

無線マルチホップネットワークにおける 隣接関係を保存する無線ノード配置推定手法

伊藤 啓^{†1} 桧垣 博章^{†1}

無線マルチホップネットワークにおいて、各無線ノードの位置を推定する手法が提案されているが、その多くが位置が既知の基準ノードからの距離に基づいて各無線ノードの位置を独立に推定する。この方法では、個々の推定誤差が小さくても無線ノード対の隣接関係が保存されないために、ルーティング等の応用において誤りを生じることがある。本論文では、隣接関係を保存する位置推定を実現するために、隣接関係から導かれる無線ノード位置を未知数とする連立不等式をより小さな計算量で解く手法を提案する。ここでは、直線上に配置された無線ノード集合を対象とし、隣接関係では位置関係を特定できない無線ノード集合をひとつの無線ノードへ集約し、集約された無線ノードの列を推定した上で充足すべき連立不等式を解く問題へと変換することにより計算量を削減している。

Estimation of Ad-Hoc Network Topology Preserving Neighbor Relations among Nodes

KEI ITOH^{†1} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

In wireless multihop networks, various methods for estimation of locations of wireless nodes have been proposed. Most of them estimate the location of each wireless node independently of the others. Hence, even though the error of the estimation is so small, the neighbor relations among the wireless nodes are not always preserved. This paper proposes a novel method of location estimation in which neighbor relations among the nodes are preserved. Here, for reduction of computational complexity, before calculation of the locations, the sequence of wireless nodes on a line is estimated.

1. はじめに

複数の無線ノードがマルチホップ配送機能を用いてデータメッセージを交換するアドホックネットワーク等の無線マルチホップネットワークでは、データメッセージの無線マルチホップ配送のためのルーティングや位置情報サービス等のアプリケーションの実現、無線ノード群の配置状況（配置範囲や配置密度）把握のために、無線ノードの位置や無線ノード間の位置関係を活用する。各無線ノードの位置情報取得デバイスとして GPS (Global Positioning System) の使用を前提とする手法が提案されているが、Smart Dust²⁾ のような安価で小型軽量のセンサノードを散布配置する場合や GPS 衛星からの信号受信が困難な屋内配置無線ノードから構成される無線マルチホップネットワークでの適用は困難である。そこで、本論文では、各無線ノードがノード ID を無線信号到達範囲に定期的にブロードキャスト送信することによって検出された隣接無線ノード集合の情報のみを用いて、その隣接関係を保存した無線ノードの配置を推定する手法を提案する。

2. 関連研究

移動無線ノードから構成されるアドホックネットワーク等の無線マルチホップネットワークでは、無線ノードの自律移動や外力による移動等によってその位置が経時的に変化する。また、各無線ノード位置が必ずしも経時変化しないセンサネットワーク等においても、それを構成する無線ノードをあらかじめ定められた位置に正確に配置するのではなく、散布等の手段によって初期配置することが多い。このような環境において、GPS デバイスを搭載しない各無線ノードの位置を取得する手法として、基地局等の固定無線ノードや GPS 等の位置取得デバイスを備えた少数の基準無線ノードを使用する手法が提案されている。

これらの多くは、各無線ノード N_i と複数の基準無線ノード B_j との距離 $|N_i B_j|$ を推定し、多辺測量 (Multilateration) によって各無線ノード位置を推定するものである。AHL^{LoS}⁶⁾ と論文⁸⁾ の手法では、各無線ノードと基準無線ノードとの間の 1 ホップ通信によって距離を推定する。AHL^{LoS} では、基準無線ノードから同時に送信された無線信号の無線ノードへの到達時間差を用いる。また、論文⁸⁾ の手法では、基準無線ノードから送信された無線信号の受信強度を用いる。これらの手法では、複数の基準無線ノードからの無線信号が到達可能な領域にある無線ノード位置のみが推定できることから、多数の基準無線ノードを設置する、位置推定を終えた無線ノードをも基準無線ノードに加える、等の手法を適用している。ただし、前者は高い設置コストを要し、後者は推定位置の誤差が拡大する問題がある。一方、DV-Hop⁵⁾ および HV 手法⁷⁾ では、複数の基準無線ノードと各無線ノードとの間で制御メッセージを無線マルチホップ配送し、その配送ホップ数から無線ノード位置を推定す

^{†1} 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

る。無線マルチホップ配送を用いることから、基準無線ノード密度が比較的低い環境への適用が考慮されている。

これらの手法では、各無線ノード N_i の位置を他の無線ノード N_j とは独立に推定している。このため、図1のように N_i と N_j が互いに隣接無線ノードであるにも関わらずノード間距離が無線信号到達距離よりも大きく推定されたり、 N_k と N_l が互いに隣接しない無線ノードであるにも関わらずノード間距離が無線信号到達距離よりも小さく推定されることがある。すなわち、無線ノード N_i と N_j の位置をそれぞれ x_i 、 x_j 、 N_i と N_j の推定位置をそれぞれ $x_i + \Delta x_i$ 、 $x_j + \Delta x_j$ 、無線信号到達距離を R とするとき、 $\|x_i - x_j\| \leq R$ であるにも関わらず $\|(x_i + \Delta x_i) - (x_j + \Delta x_j)\| > R$ となったり、 $\|x_i - x_j\| > R$ であるにも関わらず $\|(x_i + \Delta x_i) - (x_j + \Delta x_j)\| \leq R$ となることがある。無線ノードの隣接関係は、無線マルチホップネットワークにおける基本的な性質であり、データメッセージのルーティング等に大きな影響を与える。特に GPSR³⁾、GEDIR⁴⁾、FACE¹⁾ などのノード位置情報を用いるルーティングプロトコルを各無線ノードの推定位置に基づいて適用する場合、推定位置が隣接関係を保存していない場合には正しくデータメッセージをルーティングすることができない。

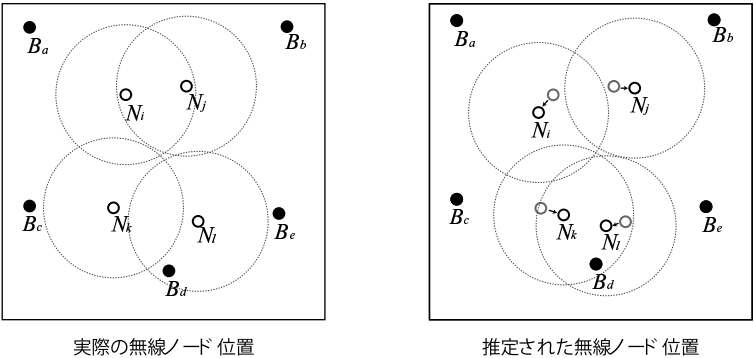


図1 隣接関係の保存できないノード位置推定

そこで、シミュレーション実験により、各無線ノード位置を独立に推定した場合に隣接関係が保存できない場合がどれだけ発生するかを評価する。ここでは、100m × 100m の正方形領域に無線信号到達距離が 10m の無線ノードを一様分布乱数に基づいてランダムに配置する。位置推定対象の無線ノード数を 200–300 台、位置が既知である基準ノード数を 10–90 台とし、DV-Hop を用いて各無線ノード位置を推定したとき、隣接関係が保存できない無

線ノード対の数を計測した。実験結果を図2に示す。隣接関係を保存できない無線ノード対の数は推定対象無線ノード数が多く、ノード密度が高いほど多く、基準ノード数が多いほど少なくなる。これは、基準ノードの増加にともなってホップ数が減少し、推定誤差が縮小することによるものであると考えられる。しかし、5–35 対程度の無線ノード対で隣接関係が保存されていないことが示されている。したがって、無線ノード位置の推定においては、無線ノード間の隣接関係を保存することが求められる。このため、無線ノード位置の推定においては、無線ノード間の隣接関係を保存することが強く求められる。

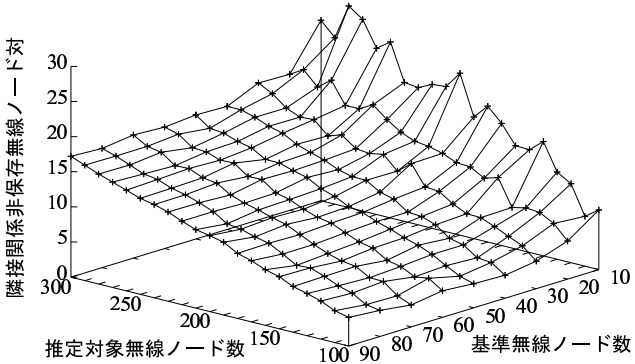


図2 従来手法による無線ノード位置推定

3. 隣接関係に基づく配置推定手法

3.1 問題点

本論文では、無線マルチホップネットワークにおける無線ノード位置推定における前章で述べた問題点 (1) 位置情報を取得済み (位置が固定であるものを含む) の無線ノードを多数必要とする、(2) 推定位置が無線ノード間の隣接関係を保存するとは限らない、を解決する手法を提案する。ここでは、位置情報を取得済みの無線ノードが存在しないことを前提とし、無線ノード間の隣接関係のみに基づいて無線ノードの配置を推定する。

各無線ノードには、IP アドレス等の識別子があらかじめ付与されているものとする。また、各無線ノードの無線信号到達距離 R は等しいものとする。さらに、無線マルチホップネットワークに含まれるすべての無線ノードは、無線マルチホップ配送によってメッセージを互いに到達させることが可能であることを前提とする。互いに到達不能である無線ノード

対が存在する場合には、互いに到達可能な無線ノード群から構成される複数の無線マルチホップネットワークに分割し、それぞれに対して提案手法を適用する。このとき、これらの分割された無線マルチホップネットワーク間の位置関係を推定することはできない。

無線ノード N_i が自身の識別子を含むビーコンメッセージを定期的にブロードキャスト送信すると、 N_i の無線信号到達範囲に含まれるすべての隣接無線ノードがこれを受信し、 N_i の識別子を取得することができる^{*1}。すなわち、無線ノード N_j が N_i の識別子を含むビーコンメッセージを受信することによって、 N_j は N_i が隣接無線ノードであることを検出することができる。したがって、 N_i, N_j の位置をそれぞれ x_i, x_j とすると、このビーコンメッセージの受信によって $\|x_i - x_j\| \leq R$ が成り立つことが検出される。一定時間継続したビーコンメッセージ交換の結果から、無線マルチホップネットワークの任意の無線ノード N_i, N_j の位置 x_i, x_j について、 $\|x_i - x_j\| \leq R$ または $\|x_i - x_j\| > R$ のいずれかが成り立っていることが検出される。つまり、無線ノード群 $\{N_0, \dots, N_{n-1}\}$ からなる無線マルチホップネットワークにおいては、これらの位置 $x_0, \dots, x_{n-1}$ に対して $nC_2 = n(n-1)/2$ 個の制約条件式が与えられることになる。

以降では、すべての無線ノードが直線上に配置されている場合を対象とする。例えば、直線道路上に分布する車載コンピュータ等が対象となる。このとき、無線ノード N_i の位置は直線上の座標 x_i となる。任意の無線ノード N_i, N_j の位置 x_i, x_j に対して、 $|x_i - x_j| \leq R$ または $|x_i - x_j| > R$ のいずれかが成り立つことがビーコンメッセージの交換によって得られる。ここで、 $x_0, \dots, x_{n-1}$ に対する制約条件は $nC_2 = n(n-1)/2$ 個の不等式によって与えられるが、このうち $|x_i - x_j| > R$ ($i, j \in \{0, \dots, n-1\}$) となるものが L 個あるとする。 $|x_i - x_j| > R$ は、 $x_i - x_j < -R$ または $x_i - x_j > R$ であることから、各 x_i の取り得る範囲を求めるためには 2^L の場合分けが必要となる。すなわち、 nC_2 個の不等式で制約条件を与えられた線形計画問題を 2^L の場合に分けて解かなければならない。 L は互いに無線信号到達範囲に含まれない無線ノード対の数であることから、無線ノード数 n が多く、広範囲に無線ノードが分布する無線マルチホップネットワークでは L が大きな値となることが一般的である。そのため、大きな計算量を要することになる。

3.2 集約無線ノード

互いに無線マルチホップ配送によってメッセージを到達させることが可能な無線ノード群 $\mathcal{N}$ から構成されるひとつの無線マルチホップネットワークを考える。各無線ノードが自身の識別子を含むビーコンメッセージを定期的に無線信号到達範囲に含まれるすべての無線ノード

ドヘブロードキャスト送信する。これによって、無線ノード $N_i \in \mathcal{N}$ は、隣接無線ノードの集合 $Nei(N_i)$ に含まれるすべての無線ノードからのビーコンメッセージを受信し、それらの識別子を取得することができる。例えば、無線マルチホップネットワークを構成する無線ノード群 $\mathcal{N} := \{N_1, N_2, N_3\}$ が図3のように配置されているならば、 $Nei(N_1) = \{N_2\}$, $Nei(N_2) = \{N_1, N_3\}$, $Nei(N_3) = \{N_2\}$ が成り立つ。逆に、各無線ノード N_i の隣接無線ノード集合 $Nei(N_i)$ がこのように与えられたならば、図3のように無線ノード群が配置されていることが推定できる^{*2}。

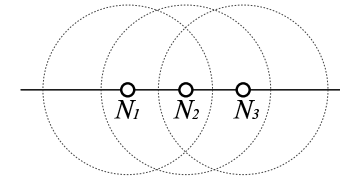


図3 位置推定可能な無線ノード群

ここで、図4(a)と図4(b)はいずれも無線ノード群 $\mathcal{N} := \{N_1, N_2, N_3, N_4\}$ から構成される無線マルチホップネットワークであり、 $Nei(N_1) = \{N_2, N_3\}$, $Nei(N_2) = \{N_1, N_3, N_4\}$, $Nei(N_3) = \{N_1, N_2, N_4\}$, $Nei(N_4) = \{N_2, N_3\}$ が成り立つ。逆に、各無線ノード N_i の隣接無線ノード集合 $Nei(N_i)$ がこのように与えられたならば、図4(a)または図4(b)のいずれかのよう無線ノード群が配置されていることは推定可能であるが、そのいずれであるかを決定することはできない。このように、無線ノード $N_i, N_j \in \mathcal{N}$ が $Nei(N_i) \cup \{N_i\} = Nei(N_j) \cup \{N_j\}$ を満足する場合、 N_i と N_j の相対的位置を決定することができない。

そこで、本論文で提案する配置推定手法では、無線ノードとその隣接無線ノードからなる集合が等しい複数の無線ノード $\{N_i\} \subset \mathcal{N}$ をひとつの集約無線ノード N'_j に置換する。隣接無線ノード集合が等しい他の無線ノードが存在しない無線ノード N_i は、単体として集約無線ノード N'_j に対応付けることにより、 $\mathcal{N}$ の配置推定問題は $\mathcal{N}' := \{N'_i\}$ の配置推定問題に置き換えられる(図5)。このとき、集約無線ノードの定義から、集約無線ノード群は以下の性質を持つ。

[性質1] $N'_i \neq N'_j$ であるならば、 $Nei(N'_i) \cup \{N'_i\} \neq Nei(N'_j) \cup \{N'_j\}$ である。また、 $Nei(N'_i) \cup \{N'_i\} \neq Nei(N'_j) \cup \{N'_j\}$ であるならば、 $N'_i \neq N'_j$ である。□

*1 本論文では、受信電波強度に基づいて送信無線ノードから受信無線ノードまでの距離を推定することは行わない。無線信号到達範囲に含まれるか否かのみを情報の用いた無線マルチホップネットワーク配置推定を対象とする。

*2 図3とは逆順になることが考えられるが、無線信号の到達のみを判断基準とする場合には区別することができない。そのため、以下では逆順を区別しない。

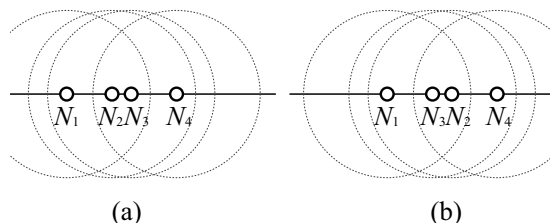


図 4 位置推定不可能な無線ノード群

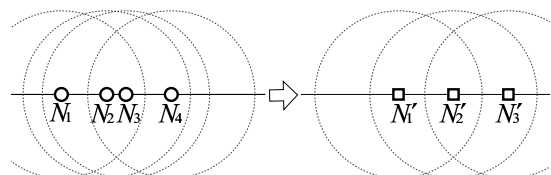


図 5 集約無線ノード群

3.3 隣接集約無線ノード群分割

集約無線ノード集合 $\mathcal{N}'$ に含まれるすべての集約無線ノード $N'_i \in \mathcal{N}'$ について、その隣接集約無線ノード $N'_j \in \text{Nei}(N'_i)$ を 2 つの隣接集約無線ノード集合 $\text{Nei}_L(N'_i)$ と $\text{Nei}_R(N'_i)$ に分割することを考える。ここで、 $\text{Nei}_L(N'_i)$ と $\text{Nei}_R(N'_i)$ とは、 N'_i に対して互いに反対側に位置する集約無線ノードの集合である。すなわち、 $\text{Nei}_L(N'_i) \cup \text{Nei}_R(N'_i) = \text{Nei}(N'_i)$ 、 $\text{Nei}_L(N'_i) \cap \text{Nei}_R(N'_i) = \emptyset$ であり $\forall N'_l \in \text{Nei}_L(N'_i), \forall N'_r \in \text{Nei}_R(N'_i)$ について N'_i は線分 $N'_l N'_r$ 上にある^{*1}。

まず、集約無線ノード N'_i の隣接集約無線ノード数 $|\text{Nei}(N'_i)|$ が少数である場合について考察する。 $|\text{Nei}(N'_i)| = 1$ である場合、この唯一の隣接集約無線ノードを $N'_j \in \text{Nei}(N'_i)$ とすると、 $\text{Nei}_L(N'_i) = \emptyset, \text{Nei}_R(N'_i) = \{N'_j\}$ となる。すなわち、 N'_i はこの無線マルチホップネットワークのエッジ集約無線ノードである。

[性質 2] $|\text{Nei}(N'_i)| = 1$ の場合、 N'_i はエッジ集約無線ノードである。□

次に、 $|\text{Nei}(N'_i)| = 2$ である場合、 $\text{Nei}(N'_i) := \{N'_j, N'_k\}$ とすると、これらの集約無線ノードの配置は次のいずれかとなる。

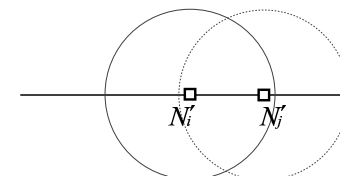


図 6 $|\text{Nei}(N'_i)| = 1$ である場合の推定配置

- 1) $\text{Nei}_L(N'_i) = \{N'_j\}, \text{Nei}_R(N'_i) = \{N'_k\}$ (図 7)
- 2) $\text{Nei}_L(N'_i) = \emptyset, \text{Nei}_R(N'_i) = \{N'_j, N'_k\}$ (図 8)

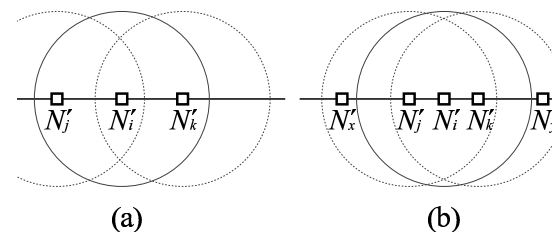


図 7 $|\text{Nei}(N'_i)| = 2$ である場合の推定配置 (1)

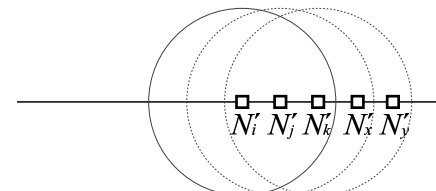


図 8 $|\text{Nei}(N'_i)| = 2$ である場合の推定配置 (2)

- 1) の場合は、さらに以下の 2 つの場合に分けられる。
 - 1-1) N'_j と N'_k が互いの無線信号到達範囲に含まれない場合 (図 7(a))
 - 1-2) N'_j と N'_k が互いの無線信号到達範囲に含まれる場合 (図 7(b))

^{*1} それぞれの隣接集約無線ノードが N'_i のいずれの側に位置するかは決定することができない。

1-1) の場合は、 $N'_i \in \text{Nei}(N'_j)$ かつ $N'_k \notin \text{Nei}(N'_j)$ であり、 $N'_i \in \text{Nei}(N'_k)$ かつ $N'_j \notin \text{Nei}(N'_k)$ である。すなわち、 $\text{Nei}(N'_j) \cap \text{Nei}(N'_k) = \{N'_i\}$ である。また、1-2) の場合は、 $N'_i, N'_k \in \text{Nei}(N'_j)$ かつ $N'_i, N'_j \in \text{Nei}(N'_k)$ である。ここで、 $\text{Nei}(N'_i) = \{N_j, N_k\}$ であることから、 $\exists N'_x \in \text{Nei}(N'_j)$, $N'_x \notin \text{Nei}(N'_i)$, $N'_x \notin \text{Nei}(N'_k)$ かつ $\exists N'_y \in \text{Nei}(N'_k)$, $N'_y \notin \text{Nei}(N'_i)$, $N'_y \notin \text{Nei}(N'_j)$ を満足しなければならない。これは、 N'_i, N'_j, N'_k がいずれも集約無線ノードであることから、 $\text{Nei}(N'_i) \cup \{N'_i\}$, $\text{Nei}(N'_j) \cup \{N'_j\}$, $\text{Nei}(N'_k) \cup \{N'_k\}$ が互いに異ならなければならないためである。したがって、 $\text{Nei}(N'_j) \cap \text{Nei}(N'_k) = \{N'_i\}$ である。

一方、2) の場合は、 $\exists N'_x \notin \text{Nei}(N'_i)$, $N'_x \in \text{Nei}(N'_j)$, $N'_x \in \text{Nei}(N'_k)$ かつ $\exists N'_y \notin \text{Nei}(N'_i)$, $N'_y \notin \text{Nei}(N'_j)$, $N'_y \in \text{Nei}(N'_k)$ を満足しなければならない^{*1}。これも、 N'_i, N'_j, N'_k がいずれも集約無線ノードであることから、 $\text{Nei}(N'_i) \cup \{N'_i\}$, $\text{Nei}(N'_j) \cup \{N'_j\}$, $\text{Nei}(N'_k) \cup \{N'_k\}$ が互いに異ならなければならないためである。したがって、 $\text{Nei}(N'_j) \cap \text{Nei}(N'_k) \supset \{N'_i, N'_x\}$ である。

以上より、 N'_i の無線信号到達範囲外に N'_j と N'_k に共通の隣接集約無線ノードが存在する、すなわち、 $\text{Nei}(N'_j) \cap \text{Nei}(N'_k) - \{N'_i\} \neq \emptyset$ を満足する場合には、 N'_j と N'_k は N'_i に対して同じ側に位置する。すなわち、 $\text{Nei}_L(N'_i) = \emptyset$, $\text{Nei}_R(N'_i) = \{N'_j, N'_k\}$ であり、 N'_i はこの無線マルチホップネットワークのエッジ集約無線ノードである。一方、 N'_i の無線信号到達範囲外に N'_j と N'_k に共通の隣接集約無線ノードが存在しない、すなわち、 $\text{Nei}(N'_j) \cap \text{Nei}(N'_k) - \{N'_i\} = \emptyset$ を満足する場合には、 N'_j と N'_k は N'_i に対して反対側に位置する。すなわち、 $\text{Nei}_L(N'_i) = \{N'_j\}$, $\text{Nei}_R(N'_i) = \{N'_k\}$ である。

[性質 3] $|\text{Nei}(N'_i)| = 2$ の場合、 $N'_j, N'_k \in \text{Nei}(N'_i)$ の隣接集約無線ノード集合 $\text{Nei}(N'_j)$, $\text{Nei}(N'_k)$ のみによって、 $\text{Nei}_L(N'_i)$ と $\text{Nei}_R(N'_i)$ を得ることができる。□

以降は一般に $|\text{Nei}(N'_i)| \geq 1$ である場合を考える。ここで、 N'_i の隣接集約無線ノード $N'_j \in \text{Nei}(N'_i)$ の隣接集約無線ノード集合 $\text{Nei}(N'_j)$ に N'_i の無線信号到達範囲に含まれない集約無線ノードが含まれるか否かに基づいて 2 つの場合に分けることができる。

- 1) N'_i の無線信号到達範囲に含まれない集約無線ノードを隣接集約無線ノード集合 $\text{Nei}(N'_j)$ に含む N'_i の隣接集約無線ノード N'_j が存在する場合
- 2) N'_i の無線信号到達範囲に含まれない集約無線ノードを隣接集約無線ノード集合 $\text{Nei}(N'_j)$ に含む N'_i の隣接集約無線ノード N'_j が存在しない場合

まず、1) の場合について考える。図 9 に示すように、 N'_i に対して同じ側に位置し、 N'_i の無線信号到達範囲に含まれない集約無線ノードを隣接集約無線ノードとする N'_i の隣接集

約無線ノード N'_j は、少なくとも 1 つの集約無線ノード N'_k を N'_i の無線信号到達範囲に含まれない共通の隣接集約無線ノードとしている。

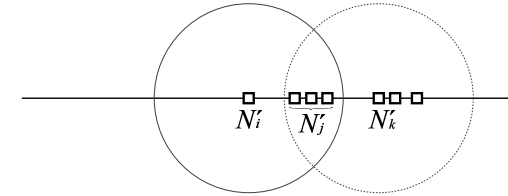


図 9 共通の隣接集約無線ノード $N'_k \notin \text{Nei}(N'_i)$

ここで、このような N'_k が存在しないと仮定する。このとき、図 10 に示すように、 N'_i の無線信号到達範囲に含まれない N'_j の隣接集約無線ノードで最も N'_i に近い集約無線ノードを $\tilde{N}'_k$ とするならば、 $\tilde{N}'_k$ を無線信号到達範囲に含まず、 N'_i の無線信号到達範囲に含まれない隣接集約無線ノード N'_l を少なくとも 1 つ持つ N'_i の隣接集約無線ノード N'_m が N'_i について N'_j と同じ側に存在しなければならない。ここで、 N'_l は N'_m の隣接集約無線ノードであり、 N'_i の無線信号到達範囲に含まれないことから、 N'_l は N'_i に対して N'_m と同じ側に位置しなければならない。また、 N'_m が $\tilde{N}'_k$ を無線信号到達範囲に含まない一方、 N'_l は N'_m の隣接集約無線ノードであることから、 N'_l は $\tilde{N}'_k$ よりも N'_m に近く、同時に N'_i にも近い。したがって、 N'_l は N'_j の無線信号到達範囲に含まれることから、 N'_l は N'_i の無線信号到達範囲に含まれず、 N'_j の隣接集約無線ノードとなっている。これは、 $\tilde{N}'_k$ が N'_i の無線信号到達範囲に含まれない N'_j の隣接集約無線ノードのなかで最も N'_i に近いという前提に矛盾する。

[性質 4] N'_i に対して同じ側に位置する集約無線ノードのうち N'_i の無線信号到達範囲に含まれない集約無線ノードを隣接集約無線ノードとして持つものは、少なくとも 1 つの集約無線ノードを共通の隣接集約無線ノードとしている。□

この共通の隣接集約無線ノードは、 N'_i に対して片側にのみ位置する場合と、両側に位置する場合がある。図 11 のように片側にのみ位置する場合、この集約無線ノードを N'_k とすると、 N'_k の無線信号到達範囲に含まれない N'_i の隣接集約無線ノードのそれぞれが、 N'_i について N'_k と同じ側に位置するか、反対側に位置するかを決定しなければならない。ここで、図 12 のように、 N'_k と同じ側に位置する集約無線ノード N'_l は、 N'_i と N'_k をともに隣接集約無線ノードとしているすべての集約無線ノード N'_j を隣接無線ノードとしている。一方、図 13 のように、 N'_i と反対側に位置する集約無線ノード N'_l については、 N'_i と N'_k をとも

*1 N'_j と N'_k の相対的位置が逆の場合を区別していない。

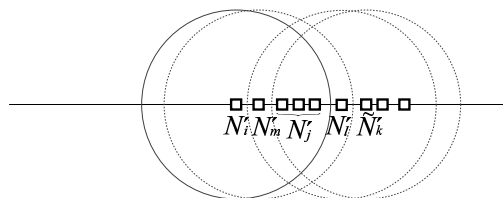


図 10 共通の隣接集約無線ノード $N'_k \notin \text{Nei}(N'_i)$ の存在証明

に隣接集約無線ノードとしている集約隣接無線ノード N'_j のうちの少なくとも 1 つがその無線信号到達範囲に含まれていない。これは、 N'_i について N'_l と同じ側には N_i の無線信号到達範囲に含まれない N'_l の隣接集約無線ノードが存在しないという仮定から、もし N'_l の無線信号到達範囲にすべての N'_j が含まれるのであれば、 $\text{Nei}(N'_i) \cup \{N'_l\} = \text{Nei}(N'_i) \cup \{N'_l\}$ となり、 N'_i と N'_l がともに集約無線ノードであることに矛盾するからである。

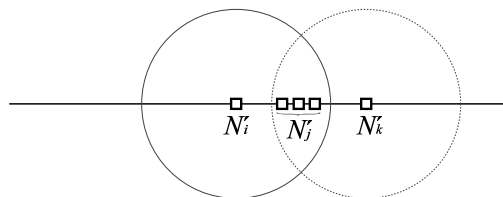


図 11 $\text{Nei}(N'_i)$ の分割 (1)

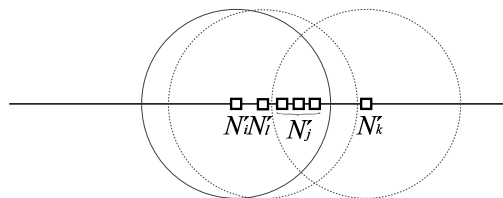


図 12 $\text{Nei}(N'_i)$ の分割 (2)

[性質 5] N'_k を隣接集約無線ノードとするすべての N'_j を無線信号到達範囲に含む N'_l は、

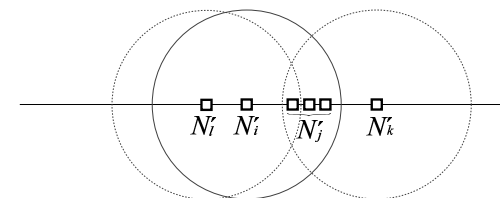


図 13 $\text{Nei}(N'_i)$ の分割 (3)

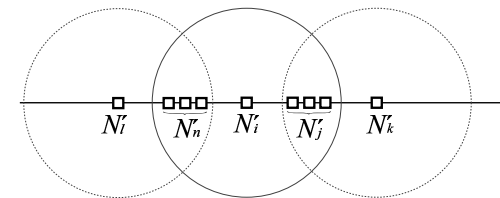


図 14 $\text{Nei}(N'_i)$ の分割 (4)

N'_i に対して N'_j と同じ側に位置し、 N'_j のうちの少なくとも 1 つを無線信号到達範囲に含まない N'_l は、 N'_i に対して N'_j と反対側に位置する。□

したがって、図 11 のように片側にのみ位置する場合には、 N'_i のすべての隣接集約無線ノードを $\text{Nei}_L(N'_i)$ と $\text{Nei}_R(N'_i)$ に分割することが可能である。

また、図 12 のように両側に位置する場合、これらの集約無線ノードを N'_k 、 N'_l とすると、 N'_k および N'_l の無線信号到達範囲に含まれない N'_i の隣接集約無線ノードのそれぞれが、 N'_i について N'_k と同じ側に位置するか、 N'_l と同じ側に位置するかを決定しなければならない。ここで、図 15 のように、 N'_i と同じ側に位置する集約無線ノード N'_m は、 N'_i と N'_k をともに隣接集約無線ノードとしているすべての集約無線ノード N'_j を隣接無線ノードとしており、 N'_i と N'_l をともに隣接集約無線ノードとしている集約無線ノード N'_n のうちの少なくとも 1 つを無線信号到達範囲に含んでいない。同様に、図 16 のように、 N'_l と同じ側に位置する集約無線ノード N'_o は、 N'_i と N'_l をともに隣接集約無線ノードとしているすべての集約無線ノード N'_n を隣接無線ノードとしており、 N'_i と N'_k をともに隣接集約無線ノードとしている集約無線ノード N'_j のうちの少なくとも 1 つを無線信号到達範囲に含んでいない。以上から、図 14 のように両側に位置する場合にも、 N'_i のすべての隣接集約無線ノードを $\text{Nei}_L(N'_i)$ と $\text{Nei}_R(N'_i)$ に分割することが可能である。

最後に、2) の場合、すなわち N'_i の隣接集約無線ノード N'_j のすべての隣接集約無線ノード

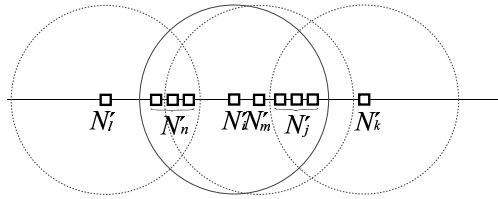


図 15 $Nei(N_i')$ の分割 (5)

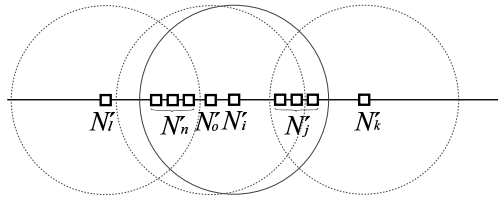


図 16 $Nei(N_i')$ の分割 (6)

が N_i' の無線信号到達範囲内にのみ存在する場合を考える。このとき、図 17 のように、この無線マルチホップネットワークのすべての集約無線ノードは N_i' の無線信号到達範囲に含まれている。ここで、 N_i' と N_j' はともに集約無線ノードであることから、 $Nei(N_j') \neq Nei(N_i')$ である。したがって、 N_j' の無線信号到達範囲に含まれない集約無線ノード N_k' が存在する。ところで、 N_i' に対して N_j' と同じ側に位置する集約無線ノード N_l' は必ず N_j' の無線信号到達範囲に含まれることから N_k' は N_i' に対して N_j' と反対側に位置する。また、 N_j' と N_l' には、その無線信号到達範囲に共通に含まない集約無線ノード N_m' を少なくとも 1 つ持つ。この N_m' は N_i' に対して N_k' と同じ側になければならない。以上により、すべての N_i' の隣接集約無線ノードを $Nei_L(N_i')$ と $Nei_R(N_i')$ に分割することが可能である。

[性質 6] 集約無線ノード N_i' の隣接集約無線ノード集合 $Nei(N_i')$ を N_i' についてそれぞれ同じ側に位置する集約無線ノード集合 $Nei_L(N_i')$ と $Nei_R(N_i')$ に分割することが、各隣接集約無線ノード $N_j' \in Nei(N_i')$ の隣接集約無線ノード集合 $Nei(N_j')$ のみによって可能である。
 □

3.4 エッジ集約無線ノード検出

前節では、集約無線ノード N_i' の隣接集約無線ノード集合 $Nei(N_i')$ を N_i' についてそれぞれ同じ側に位置する集約無線ノード集合 $Nei_L(N_i')$ と $Nei_R(N_i')$ に分割することが、各隣接集約無線ノード $N_j' \in Nei(N_i')$ の隣接集約無線ノード集合 $Nei(N_j')$ のみによって可能で

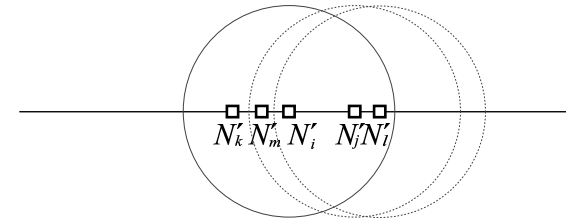


図 17 $Nei(N_i')$ の分割 (7)

あることを示した。ところで、対象となる無線マルチホップネットワークを構成するすべての無線ノード $N_i \in \mathcal{N}$ が互いに無線マルチホップ配送によってメッセージを到達させることが可能であるならば、この無線マルチホップネットワークのエッジとなる集約無線ノードは必ず 2 つである^{*1}。このとき、無線マルチホップネットワークのエッジに位置する集約無線ノード N_i' には、以下の性質がある。

[性質 7] 集約無線ノード N_i' の隣接集約無線ノード $Nei(N_i')$ が前節の手法によって $Nei_L(N_i')$ と $Nei_R(N_i')$ に分割されるならば、 $Nei_L(N_i') = \emptyset$ または $Nei_R(N_i') = \emptyset$ のいずれかを満足する。 □

3.5 集約無線ノード列推定

本節では、3.3 節で得られた各集約無線ノード N_i' に対する分割隣接集約無線ノード集合である $Nei_L(N_i')$ と $Nei_R(N_i')$ 、および、3.4 節で検出されたエッジ集約無線ノードである N_{el}' および N_{er}' から、集約無線ノード列を得る手法について述べる。ここで、 $\mathcal{N}' := \mathcal{N} - \{N_{el}', N_{er}'\}$ とする。図 18 に示すように、 N_{el}' のすべての隣接集約無線ノード $N_i' \in Nei(N_{el}')$ において、 $N_{el}' \in Nei_L(N_i')$ または $N_{el}' \in Nei_R(N_i')$ である。そこで、 $N_{el}' \in Nei_L(N_i')$ ならば $Nei_L(N_i') := Nei_L(N_i') - \{N_{el}'\}$ 、 $N_{el}' \in Nei_R(N_i')$ ならば $Nei_R(N_i') := Nei_R(N_i') - \{N_{el}'\}$ として、 N_{el}' を $\mathcal{N}'$ から取り除き $\mathcal{N}' := \mathcal{N}' - \{N_{el}'\}$ とする。すると、更新された $\mathcal{N}'$ には N_{el}' に隣接していた $\mathcal{N}'$ のエッジ集約無線ノード N_{el2}' がただ 1 つ存在する。この N_{el2}' は、 $\mathcal{N}'$ に含まれる集約無線ノードのなかで最も N_{el}' に近く、 $Nei_L(N_{el2}') = \emptyset$ または $Nei_R(N_{el2}') = \emptyset$ を満足する。ここで、 N_{el}' 検出時と同様に、 N_{el2}' をその隣接集約無線ノード $N_j' \in Nei_R(N_{el2}')$ の分割隣接集約無線ノード集合 $Nei_L(N_j')$ または $Nei_R(N_j')$ から取り除く ($Nei_L(N_{el2}') = \emptyset$ のとき) か、 N_{el2}' をその隣接集約無線ノード $N_j' \in Nei_L(N_{el2}')$ の分割隣接集約無線ノード集合 $Nei_L(N_j')$ または $Nei_R(N_j')$ から取り除く ($Nei_R(N_{el2}') = \emptyset$

^{*1} $\mathcal{N}$ が互いに無線マルチホップ配送によってメッセージを到達させることが可能な n 個の無線マルチホップネットワークに分割されている場合には、エッジとなる集約無線ノード数は $2n$ である。

のとき) ことによって、 $\mathcal{N}'$ から N'_{el2} を取り除き、 $\mathcal{N}' := \mathcal{N}' - \{N'_{el2}\}$ とする。これを、 $\mathcal{N}' = \emptyset$ となるまで繰返すことによって、すべての集約無線ノードを正しく一列に並べることができる。

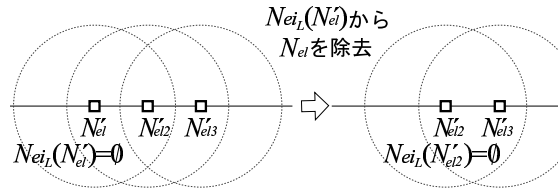


図 18 集約無線ノード列推定

3.6 集約無線ノード位置推定

前節で得られた集約無線ノード列 $N'_{i_0}, \dots, N'_{i_{n'-1}}$ ($i_0, \dots, i_{n'-1}$ は $0, \dots, n' - 1$ の置換) の各集約無線ノード座標 x'_{i_k} の取り得る範囲を求める手法について述べる。ここで、 $x'_{i_0} = 0$ 、 $x'_{i_k} \geq 0$ としても一般性を失わない。したがって、 $0 = x'_{i_0} \leq x'_{i_1} \leq \dots \leq x'_{i_{n'-1}}$ である。これは、 $0 \leq x'_{i_1}, x'_{i_k} \leq x'_{i_{k+1}}$ ($k = 1, \dots, n' - 2$) の $n' - 1$ 個の不等式と等価である。また、 $Nei(N'_{i_k}) = \{N'_{i_l}, \dots, N'_{i_m}\}$ であるとき、 $x'_{i_k} - x'_{i_{l-1}} > R$ 、 $x'_{i_k} - x'_{i_l} \leq R$ 、 $x'_{i_m} - x'_{i_k} \leq R$ 、 $x'_{i_{m+1}} - x'_{i_k} > R$ である。ただし、 $k = 0$ のときは l は存在せず、 $k = n' - 1$ のときは m が存在しない。つまり、 x'_{i_0} については $x'_{i_m} - x'_{i_0} \leq R$ 、 $x'_{i_{m+1}} - x'_{i_0} > R$ の 2 個の不等式のみが制約条件となり、 $x'_{i_{n'-1}}$ については、 $x'_{i_{n'-1}} - x'_{i_{l-1}} > R$ 、 $x'_{i_{n'-1}} - x'_{i_l} \leq R$ のみが制約条件となる。さらに、 $k = 1$ のとき $l = 0$ であり、 $k = n' - 2$ のとき $m = n' - 1$ である。つまり、 x'_{i_1} については $x'_{i_1} - x'_{i_{l-1}} > R$ を除く 3 個の不等式が制約条件となり、 $x'_{i_{n'-2}}$ については $x'_{i_{m+1}} - x'_{i_{n'-2}} > R$ を除く 3 個の不等式が制約条件となる。以上により、 $\{x'_{i_k}\}$ に対する制約条件は、 $n' \geq 5$ のとき $4(n' - 4) + (2 \times 2 + 3 \times 2) + (n' + 1) = 5n' - 7$ 個以下の不等式で与えられる^{*1}。以上により、提案手法の無線ノード集約と集約無線ノード列の獲得により、より少ない数の集約無線ノード位置 x'_{i_k} の取り得る範囲を得るために、より少ない制約条件式に対する線形計画問題を解けば良いことになる。

*1 $n' = 2, 3, 4$ のときは、それぞれ 2 個、6 個、13 個以下の不等式で制約条件が与えられる。

4. まとめと今後の課題

本論文では、直線上に位置する無線ノード群によって構成される無線マルチホップネットワークにおける無線ノードの配置推定を、定期的なビーコンメッセージの交換によって得られる無線ノード間の隣接関係のみを用いて行なう手法を提案した。無線ノード群を集約無線ノード群に置換することによって、隣接集約無線ノード集合を集約無線ノードに対して同じ側にある 2 つの集合に分割することが可能であることを示した。これによって、集約無線ノード列を確定することができる。また、より少ない計算量で各集約無線ノードの存在する範囲を求めることができる。提案手法によって得られた無線ノード配置は、無線ノード間の隣接関係を保存している。今後は、配置推定アルゴリズムを実装し、計算時間を測定することによる性能評価を行なう。また、平面上に分布する無線ノード群の配置推定手法を考案する。

参考文献

- 1) Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, pp.48–55 (1999).
- 2) Kahn, J.M., Katz, R. and Pister, K., "Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust", " Proceeding of the 5th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.271–278 (1999).
- 3) Karp, B. and Kung, H.T., "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.243–254 (2000).
- 4) Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- 5) Niculescu, D. and Nath, B., "DV based Positioning in Ad hoc Networks," Telecommunication Systems, Vol.22, pp.267–280 (2003).
- 6) Savvides, A., Han, C. and Strivastava, A.B., "Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors," Proceeding of the 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.166–179 (2001).
- 7) 油田, 河内, 岡崎, 富田, 朴, "センサネットワークにおける回帰分析を用いたノード位置推定手法の提案," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J92-B, No.1, pp.88–97 (2009).
- 8) 藤原, 寺西, 秋山, 春本, 竹内, 西尾, "無線電波強度分布に基づくユーザ存在範囲推定手法について," 情報研報, Vol.2009-DPS-141, No.24, pp.1–6 (2009).