮想的な距離を表すことになるため、平面を想定するのであれば、図4に示すように少なくとも3点からの仮想的な距離を用いることで一意性が保証されることになる。本報告では、平面上のトポロジーを対象としているため、使用するポテンシャル場は3つとする。

本報告では文献[3]と同様に拡散方程式を用いて、3つのポテンシャル場を構築する。構築したポテンシャル場をそれぞれポテンシャル場 F_0, F_1, F_2 とする。ポテンシャル場の構築には式(7)を用いており、 $\phi(n, t, i)$ は時刻 t における、ノード n のポテンシャル場 $F_i (i \in \{0, 1, 2\})$ のポテンシャル値である。 $D(n)$ を文献[3]と同じ $\frac{\epsilon}{|Z(n)|}$ とすると、式(7)の右辺は隣接ノードのポテンシャルの平均値と自身の直前のポテンシャル値の重み付き平均と考えることができる。

$$\phi(n, t+1, i) = \phi(n, t, i) + D(n) \sum_{k \in Z(n)} \{\phi(k, t, i) - \phi(n, t, i)\}. \quad (7)$$

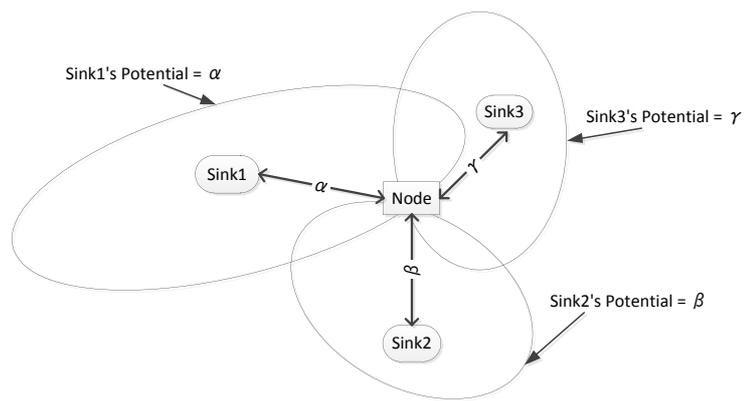


図 4: ポテンシャルの組み合わせによるノード識別

提案方式においては、式 (3) に示した境界条件は使用しない。これは、式 (3) を用いる場合にネットワークの境界に存在する複数のセンサノードのポテンシャルの値が ϕ_{max} となり、それらのノードのうち 1 つが宛先となったときにその宛先ノードに対して確実にデータパケットを届けることができないからである。そこで、式 (3) の代わりとして、ネットワーク全体のポテンシャルの値がシンクノードのポテンシャルの値に収束することを防ぐために式 (8) の境界条件を用いる。式 (8) で、 S はシンクノードの集合である。 $type(s)$ はシンクノード s が構築するように割り当てられたポテンシャル場の種類であり、ポテンシャル場 F_0 、 F_1 、 F_2 のいずれかを表す。このシンクノードへのポテンシャル場の割り当ては手動で行う必要がある。

$$\forall s \in S, \phi(s, t, i) = \begin{cases} \phi_{min} & \text{if } i = type(s), \\ \phi_{max} & \text{else.} \end{cases} \quad (8)$$

4.4 ノード識別子を用いたルーティング手法の提案

シンクノードからデータパケットをセンサノードへ送るためには、シンクノードは各センサノードのノード識別子を知る必要がある。本報告では、データ収集を行うアプリケーションを想定しているため、各センサノードは定期的にセンシングしたデータパケットをシンクノードに届けている。このデータパケットのヘッダにセンサノードが自身のノード識別子を含めてシンクノードに送ることで、シンクノードは各センサノードのノード識別子を知ることができる。すなわち、センサノードがシンクノードに送る上り方向の通信とシンクノードがセンサノードに送る下り方向の通信を同時に行うことで、シンクノードはセンサノードのノード識別子を収集することができ、そのセンサノードへ到達可能な経路が存在することを知ることができる。シンクノード間は有線で接続されていることを前提としているため、シンクノード間でセンサノードのノード識別子を共有することができる。また、シンクノードからセンサノードへとデータパケットを送るとき、シンクノードは有線を用いて宛先ノードに最も近いシンクノードに送ることができるものとし、そのシンクノードから下り方向の通信を開始する。

前述のとおり、ポテンシャルはシンクノードまでのホップ数が小さいノードほど低い値をとり、ホップ数が大きいノードほど大きな値をとるため、ポテンシャルの値は各シンクノードからセンサノードまでの仮想的な距離と考えることができる。このことから、3つのポテンシャル場のポテンシャル値の組を使うことによって、3つのシンクノードからの距離を表すことが可能になるため、ポテンシャルの組を仮想的な座標として扱うことができる。この座標を用いてノード間の仮想的な距離 (ポテンシャル距離) を定義してルーティングのメトリックとすることで、各ノードは宛先ノードに近づくようなノードを次ホップとして選ぶ。

ノード a とノード b のポテンシャルの組をそれぞれ (a_1, a_2, a_3) 、 (b_1, b_2, b_3) とし、ノード a とノード b のポテンシャル距離 $Dist_p(a, b)$ を式 (9) のように定義する。

$$Dist_p(a, b) = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2}. \quad (9)$$

シンクノードがデータパケットを生成した場合、データパケットのヘッダに宛先ノードのノード識別子を含める。センサノードはデータパケットを受信したときに、この値に基づき宛先ノードと各隣接ノードとのポテンシャル距離を求める。各ノードは宛先ノードへのポテンシャル距離が最も小さくなるノードを次ホップとして決定する。送信ノードよりも宛先ノードとのポテンシャル距離の値が小さくなる隣接ノードがないときは次ホップを選ぶことができず、データパケットの転送を終了する。

4.5 シミュレーションによる評価

ネットワークモデルとして 600m 四方の領域にセンサノードをそれぞれ 50 個、100 個、150 個、200 個、250 個配置し、シンクノード 3 個をネットワークの端に配置した。完全にランダムなトポロジでは、ノードの分布に偏りが生じ、接続性が保証されないため、以下に示す方法で準ランダムなトポロジを生成し、シミュレーションに使用した。

- 600m*600m の観測領域を 120m*120m のタイルで 25 個のタイルに分割する
- それぞれのタイルに $2 \cdot x$ 個のセンサノードをランダムに配置すると、観測領域全体で $50 \cdot x$ 個のセンサノードを配置できる

このようにタイルの制約をいれた状態でランダムトポロジを生成すると、ノードの分布の大きな偏りをなくすことができ、 $x = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ と値を決めることによってそれぞれのランダムトポロジを生成することができる。

シミュレーションは、Omnet++[17] シミュレータを使用し、提案手法を記述したシミュレーションプログラムによって行った。シミュレーションの設定値は表 1 の通りである。シミュレーション時間は、シンクノードがネットワーク内に存在するすべてのセンサノードに対して、それぞれのセンサノードを宛先ノードとしたデータパケットを 1 個ずつ発生させ、すべてのデータパケットが宛先ノードに到達、あるいは破棄されるまでの時間とする。MAC 層プロトコルには省電力性に優れた Intermittent Receiver-Driven Transmission (IRDT) 方式を使用している [18]。この方式では、各ノードがスリープ状態と起動状態を周期的に遷移し、起動状態のときに ID パケットを隣接ノードに送信することで、自身が通信可能な状態であることを知らせる。データパケットをもつノードは起動状態を保ち、隣接ノードから ID

パケットを受信したときに通信を開始する。IRDT は受信端末駆動型 MAC 層プロトコルであり、送信ノードは ID パケット受信ごとにその ID パケット送信者を次ホップとして選ぶかどうか選択できるという特徴をもつ。性能評価に際しては、パケット損失率を 0、0.1、0.2、0.3、0.4 と変化させた場合と、シンクノードからセンサノードへの下り方向の通信のデータ発生レートを $\frac{1}{300}$ 、 $\frac{2}{300}$ 、 $\frac{3}{300}$ 、 $\frac{4}{300}$ 、 $\frac{5}{300}$ と変化させた場合についてのシミュレーションを行い、それぞれの場合についてデータパケットの到達率、データパケットの到達遅延時間、シンクノードまでの最小ホップ数と受信時ホップ数の比率を以下のように定義し、提案手法についての評価結果をそれぞれ図 5 に示す。パケット損失率はデータパケットにおける値であり、制御メッセージはデータパケットに比べてサイズが小さいため、制御メッセージの損失率はパケット損失率の 10 分の 1 としている。それぞれの結果は 15 回のシミュレーションの平均であり、信頼区間は 95% である。

- データパケットの到達率

$$\frac{\text{各センサノードが受信した自分宛のデータパケット数の合計}}{\text{シンクノードが発生させたデータパケット数}}$$

- データパケットの到達遅延時間

(各センサノードが自分宛のデータパケットを受信した時間) – (シンクノードでデータパケットが発生した時間) の平均値

- シンクノードまでの最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

$$\frac{\text{(各センサノードが自分宛のデータパケットを受信したときのデータパケットのホップ数) の平均値}}{\text{(各センサノードからシンクノードまで最短経路で到達する場合のホップ数) の平均値}}$$

パケット損失率が上昇するとデータパケット到達率が減少し、遅延時間が上昇しているが、データパケットが到達するまでの平均最小ホップ数と受信時ホップ数の比率は大きな変化がない。パケット損失率が上昇し、パケット損失でパケットを破棄しても MAC 層プロトコルで再送を行うため、宛先ノードまでの経路が変わらず、平均最小ホップ数と受信時ホップ数の比率が変化しない。

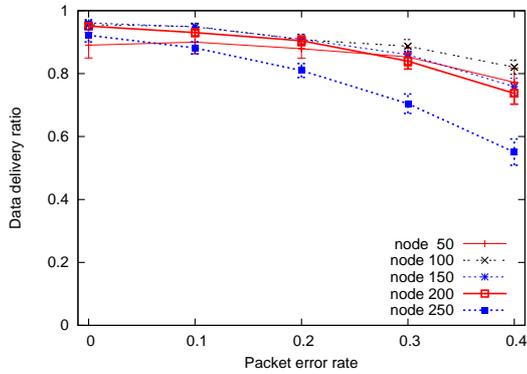
下り方向の通信のデータ発生率を変化させてもデータパケット到達率、遅延時間、データパケットが到達するまでの平均最小ホップ数と受信時ホップ数の比率は大きな変化がない。下り方向のデータ発生率を上昇してもシンクノードへの負荷が集中することはなく、結果として下り方向のデータ発生率を上昇しても性能はほぼ変わらない。

ノード密度が上昇すると、データ到達率はパケット損失率が 0.2 以下のときはセンサノード数 150 個で最も高く 95% であり、パケット損失率が 0.3 以上のときはセンサノード数 100 個で最も高く、それぞれ 88% と 82% となっている。センサノード数が 50 個のときには、ノード密度が小さいためにネットワーク全体のリンク数が少なく、宛先ノードにデータパケット

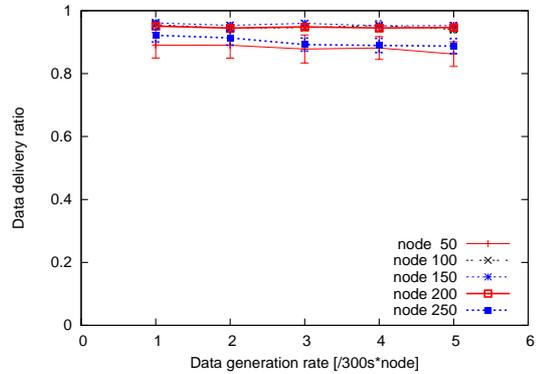
を届けるためには迂回が必要となることが多い。迂回路に存在するセンサノードのノード識別子が宛先ノードのノード識別子に近づく保証はなく、データパケット到達率が小さい原因となっている。一方でノード密度が大きくなるにつれて、ネットワーク全体のリンク数が増え、迂回をする必要性が小さくなるため、データパケット到達率が上昇している。しかし、センサノード数が 200 個、250 個の場合は隣接ノード数が増えるため、制御メッセージ数が増え、パケットが衝突しやすくなる。そのため、データパケットを転送している間に隣接ノードのパケットと衝突することによってデータパケットの送受信が失敗し、データパケット到達率が小さい原因となっている。ノード密度が増加するにつれて、データパケットの到達遅延時間は上昇傾向にある。これは、MAC 層の影響であり、パケットの衝突を検出したときに各センサノードはバックオフアルゴリズムで再送を試みる。ノード密度が大きい場合、パケットが衝突しやすいため、このバックオフの時間がデータパケット到達遅延時間に影響を与えている。

表 1: データの発生モデル

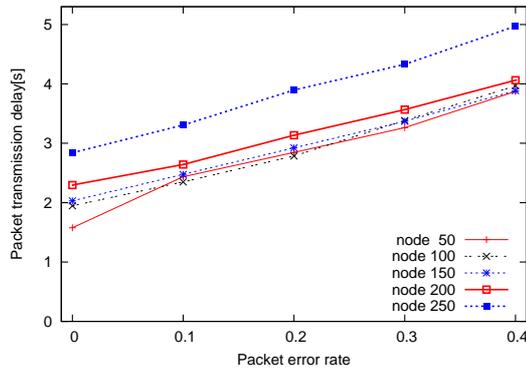
パラメータ名	値
間欠周期	1 秒
データパケット保持期限	5 秒
通信可能範囲	100 m
最大中継回数	15
データパケットサイズ	128 byte
無線速度	100 kbps
ポテンシャル更新時の係数 ϵ	0.8
ポテンシャル値の最小値	-90
ポテンシャル値の最大値	0
各ノードのポテンシャル更新周期	50 秒



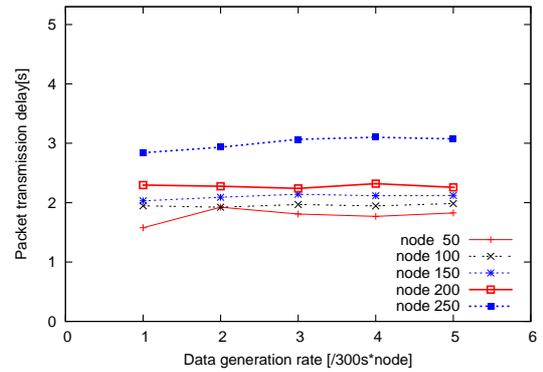
(a) パケット損失率とパケット到達率



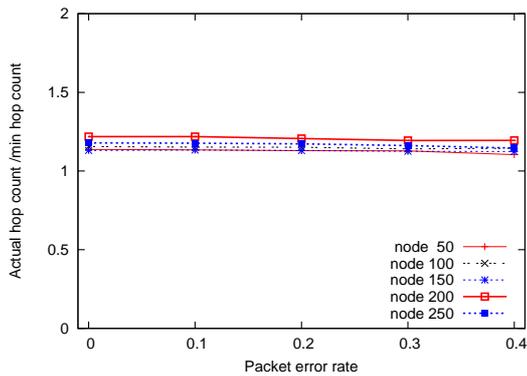
(b) 下り方向のデータ発生率とパケット到達率



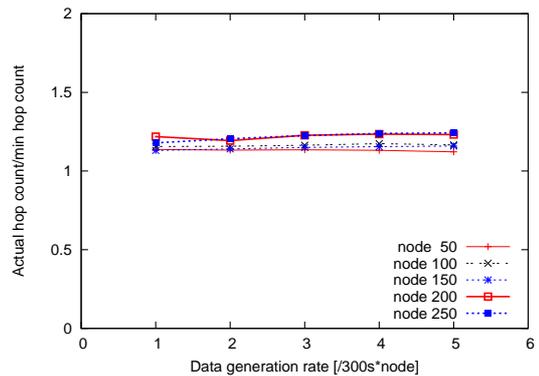
(c) パケット損失率とパケット到達遅延時間



(d) 下り方向のデータ発生率とパケット到達遅延時間

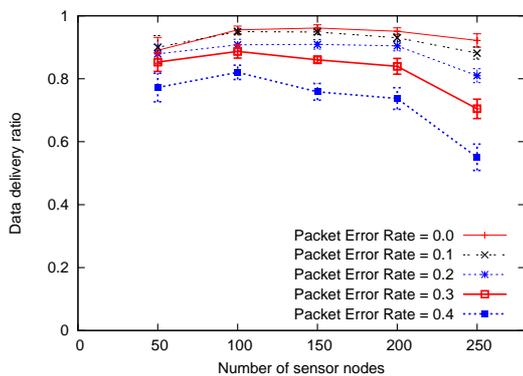


(e) パケット損失率と最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

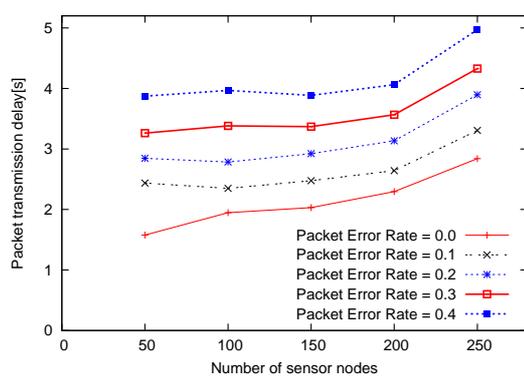


(f) 下り方向のデータ発生率と最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

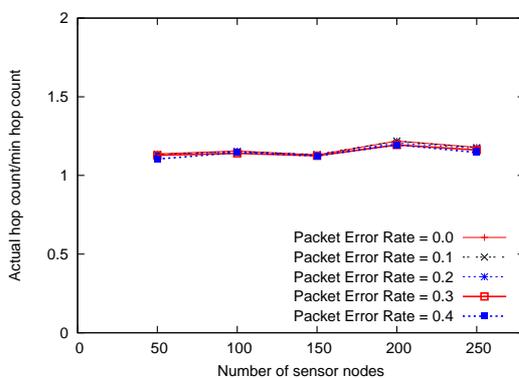
図 5: 基本性能評価



(g) ノード密度とパケット到達率



(h) ノード密度とパケット到達遅延時間



(i) ノード密度と最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

図 5: 基本性能評価

5 提案手法における問題点とその解決方法

提案手法において、データパケットが破棄される主な原因は TTL 超過と、タイムアウトである。TTL はデータパケットの最大転送回数であり、各センサノードは中継するたびにこの値をデクリメントし、TTL が 0 になったときにデータパケットを破棄する。一方、データパケットを保持しているノードが一定時間 ($T_{timeout}$) 経過してもデータパケットを次ホップに転送することができない場合にタイムアウトとなり、このときデータパケットを破棄する。

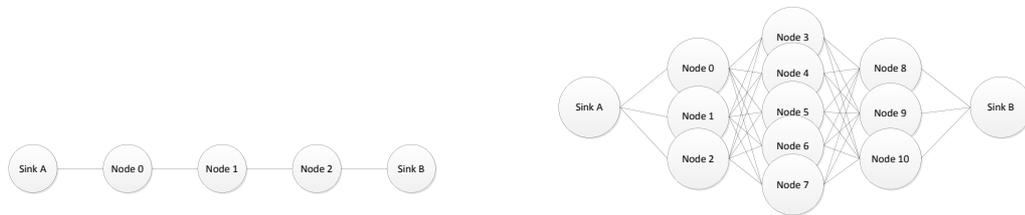
5.1 TTL 超過によるパケット破棄の問題とその解決方法

TTL 超過がパケット破棄の原因となるのは、ネットワーク内部のノード密度が大きい領域に存在するノードや、ネットワークの端のノード密度が小さい領域に存在するノードを宛先ノードとしたときである。5.1.1 節では、この問題が生じる原因となるポテンシャル場の形について説明する。

5.1.1 拡散方程式を用いて構築したポテンシャル場の形

あるセンサノード n からシンクノード s までの最小ホップ数が h であるとき、ノード n に隣接するノードからシンクノード s までの最小ホップ数は $h-1$ 、 h 、 $h+1$ のいずれかとなり、以降はそれぞれのホップ数のノードを、ノード n にとっての前向きノード、横向きノード、後向きノードと呼ぶことにする。ポテンシャルの値はシンクノードに近いほど小さい値をとり、シンクノードから遠いほど大きな値をとるため、あるノード n の前向きノードは、ノード n よりも小さなポテンシャルの値をもち、ノード n の後向きノードは、ノード n よりも大きなポテンシャルの値をもつ。式 (7) より各センサノードは隣接ノードのポテンシャル値の平均値を用いて自身のポテンシャル値を決定するため、ポテンシャルの値は前向きノードの数、後向きノードの数に依存する。前向きノードの数が多いノードでは、ポテンシャルの値はより小さく、後向きノードの数が多いノードでは、ポテンシャルの値はより大きくなる。あるノード n の横向きノードはノード n とほぼ同じポテンシャルの値をもつため、横向きノードの数が多いノードでは前向きノードの数と後向きノードの数の影響が小さくなり、ポテンシャルの値は横向きノードのポテンシャルの値に漸近する。前向きノードの数と後向きノードの数と同じとなるトポロジーの例を図 6(a) に、前向きノードと後向きノードの数が異なるトポロジーの例を図 6(b) に示す。シンク A はポテンシャル場 F_0 を構築し、シンク B はポテンシャル場 F_1 を構築するものとする。このときそれぞれのトポロジーにおいて、シンク A からのホップ数とポテンシャル場 F_0 によって構築されたポテンシャルの値の

関係を図7に示す。式(8)に示したように、あるポテンシャル場に注目すると一つのシンクノードのポテンシャル値が ϕ_{\min} であり、その他のシンクノードのポテンシャルが ϕ_{\max} である。このポテンシャル場においては、ポテンシャルの値が ϕ_{\min} となるシンクノードの周囲には前向きノードの数がより少なくなる。また、ポテンシャルの値が ϕ_{\max} となるシンクノードの周囲にはネットワークの端となるため後向きノードがより少なくなる。このことから、ネットワークの内側を経由する経路では図7に示した曲線型のポテンシャル場が構築される傾向にある。一方で、ネットワークの端はノード密度が小さく、前向きノードの数も後向きノードの数もほぼ同じになるような経路が存在し、そのような経路では図7に示した直線型のポテンシャル場が構築される傾向にある。このポテンシャル場の形が原因となり、データパケットが破棄される問題がある。



(a) 前向きノードの数と後向きノードの数が同じであるトポロジーの例 (b) 前向きノードと後向きノードの数が異なるトポロジーの例

図 6: ポテンシャル場に特徴的な形が表れるトポロジーの例

5.1.2 宛先ノードを次ホップとして選択しない問題とその解決方法

ネットワークの内側に存在するノードのポテンシャルの形は図7の平坦な部分であり、このようなノードを宛先ノードとした場合、付近に宛先ノードのポテンシャルの値と同じポテンシャルの値をもつノードが複数存在することがわかる。シンクノードのテーブルに含まれている各センサノードのポテンシャルの値は、各センサノードが生成したデータパケットがシンクノードに到達したときに更新される。また、各センサノードは T_{update} の周期で隣接ノードのポテンシャルの情報を収集し、自身のポテンシャルの値を更新する。センサネットワークの多くでは、比較的低頻度な観測が前提となるため、シンクノードのテーブルに含まれている各センサノードのポテンシャル値の更新周期は、センサノードのポテンシャル値の更新周期 T_{update} よりも大きくなる。この更新周期の違いから、シンクノードでデータパケットに含めた宛先ノードのポテンシャル値は、宛先ノードの最新のポテンシャル値とは異

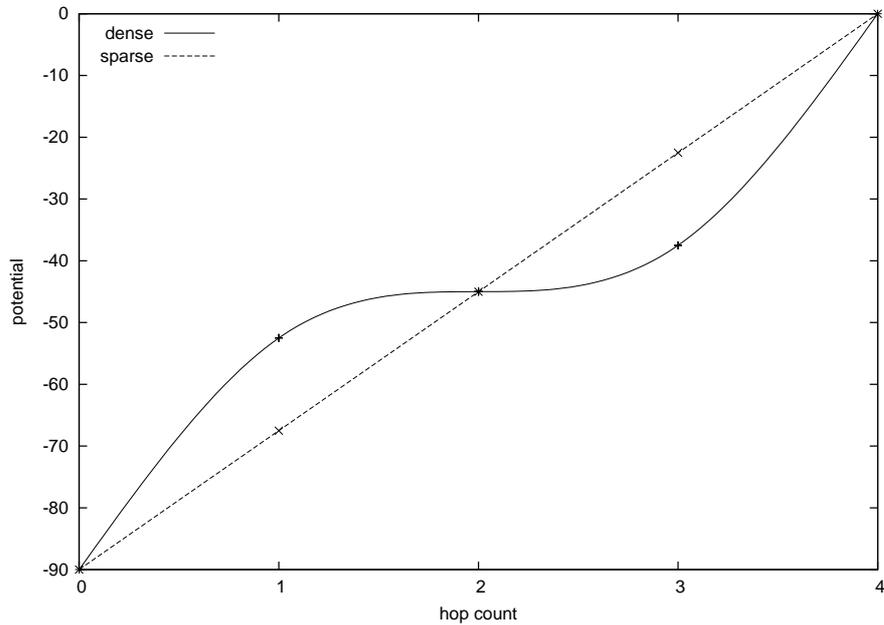


図 7: シンク A からのホップ数とポテンシャル値の関係

なる場合がある。さらに、各センサノードが隣接ノードのポテンシャルの情報を受信することができなかった場合、その隣接ノードは故障または通信範囲外に移動したと判断して、その隣接ノードに関する情報はテーブルから削除している。このとき自身のポテンシャルの値は大きく変動してしまうことになる。そのため、宛先ノードのポテンシャルとデータパケットに含まれたポテンシャルとの距離が 0 にならず、宛先ノードの付近までデータパケットが届いているにもかかわらず宛先ノードを次ホップに選択しないという問題がある。

宛先ノードを次ホップとして選択しない問題が生じる例を図 8 に示す。図中の円はノードを表し、直線はリンクを表す。ポテンシャル値の組み合わせは順にポテンシャル場 F_0 、 F_1 、 F_2 のポテンシャル値を表している。また、 $Dist$ は、データパケットに含まれたポテンシャルと各ノードのポテンシャルの距離を表しており、矢印はデータパケットが転送される様子を表している。

上記の問題を解決するため、隣接ノードに宛先ノードが存在するときは、宛先ノードの ID を使って直接宛先ノードに送るという方法を適用する。ID を使うことによって、図 8 に示したような宛先ノードを次ホップとして選択しない場合の TTL 超過によるデータパケットの破棄を減らすことができる。

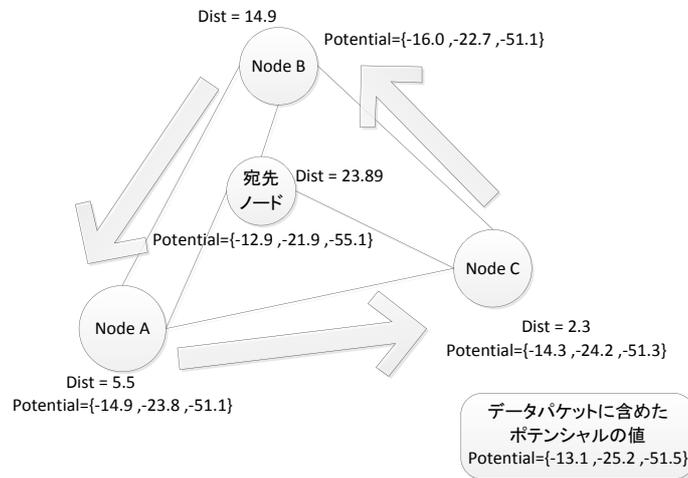


図 8: 宛先ノードを次ホップとして選択しない問題の例

5.1.3 宛先ノードの隣接ノードを次ホップとして選択しない問題とその解決方法

ネットワークの末端のようなノード密度が小さい領域に存在するノードでは、前向きノードの数も後ろ向きノードの数も少ないため、ポテンシャルの値は図 7 に示した直線型のポテンシャル場となり、隣接ノードであってもポテンシャルの値は大きく異なる。このようなポテンシャル場の形の違いから、宛先ノードにデータパケットを届けるために経路しなければならぬ隣接ノードのポテンシャルの値が、宛先ノードのポテンシャルの値と大きく異なる場合がある。一方で、ネットワークの内側に存在するノードとネットワークの端に存在するノードでは同じポテンシャルの値となることがあり、ネットワークの内側に存在するノードのほうが宛先ノードの隣接ノードよりもポテンシャルの値が近い場合がある。このことからシンクノードからのデータパケットが一切届かないノードが存在する。宛先ノードがノード密度が小さい領域に存在する場合に問題が生じる例を図 9 に示す。図 9 の例では、ネットワークの端に存在する宛先ノードにデータパケットを届けるためにはノード D またはノード F を経由しなければならない。しかし、ノード D、宛先ノード、ノード F は図 6(a) と同じトポロジを構成しており、ポテンシャル場 F_1 、 F_2 でのポテンシャル値はそれぞれ大きく異なる。一方でネットワークの内側に存在するノード A、ノード B、ノード C のポテンシャル場 F_1 、 F_2 でのポテンシャル値はノード D、ノード F のポテンシャル値よりも宛先ノードのポテンシャル値に近い。ポテンシャル距離を計算するとポテンシャル場 F_0 のポテンシャル値の差よりも、ポテンシャル場 F_1 、 F_2 のポテンシャル値の差の影響のほうが大きく、ノード

ド C はノード D を次ホップとして選択しない。

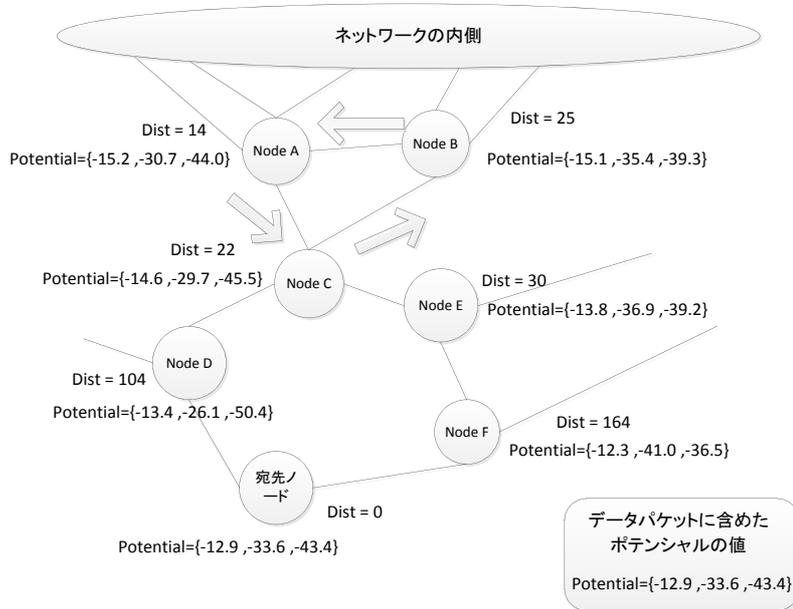


図 9: 宛先ノードがノード密度の小さい領域に存在する場合の問題

拡散方程式を用いたポテンシャル場の構築方法では、図 7 に示したようにノード密度が大きい領域ではポテンシャルの形は平坦となり、ノード密度の小さい領域ではポテンシャルの形は急勾配となる。このポテンシャル場の形の違いから、ノード密度が大きい領域に存在するノードからノード密度が小さい領域に存在するノードにデータパケットを転送することができない。このようなポテンシャル場となる原因は、各センサノードのポテンシャル値が隣接ノードのポテンシャルの値の平均値に収束することである。ノード密度が小さい領域に存在するノードは横向きノードの数が少ないため、その値はほぼ前向きノードと後向きノードのポテンシャルの値の中間の値となる。一方で、ノード密度が大きい領域に存在するノードは隣接ノードの前向きノードが多く存在すれば前向きノードのポテンシャルの値に、後向きノードが多く存在すれば後向きノードのポテンシャルの値に、横向きノードが多く存在すれば横向きノードのポテンシャルの値に漸近する。

データパケットを破棄する原因はノード密度によってポテンシャル場の形が異なることであるため、ノード密度が大きい領域のポテンシャル場をノード密度が小さい領域のポテンシャル場と同じ形、すなわちシンクノードを最小値とした円錐型にすることで問題を解決する。これは自身のポテンシャルの値を前向きノードのポテンシャルの値と後向きノードのポテンシャルの値の中間の値となるように決めればよい。前向きノードは自身よりもポテン

シャルの値が小さいため、前向きノードの数が多い場合は自身のポテンシャルの値もより小さく、後向きノードは自身よりもポテンシャルの値が大きいため、後向きノードの数が多い場合は自身のポテンシャルの値もより大きくなる。このことから、自身のポテンシャルの値を決定するときに、前向きノードの数と後向きノードの数が同等となるように重み付けをすることによって、自身のポテンシャルの値を前向きノードと後向きノードのポテンシャル値の中間の値にすることができる。あるノード n の横向きノードのポテンシャルの値はノード n のポテンシャルの値とほぼ同じ値となるため、横向きノードの影響は考慮しない。

ノード n について、ポテンシャル場 i における前向きノードの集合を $front(n, i)$ 、後向きノードの集合を $back(n, i)$ 、横向きノードの集合を $side(n, i)$ とする。それぞれの個数を $|front(n, i)|$ 、 $|back(n, i)|$ 、 $|side(n, i)|$ とし、それぞれのポテンシャルの合計を $\sum_{k \in front(n, i)} \phi(k, t, i)$ 、 $\sum_{k \in back(n, i)} \phi(k, t, i)$ 、 $\sum_{k \in side(n, i)} \phi(k, t, i)$ とする。ポテンシャルの更新は次のようになる。

$|front(n, i)| < |back(n, i)|$ の場合

$$\begin{aligned} \phi(n, t+1, i) &= \phi(n, t, i) + \frac{\epsilon}{|back(n, i)| + |back(n, i)| + |side(n, i)|} \cdot \\ &\left(\frac{|back(n, i)|}{|front(n, i)|} \cdot \sum_{k \in front(n, i)} \phi(k, t, i) + \sum_{k \in back(n, i)} \phi(k, t, i) + \sum_{k \in side(n, i)} \phi(k, t, i) - \phi(n, t, i) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$|front(n, i)| > |back(n, i)|$ の場合

$$\begin{aligned} \phi(n, t+1, i) &= \phi(n, t, i) + \frac{\epsilon}{|front(n, i)| + |front(n, i)| + |side(n, i)|} \cdot \\ &\left(\frac{|front(n, i)|}{|back(n, i)|} \cdot \sum_{k \in back(n, i)} \phi(k, t, i) + \sum_{k \in front(n, i)} \phi(k, t, i) + \sum_{k \in side(n, i)} \phi(k, t, i) - \phi(n, t, i) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$|front(n, i)| = |back(n, i)|$ の場合

$$\begin{aligned} \phi(n, t+1, i) &= \phi(n, t, i) + \frac{\epsilon}{|front(n, i)| + |back(n, i)| + |side(n, i)|} \cdot \\ &\left(\sum_{k \in front(n, i)} \phi(k, t, i) + \sum_{k \in back(n, i)} \phi(k, t, i) + \sum_{k \in side(n, i)} \phi(k, t, i) - \phi(n, t, i) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、あるノード n の隣接ノードの中にポテンシャルの値が ϕ_{\max} となるノードが存在する場合、そのノードはホップ数にかかわらず後向きノードとして数えている。これによ

り、複数のノードのポテンシャル値が境界条件である ϕ_{\max} に近い値になり、それらのノードのうち1つが宛先となったときにその宛先ノードに対して確実にデータパケットを届けることができなくなることを防いでいる。また、隣接ノードに後向きノードが存在しないノードは式 (11) からポテンシャルの値を計算することができないため、仮想的な後向きノードが一つ存在するものとし、その後向きノードのポテンシャルの値を ϕ_{\max} として自身のポテンシャルの値を計算する。

このようにしてポテンシャル場を構築すると図 6(a) や図 6(b) のような単純なトポロジーではポテンシャル場の形は円錐形になる。このようにして構築したポテンシャル場は、ノード密度の影響を受けず、ネットワークの内側から外側でポテンシャルの値が大きく異なるということがなくなる。しかし、このポテンシャル場を構築するためには各隣接ノードから各シンクノードまでの最小ホップ数を知る必要があり、各ノードはポテンシャル値に加えて最小ホップ数の情報を定期的に交換する必要がある。

ここではポテンシャル場の構築方法を変更することによって、図 9 のようなデータパケットがループする問題を解決した。しかし、ポテンシャル場の構築方法を変更することによって、上り方向の通信にも影響を与えることになり、既存の上り方向の通信を行うすべてのポテンシャルルーティングに適用できるわけではない。そこで 5.1.4 節では、ポテンシャル場の構築方法を変更せずに、ルーティング方法を切り替えることによってデータパケットがループする問題を解決する。

5.1.4 ルーティング方法を変えることによって解決する方法

図 9 に示したデータパケットのループは、ネットワークの内側で生じている。そこで、このループを検出したときにルーティング方法を切り替えることでループから脱出することを考える。ルーティング方法を切り替えるために、式 (9) で示されるポテンシャル距離とは別のメトリックを使用して次ホップを選択する必要がある。シミュレーションを行った結果として、ネットワークの端に存在するノードを宛先ノードとした場合に TTL 超過によるパケット破棄が生じているという事実が明らかとなった。そのため、この問題を解決する方法として、ループを検出した場合は宛先ノードはネットワークの端にあると仮定し、ルーティングを行う。ポテンシャルはシンクノードからの仮想的な距離と考えることができるので、ネットワークの端に存在するセンサノードは、あるシンクノードから最も離れた領域に存在することになり、そのシンクノードが構築するポテンシャル場でのポテンシャルの値は ϕ_{\max} に近い値となる。ネットワークの端にデータパケットを送るためには、最も離れたシンクノードからより離れるようなノードにデータパケットを転送すればよいことになる。そのため、宛先ノードのポテンシャルの組のうち最も大きな値となるポテンシャル場のみを使って

次ホップを選択することによって、宛先ノードが存在するネットワークの端にデータパケットを届けることができる。以上から、式 (13) のように定義したメトリックを使用することによって、宛先ノードが存在するネットワークの端にデータパケットを届けることができると考えられる。ノード k は宛先ノードであり、ノード n は送信ノードである。

$$Gap(n, k, t) = |\phi(k, t, i) - \phi(a, t, i)|, i = \{i \mid \forall j, \phi(k, t, j) < \phi(k, t, i)\}, a \in Z(n). \quad (13)$$

ループを検出するために、データパケットに含めたシーケンス番号を用いることを考える。各ノードは下り方向のデータパケットを受信した場合、データパケットの送信ノードと、自身がどのノードに転送したかをシーケンス番号とともに記録しておき、同じシーケンス番号をもつデータパケットを同じ送信ノードから受信した場合にループが発生したと判断する。各ノードはこの履歴を最新のものから $n_{history}$ 個記録する。ノード n がループを検出したときのルーティングの流れを以下に示す。

1. ノード n がデータパケットのループを検出
2. ノード n がループが発生したことを示すフラグをデータパケットにセットする
3. データパケットを中継するノードはこのフラグを調べて、フラグがセットされていれば Gap を、そうでなければ $Dist_p$ を使用して次ホップを選択する
4. ノード k にデータパケットが到達したときに、ノード k よりも Gap の値が小さくなる隣接ノードが存在しない場合、データパケットのループが発生したことを示すフラグをクリアする
5. ノード k から再度 $Dist_p$ を用いて次ホップを選択する

データパケットにループが発生したことを示すフラグがセットされている場合、各ノードは宛先ノードのポテンシャルと各隣接ノードのメトリックを式 (13) で求める。各ノードは最もこのメトリックの値が小さくなるノードを次ホップとして決定する。この方法を適用することで、ノード密度が小さいネットワークの端に存在するセンサノードにデータパケットを届けることが可能となり、図 9 に示したような問題が解決できる。

5.2 タイムアウトによるパケット破棄の問題とその解決方法

タイムアウトが原因でパケットを破棄する場合は、シンクノード宛の上り方向の通信とセンサノード宛の下り方向の通信を同時に行なっているためにデータパケットを破棄してい

る。無線センサネットワークを対象とした多くの MAC 層プロトコルでは、消費電力を小さくするために、ノードが起動状態とスリープ状態を周期的に遷移する間欠動作のデータ転送方式が用いられる。このようなデータ転送方式では、送信ノードと受信ノードがお互いに起動状態で、通信可能な状態であることを知らせる機構が必要である。本報告では、前述のとおり MAC 層プロトコルとして IRDT を使用している [18]。この方式では、各ノードがスリープ状態と起動状態を周期的に遷移し、起動状態のときに ID パケットを隣接ノードに送信することで、自身が通信可能な状態であることを知らせる。データパケットをもつノードは起動状態を保ち、隣接ノードから ID パケットを受信したときに通信を開始する。送信ノードが $T_{timeout}$ の間に次ホップとして選択したノードから ID パケットを受信できないとき、データパケットを転送することができずにパケットを破棄している。タイムアウトによるパケット破棄が生じる例を図 10 に示す。ノード x は上り方向の通信のためのデータパケットをもっており、ノード y に転送するためにノード y からの ID パケットを待っている。同時にノード y は下り方向の通信のためのデータパケットをもっており、ノード x に転送するためにノード x からの ID パケットを待っている。このような場合、お互いに ID パケットを送信することはないため、このままタイムアウトでパケットを破棄することになる。

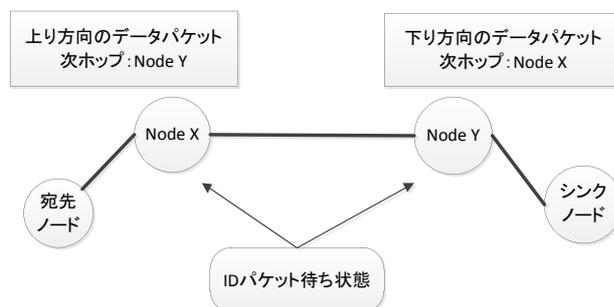


図 10: 上り方向の通信と下り方向の通信の競合

タイムアウトが原因でパケットを破棄する問題は送信相手を一つに限定していることが原因となっている。そのため、迂回路となるノードにもデータパケットを送ることが可能であるようなルーティング方法が必要となる。各ノードはデータパケットを受信したときにルーティングのメトリックを計算し、このメトリックの値が最小となる $n_{candidate}$ 個の隣接ノードを次ホップの候補とする。このとき計算するルーティングのメトリックは、データパケットにループ検出フラグがセットされていない場合は $Dist_p$ であり、ループ検出フラグがセッ

トされている場合は Gap である。この $n_{candidate}$ 個の隣接ノードのいずれかから ID パケットを受信した場合に、式 (14) の確率でデータパケットをそのノードに転送する。

$$p(n, k) = \frac{metric(n)}{metric(n) + metric(k)}, \quad (14)$$

$$metric(n) = \begin{cases} Dist_p(n, d) & \text{if ループ検出フラグがセットされていない} \\ Gap(n, d) & \text{else} \end{cases}, \quad (15)$$

$metric(n)$ はノード n と宛先ノード d に対して求めたメトリックの値である (式 (15))。 n はデータパケットをもっている送信ノードであり、 k は次ホップの候補となる隣接ノードのいずれかである。

式 (14) に示した $p(n, k)$ がとりうる範囲は $(0, 1]$ である。 $metric(k)$ の値が 0 となるとき、すなわちノード k が宛先ノードと同じポテンシャルの値であるときに $p(n, k)$ の値は 1 となり、そのノードから ID パケットを受信したときに必ずデータパケットの転送を試みる。また、 $metric(n) < metric(k)$ のとき $p(n, k) < \frac{1}{2}$ であり、 $metric(n) > metric(k)$ のとき $p(n, k) > \frac{1}{2}$ である。これは、自身のポテンシャル値よりもノード k のポテンシャル値のほうが宛先ノードのポテンシャル値に近いときに次ホップとして選ぶ確率が高くなり、ノード k のポテンシャル値のほうが宛先ノードのポテンシャル値より遠いときに次ホップとして選ぶ確率が低くなることを意味している。このような確率を用いることにより、宛先ノードに近いノードほど次ホップとして選びやすく、遠いノードほど次ホップとして選びにくくなるため、宛先ノードと全く異なる方向へとデータパケットが転送されることを防ぐことができる。この方法を適用した結果、タイムアウトによるパケット破棄が減少した。

5.3 シミュレーションによる評価

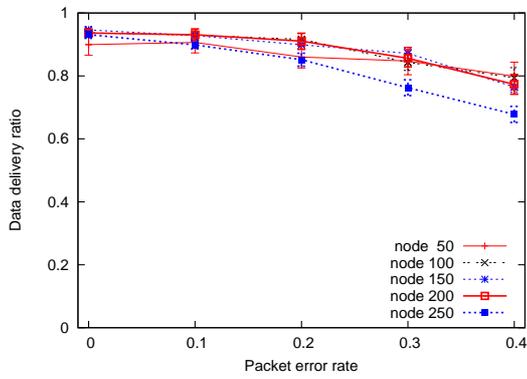
シミュレーションの設定は、4.5 節の設定と同じものを用いている。さらに、5.1.4 節のループ検出に用いる、中継したデータパケットを記録する履歴の数と、5.2 節の次ホップの候補とする隣接ノードの数を表 2 に示す。シミュレーションは 5.1.3 節で示したポテンシャル場の構築方法を変更してルーティングを行う方法、および 5.1.4 節で示したルーティングの切り替えを行うルーティング方法の 2 つの手法に対して行った。パケット損失率を変化させた場合と、シンクノードからセンサノードへの下り方向の通信のデータ発生レートを変化させた場合についてのシミュレーションを行い、データパケットの到達率、データパケットの到達遅延時間、シンクノードまでの最小ホップ数と受信時ホップ数の比率を求めた。それぞれの結果を図 11、図 12 に示す。

4章で示した基本手法では、トポロジーに依存してシンクノードからのデータパッケージが一切届かないノードが存在するという問題がある。図13に示したトポロジーではノード38を宛先ノードとした場合に、4章で示した手法では一切データパッケージが届かない。図13に示したトポロジーにおいて、ノード38宛のデータパッケージを50個送信した場合に、基本手法、ポテンシャル場の構築方法を変更してルーティングを行う方法、ルーティングの切り替えを行うルーティング方法でそれぞれシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、それぞれの手法におけるデータパッケージ到達率を表3に示す。また、ノード38を宛先ノードとした場合に、データパッケージが宛先ノードに届くための経路を図14、図15に示す。

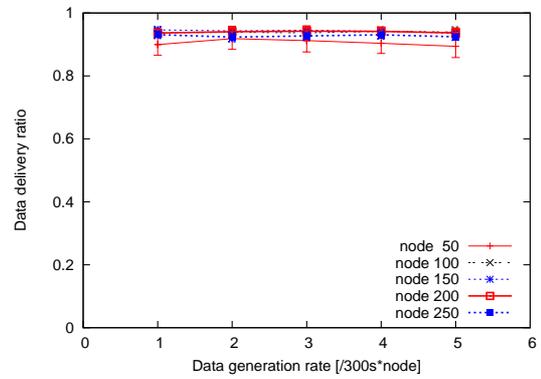
図11、図12より、ポテンシャル場の構築方法を変更する方法、ルーティング方法を切り替える方法、ともにパケット損失率や下り方向の通信のデータ発生率やノード密度がデータパッケージ到達率、データパッケージ到達遅延時間、シンクノードまでの最小ホップ数と受信時ホップ数の比率に与える影響は基本手法と同じである。シンクノードまでの最小ホップ数と受信時ホップ数の比率はいずれの方法においても平均1.5となっている。これは、各センサノードを宛先ノードとしてデータパッケージを送信した場合、シンクノードから宛先ノードに届くまでのホップ数は、最小ホップ数の1.5倍となることを意味している。ポテンシャル場の構築方法を変更する方法では、図15ではシンクノードまで最小ホップ数となるシンクノードからはデータパッケージを届けることができず、他のシンクノードからデータパッケージを届けることができるため、ホップ数は最小ホップ数よりも大きくなる。ルーティングを切り替える方法では、データパッケージのループを検出してからネットワークの端にデータパッケージを転送するため、ホップ数は最小ホップ数よりも大きくなる。この影響からホップ数は最小ホップ数よりも大きくなる。表3から基本手法ではノード38を宛先ノードとした場合には一切データパッケージを届けることができないが、ポテンシャル場の構築方法を変更する方法やルーティングを切り替える方法では届けることが可能となっていることが分かる。

表 2: 各手法に用いるパラメータ

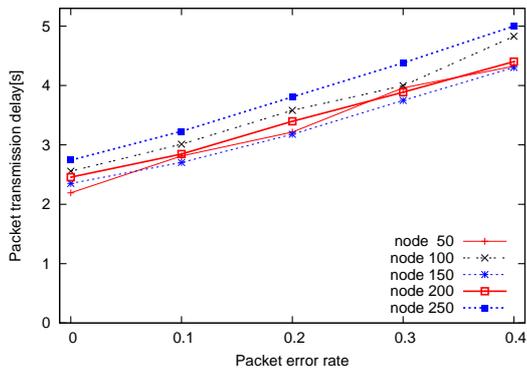
パラメータ名	値
中継したデータパッケージを記録する履歴の数	3
次ホップの候補とする隣接ノードの数	2



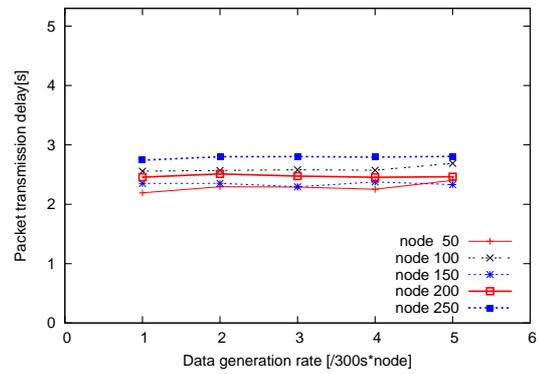
(a) パケット損失率とパケット到達率



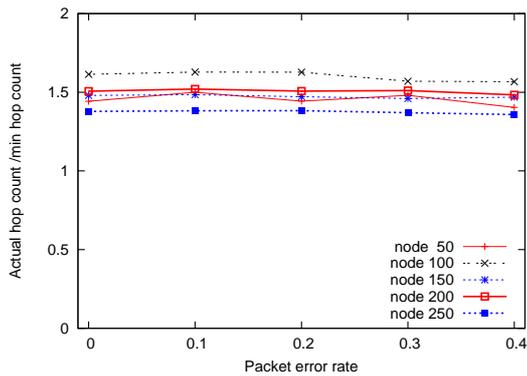
(b) 下り方向のデータ発生率とパケット到達率



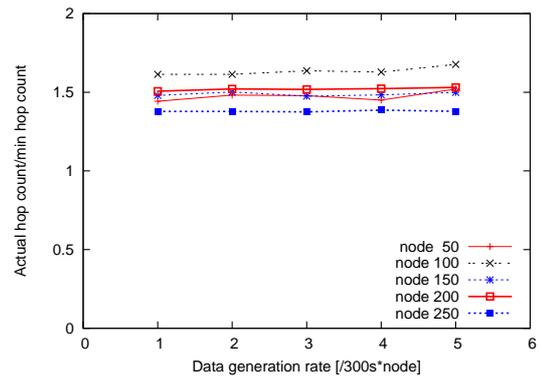
(c) パケット損失率とパケット到達遅延時間



(d) 下り方向のデータ発生率とパケット到達遅延時間

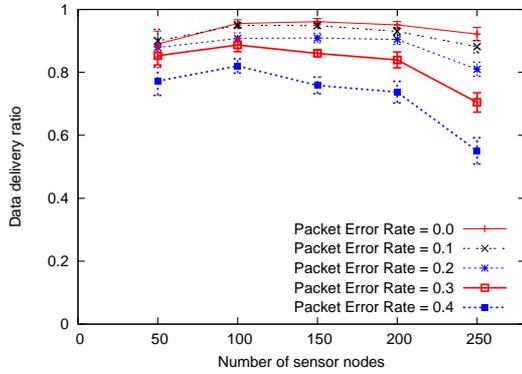


(e) パケット損失率と最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

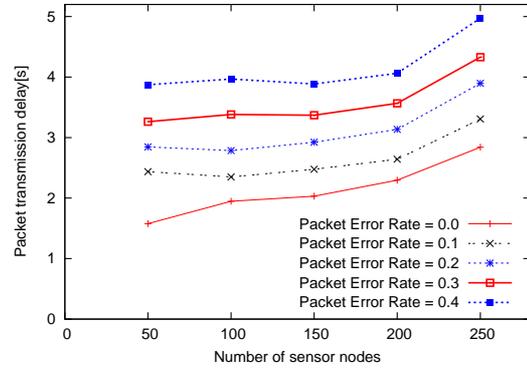


(f) パケット損失率とパケット到達率

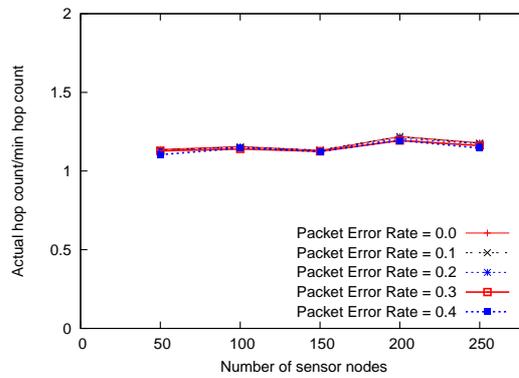
図 11: ポテンシャル場の構築方法を変更した場合の性能評価



(g) ノード密度とパケット到達率



(h) ノード密度とパケット到達遅延時間

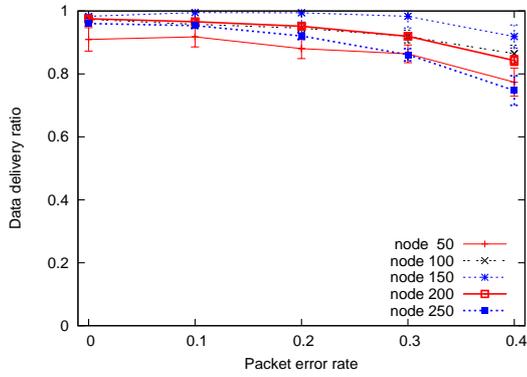


(i) ノード密度と最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

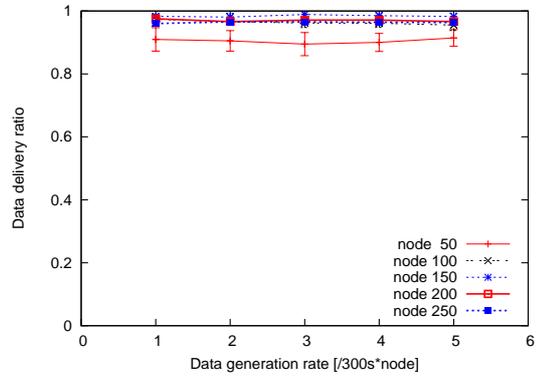
図 11: ポテンシャル場の構築方法を変更した場合の性能評価

表 3: データパケットが届かないノードを宛先とした場合のパケット到達率

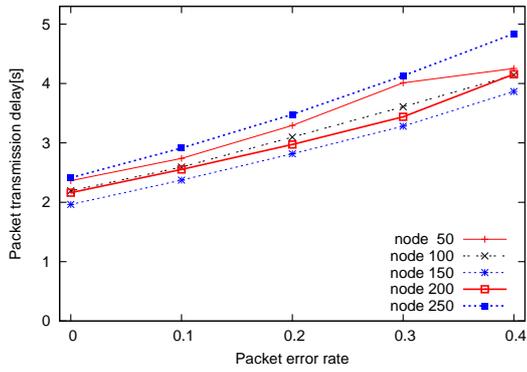
手法	ノード 38 へのデータパケット到達率
基本手法	0%
ポテンシャル場の構築方法を変更する方法	$26.6 \pm 3.2\%$
ルーティングを切り替える方法	$23.1 \pm 1.9\%$



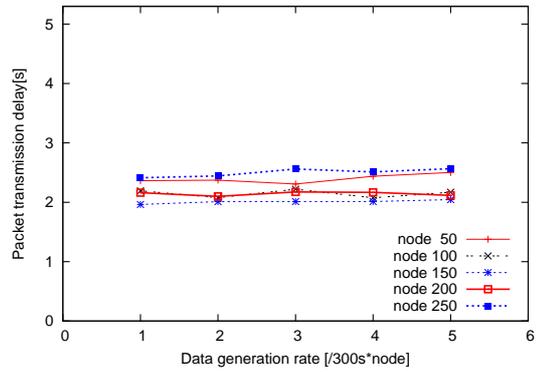
(a) パケット損失率とパケット到達率



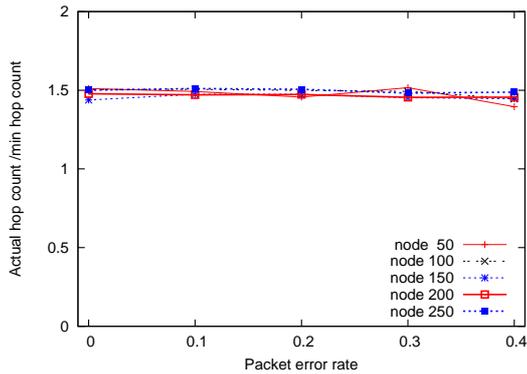
(b) 下り方向のデータ発生率とパケット到達率



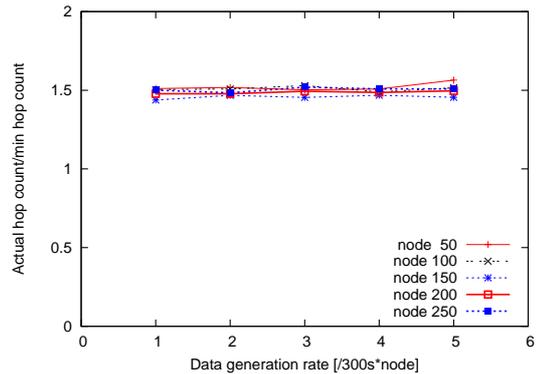
(c) パケット損失率とパケット到達遅延時間



(d) 下り方向のデータ発生率とパケット到達遅延時間

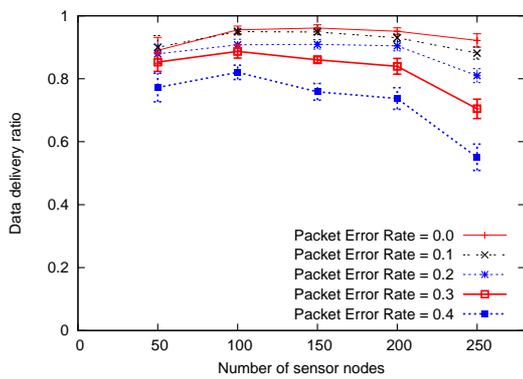


(e) パケット損失率と最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

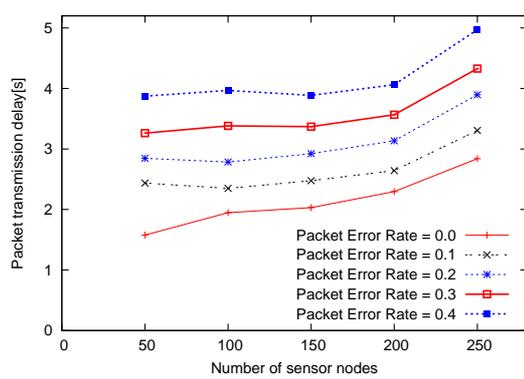


(f) パケット損失率とパケット到達率

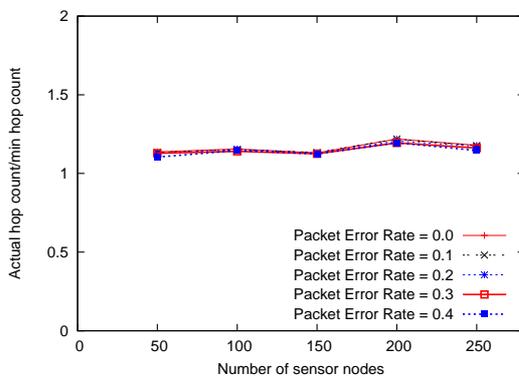
図 12: ルーティング方法を変更した場合の性能評価



(g) ノード密度とパケット到達率



(h) ノード密度とパケット到達遅延時間



(i) ノード密度と最小ホップ数と受信時ホップ数の比率

図 12: ルーティング方法を変更した場合の性能評価

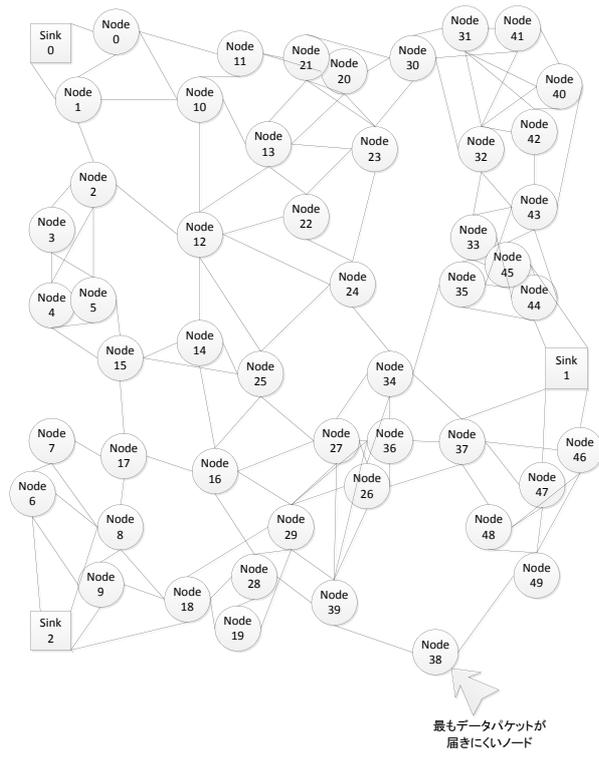


図 13: 基本手法においてデータパケットを届けることができないノードが存在するトポロジーの例

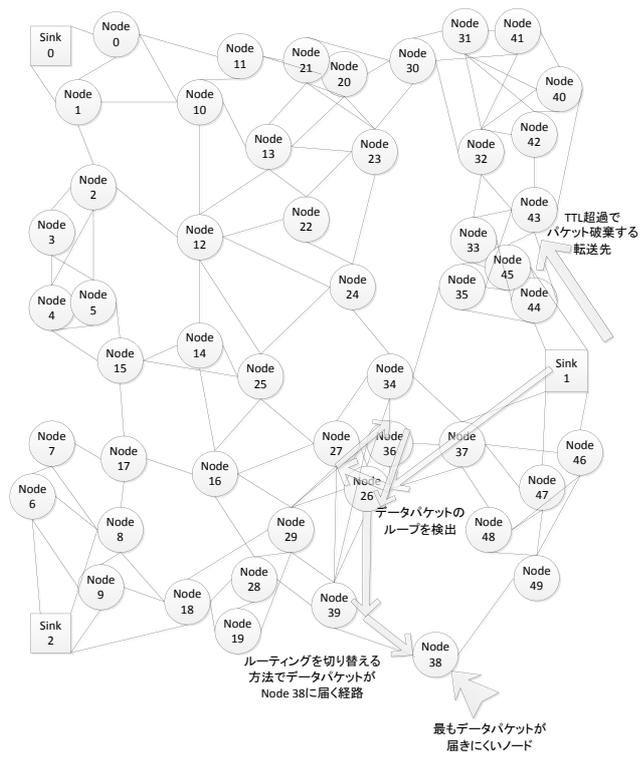


図 14: ルーティングを切り替える方法でノード 38 にデータパケットを送る場合の転送経路

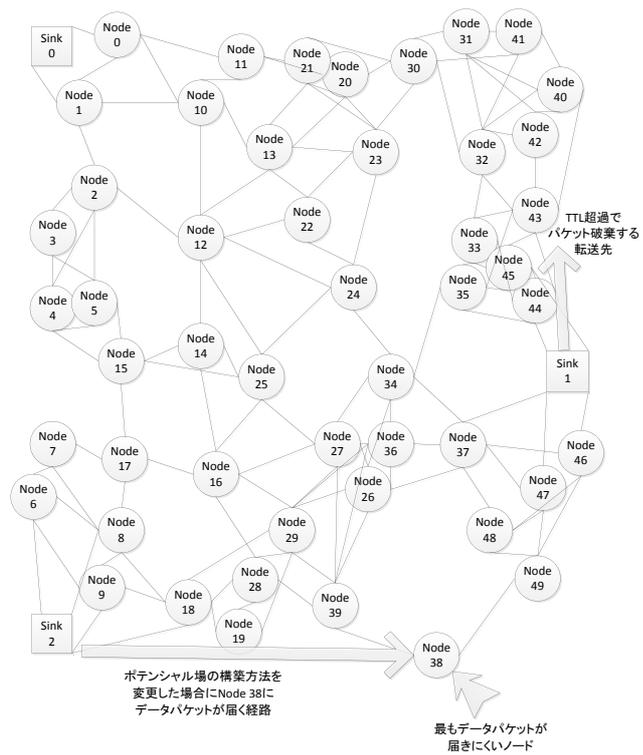


図 15: ポテンシャル場の構築方法を変更する方法でノード 38 にデータパケットを送る場合の転送経路

6 おわりに

本報告では、マルチシンク無線センサネットワークを対象として、ポテンシャルルーティングを用いた下り方向の通信を実現する手法を提案した。シミュレーションによる評価の結果、複数のポテンシャル場を用いることによって、パケット損失率が0.1以下の条件下では、データパケットの到達率が90%以上であることを明らかにした。

今後の課題として、データパケットが届きにくいノードが依然として存在し、このようなノードに対してデータパケットの到達率を向上することが挙げられる。また、負荷が変動する場合や、残余電力の偏りに着目して、ネットワーク寿命を延ばせるような下り方向通信のポテンシャルルーティングについて検討する。

謝辞

本報告を終えるにあたり、御指導、御教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深く感謝いたします。ならびに、本報告の作成に終始御指導頂きました大阪府立大学総合リハビリテーション学部の菅野正嗣教授に深く感謝いたします。また、平素から適切なお助言をいただいた大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀教授、ならびに荒川伸一准教授、大阪大学大学院経済学研究科の山下裕一助教に厚く御礼申し上げます。最後に、日頃から本報告の作成にあたり様々な質問に答えていただきました村田研究室の小南大智氏、Chuluunsuren Damdinsuren 氏、速水直氏をはじめとする村田研究室の皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] K. Akkaya and M. Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, pp. 325–349, Sept. 2005.
- [2] H. Karl and A. Willing, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, first ed., June 2005.
- [3] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, “Controlled potential-based routing for large-scale wireless sensor networks,” in *Proceedings of Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 187–196, Jan. 2011.
- [4] C. Wu, R. Yuan, and H. Zhou, “A novel load balanced and lifetime maximization routing protocol in wireless sensor networks,” in *Proceeding of IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 113–117, May 2008.
- [5] H. Liu, Z.-L. Zhang, J. Srivastava, V. Firoiu, and B. DeCleene, “PWave: flexible potential-based routing framework for wireless sensor networks,” in *Proceeding of IFIP/TC6 Networking Conference*, pp. 14–18, May 2007.
- [6] L. Mottola and G. P. Picco, “MUSTER: adaptive energy-aware multisink routing in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, pp. 1694–1709, Dec. 2011.
- [7] C. Li, H. Zhang, B. Hao, and J. Li, “A survey on routing protocols for large-scale wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 11, pp. 3498–3526, Mar. 2011.
- [8] S.-J. Park, R. Sivakumar, I. Akyildiz, and R. Vedantham, “GARUDA: Achieving effective reliability for downstream communication in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, pp. 214–230, Feb. 2008.
- [9] A. Basu, A. Lin, and S. Ramanathan, “Routing using potentials: a dynamic traffic-aware routing algorithm,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2003*, pp. 37–48, Aug. 2003.
- [10] S. Guo, Y. Gu, B. Jiang, and T. He, “Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links,” in *Proceedings of ACM MobiCom 2009*, Sept. 2009.

- [11] S. Fauji and K. Kalpakis, “A gossip-based energy efficient protocol for robust in-network aggregation in wireless sensor networks,” in *Proceedings of IEEE Pervasive Computing and Communications Workshops*, pp. 166–171, Mar. 2011.
- [12] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” in *Proceedings of IEEE Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 90–100, Feb. 1999.
- [13] T. Clausen, P. Jacquet, A. Laouiti, P. Muhlethaler, A. Qayyum, and L. Viennot, “Optimized link state routing protocol,” *Internet Draft draft-ietf-manet-olsr-txt Work in progress*, pp. 1–15, Apr. 2003.
- [14] L. Shu, Y. Zhang, L. Yang, Y. Wang, M. Hauswirth, and N. Xiong, “Tpgf: geographic routing in wireless multimedia sensor networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 44, pp. 79–95, 2010.
- [15] A. Caruso, S. Chessa, S. De, and A. Urpi, “GPS free coordinate assignment and routing in wireless sensor networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2005*, pp. 150–160, Mar. 2005.
- [16] Y. Zhao, Y. Chen, B. Li, and Q. Zhang, “Hop id: A virtual coordinate based routing for sparse mobile ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, pp. 1075–1089, Sept. 2007.
- [17] A. Varga, “Omnet++,” in *Modeling and Tools for Network Simulation*, pp. 35–59, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [18] C. Damdinsuren, D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Fukuyama, “Lifetime extension based on residual energy for receiver-driven multi-hop wireless network,” in *Proceedings of High Performance Computing and Simulation*, pp. 442–448, July 2011.