

# センサネットワークの情報量とエネルギーのトレードオフに関する研究

M2010MM044 渡邊 博功

指導教員：石崎 文雄

## 1 はじめに

近年、無線技術の発達により、センサネットワーク技術が急速に発達している [1]. センサネットワークは元々、戦闘地域の監視など軍事目的や物理的状況を採取することを可能とする無線ネットワークとして開発され、現在では人が立ち入ることが困難な場所における環境調査や交通状況、健康管理などのモニタを目的として用いられている. 今後はユビキタスネットワークの実現に向けた基盤技術のひとつとして注目されている.

センサネットワークは、小型のセンサ、無線装置、情報処理装置を内蔵した多数のセンサノードから構成される. センサノードは他のセンサノードから送られた情報を受信し、その情報を処理し、転送する機能も持っている. 各センサノードは、設置されると自動的に周囲の状況を認識し、認識した情報をもとに自律的にネットワークを構築し、センシングした情報あるいは他のセンサノードから受信した情報を処理して必要なところ (例えばシンクノードと呼ばれるデータ収集地点や基地局) へ送信する.

センサネットワークにおいては、制約のある資源 (例えばセンサノードの電力資源、計算資源、通信資源など) をどのように効率的に利用するかが課題となる. センサノードは、環境の観測などの応用においては通常地理的に散らばって配置されており、場合によっては数百から数千個のセンサノードが広い範囲で存在するため、内蔵されている電源を新しいものと入れ換えることが難しいので、センサノード間のデータ送信時だけでなく、受信時や情報を圧縮する時に消費する電力を極力抑えたい.

本研究では、情報量とエネルギーのトレードオフ (センサネットワーク内の情報量を増加させるとすると、消費エネルギーが増加してしまい、また消費エネルギーを減少させれば、情報量が減少してしまう) について着目し、センサネットワーク内の電力消費について考える. センサネットワーク内で通信される情報量と消費エネルギーのトレードオフについて着目した先行研究として、文献 [2] がある.

この先行研究においては、送信電力を制御し送信レートが調節可能でセンサネットワーク内の送信レートを最大、もしくはセンサネットワーク内の全ての送信レートの合計を一定の値に決め、その際の消費エネルギーを最小にするモデル (非線形) と、全てのリンクで送信レートが固定され、シンクノードへの情報量を最大にする、もしくはシンクノードへの情報量を一定の値に決め、その際の消費エネルギーが最小となるモデル (線形) が考えられている.

しかしながら、定式化の際、データを送信する際のノイズを一定と仮定した定式化が行われており、他のノ

ド間の通信による干渉を一切無視している. この定式化は現実と大きく異なり、通信される情報量と消費エネルギーを過度に楽観的に見積もることになる. 本研究では、他のノード間の通信による干渉も考慮した定式化を行い、その定式化のもとで、ネットワーク内で通信される情報量と消費エネルギーのトレードオフについて調べる.

本研究で考える各モデルにおいて、シャノンの定理を利用し [3], シンクノードへの情報量を固定し、その際に発生する各ノードがデータを送信するの消費エネルギーを最小にする数理計画問題を解く. さらに、いくつかの数値例を通じて情報量と消費エネルギーのトレードオフを詳しく調査する.

## 2 モデル

本研究では、センサネットワークのモデル化のために、よく使われる基本的なグラフ理論モデルである、ユニットグラフモデルを想定し [4], センサノードは均等に配置されていると仮定する. また、データを集めるシンクノードは、均等に配置されているセンサネットワークの外に配置するものとする (図 1). ユニットグラフモデルにおいては、ノード  $i$  とノード  $j$  のユークリッド距離がセンサノードが送信できる半径  $r$  以下であればノード  $i$  とノード  $j$  は隣接し枝で結ばれる. また、枝で結ばれていないノード同士は通信できないとする.

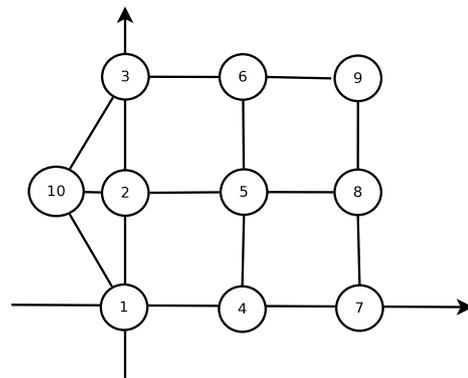


図 1 ユニットグラフの一例

しかし、送信半径  $r$  より離れている場合、通信はできないがノイズは発生する. センサネットワークにおいては、データの送受信は無線を用いて行われるため、全方位に電波を発生させる. たとえ距離が離れていても同じタイミングでデータを送信すれば、微弱な電波として送受信しているノード間に到達しデータに干渉する. 電波は距離の二乗で減衰していくので、送受信をしているノード間に近いほどノイズは強く、遠いほどノイズは弱くなる.

本研究では、ノード間のデータの送受信の際に発生するノイズを想定し、各ノード間の送信レートを変化させた場合と、送信レートを固定し、各ノード間の情報量を変化させた場合の消費エネルギーがどのように変化していくかを調べる。

### 3 定式化

本研究では、各ノード間の送信レートと送信電力を決定変数としたモデルと送信レートをと一定の値にし、各ノード間の情報量と送信電力を決定変数としたモデルの2つを考える。まず、変数の定義から始める。グラフは、 $n$  個のソースノードと  $n+1$  番目のシンクノードで構成される。さらに、ノード  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  においてノード  $i$  と  $j$  間の送信レートを  $f_{ij}$ , 送信する情報量を  $b_{ij}$ , 距離を  $d_{ij}$ , 送信電力を  $P_{ij}$  と表す。さらに、センシングコストを  $\beta$ , 受信コストを  $C$ , 熱雑音を  $\eta$ , 送信半径を  $r$ , シンクノードへの情報量の合計を  $b_{out}$ , データの送受信時間を  $T$  とし、その際の消費エネルギーを最小にする数理計画問題を解く。

#### 3.1 非線形モデル

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n+1} (k_j F + P_{ij}) T \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n+1} f_{ij} - \sum_{j=1}^n f_{ji} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} f_{ij} - \sum_{j=1}^n f_{ji} \leq \alpha \sum_{j=1}^n f_{jn+1} T \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n f_{jn+1} T = b_{out} \quad (4)$$

$$f_{ij} \leq \log\left(1 + \frac{P_{ij} d_{ij}^{-2}}{\eta + \sum_{l=1, l \neq i}^n \sum_{m=1}^{n+1} P_{lm} d_{lj}^{-2}}\right) \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$f_{ij} = 0, P_{ij} = 0 (\text{if } d_{ij} > r), f_{ij} \geq 0, P_{ij} \geq 0$$

$$F = \begin{cases} 1 & (f_{ij} > 0 \text{ のとき}) \\ 0 & (f_{ij} = 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

#### 3.2 線形モデル

送信レートは一定の値なので、新たに変数  $R$  を定義する。

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n+1} (k_j b_{ij} + \frac{P_{ij}}{R} b_{ij}) \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n+1} b_{ij} - \sum_{j=1}^n b_{ji} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} b_{ij} - \sum_{j=1}^n b_{ji} \leq \alpha b_{out} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n b_{jn+1} = b_{out} \quad (9)$$

$$R \leq \log\left(1 + \frac{P_{ij} d_{ij}^{-2}}{\eta + \sum_{l=1, l \neq i}^n \sum_{m=1}^{n+1} P_{lm} d_{lj}^{-2}}\right) \quad (10)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$b_{ij} = 0, P_{ij} = 0 (\text{if } d_{ij} > r), b_{ij} \geq 0, P_{ij} \geq 0$$

ここで、3.1 節の (1) と 3.2 節の (6) の  $k_j$  を

$$k_j = \begin{cases} C & (j = 1, \dots, n \text{ のとき}) \\ \beta & (j = n+1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

とする。

また  $\alpha$  は、センサネットワーク内で特定のノードばかりが送信することの無いよう公平性を追加する変数である。

#### 3.3 目的関数、制約条件

最初に目的関数 (1), (6) について考える。(1), (6) ともに、最初の項は受信にかかるエネルギーを表し、次の項は送信にかかるエネルギーを表している。ここで、(1) の受信にかかるエネルギーは、時間によって変化することがわかる。これは、センサノードが情報を受信する際、受信する情報量が大きくても小さくても、消費するエネルギーは変わらないからである。また、(6) の受信にかかるエネルギーは、受信する情報量によって変化することがわかる。これは、送信レートが一定なので、より多くの情報量を受信するノードが、受信に多くの時間を必要とするためである。

次に制約条件 (5), (10) について考える。制約条件 (5), (10) は、シャノンの定理に各センサノードが情報を送信する際に発生するノイズを加えたものである [3]。

ここで、ノイズである

$$\eta + \sum_{l=1}^n \sum_{m=1, m \neq l}^{n+1} \frac{P_{lm}}{d_{lj}^2} \quad (11)$$

に焦点を当てて考える。

$\eta$ は熱雑音であり、データの送受信をせずとも発生してしまうものなので、一定の値である。次の項は、ノード  $i$  がノード  $j$  に送っている時に他のノードがデータを送信する際に発生するノイズの合計である。ただし、 $l \neq i$  である。何故なら、 $l=i$  の時に、ノード  $i$  からノード  $j$  にデータを送信しているときに発生する電波もノイズとして扱ってしまうからである。また、ノード  $l$  からノード  $m$  にデータを送信しているの、電力は  $P_{lm}$  で表すことが出来るが、ノイズが減衰していく距離は  $d_{lj}$  となる。受信するノードは  $j$  なので、もし減衰していく距離を  $d_{lm}$  とした場合では、ノード  $j$  がノード  $m$  より近いとノード  $j$  で受けるノイズが実際よりも小さく見積られるからである。逆にノード  $j$  がノード  $m$  より遠かった場合では、ノード  $j$  で受けるノイズが実際よりも大きく見積られる。なので、 $\sum_{l \neq i}^n \sum_{m=1}^{n+1} P_{lm} d_{lj}^{-2}$  がノイズの数式となる。また、制約条件 (5), (10) では、 $d_{ij} = 0$  の場合や、 $d_{lm} = 0$  の場合、 $d_{lj} = 0$  の場合は、その項自体を 0 と考える。

## 4 実行結果

本研究では、第2章の図1のノード数10のネットワークと、図2のノード数16のネットワークについて考え、MATLABのOptimization toolboxの内点法[5]を使用して第3章で定式化した2つの数理計画問題を解いていく。

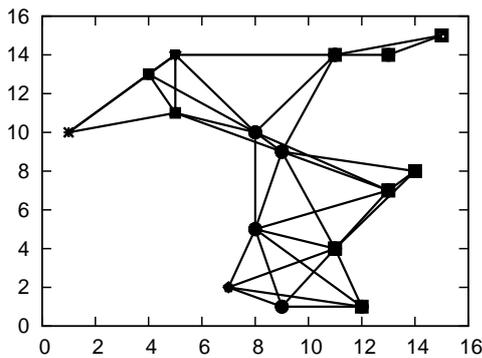


図2 想定するネットワーク (ノード数16)

まず、想定する図1のネットワークの構成を考える。シンクノードは座標  $(-3, 5)$  に配置し、9個のセンサノードは  $[0, 10]^2$  の正方形内に均等に配置するとする。

次に図2のネットワークの構成を考える。シンクノードは座標  $(15, 15)$  に配置し、15個のセンサノードは  $[0, 15]^2$  の正方形内にランダムに配置するとし、全てのセンサノードは、間接的にでも他の全てのセンサノードと通信ができるとする。

想定したネットワークにおいて、第3章で定義した非線形モデルと線形モデルの数理計画問題に含まれているパラメータを  $\alpha = 0.15$ ,  $\beta = 0.00001$ ,  $C = 0.001$ ,  $\eta = 0.0001$ ,  $r = 6.0$ ,  $T = 1$  と設定し、数理計画問題を解く。

しかし、本研究で定式化した問題は非線形の数理計画問題である。非線形数理計画問題は、初期値によって局所解に陥る可能性がある。実際、何度か同じプログラムを実行しても違う結果が出てきた。その為、最小のエネルギーを求めることは難しい。そこで、初期値を  $[0, (\text{シンクノードへの情報量})]$  の範囲からランダムに決め、150回同じプログラムを実行し、その中の最小値を取ることとする。

### 4.1 非線形モデル

第3章で定義した非線形モデルをソルバーを用いて解いた結果と文献[2]で定式化されていた数理計画問題をソルバーを用いて解いた結果を図3と図4に示す。図3はノード数10のときの、図4はノード数16のときのものである。

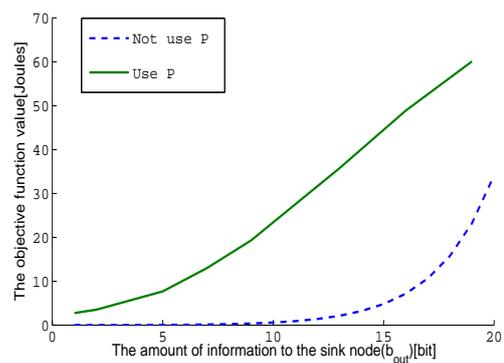


図3 非線形モデル (ノード数10)

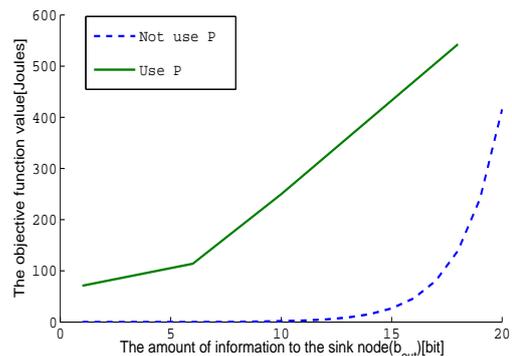


図4 非線形モデル (ノード数16)

図3と図4の横軸はシンクノードへの情報量 ( $b_{out}$ )、縦軸は目的関数の値であり、“Not use P”が自然発生のみを考慮に入れた場合、“Use P”がセンサノードの送受信の際に発生するノイズも考慮した場合のグラフである。

### 4.2 線形モデル

第3章で定義した線形モデルをソルバーを用いて解いた結果と文献[2]で定式化されていた数理計画問題をソルバーを用いて解いた結果を図5と図6に示す。図5は

ノード数 10 のときの、図 6 はノード数 16 のときのものである。また、送信レート  $R = 0.05$  とする。

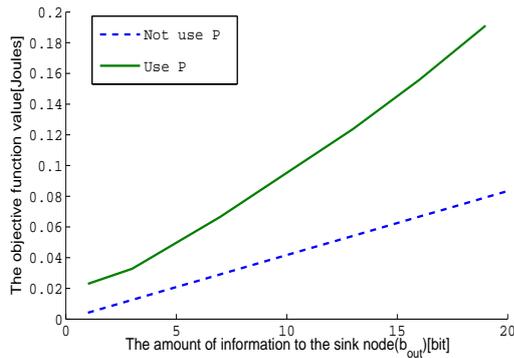


図 5 線形モデル (ノード数 10)

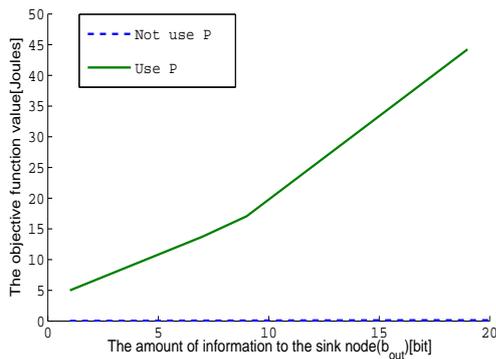


図 6 線形モデル (ノード数 16)

図 5 と図 6 の横軸はシンクノードへの情報量 ( $b_{out}$ )、縦軸は目的関数の値であり、“Not use P”が自然発生ノイズの影響のみを考慮に入れた場合、“Use P”がセンサノードの送受信の際に発生するノイズも考慮した場合のグラフである。

### 4.3 考察

非線形のモデル、線形モデルともに右上がりのグラフとなっている。4つのグラフを見てみると、どのグラフもセンサノードの送受信の際に発生するノイズも考慮した場合のほうが消費電力が大きくなっていることがわかる。このことから、現実で考えると自然発生ノイズのみの考慮では消費電力を少なく見積もりすぎており、センサノードを交換する時期を計算する際に、本来の時期より遅い段階で入れ替える結果になり、センサネットワークから孤立してしまうセンサノードが出てきてしまう可能性がある。また、ランダムにセンサノードを配置したネットワークのほうが大幅に消費電力が大きくなった。これは、単純にセンサノードの数が多くなったのとセンサノード間の距離が近いものもあれば離れているものもあるので、データの送受信が均等に配置されたネットワークと比べ効率が悪いためであると考えられる。

## 5 まとめと今後の課題

センサネットワークにおいては、センサノードの制約のある資源を、どう効率良く利用するかが課題となる。その中でも、情報量とエネルギーのトレードオフの関係に着目した。情報量とエネルギーのトレードオフの関係についての先行研究として、文献 [2] があるが、センサネットワークでのデータを送受信する際にノイズを熟雑音しか考えていない定式化をしていた。本研究では、他のノード間の通信によって発生するノイズの影響も考慮した定式化を行い、より現実に近い状況を想定し情報量と消費電力の関係を調べた。関係を調べるために、非線形モデルと線形モデルの2つの定式化した数理計画問題を、第2章の図1と第4章の図2のネットワークで解き、先行研究との比較を行った。

その結果、センサノードの送受信の際に発生するノイズも考慮に入れた場合の消費電力のほうが、自然発生ノイズしか考慮しない場合の消費電力より大きくなった。このことから、自然発生ノイズしか考慮しない場合は、センサノードの消費電力を少なく見積もっている為、センサノードを入れ替える時期が本来の時期より遅い段階で入れ替える結果になり、センサネットワークから孤立してしまうセンサノードが出てきてしまう可能性があるため、現実的ではないということがわかった。また、ランダムにセンサノードを配置したネットワークのほうが大幅に消費電力が大きくなった。これは、センサノードの数が増えたことと、センサノード間の距離が近いものもあれば離れているものもあるので、データの送受信が均等に配置されたネットワークと比べ効率が悪いということもわかった。

## 参考文献

- [1] T.Furuta, M.Sasaki, F.Ishizaki, A.Suzuki, H.Miyazawa, “A new clustering model of wireless sensor networks using facility location theory,” Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol.52, pp. 366-376, 2009.
- [2] B.Krishnamachari, F. Ordonez, “Fundamental limits of networked sensing,” Wireless Sensor Networks Edited by C.S.Raghavendra, K.M.Sivalingam and T.Znati Springer, 2004.
- [3] A.Behzad ,I.Rubin, “Optimum integrated link scheduling and power control for multihop wireless networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.56, pp. 194-205, 2007.
- [4] J. C. Hou, N. Li and I. Stojmenović, “Topology construction and maintenance in wireless sensor networks,” Handbook of sensor networks algorithms and architectures, Wiley, 2005.
- [5] 制約付き非線形最適化アルゴリズム :: 最適化アルゴリズムと例 (Optimization Toolbox), “[http://www.mathworks.co.jp/help/ja\\_JP/toolbox/optim/ug/brnoxzl.html](http://www.mathworks.co.jp/help/ja_JP/toolbox/optim/ug/brnoxzl.html),” MathWorks, 2012.