

無線マルチホップネットワークにおける 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ける無線ノード位置推定については、座標が既知の複数のノードからの推定距離を用いて各ノードの座標を求める研究がなされている。しかし、無線ノード間の隣接関係を保存しない結果が得られる場合がある。本論文では、無線ノード間の隣接関係のみを用いて、この隣接関係を保存する無線ノード配置を推定する手法を提案する。ここでは、無線ノードが隊列を成して移動するモデル(車載ノード列など)を対象として、直線上に配置された無線ノード間の隣接関係から、無線ノード配置順序と各無線ノード間距離の範囲を求めるアルゴリズムを提案する。また、提案アルゴリズムは、無線ノード対間の隣接関係を表す不等式を直接用いて配置推定する手法に比べてより少ない計算量しか要さないことを示す。

Estimation of Ad-Hoc Network Topology based on Neighbor Relation among Wireless Nodes

KEI ITOH^{†1} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

In order to estimate locations of wireless nodes without GPS devices, various methods to estimate the absolute locations with help of some wireless nodes whose locations have already been determined. However, since locations of wireless nodes are estimated independently of the other nodes, the estimated locations do not keep neighbor relation among them. This paper proposes a novel method to achieve the relative locations of wireless nodes only based on sets of neighbor wireless nodes of all the wireless nodes achieved by exchanges of beacon messages with their node IDs. Here, the wireless nodes are assumed to be located on a line, i.e. 1-dimensional estimation. By replacing wireless nodes among which their relative locations are not determined only by the sets of neighbor wireless nodes with an aggregate wireless node, the relative locations among the aggregate wireless nodes are determined with less computational complexity than the naive method.

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

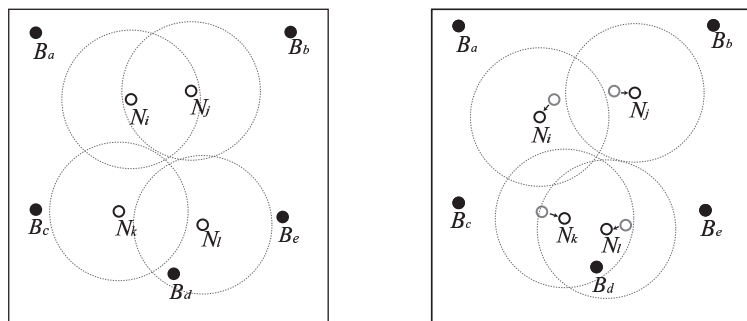
移動無線ノードから構成されるアドホックネットワーク等の無線マルチホップネットワークでは、無線ノードの自律移動や外力による移動等によってその位置が経時的に変化する。また、各無線ノード位置が必ずしも経時変化しないセンサネットワーク等においても、それを構成する無線ノードをあらかじめ定められた位置に正確に配置するのではなく、散布等の手段によって初期配置することが多い。このような環境において、GPSデバイスを搭載しない各無線ノードの位置を取得する手法として、基地局等の固定無線ノードやGPS等の位置取得デバイスを備えた少数の基準無線ノードを使用する手法が提案されている。

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。AHLoS⁶⁾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。AHLoS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

^{†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

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 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 、 N_i と N_j の推定位置をそれぞれ $\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j + \Delta\mathbf{x}_j$ 、無線信号到達距離を R とするとき、 $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \leq R$ であるにも関わらず $\|(\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i) - (\mathbf{x}_j + \Delta\mathbf{x}_j)\| > R$ となったり、 $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| > R$ であるにも関わらず $\|(\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i) - (\mathbf{x}_j + \Delta\mathbf{x}_j)\| \leq R$ 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。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。



実際の無線ノード位置 推定された無線ノード位置

図1 隣接関係の保存できないノード位置推定

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 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ とすると、このビーコンメッセージの受信によって $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \leq R$ 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 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ について、 $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \leq R$ または $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| > R$ のいずれかが成り立っているかが検出される。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 $\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_{n-1}$ 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。

*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なわない。無線信号到達範囲に含まれるか否かのみを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。

$|x_i - x_j| > R$ 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へ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。

ここで、図 2(a) と図 2(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 2(a) または図 2(b) のいずれかのように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、そのいずれか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'_i 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 2(c))。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。□

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 $N'_j \in Nei(N'_i)$ を 2 つの隣接集約無線ノード集合 $Nei_L(N'_i)$ と $Nei_R(N'_i)$ に分割することを考える。ここで、 $Nei_L(N'_i)$ と $Nei_R(N'_i)$ 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、 $Nei_L(N'_i) \cup Nei_R(N'_i) = Nei(N'_i)$, $Nei_L(N'_i) \cap Nei_R(N'_i) = \emptyset$ であり $\forall N'_l \in Nei_L(N'_i), \forall N'_r \in Nei_R(N'_i)$ について N'_i は線

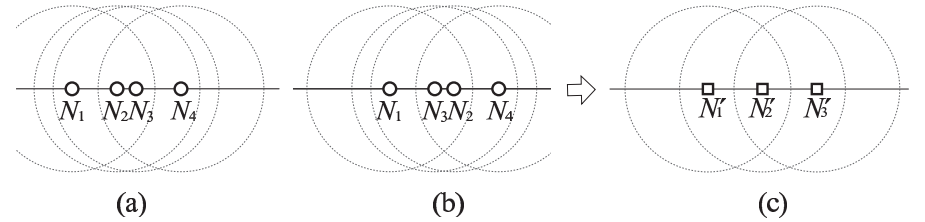


図 2 集約無線ノード群

分 $N'_l N'_r$ 上にある*1。

ここで、 N'_i の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 $Nei(N'_j)$ 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 $Nei(N'_j)$ 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 $Nei(N'_j)$ 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 3 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。

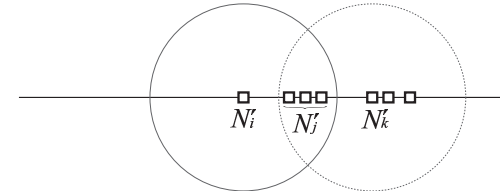


図 3 共通の隣接集約無線ノード $N'_k \notin Nei(N'_i)$

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 4 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

*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。

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。

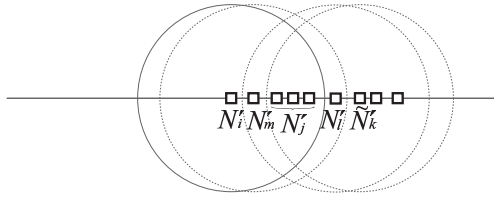


図 4 共通の隣接集約無線ノード $N'_k \notin Nei(N'_i)$ の存在証明

[性質 2] 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 5(a) 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 5(b) 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 5(c) 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、 $Nei(N'_i) \cup \{N'_l\} = Nei(N'_i) \cup \{N'_l\}$

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。

[性質 3] 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、 N'_j 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 5(a) 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 $Nei_L(N'_i)$ と $Nei_R(N'_i)$ に分割することが可能である。

また、図 5(d) 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 5(e) のように、 N'_k 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 5(f) 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 5(d) 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 $Nei_L(N'_i)$ と $Nei_R(N'_i)$ 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 5(g) 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 4] 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

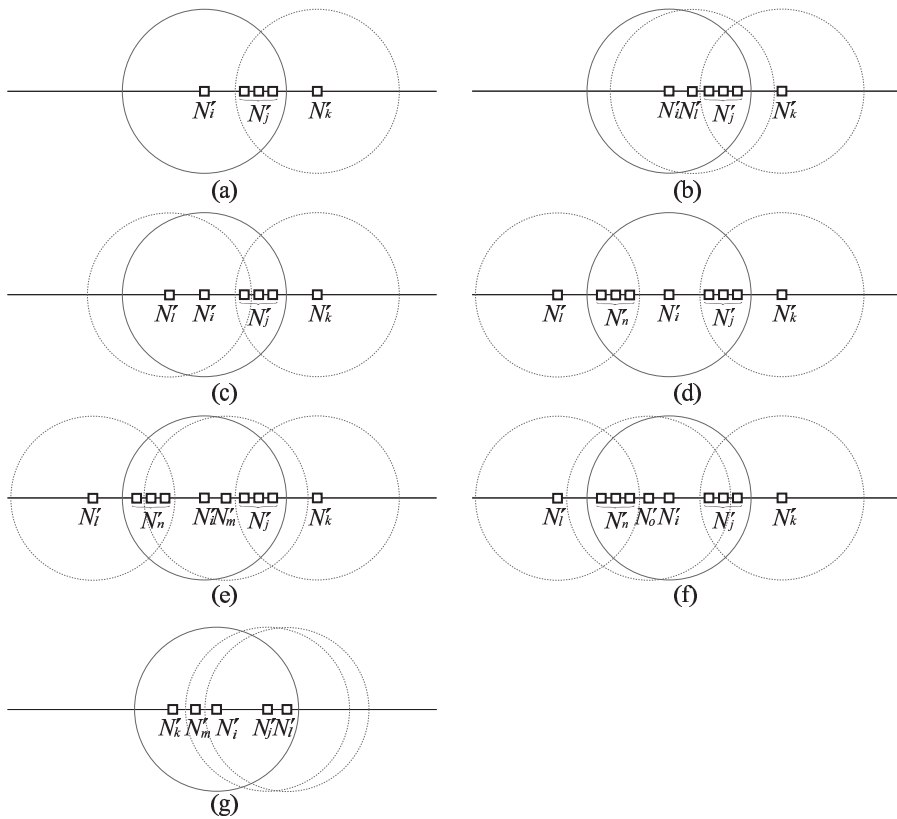


図5 $Nei(N'_i)$ の分割

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。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5] 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6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 ($Nei_R(N'_{el2}) = \emptyset$ 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。

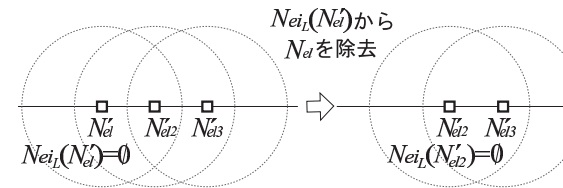


図6 集約無線ノード列推定

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、 $Nei(N'_{i_k}) = \{N'_{i_1}, \dots, N'_{i_m}\}$ 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。

4. 評価

本章では、無線ノード群 $\{N_0, \dots, N_{n-1}\}$ のすべての無線ノード対間の隣接関係に基づいて、この隣接関係を保存した無線ノード群の配置推定を行なう提案手法を計算量の観点から評価する。

まず、ビーコンメッセージの交換によって得られた隣接関係、すなわち、任意の無線ノード対 N_i, N_j の位置 x_i, x_j の間の関係式 $|x_i - x_j| \leq R$ または $|x_i - x_j| > R$ をそのまま場合分けして線形計画問題として解く場合の計算量を評価する。3章で述べたように、 $|x_i - x_j| > R$ で制約条件が与えられる x_i と x_j の組、すなわち、互いに隣接しない無線ノード対の数を L とする。このとき、 N_0, \dots, N_{n-1} の配置推定問題、すなわち、 x_0, \dots, x_{n-1} の取り得る範囲を求める問題は、 ${}_nC_2 = n(n-1)/2$ 個の不等式が制約条件式で与えられる線形計画問題を最悪 2^L の場合について解くこととなる。シンプレックス法は、 n の指数オーダーのアルゴリズムであることから、全体の計算量は $O(2^{n+L})$ で与えられることとなる。

一方、提案手法では、無線ノードの集約に $O(n^3)({}_nC_2)$ の組み合わせに対して隣接ノードが等しいかを比較する。隣接ノード数は最大で $n-1$ であることから、全体としては $O(n^3)$ の計算量を要し、集約無線ノード数は $n' < n$ となる。各集約無線ノードに対して、隣接集約無線ノードを2分割するのに要する計算量は、各隣接集約無線ノードに共通の隣接集約無線ノードを探索する手続きとなることから $O(n'^2)$ となる。したがって、全集約無線ノードにおける隣接集約無線ノード分割に要する計算量は $O(n'^3)$ である。この分割に基づいて集約無線ノード列を構成する手続きの計算量は $O(n'^2)$ である。最後に、構成された集約無線ノード列から各集約無線ノード N'_i の位置 x'_i が取り得る範囲を求めるには、 $x'_0, \dots, x'_{n'-1}$ に対する $5n' - 7$ 個の不等式で制約条件が与えられた線形計画問題を場合分けすることなく解くこととなるため、その計算量は $O(2^{n'})$ となる。以上により、全体では

$O(n^3 + n^3 + 2^{n'}) = O(2^{n'} + n^3)$ となり、より少ない計算量での配置推定が実現されている。

5. 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, 春木, 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," 情処研報, Vol.2009-DPS-141, No.24, pp.1-6 (2009).

*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。