

# 大規模無線センサネットワークにおける管理型自己組織制御に基づく ポテンシャルルーティング

小南 大智<sup>†</sup> 菅野 正嗣<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup> 畠内 孝明<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 大阪府立大学総合リハビリテーション学部 〒 583-8555 羽曳野市はびきの 3-7-30

<sup>†††</sup> 富士電機システムズ 〒 191-8502 日野市富士町 1

E-mail: †{d-kominami,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp,

†††hatauchi-takaaki@fesys.co.jp

あらまし 無線センサネットワークの課題の1つにスケーラビリティの向上があり、これまでに局所情報に基づき自己の動作を決定する自己組織制御を用いた手法が研究されてきた。しかしながら完全な自己組織制御に基づき動作するネットワークでは、ネットワークの規模が非常に大きくなったときにネットワーク全体が望ましく動作していることを保証できない問題がある。そこで我々は管理型自己組織制御に基づくポテンシャルルーティングを提案する。管理型自己組織制御では、自己組織的に動作するノードの一部を例えば集中制御のような方法で管理することで、自己組織制御によって生ずる意図しない方向へのシステムの動作の遷移を防ぐ。マルチシンクを想定したシミュレーション評価により、シンクノードの分布に偏りがある場合も負荷を均一化できることを示す。さらに、センサノードの中継負荷を分散することで最も負荷の高いセンサノードの消費電力を抑制することで、ネットワーク寿命を 63.7 % 延長できることを示す。

キーワード センサネットワーク, ポテンシャルルーティング, 管理型自己組織制御, スケーラビリティ

## Controlled potential-based routing in large-scale wireless sensor networks

Daichi KOMINAMI<sup>†</sup>, Masashi SUGANO<sup>††</sup>, Masayuki MURATA<sup>†</sup>, and Takaaki HATAUCHI<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University  
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

<sup>††</sup> School of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture University  
3-7-30 Habikino, Habikino-shi, Osaka, 583-8555, Japan

<sup>†††</sup> Fuji Electric Systems  
1, Fujicho, Hino-shi, Tokyo, 191-8502, Japan

E-mail: †{d-kominami,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp,

†††hatauchi-takaaki@fesys.co.jp

**Abstract** Improving scalability in wireless sensor network is one of significant subjects and numerous researches on self-organized control have ever conducted to improve scalability. However, much larger networks based on pure self-organized control cannot guarantee to engage desired behavior. In this paper we propose a controlled potential-based routing. This routing protocol is based on a novel new concept; ‘controlled self-organization scheme’, which is a self-organization scheme accompanied by a control from the outside of the system. This scheme ensures desired behaviors of networks by controlling a part of nodes operated in self-organization with, for example, centralized control. Through simulation experiments with a multi-sink network, we show traffic loads of sink nodes distributed heterogeneously can be equalized, moreover, load balancing among the relay nodes can attain a 63.7 % extension of the network lifetime.

**Key words** sensor network, potential-based routing, controlled self-organization, scalability

## 1. はじめに

センサネットワークにおける課題の1つとしてスケーラビリティの問題がある。多数のセンサノードを利用する際には、ノード数の増加に応じて交換する経路情報が増加し、消費電力の増加や帯域の圧迫が問題となる。この場合、任意のノードへのアクセスが必要なIPネットワークのように各ノードに一意の識別子を与えて、全ての経路情報を各ノードが交換することは現実的ではない。また、各センサノードが観測したデータをシンクノードに集めるという多対一の通信形態を取るため、ネットワーク規模が増加するほどに、シンクノード周辺のノードの中継負荷が大きくなることも問題である。

交換する経路情報量の削減という観点から、地理的位置情報を用いるルーティング [1, 2] やポテンシャルルーティング [3-6] がこれまでに研究されている。例えば前者では、各センサノードは位置情報を利用して宛先となるノードにより近いノードを次ホップとして選択する。このとき各ノードが必要とするのは宛先ノードと近隣ノードの位置情報のみである。位置情報を用いるルーティングの実現には、GPS等の位置情報を知るための装置や機能が各ノードに必要となるため、センサノードの製造コストが増加し、大量のセンサノードを利用する際には問題となる。また、高い精度の位置情報が必要とされるため、屋内や地下などのGPSの精度が劣化する環境では正しく機能しないことも問題である。そこで我々は、スケーラブルなセンサネットワークの構築を実現するポテンシャルルーティングを提案する。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持ち、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。このときシンクノードに近づくほどにポテンシャルが低くなるように各ノードが自身のポテンシャルを決定できれば、最もポテンシャルが低い、通信範囲内にあるノード（隣接ノード）を次ホップとして選択することで、シンクノードへとデータを届けることができる。MAC層には省電力性に優れた *intermittent receiver-driven data transmission* (IRDT) 方式 [8] を用いており、このIRDT方式に対して簡単な修正を用いることで、ポテンシャルルーティングを実現する。

中継負荷の増加を抑制するには複数のシンクノードを配置するマルチシンク構成のネットワークを構築することが解決の方法として考えられる。シンクノードに届いたデータは一度データサーバに蓄えられ、管理者やアプリケーションが必要に応じてその情報を利用するため、各センサノードは観測したデータを特定のシンクノードを宛先として送る必要はない。センサノードはシンクノードのアドレスや位置を知らずとも、ポテンシャルに基づいて次ホップを選択することで、いずれかのシンクノードまでデータを送り届けることが可能であるため、ポテンシャルルーティングをマルチシンク構成のセンサネットワークにおいて用いることは容易である。

ポテンシャルの決定のために必要な情報交換は隣接ノード間のみで行われ、交換される情報量が非常に小さいために高いスケーラビリティが得られる。さらに、局所情報のみを用いる自己組織的な経路制御を行うため、ノードの故障や追加が生じた場合もその影響をネットワーク全体に及ぼすことがなく、スケーラビリティに加えてロバスト性も期待できる。しかしながら、完全な自己組織制御には、そのボトムアップによる設計から以下の問題が生じると考えられる [7]。

- ネットワーク全体の制御動作確認の困難さ
- 最適な動作保証の困難さ

- 環境変化への適応速度の遅さ

例えば自己組織制御に基づくポテンシャルルーティングでは局所的な情報のみを用いてルーティングを行うため、ノードの分布密度の差によって通信負荷の偏りが生じて一部のシンクノードの近傍のノードに中継負荷が集中してしまう状況に対処できない。このような問題を解決するために管理型自己組織制御に基づくポテンシャルルーティング (Controlled Potential-based Routing (CPBR)) を提案する。管理型自己組織制御では、自己組織的に動作するノードの一部を例えば集中制御のような方法で管理することで、自己組織制御によって生ずる意図しない方向へのシステムの動作の遷移を防ぐ。また管理型自己組織制御を用いることで、自己組織的に動作するシステムの性能を最適により近づけることができる。CPBRでは、シンクノードのポテンシャルを制御することでポテンシャル場を制御する。ここではシンクノード同士は有線ネットワークによって接続されていると想定し、受信したデータパケット数や、隣接するノードの残余電力などの情報を定期的に交換する。有線接続という想定から、これらの情報はほぼ瞬時に全シンクノード間で共有することが可能である。シンクノードがこれらの情報に基づき自身のポテンシャルを決定することで、各センサノードは局所的な情報のみに基づいて自身のポテンシャルを決定しているにもかかわらず、ネットワーク全体では望ましいポテンシャル場が構築される。

本稿では第一に、CPBRを可能とするために、拡散方程式に基づいたポテンシャルルーティングを提案する。次に拡散方程式を拡張することで、局所的な最適経路選択機能をポテンシャルルーティングに追加する。そして、局所的な最適性に加えて、ネットワーク全体での最適性をCPBRによって実現する。

## 2. ポテンシャルルーティング

### 2.1 関連研究

ポテンシャルを用いたルーティングとして、これまでに様々なものが研究されている [3-6]。これらは物理学における知見を応用してポテンシャルを割り当てるものと、シンクノードからのホップ数や自身と隣接ノードの残余電力に基づいてポテンシャルを割り当てるものの2種類に分けることができる。前者では静電場とセンサネットワークの類似に基づき負荷分散を実現するルーティングが研究されている [3, 4]。しかしこれらにはポテンシャルの計算にノードの位置情報を必要とするという問題点がある。後者では、シンクノードからホップ数と隣接ノードの残余電力に基づくポテンシャルを各ノードが計算し、負荷分散を目的としたルーティングに利用する [5, 6]。しかし、ポテンシャルの計算に用いるパラメータについて十分な検討や評価がなされておらず、単に最小ホップルーティングに残余電力を考慮しただけのものとの違いが明確にされていない。さらにいずれの方式も、ルーティングに要する制御メッセージサイズが小さいこと、負荷分散によるネットワークの長寿命化を利点としているが、それらの動作を保証する機構がないという問題がある。我々は Controlled Potential-based Routing (CPBR) によってこの問題を解決する。CPBRを実現するためには、各センサノードはシンクノードのポテンシャルに応じて自身のポテンシャルを変化させる必要がある。そこで我々は、シンクノードのポテンシャルがセンサネットワークに伝わっていく様子と、熱源から熱量が伝導体を伝わっていく様子の類似性に着目する。熱伝導の様子を記述する拡散方程式をポテンシャル場の構築に用いることで、シンクノードのポテンシャルをセンサネットワーク全体へ拡散させる。

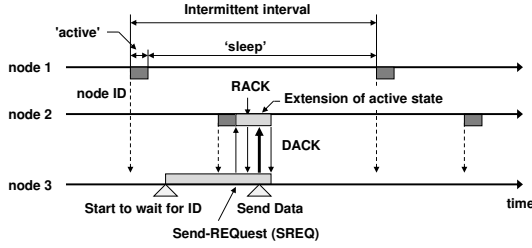


図1 Intermittent Receiver-driven Data Transmission

## 2.2 拡散方程式を用いたポテンシャル場の構築

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  $\phi$  を定める。

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

ここで  $D$  は正の値を持ち、拡散の速度を表す係数である。作用が直接伝わるのは近傍からのみであるという近接作用の考えに基づいて式が微分形で表現されている。そのためこの式を離散化し、 $\phi$  をポテンシャルとみなすことで、自身と隣接ノードの情報のみに基づいて自己の動作を決定する自己組織的な制御に基づいたポテンシャル場の構築が可能となる。

### 2.2.1 離散拡散方程式

ノード  $n$  は、離散化した拡散方程式 (2) に基づいて次ステップ  $t+1$  での自身のポテンシャル  $\phi(n, t+1)$  を定める。式 (2) において、ノード  $n$  に隣接するノード集合を  $nb(n)$  で表している。このときノード  $n$  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。このポテンシャルの計算のために、各ノードは定期的に隣接ノードに対して最新のポテンシャルを通知する必要がある。

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

式 (1) を離散化した式 (2) では、 $D(n)$  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変化させるパラメータと考えることができる。ここで注意すべき点として、 $D(n)$  の値が大きい場合にポテンシャルが振動する問題がある。この問題の解決のために、まずノード  $n$  に対して単一の隣接ノード  $m$  だけが存在する場合について考える。式 (2) は  $\phi(n, t+1) = D(n) * \phi(m, t) + (1 - D(n)) * \phi(n, t)$  となり、数直線上の2点  $\phi(n, t)$ ,  $\phi(m, t)$  を考えると、 $D(n)$  の値によって、 $\phi(n, t+1)$  は  $\phi(n, t)$ ,  $\phi(m, t)$  の内外分点のいずれかになる。以下では、 $\phi(n, t) < \phi(m, t)$  の場合を考える。

- $0 < D(n) < 1$  の場合：ノード  $m$  のポテンシャルをノード  $n$  が受信した後、 $\phi(n, t) < \phi(n, t+1) < \phi(m, t)$  となる。この手順が繰り返される場合2点は近づき続けるため、ポテンシャルは  $\phi(n, t)$  と  $\phi(m, t)$  の間に収束する。

- $1 \leq D(n)$  の場合：ノード  $m$  のポテンシャルをノード  $n$  が受信した後、 $\phi(n, t) < \phi(m, t) < \phi(n, t+1)$  となる。 $D(n)$  の値によっては収束するが、ノード  $n$  とノード  $m$  のポテンシャルの大小関係が定まらず振動する。

ポテンシャルの拡散を考える場合  $0 < D(n) < 1$  であることが望ましいといえる。隣接ノードが複数存在する場合には、 $D(n)$  を  $\frac{\alpha}{|nb(n)|}$  に設定することとする。 $|nb(n)|$  は  $nb(n)$  の要素数であり、これによって各ノードは仮想的に1個のノードからのみポテンシャルの影響を受けているようにみなせるため、単一の隣接ノードがある場合の性質から、 $0 < \alpha < 1$  と設定することで振動を防ぐことができる。

### 2.2.2 MAC 層とポテンシャルの通知

センサネットワークにおいては省電力性が重要な観点であ

り、我々はデータリンク層には省電力性に優れた *Intermittent Receiver-driven Data Transmission* (IRDT) 方式 [8] を用いる。IRDT はスリープと起動を定期的に繰り返す受信端末駆動型の通信方式であり、図1に示すように、IRDT では受信端末が定期的に自身の ID を周囲に送信して、自身が受信可能状態であることを通知する。データを所持しているノードは ID の受信を待機し、受信した ID が通信先候補からのものであれば送信要求である SREQ パケットを送信する。SREQ 受信確認を通知する RACK パケットの到着後は、データパケットを送信してデータ受信確認の DACK パケットを待つ。

ポテンシャルの通知は、IRDT が用いる定期的な端末 ID の送信時に自身のポテンシャルを含めて送信することで行う。そのためポテンシャルの通知に要するオーバーヘッドはごく僅かである。ただし IRDT はスリープ制御を用いた MAC プロトコルであるため、このポテンシャルの通知が必ず通信範囲内にあるノードに受信されるとは限らない。定期的に周囲のノードのポテンシャルを受け取るためには、各ノードが周期的に無線インタフェースを受信状態とする必要がある。この周期を  $T_i$  とし、 $T_i$  ごとに ID 送信の周期と同じ長さだけパケットの受信を待機する。受信したポテンシャルはソフトステータ的に管理することとし、この受信待機が終了した時点で前回の受信待機時からポテンシャルの通知がなかったノードに関する情報は全て削除する。具体的なポテンシャルの更新手順について以下に示す。

一定周期  $T_i$  ごとの ID の受信待機時：

(1) ID 受信後に自身のポテンシャルを返信する。返信後に自身のポテンシャルを更新する。

(2) (1) で返信されたポテンシャルを受信したノードは自身のポテンシャルを更新する。

データパケット送信のための ID の受信待機時：

(1) ID を受信後に SREQ パケットに自身のポテンシャルを含めて返信する。返信後に自身のポテンシャルを更新する。

(2) (1) で返信されたポテンシャルを受信したノードは自身のポテンシャルを更新する。

一定周期  $T_i$  ごとの ID の受信待機終了時：

$T_i$  の間にポテンシャルの通知がなかったノードに関する情報を削除する。削除後に自身のポテンシャルを更新する。

### 2.2.3 境界条件

まず初期条件として全センサノードのポテンシャルは0に設定する。式 (2) を用いてポテンシャル場を構築するために、以下の境界条件によってシンクノード  $d$  のポテンシャルを定める。

$$\forall d \in N_s, \phi(d, t) = \Phi(d) \quad (3)$$

$N_s$  はシンクノードの集合であり、シンクノード  $d$  は共有する情報を元にして時刻  $t$  におけるポテンシャル  $\phi(d)$  を決定する。 $\Phi(d, t)$  はポテンシャル制御関数であり、次章で説明する。

拡散方程式の性質上、この境界条件のみでは、長時間が経過した時点で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。これを防ぐためにさらにネットワークの末端に存在するノードのポテンシャルを0とする境界条件を定義する。

$$\forall n \in N_{edge}, \phi(n, t) = 0 \quad (4)$$

$N_{edge}$  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  $n$  は式 (5)、式 (6) のいずれかを満たす。

$$\forall k \in nb(n), H(n) > H(k) \quad (5)$$

$$\forall k \in nb(n), H(n) \geq H(k) \cap belong(n) = belong(k) \quad (6)$$

$H(n)$  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。  $H(n)$  と  $belong(n)$  を各ノードが得るために、各ノードは下位層の IRDT が定期的送信する ID に  $H$  と  $belong$  とを含める。シンクノードは  $H$  を 0 に、 $belong$  を自身のノード ID とする。ノード  $n$  は隣接ノード  $m$  から ID を受信した際に、 $H(m) + 1$  が  $H(n)$  よりも小さければ、 $H(n)$  を  $H(m) + 1$  に設定し、 $belong(n) = belong(m)$  とする。  $H(m) + 1$  と  $H(n)$  が等しいが  $belong(m)$  と  $belong(n)$  が異なる場合には、 $\frac{1}{2}$  の確率で  $belong(n)$  を  $belong(m)$  に設定する。

式 (5) では、ネットワークの末端部分に同一ホップのノードのみが複数個存在する場合に境界条件が設定されない。そのため式 (6) を用いて同一ホップのノードが存在する場合も境界条件を設定する。この時シンクノードとシンクノードの境界付近をネットワークの端と判断する可能性があるため、 $belong$  を用いることでこれを防いでいる。 $belong$  は最も近いシンクノードを表すため、シンクノード間の境界付近では隣接ノード間で  $belong$  が一致しないことを利用している。

#### 2.2.4 局所的な最適経路選択機能の追加

離散化した拡散方程式 (2) の右辺に  $\rho(n)$  を加算することで、局所的に最適な経路を選択する機能を追加する。

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

$\rho(n)$  はノード自身がポテンシャルに与える影響の強さを表す正の値を持つ変数であり、 $\rho(n)$  が大きいほど自身が隣接ノードから次ホップとして選択される確率が減少する。ここでは、 $\rho(n)$  を用いた負荷分散を行う。

自身の残余電力が、自身と隣接する同一ホップのノードの平均残余電力よりも小さい場合には、 $\rho(n)$  の値を増加させることで負荷分散が実現できる。このとき、境界条件の設定に用いた  $H$  が等しい隣接ノードを同一ホップのノードと定義する。残余電力に関しても、下位層の IRDT が定期的送信する ID に残余電力を載せて送ることで隣接ノードに通知する。ID を受けたノードが自身のポテンシャルを返信する際は残余電力も同時に送ることとする。具体的な  $\rho(n)$  の決定方法は以下のアルゴリズムに従い、ポテンシャルの計算毎に行う。

(1) 自身の残余電力  $E_{rem}(n)$ 、同一ホップの隣接ノードの平均残余電力  $E_{avg}(n)$  をそれぞれ求める。

- $E_{rem}(n) > E_{avg}(n)$  のとき  $\rho = 0$  とする。
- $E_{rem}(n) \leq E_{avg}(n)$  のとき (2) 以下の処理を行う。

(2)  $E_{dif}(n) = E_{avg}(n) - E_{rem}(n)$  を計算する。

• 直前のポテンシャルの計算時に  $E_{dif}(n)$  を求めていない場合は  $\rho = 1.0$  とする。

• 直前に  $E_{dif}(n)$  を求めていた場合は、その値を  $E'_{dif}(n)$  として以下の処理を行う。

- $E'_{dif}(n) > E_{dif}(n)$  の場合は  $\rho(n)$  を変化させない。
- $E'_{dif}(n) \leq E_{dif}(n)$  の場合は  $\rho(n)$  に  $\delta$  を加算する。

(3)  $\rho(n) = \frac{\rho(n)}{\lfloor nb(n) \rfloor}$  とする。

最後に  $\rho$  を  $\frac{1}{\lfloor nb(n) \rfloor}$  倍するのは、ポテンシャルに対する隣接ノード数の依存を抑えるためである。

#### 2.3 ポテンシャル場に基づくルーティング

IRDT における ID の送信時にはポテンシャルも載せて送るため、ポテンシャルを受信したデータ送信ノードは、その値と自身のポテンシャルを比較してデータを送るかどうかを判断する。非同期式の間欠通信方式では、通信相手がスリープ状態から起動するまで待機する時に多くの電力を消費する。ポテンシャルルーティングを行う際、特定の相手のみを受信ノードに選択すると、大きな待機時間が必要であり消費電力も増加す

る。そこで、自身よりもポテンシャルが低いノードから ID が届いた際に確率的にデータを送るルーティングを用いることで、省電力性とさらに信頼性も高めることができる。ノード  $n$  が自身以下のポテンシャルを持つノード  $r$  からポテンシャルを受信したとき、データ送信確率  $P(n, r)$  を決定する式として以下の式を用いる。

$$P(n, r) = 1 - \beta \left( \frac{\phi'(r)}{\sum_{k \in small(n)} \phi'(k)} \right) \quad (8)$$

ここで  $\phi'$  は、隣接ノードのうちポテンシャルが最小のノードを  $i$  とするとき、 $\phi'(r) = \phi(r) - \phi(i)$  で得られる値である。 $small(n)$  はノード  $n$  以下のポテンシャルを持つ、ノード  $n$  に隣接するノードの集合である。 $\beta$  は定数で、この値が小さいほどポテンシャルが最小のノード以外のノードを次ホップとして選択する確率が増加する。

### 3. Controlled Potential-based Routing

CPBR では複数のシンクノード間で情報を共有し、シンクノードのポテンシャルを制御することでネットワーク全体のポテンシャル場を制御する。シンクノードは一定時間  $T_p$  ごとに、制御する目的に応じた評価値  $m$  をシンクノード間で交換する。ここではシンクノードの負荷分散とネットワーク寿命を目的とし、それぞれの実現について以下で説明する。

- シンクノードの負荷分散

全てのシンクノードに届くデータパケットの数を等しくすることで負荷分散を行う。このとき、評価値としてシンクノード  $d$  が受信したパケット数  $N_{dt}(d)$  を用いる。

- ネットワーク寿命の延長

ネットワーク寿命をシステムの動作開始時点から最初にノードの電力枯渇が生じるまでの時間と定義する。ネットワークにおいて電量枯渇が激しいのはデータの中継を頻繁に行う必要があるシンクノードの隣接ノードである。そこで、評価値にはシンクノード  $d$  の隣接ノードの残余電力和  $P_{nb}(d)$  に基づく値を用いる。各シンクノードの周囲のノードの電力消費を均等にするために、隣接ノードの電力消費速度を全シンクノード間で等しくする。これによって、各センサノードの中継負荷を均等にできる。評価値には、直前のポテンシャル制御時の残余電力和を  $P'_{nb}(d)$  とするときの電力消費速度  $\frac{P'_{nb}(d) - P_{nb}(d)}{P_{nb}(d)}$  を用いる。

シンクノード  $d$  のポテンシャル  $\phi(d)$  をポテンシャル制御関数  $\Phi(d)$  によって与えることで CPBR を実現する。 $\Phi(d)$  は以下のアルゴリズムで決定される。

(1) 初期ポテンシャルを設定する。

$$\Phi(d) = \Phi_{init} \quad (\Phi_{init} < 0) \quad (9)$$

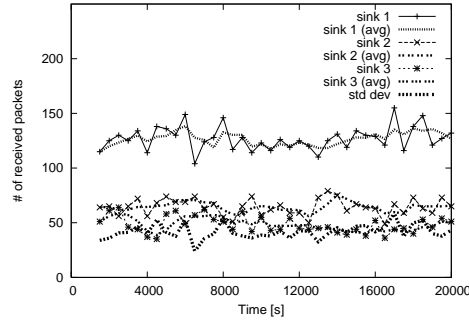
(2) 受信データ個数に関しては全シンクノードの持つ値の平均値  $\bar{m}$  を求める。ネットワーク寿命の場合は平均電力消費速度を  $\bar{m}$  とする。平均電力消費速度は式 (10) で与えられる。

$$\bar{m} = \frac{\sum_{d \in N_s} \{P'_{nb}(d) - P_{nb}(d)\}}{\sum_{d \in N_s} P_{nb}(d)} \quad (10)$$

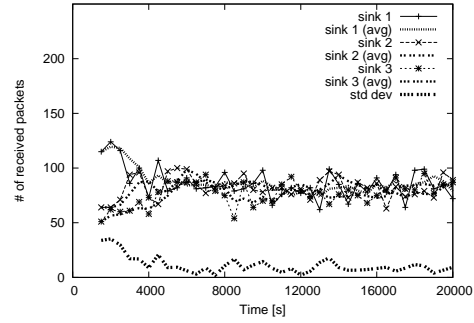
(3) 式 (11) によりポテンシャルを決定する。

$$\Phi(d) = \begin{cases} \Phi(d) * (1 - \theta * \frac{m(d) - \bar{m}}{\bar{m}}) & (m(d) \geq \bar{m}) \\ \Phi(d) * (1 + \theta * \frac{\bar{m} - m(d)}{\bar{m}}) & (m(d) < \bar{m}) \end{cases} \quad (11)$$

$\theta$  は定数であり、 $-1 < \theta < 1$  とする。このようにポテンシャルを制御することで、平均値から離れているほどポテンシャルの変化を大きく、平均値に近いほどポテンシャルの変化を小さ

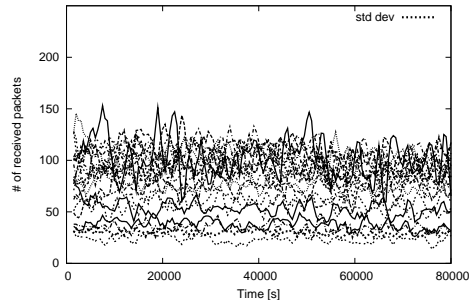


(a) ポテンシャル制御を用いない場合

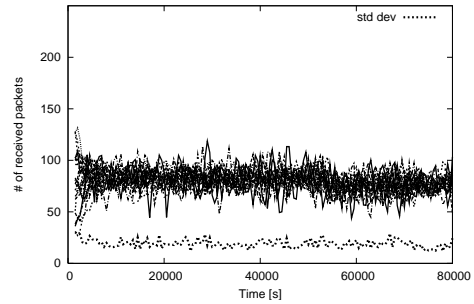


(b) ポテンシャル制御を用いる場合

図 2 データの受信個数に基づくポテンシャル制御 (シンクノード数 3)



(a) ポテンシャル制御を用いない場合 (移動平均)



(b) ポテンシャル制御を用いる場合 (移動平均)

図 3 データの受信個数に基づくポテンシャル制御 (シンクノード数 20)

くすることが可能となる．このとき，ポテンシャルが異常な値を取らないように，ポテンシャルはあらかじめ定めた範囲  $[\Phi_{min}, \Phi_{max}]$  に収めることとする．

#### 4. シミュレーション結果

シンクノードのポテンシャル制御による効果を検証するためにシミュレーションを行った．ネットワークモデルとして  $600\text{m} \times 600\text{m}$  の正方領域にセンサノード 150 個をランダムに配置した．各ノードの通信範囲は  $100\text{m}$  である．また，3 台のシンクノードの位置はそれぞれ  $(300, 300)$ ， $(75, 75)$ ， $(75, 525)$  であり，これらをそれぞれシンク 1，シンク 2，シンク 3 とする．各センサノードからは毎秒平均 0.003 個のデータがポアソン過程に従って発生しシンクノードに届ける．シミュレーションにおけるパラメータは表 1 に示すとおりである．ポテンシャル制御の評価値が平均値よりも大きい時に，ポテンシャルの増減を決定するのは  $\theta$  である．ここでは平均値よりも大きい時にポテンシャルを増加させる必要があるため，正の値を設定している．シンクノードのポテンシャル制御周期である  $T_p$  は，2 つの値を利用しており，受信データ数を用いる場合は  $500\text{ s}$  に，シンクノードの隣接ノードの電力消費速度を用いる場合には  $50\text{ s}$  に設定している．前者はパケット発生率がそれほど高くないため，ある程度長い周期で制御を行わなければ望ましい値に収束しないためである．後者に関してはポテンシャル更新のための ID 受信待機を行う周期である  $T_i$  に依存する．周期  $T_i$  での ID 待機中に ID を受信した場合は，即座自身のポテンシャルを返信する．この際に残余電力情報についても返信するため，平均的には  $\frac{T_i}{2}$  の周期で周囲のノードの残余電力情報は更新される．そのため後者では，比較的短い周期でシンクノードのポテンシャルを制御することが可能である．

##### 4.1 シンクノードの負荷分散

シンクノードの負荷分散を実現するにはデータの受信個数に

表 1 パラメータ

Parameter	Value
$T_i$	100 s
$T_p$	50 s or 500 s
$\alpha$	0.9
$\beta$	1
$\Phi_{init}$	-30
$\Phi_{min}$	-90
$\Phi_{max}$	-5
$\theta$	0.3

基づくポテンシャル制御を行えばよい．図 2 にシミュレーション結果を示す．図の縦軸は直前  $500\text{ s}$  でシンクノードが受信したデータ個数である．avg は直前 3 データの移動平均であり，std dev は  $500\text{ s}$  ごとの各シンクノードに届いたデータ個数の標準偏差である．受信データ個数に基づいてポテンシャル制御を用いない場合では，受信するデータ個数は時間の経過に対してほぼ変わらないままであるが，ポテンシャルを制御することで，各シンクノードの受信するデータ個数を均等化できている．ここでは  $500\text{ s}$  ごとに制御を行うため，各シンクノードに平均で 75 個のデータが集まることが期待され，それを実現できている．また，収束までに約  $6000\text{ s}$  経過しており，制御周期が  $500\text{ s}$  であることを考えると 12 回の制御によって収束している．センサネットワークで目的とするシステムの稼働時間が年のスケールであることを考えると現実的な時間での収束が可能であるといえる．

図 3 は，センサノード数を 1000 個，シンクノード数を 20 台としたときの各シンクノードの受信データ個数の移動平均を示している．ネットワークは  $1500\text{m} \times 1500\text{m}$  であり，シンクノードの配置もランダムに決定している．このときもポテンシャル制御が正しく機能しているが，収束時間は  $9000\text{ s}$  程度と制御周期の 18 倍にまで増えている．また，各シンクノードに届くデータ個数の標準偏差をみると，シンクノード数が 3 台

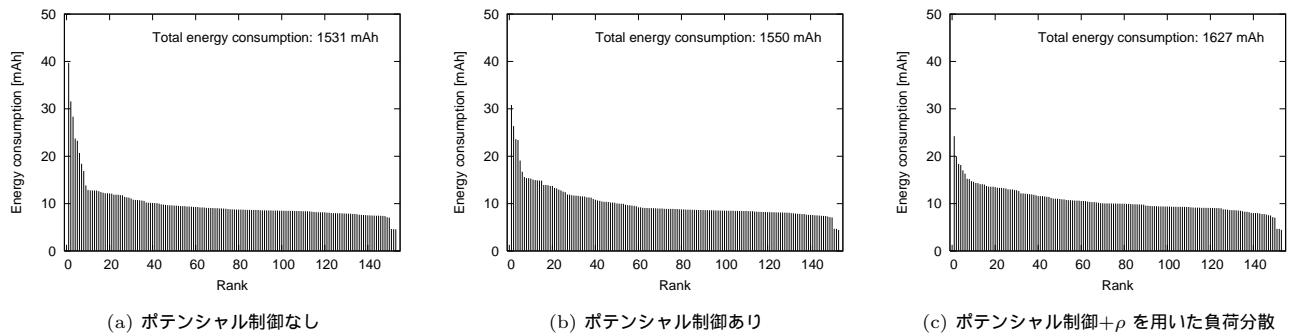


図 4 シンクノードの隣接ノードの電力消費速度に基づくポテンシャル制御

の場合に比べて大きくなっている。これは、各センサノードが自己組織的に動作するために、ネットワークの規模が大きくなる時には避けることができない問題である。しかし規模の増加に対して収束時間はほとんど増加しておらず望ましい動作をしている。ネットワークの規模がさらに増加するとき、標準偏差や収束までの時間がどのように変化するのかを調べることは今後の課題である。

#### 4.2 ネットワーク寿命の延長

ネットワーク寿命の延長のために、シンクノードの隣接ノードの電力消費速度に基づくポテンシャル制御を用いる。図 4 に、シミュレーション結果を示す。図の縦軸はシミュレーション内で 6 時間経過した際の消費電力であり、横軸は消費電力が大きい順にノードをソートしている。単にポテンシャルに基づくルーティングだけを行う場合、シンクノードに隣接するノードのうち、最もポテンシャルが低いノードにデータの中継負荷が集中する。そのため一度ポテンシャルの変化が収束すると特定のノードに負荷が集中し続けることが、図 4(a) から分かる。図 4(a) ではシンク 1 に負荷が集中するために、少数のノードの消費電力が非常に大きくなっているが、図 4(b) では制御を用いることで最も消費電力が大きいノードの負荷が抑えられている。これは、各シンクノードの隣接ノードの数がほぼ等しく、到着するデータの個数がほぼ均等になっているためである。シンクノードに隣接するセンサノードの数に偏りがある場合には、図 4(a) 以上に偏りが大きくなってしまいう可能性がある。しかしシンクノードの隣接ノード数に偏りがある場合も、隣接ノード間で負荷を分散することでポテンシャル制御の利点が顕著に現れる。図 4(c) では、 $\rho$  を用いた局所的な負荷分散機能をポテンシャル制御に加えて利用している。このとき、 $\rho$  を用いることで迂回経路が生じるために総消費電力は増えているが、負荷が最大のノードの消費電力を制御がない場合と比較して、38.9%抑制できており、通信によってのみ電力が消費されると仮定すると、ネットワーク寿命を 63.7%延ばすことができる。

### 5. まとめ

管理型自己組織制御では、ネットワーク全体が意図しない状態に遷移しないように、自己組織制御に基づいて動作するネットワークの一部のノードを集中制御あるいは分散制御などの方法で管理する。本稿では管理型自己組織制御に基づく Controlled Potential-based Routing (CPBR) を提案した。提案方式ではシンクノードのポテンシャルを分散制御によって管理して、望ましいポテンシャル場を自己組織的に構築してルーティングに利用する。MAC 層には IRDT 方式を用いたが、CPBR は下位層に限定されることはなく、他の MAC 層プロトコルを採用したセンサネットワークでも適用可能である。シミュレーションによって、複数のシンクノードが偏った分布で存在するセンサネットワークにおいて、各シンクノードに届くデータの個数に

基づきポテンシャルを制御することで、シンクノードの負荷分散を実現できることを示した。また、シンクノードに隣接するノードの残余電力に基づいたポテンシャル制御を行うことで、最も負荷の高いセンサノードの消費電力を 38.9%削減し、ネットワーク寿命を 63.7%改善できることを示した。今後の課題として、ネットワークの規模によって、制御による動作が収束するまでの時間、収束時の偏りがどのように変化するのかを調べることが挙げられる。また、環境変化に対するロバスト性や、ノード密度に偏りがあるネットワークでの動作についての調査も検討したい。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究 (A) 21240004 によるものである。ここに記して謝意を表す。

#### 文 献

- [1] S. Subramanian and S. Shakkottai, "Geographic Routing with Limited Information in Sensor Networks," IEEE Transactions on Information Theory, vol.56, no.9, pp.4506–4519, 2000.
- [2] Y. Yu, R. Govindan, and D. Estrin, "UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA/CSD-TR-01-0023," Technical report, Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks, March 2001.
- [3] M. Kalantari and M. Shayman, "Design Optimization of Multi-Sink Sensor Networks by Analogy to Electrostatic Theory," Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.431–438, April 2006.
- [4] S. Jung, M. Kserawi, D. Lee, and J.-K.K. Rhee, "Distributed Potential Field Based Routing and Autonomous Load Balancing for Wireless Mesh Networks," IEEE Communications Letters, vol.13, no.6, pp.429–431, 2009.
- [5] C. Wu, R. Yuan, and H. Zhou, "A Novel Load Balanced and Lifetime Maximization Routing Protocol in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), pp.113–117, May 2008.
- [6] P. Kumar, J. Kuri, P. Nuggehalli, M. Strasser, M. May, and B. Plattner, "Connectivity-Aware Routing in Sensor Networks," Proceedings of the International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), pp.387–392, Oct. 2007.
- [7] C. Muller-Schloer, "Organic Computing: On the Feasibility of Controlled Emergence," Proceedings of the 2nd IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, pp.2–5, Sept. 2004.
- [8] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Fukuyama, "Performance Evaluation of Intermittent Receiver-driven Data Transmission on Wireless Sensor Networks," Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), pp.141–145, Sept. 2009.