

# ワイヤレスセンサネットワークにおけるセンサ数の決定問題

M2010MM006 長谷川遼太

指導教員：鈴木敦夫

## 1 はじめに

本研究では、ワイヤレスセンサネットワーク（以後センサネットワーク）におけるセンサ数の決定を行う。その際、センサ機能による領域の被覆と通信機能によるネットワークの構築を考慮する。

センサネットワークとは、センサ付無線端末のネットワークのことである。領域内にセンサネットワークを設置することで、環境や物理的状況のデータ（温度、光、音、湿度など）を収集することができる。遠隔の情報をリアルタイムで収集することができるため、様々な場面で利用が期待されている。例えば、森林火災への対策 [3] である。まず事前に森林の中にセンサネットワークを設置する。そして、森林で火災が発生した時に火災の発生源をすぐに特定することが出来る。そのため、早期に鎮火作業をすることができ、被害を抑えることが可能となる。他には、病院での患者の健康管理や野生生物の観察、戦場での戦略などがある [3]。

近年、技術の発達によりセンサは小型化され、さまざまなアプリケーションのセンサ上での利用が可能となっている。そのため、以前に比べてセンサネットワークはより実用的となった。しかし、センサには通信機能やバッテリーなどの機能面での問題がある。センサネットワークのこうした制約を考慮した研究も多くされている [3]。

センサネットワークでは、センサ機能により周辺のデータを収集し、通信機能によるネットワークで利用者に収集した情報を伝達する。そして、センサのセンサ機能と通信機能が届く範囲は、どちらも有限である。そのため、配置されるセンサ数が不足しているとデータの収集や情報の伝達が出来なくなり、センサネットワークとして機能しない。しかし、センサネットワークとして機能させるために大量にセンサを配置すれば、以下のような問題が発生する。

- 同時に通信するセンサ数の増加による、干渉の発生
- 干渉が原因で発生する再送信などの通信回数増加による、バッテリーの消耗
- 必要なコストの増加
- 環境に悪影響を与える可能性

そのため、領域に配置されるセンサ数は適量が望ましい。

領域の被覆とネットワークの構築を確保するセンサ数の計算は、過去にもされている [2]。しかし、[2]の研究の評価指標では実際より過大評価となっている。そのため、実用的なセンサ数の見積が出せない。また、他の研究の評価指標でも適量のセンサ数の見積が出せず、決定的な解法が見つからなかった。そこで、本研究では、センサネットワークの領域の被覆とネットワークの構築を確保するセンサ数の評価指標を作る。このとき、領域の被覆とネットワークの構築はそれぞれ別で考える。

## 2 研究の準備

問題の設定を行う。本研究ではセンサネットワークを設置する領域は正方形であるとする。また、研究内の数値実験時は単位正方形で考える。また、センサはヘリコプターなどで領域の上空から撒かれると仮定し、一様にランダムで配置されるとする。そして、センサのセンサ機能と通信機能が届く範囲は、センサを中心とした半径固定の円であるとする。このとき、センサのバッテリーや風の影響など、その他の要因は一切考慮しない。ここでカバー率と連結状態という2つの要素を定義する。

カバー率は、センサのセンサ機能によって領域が被覆されている割合と定義する。カバー率の例を図1に示す。正方形内が対象領域、各点がセンサ、センサの周囲の円内が被覆されている領域である。図1の左図は、領域の全体が被覆されているのでカバー率が高く、理想的な状態である。また、図1の右図は、領域が疎らにしか被覆されておらず、カバー率は低い。

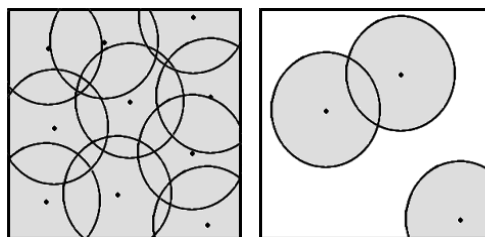


図1 カバー率の例

連結状態とは、センサが通信可能な距離以下で、領域内の全てのセンサが1つの構造木となることが出来る状態と定義する。連結状態の例を図2に示す。正方形内が対象領域、各点がセンサ、連結であるセンサ間は線で繋がっている。図2の左図は、全てのセンサが一定の距離以下で1つの構造木となっているため連結状態であり、望ましい状態である。また、図2の右図は、センサが1つの構造木となっていないため、連結状態ではない。

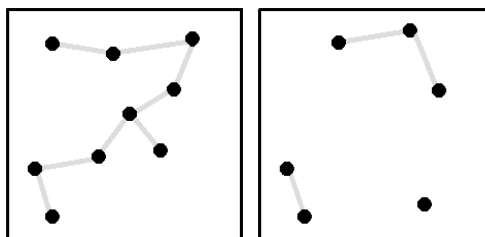


図2 連結状態の例

上記のカバー率と連結状態となることを考慮し、センサ数を計算する。また、計算を行う際には [2]の研究に注目し、研究を進める。

### 3 カバー率を考慮したセンサ数の決定

#### 3.1 過去の研究

センサネットワークのカバー率のみに注目して考える。ここではセンサのセンサ機能が届く範囲の半径（センサ距離）を  $r_s$  とする。[2]では、領域内に一様にランダムで  $O(\frac{3}{r_s} \log \frac{3}{r_s} + \frac{1}{r_s} \log \frac{1}{\sigma})$  個だけセンサを配置する場合を考えている。このとき、少なくとも  $(1-\sigma)$  の確率で領域のほぼ全体が被覆されるとしている。

#### 3.2 新しい評価指標の提案

[4]の最近隣距離の分布関数によりカバー率を考慮したセンサ数の見積を行う。最近隣距離の分布は式(1)の通りである。

$$F_1(r_s) = 1 - e^{-\rho\pi r_s^2} \quad (1)$$

最近隣距離とは、「平面に点が分布しており、さらにこの平面の任意の位置に点Qをとり、点Qから最も近い他の点までの距離R」[4]のことをいう。式(1)では、点が密度  $\rho$  でポアソン分布にしたがって分布している場合、半径  $r_s$  以内に少なくとも1つは他の点がある確率を意味する。任意の点Qから  $r_s$  以内に他の点があるということは、相手の点から考えても  $r_s$  以内に点Qは存在する。つまり、式(1)は点Qが他の点が被覆している領域内にある確率と考えられるので、式(1)の確率がそのままカバー率を表す。本研究では一定のカバー率を確保するのに必要なセンサ数の見積を出すことが目的である。そのため、式(1)をセンサ数の関数へ変形し、式(2)を得る。 $P_{cov}$  がカバー率、 $n$  がセンサ数、 $S$  は対象とする領域面積である。

$$n = \frac{-S \log(1 - P_{cov})}{\pi r_s^2} \quad (2)$$

#### 3.3 シミュレーションによる評価指標の性能の比較

[2]の研究と式(2)で見積もったセンサ数でそれぞれカバー率を求めるシミュレーションを行い、精度を確かめる。シミュレーションは、センサでポロノイ図を作り、センサとポロノイ点間の角度とセンサ距離を利用し、面積を計算する。ここでは、面積を1,000回求めた結果の平均を使用する。比較した結果は表1の通りである。表1は、単位正方形を99%被覆する場合である。表1から、式(2)が高い精度でセンサ数の見積が出来ている。そのため、カバー率を考慮するセンサ数の見積には、最近隣距離の分布である式(2)を使う。

表1 領域の被覆に必要なセンサ数の見積の比較

センサ距離 [r]	過去の研究		最近隣距離	
	センサ数	カバー率	センサ数	カバー率
0.100	148.08	98.12%	146.59	97.87%
0.075	208.95	96.40%	260.60	98.07%
0.050	337.76	91.73%	586.35	98.33%
0.025	758.70	76.59%	2345.39	98.67%

### 4 連結状態となるセンサ数の決定

#### 4.1 過去の研究

センサネットワークが連結状態であるかのみ注目して考える。センサの通信可能な範囲の半径（通信距離）を

$r_t$  とする。[2]の研究では、連結状態となるのに必要なセンサ数を見積もるのに、式(3)を利用している。

$$P_{con}(r_t) = (1 - e^{-\rho\pi r_t^2})^n \quad (3)$$

式(3)は、最近隣距離の最大値の分布を表している。最大値の分布とは、ある分布関数に従い  $n$  個のデータをサンプリングしたときの最大値、を表す分布である。式(3)は、 $n$  個のセンサを密度  $\rho$  で配置したとき、センサ間の最近隣距離の中で最大である長さを表す分布である。[2]の研究では、全てのセンサが半径  $r_t$  以内に少なくとも1つは他のセンサがある状態であれば、センサが連結状態になると考えている。

#### 4.2 最小木についてのシミュレーション

式(3)によるセンサ数の見積の精度を、シミュレーションにより確かめる。本研究では、センサにより最小木を構築し、その中で最大の枝長が  $r_t$  以下であれば、センサは連結状態であると考えられる。最大の枝長が  $r_t$  以下であれば、当然、全センサが距離  $r_t$  以下で1つの構造木となるからである。シミュレーションでは、センサを一様にランダムに配置し、最小木を構築する。その後、最小木の中で最大の枝長を調べる。以上の試行を10,000回繰り返して、調べた枝長を累積して式(3)と比較する。比較した結果は、図3の通りである。図3はセンサの密度が1,000（個/領域面積）の場合である。

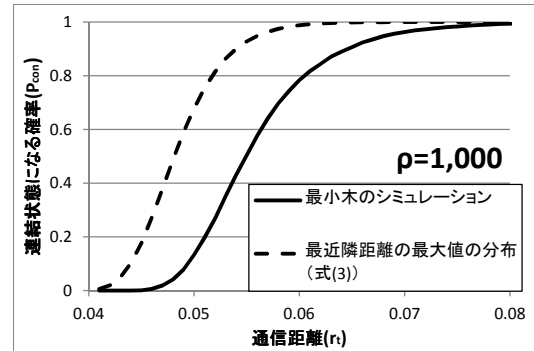


図3 最近隣距離の最大値の分布と最小木についてのシミュレーションの比較

#### 4.3 過去の研究の問題点と考察

図3より、式(3)は最小木の最大の枝長より通信距離が短い分布である。よって、最近隣距離の最大値の分布では、センサが連結状態となることを示すことは難しいと考える。ここで、連結状態を表すことが難しいと考えられる原因を2つ示す。

##### 4.3.1 最近隣の枝だけで連結状態とならない可能性

最小木を構成する枝が最近隣の辺だけではないことが、古山の研究[1]により分かっている。実際には、最小木を構成する枝には第2近隣や第3近隣、それ以降の近隣辺も含まれる。そのため、最近隣距離の最大値の分布では、連結状態であることを示すことができない。ここで、シミュレーションにより最小木の枝の構成比を調べる。シ

ミュレーションでは、ランダム配置した点で最小木を作り、その最小木の枝が何番目に近い点を結んだ辺であるかの割合を調べる。各センサの密度に対し 10,000 回調べた結果の平均が表 2 となる。表 2 より、最近隣の辺は最小木の枝の 7 割程度でしかないことが分かる。また、最小木の枝の構成比はセンサの密度にほとんど左右されていない。

表 2 最小木を枝の構成比

センサの密度	第n近隣の辺の割合			
	1	2	3	4以上
100	69.64%	21.54%	6.55%	2.27%
1000	68.97%	22.28%	6.70%	2.05%
10000	68.84%	22.52%	6.70%	1.95%

#### 4.3.2 領域の境界の影響を考慮していない点

最近隣距離の分布はポアソン分布にしたがっているため、対象領域は無限領域である。しかし、現実には対象領域は有限領域である。そのため、図 4 のような状態になる可能性がある。

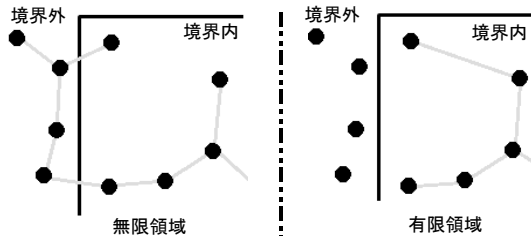


図 4 境界による影響

図 4 は、センサが無限領域と有限領域に配置された場合の、最小木の構築方法の差を表す。図の各点はセンサ、最小木の枝はセンサ間を線で繋いで表している。図 4 の左図では無限領域に配置されたセンサで最小木を構築している。図 4 の右図では、無限領域から領域を切り取り、その内部のセンサで最小木を構築している。そのため、領域の境界の外にあるセンサとは最小木を構築できない。つまり、境界付近のセンサは実際のセンサの密度よりも低い状態になっていると考えられる。そのため、実際は無限領域で考えたときより遠いセンサ同士で構造木を作ることになる。これより、無限領域の時よりも必要な通信距離が長くなる可能性がある。

#### 4.4 最近隣距離の分布を利用した評価指標の作成

最小木の枝長の分布を計算することは非常に難しい。そのため、最近隣距離の分布を利用し、最小木の枝長に近い分布を作ることによってセンサ数の評価指標を作る。

##### 4.4.1 第 2 近隣距離の分布

最近隣距離の最大値の分布では最小木の枝長より短い分布となった。そこで、第 2 近隣距離の最大値の分布を使用する。最近隣距離は最も近い点までの距離を表すが、第 2 近隣距離は 2 番目に近い点までの距離を表す。第 2 近隣距離の分布と、その最大値の分布は、式 (4)、式 (5)

の通りである。

$$F_2(r_t) = 1 - e^{-\rho\pi r_t^2} - \rho\pi r_t^2 e^{-\rho\pi r_t^2} \quad (4)$$

$$P_{con} = (1 - e^{-\rho\pi r_t^2} - \rho\pi r_t^2 e^{-\rho\pi r_t^2})^n \quad (5)$$

##### 4.4.2 境界の影響を考慮した最近隣距離の分布

センサを境界付近に配置すると、境界の外に通信可能な範囲が出る。通信可能な範囲の面積の変化に合わせ、図 5 のように領域を分割して考える。式 (3) では確率全体か

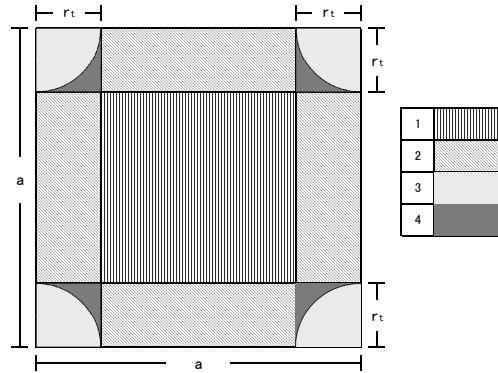


図 5 領域の分割

ら、面積  $\pi r_t^2$  内に点が 1 つもない確率を引いて計算をしている。ここで、面積  $\pi r_t^2$  を、領域の境界を考慮したときの、センサの通信範囲の面積の期待値として計算を行う。次に、配置されるセンサ数は、一様にランダムで配置することより、その領域の面積比に比例することを考慮する。各領域の面積と、その領域にセンサが配置された場合の通信範囲の面積の期待値を式 (6)～式 (13) に示す。このとき、領域全体の一辺を  $a$ 、領域  $i = \{1, 2, 3, 4\}$  の面積を  $S_i$ 、領域  $i$  にセンサが配置された場合の通信範囲の面積の期待値を  $C_i$  とする。

$$S_1 = (a - 2r_t)^2 \quad (6)$$

$$S_2 = 4r_t(a - 2r_t) \quad (7)$$

$$S_3 = \pi r_t^2 \quad (8)$$

$$S_4 = (4 - \pi)r_t^2 \quad (9)$$

$$C_1 = \pi r_t^2 \quad (10)$$

$$C_2 = r_t^2\left(\pi - \frac{2}{3}\right) \quad (11)$$

$$C_3 = \frac{r_t^2}{2\pi}(\pi^2 + 1) \quad (12)$$

$$C_4 = \frac{r_t^2(4\pi - \frac{\pi^2}{2} - \frac{16}{3})}{4 - \pi} \quad (13)$$

式 (6)～式 (13) を利用し、式 (3) を境界を考慮して変形すると、式 (14) の通りとなる。

$$\begin{aligned} P_{con} &= \prod_{i=1}^4 F_1(r_t)^{\frac{nS_i}{a^2}} \\ &= \prod_{i=1}^4 (1 - e^{-\rho C_i})^{\frac{nS_i}{a^2}} \end{aligned} \quad (14)$$

#### 4.4.3 境界の影響を考慮した第2近隣距離の分布

4.4.2の境界の影響を考慮した計算を、4.4.1の第2近隣距離の分布で行う。実際の分布は式(15)に示す。

$$P_{con} = \prod_{i=1}^4 F_2(r_t) \frac{nS_i}{a^2} = \prod_{i=1}^4 (1 - e^{-\rho C_i} - \rho C_i e^{-\rho C_i}) \frac{nS_i}{a^2} \quad (15)$$

#### 4.4.4 最小木の枝の構成比を利用した分布

最小木の枝の構成比を再現することを考えて、表2を利用する。実際には、センサ数の69%を最近隣距離、22%を第2近隣距離、7%を第3近隣距離、2%を第4近隣距離の分布として計算する。計算した評価指標の分布は式(16)の通りである。また、各近隣距離の分布は式(17)～式(20)の通りである。

$$P_{con} = F_1(r_t)^{0.69n} F_2(r_t)^{0.22n} F_3(r_t)^{0.07n} F_4(r_t)^{0.02n} \quad (16)$$

$$F_1(r_t) = 1 - e^{-\rho\pi r_t^2} \quad (17)$$

$$F_2(r_t) = F_1(r_t) - \rho\pi r_t^2 e^{-\rho\pi r_t^2} \quad (18)$$

$$F_3(r_t) = F_2(r_t) - \frac{(\rho\pi r_t^2)^2}{2} e^{-\rho\pi r_t^2} \quad (19)$$

$$F_4(r_t) = F_3(r_t) - \frac{(\rho\pi r_t^2)^3}{6} e^{-\rho\pi r_t^2} \quad (20)$$

#### 4.5 各評価指標の比較と考察

各評価指標と最小木についてのシミュレーション結果を比較したグラフを図6に示す。

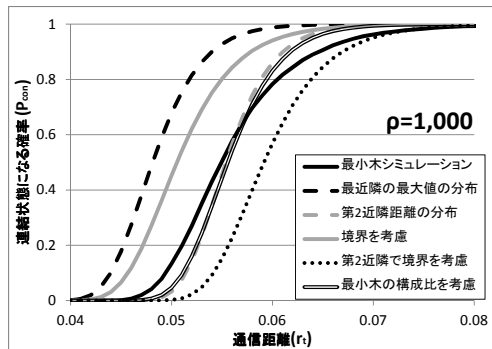


図6 各評価指標と最小木シミュレーションの比較

図6のグラフの中で、境界の影響を考慮した第2近隣距離の分布だけが、最小木によるシミュレーションの結果を上から抑えることができている。また、連結状態となる確率が95%以上では、かなり分布は近くなっている。そのため、本研究では、式(15)の境界の影響を考慮した第2近隣距離の分布を、連結状態となるのに必要なセンサ数の評価指標とする。

本研究では連結状態となることを考慮したセンサ数の見積を出したい。しかし、式(15)からセンサ数の関数を作るとは難しい。そこで、連結状態となる確率が99%の

とき、センサの通信距離から、必要なセンサの密度の目安となるグラフを近似的に作る。実際には、式(15)で確率が99%となるようなセンサの密度を、通信距離を0.01刻みで計算する。計算した値を基に曲線を描くことで、近似的に連結状態となるのに必要なセンサ数のグラフを作る。グラフは図7の通りである。

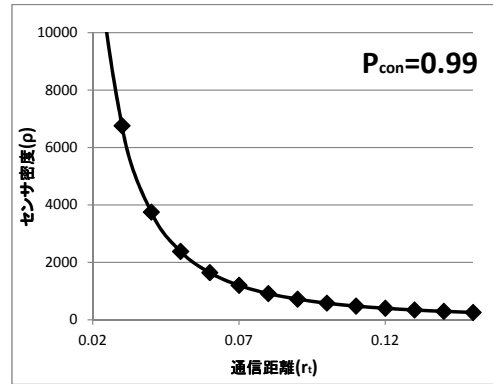


図7 連結状態となるのに必要なセンサ数の目安

## 5 まとめ

本研究では、センサネットワークのカバー率と連結状態となることを考慮したセンサ数の評価指標を作成した。

カバー率を確保するために必要なセンサ数は、高い精度で見積を出すことができた。また、連結状態を確保するセンサ数の見積は、連結状態になる確率が95%以上では高い精度で見積を出すことができた。

連結状態になる確率を最近隣距離の分布を使用し、より正確にセンサ数の見積を出すことは難しいと考える。そのため、より正確にセンサ数の見積を出すには、全く別の分布を作ること必要であると考えられる。また、本研究では対象とする領域を正方形としたが、現実には領域の形は様々な場合が考えられる。式(15)では、正方形の領域でしか見積ができないので、一般化した評価指標を考える必要があると考える。

## 参考文献

- [1] 古山正雄：地域間ネットワークにおける最短結合と近隣結合に関する理論的考察。都市計画論文集 Vol.38-3, 2003.
- [2] Volkan Isler, Sampath Kannan, Kostas Daniilidis: Sampling Based Sensor-Network Deployment, Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai Japan, pp.1780-1785, 2004.
- [3] Ivan Stojmenovic: Handbook of Sensor Networks Algorithms and Architectures, Wiley Interscience, 2005.
- [4] 谷村秀彦, 梶秀樹, 池田三郎, 腰塚武志：都市計画数理。朝倉書店, 東京, 1986.