

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[†] 菅野正嗣^{*} 村田正幸[†] 畠内 孝明^{††}

[†]大阪大学 ^{*}大阪府立大学 ^{††}富士電機システムズ

2011/01/20

アドホックネットワーク研究会

研究背景

センサネットワークへの自己組織化制御の適用

センサネットワークの課題

- スケーラビリティの向上
 - 莫大な数のセンサノードを制御することが必要
 - 制御情報量の増加・中継負荷の集中
- ロバスト性の向上
 - 通信信頼性の向上が必要
 - 不安定な無線チャネル品質・センサノードの故障や電力枯渇

自己組織化制御

- 局所的に交換された情報のみに基づく制御
- 局所的な行動決定が全体として望ましい制御として発現
 - 高いスケーラビリティ、ロバスト性を実現可能
 - 大域的な最適化が困難
 - システム全体の制御動作の確認が困難

2

研究背景

管理型自己組織制御

- 管理ノードの導入による自己組織化制御の問題の解決



管理ノードが収集した情報に基づいて特定のノードの動作を管理することで自己組織的に動作するシステムをより望ましい状態に遷移させる

自己組織化制御を用いたルーティングへの適用

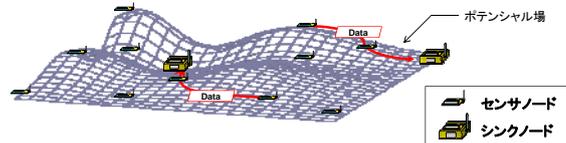
3

研究背景

自己組織化制御に基づくポテンシャルルーティング

- ノードの所持するポテンシャル(スカラー値)に基づくルーティング

- ポテンシャル場の構築
 - 自己組織的にノードが自身のポテンシャルを決定
 - 中継局として望ましいノードほど低いポテンシャルを所持
- ポテンシャル場に基づくルーティング
 - ポテンシャルが低い隣接ノードを次ホップに選択



自己組織化制御の問題点は残っている

4

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

- ポテンシャルルーティングにみられる自己組織化制御の問題点

- マクロな観点からのネットワークにおける負荷の偏りの解決が困難

負荷の偏りの原因 { センサノード・シンクノードの分布密度の偏り
トラフィックの分布の偏り

- シンクノードのポテンシャル管理による問題点の解決

- 全てのシンクノードが自律分散的に自身のポテンシャルを管理
 - 複数のシンクノードが存在するマルチシンクネットワークを想定

各シンクノードのポテンシャルを管理することでネットワークの大域的な負荷分散を行う

5

シンクノードのポテンシャル管理

- 複数シンクノード間での情報共有

- 受信データ個数・隣接ノードの残余電力など

Φ : ポテンシャル
 θ : 定数 ($-1 < \theta < 1$)
 m : 管理評価値
 \bar{m} : m の平均値

- 以下の式に従い一定周期で各シンクノードのポテンシャルを決定

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

- 適切な管理評価値 m の選択によって管理目的に応じた制御が可能

- シンクノードの負荷分散
 - m を受信データ個数とすることで実現
- ネットワークの長寿命化
 - m を 1 管理周期前からの総残余電力の減少率とすることで実現

シンクノードのポテンシャルに応じて届くデータの数が変化するように各センサノードが自身のポテンシャルを決定することが必要

6

拡散方程式によるポテンシャル場の構築

● 拡散方程式

- 熱や分子が物理的に広がる様子を記述した方程式

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

↓ 離散化

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

φ : 熱 or ポテンシャル
 x : 位置
 t : 時間
 D : 拡散定数
 Δ : ラプラシアン
 n : ノード
 nb : 隣接ノード集合

● シンクノードのポテンシャルを拡散させてポテンシャル場を構築

- 局所的な情報のみからポテンシャル場の構築が可能
- 右辺を拡張することで局所的な最適化が実現可能

拡散方程式の拡張による局所的な最適化

● 局所情報に基づく最適な次ホップの選択機能の追加

- 離散化した拡散方程式の右辺に加算項 ρ を追加

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

- ρ の値によって次ホップとして選択される確率が増加
 - ρ を減少 : 次ホップとして選択される確率が増加
 - ρ を増加 : 次ホップとして選択される確率が減少

ρ の利用例

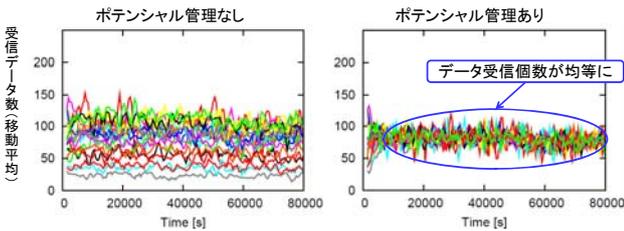
- シンクノードからのホップ数が自身と等しい隣接ノードの平均残余電力と自身の残余電力を比較
 - 自身の残余電力の方が多い : ρ を減少
 - 自身の残余電力の方が少ない : ρ を増加

残余電力に基づく局所的な負荷分散が実現可能

シミュレーション結果 - シンクノードの負荷分散 -

データパケット受信個数が等しくなるようにポテンシャルを管理

ポテンシャル管理周期: 500 s
 センサノード数: 1000
 シンクノード数: 20
 パケット発生率: 0.003 pkt/s/node



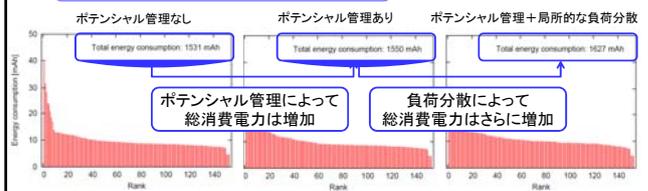
- 各シンクノードに届くデータパケット個数の均等化を実現
 - 収束までに約 9000 s が経過 (管理周期の 18 倍)

センサネットワークの運用の時間スケールと比較して現実的な時間スケールでシンクノードの負荷分散を実現可能

シミュレーション結果 - ネットワークの長寿命化 -

隣接ノードの総残余電力の減少率が一定になるようにポテンシャルを管理

ポテンシャル管理周期: 50 s
 センサノード数: 150
 シンクノード数: 3
 パケット発生率: 0.003 pkt/s/node



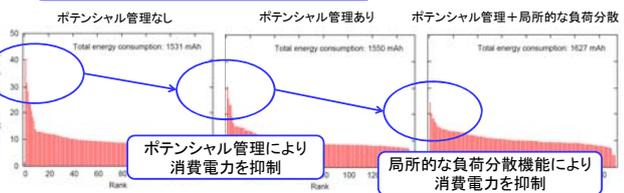
● ネットワークの総消費電力の増加

- ポテンシャル管理の利用, 局所的な負荷分散によって平均ホップ数が増加するため総消費電力が増加

シミュレーション結果 - ネットワークの長寿命化 -

隣接ノードの総残余電力の減少率が一定になるようにポテンシャルを管理

ポテンシャル管理周期: 50 s
 センサノード数: 150
 シンクノード数: 3
 パケット発生率: 0.003 pkt/s/node



● 負荷が最大のノードの消費電力の抑制

- ポテンシャル管理によって負荷が最大のノードの消費電力を 23% 抑制
- さらに局所的な負荷分散を用いることで消費電力を 39% 抑制

最初にノードの電力が枯渇するまでの時間を 64% 延長

まとめと今後の課題

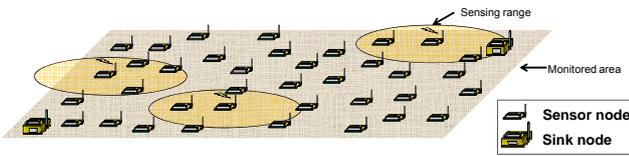
● まとめ

- 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の提案
 - シンクノードのポテンシャル管理による大域的な最適化の実現
- シミュレーションによる評価
 - 受信パケット個数の均等化を実現
 - 最初にノードの電力が枯渇するまでの時間を 64% 延長

● 今後の課題

- ネットワークの規模をさらに大きくした場合の収束性の評価
- ノードの追加や故障, チャネル品質の変動に対するロバスト性の評価
- ノード密度に大きな偏りがある場合の評価

無線センサネットワーク



- 大量のセンサノードと少数のシンクノードによって構成
 - インフラが不要であり高い応用性
 - 環境モニタリング
 - 監視システム
 - 災害時の情報収集
- 実現のために様々な課題
 - 小型化・省電力化・低コスト化・ロバスト性向上・スケーラビリティ向上 など

離散拡散方程式における拡散係数

- 拡散係数によるポテンシャルの振動
 - 2 ノードの場合で考察: ノード n がノード m からの ID を受信

$$\phi(n, t + 1) = D(n) * \phi(m, t) + (1 - D(n)) * \phi(n, t)$$
 - 数直線状での内分・外分の式と一致
 - 外分する場合 2 ノードのポテンシャルの大小関係が振動
 - ⇒ $0 \leq D(n) \leq 1$
 - $D(n) = 0$ or 1 の場合それぞれポテンシャルが不変 or 一致となり不適
 - ⇒ $0 < D(n) < 1$
 - 複数ノードが存在する場合
 - $D(n)$ を隣接ノード数の逆数とすることで 2 ノードの場合と同様の扱いが可能
 - $D(n) = \alpha / nb(n)$, ($0 < \alpha < 1$) とすることで振動を防止

境界条件

- シンクノードの境界条件のみでは不十分
 - 長時間の経過後に、前ノードのポテンシャルがシンクノードのポテンシャルと一致
 - ネットワーク末端のノードのポテンシャルを 0 に設定することが必要
- 追加する境界条件
 - 全てのネットワーク末端のノードのポテンシャルを 0 に設定

$$\forall n \in N_{edge}, \phi(n, t) = 0$$
 - 以下のいずれかの式に該当するノードは自身がネットワークの末端と判断

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

$$\forall k \in nb(n), H(n) \geq H(k) \cap belong(n) = belong(k)$$
 - H と $belong$ は ID に含めて通知

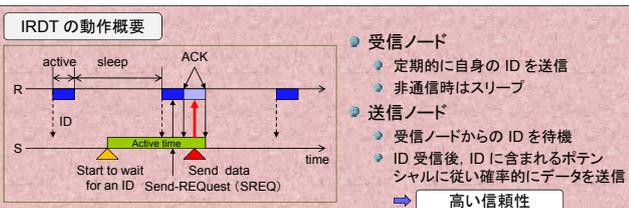
H	: 最も近いシンクノードからのホップ数
nb	: 隣接ノードの集合
$belong$: 最も近いシンクノードの ID

ρ を用いた局所的な最適化

- ρ は以下のアルゴリズムに従い計算される
 - I. 自身の残余電力 $E_{rem}(n)$ および隣接ノードのうち同一ホップのノードの平均残余電力 $E_{avg}(n)$ をそれぞれ求める
 - a. $E_{rem}(n) > E_{avg}(n)$ のとき $\rho = 0$ とする
 - b. $E_{rem}(n) \leq E_{avg}(n)$ のとき II. 以下の処理を行う
 - II. $E_{diff}(n) = E_{avg}(n) - E_{rem}(n)$ を計算する
 - a. 直前のポテンシャルの計算時に $E_{diff}(n)$ を求めていない場合は $\rho = 1.0$ とする
 - b. 直前に $E_{diff}(n)$ を求めていた場合はその値を $E'_{diff}(n)$ として以下の処理を行う
 1. $E'_{diff}(n) > E_{diff}(n)$ の場合は $\rho(n)$ を変化させない
 2. $E'_{diff}(n) \leq E_{diff}(n)$ の場合は $\rho(n)$ に δ を加算する
 - III. $\rho(n) = \rho(n) / |nb(n)|$ とする

MAC 層プロトコルとポテンシャルの通知

- 受信端末駆動型データ通信プロトコル (IRDT)
 - 受信ノードの定期的な端末 ID のブロードキャストにより通信を開始
 - ⇒ ポテンシャルを含めて送ることでポテンシャルの通知に利用
 - 送信ノードは複数の受信ノードと通信が可能
 - メッシュネットワークを構築
 - ID の受信のたびに次ホップノードを選択することが可能



- 受信ノード
 - 定期的に自身の ID を送信
 - 非通信時はスリープ
- 送信ノード
 - 受信ノードからの ID を待機
 - ID 受信後、ID に含まれるポテンシャルに従い確率的にデータを送信
 - ⇒ 高い信頼性

ポテンシャル受信時の確率的な次ホップ選択

- 既存のポテンシャルのほとんどは最小のポテンシャルを持つ隣接ノードを次ホップとして選択
 - ノードの故障や電力枯渇、無線チャンネルの変動に対して脆弱
- 下位層に IRDT を用いることで複数の宛先を柔軟に利用可能
 - ID を受信するたびに次ホップとして選択するかを判断することが可能
 - 自身よりもポテンシャルが低いノードが ID を送ってきた際に以下の式に従う確率で次ホップとして選択

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

- P : 次ホップとして選択する確率
- r : ID を送ってきたノード
- β : 正の定数
- ϕ' : $\phi - \phi(i)$, ノード i は最もポテンシャルの低い隣接ノード
- $small$: 自身よりもポテンシャルの低いノードの集合

主なシミュレーションパラメータ

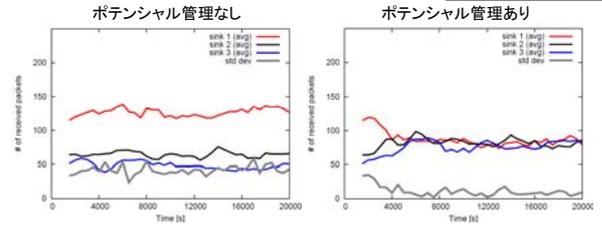
パラメータ名	値
間欠動作周期	1.0 s
パケット発生率	0.003 packet/s/node
通信速度	100 [kbps]
受信時電流	25 [mA]
送信時電流	20 [mA]
スリープ時電流	0 [mA]
ID, SREQ パケットサイズ	40 [byte]
Data パケットサイズ	128 [byte]
ACK パケットサイズ	26 [byte]
シンクノードのポテンシャル管理周期	50 s / 500 s
ポテンシャルの受信周期	100 s
θ	0.3
シンクノードのポテンシャル初期値	-30
シンクノードのポテンシャルの範囲	[-90, -5]

19

シミュレーション結果 - シンクノードの負荷分散 -

データパケット受信個数が等しくなるようにポテンシャルを制御

ポテンシャル管理周期: 500 s
 センサノード数: 150
 シンクノード数: 3
 パケット発生率: 0.003 pkt/s/node



各シンクノードに届くデータパケット個数の均等化を実現

- 理論上平均 75 個のデータパケットがシンクノードに到着
- 収束までに約 6000 s が経過 (制御周期の 12 倍)
- ノード数 1000 の場合と比較して低い標準偏差

20