

# アドホックネットワークにおけるばねモデルを適応した端末位置決定手法

佐藤 雅幸<sup>†</sup> 松尾 啓志<sup>†</sup>

アドホック環境においてはサービス向上や通信の効率化のために位置情報が重要な情報となる。位置情報が GPS により取得できない場合、絶対位置を取得可能な端末から位置情報を取得し、位置を推定する必要がある。従来の位置推定手法では、推定精度が悪く、また、通信モデルとして考えた上で問題がある。本稿では、端末間距離を適切に近似し、端末の相互の接続関係から適切な位置を推定する手法を提案する。提案手法では位置推定にばねモデルとして、KK モデルを適応する。提案手法は、簡易的な通信により、高精度な位置推定が可能であることを計算機シミュレーションにより確認する。

## A Positioning System Adapted Spring Model for mobile Ad-Hoc Networks

MASAYUKI SATO<sup>†</sup> and HIROSHI MATSUO<sup>†</sup>

The location information is important for terminals in ad-hoc networks. Usually the location information makes the service quality better and the communication of terminals effective. The location information is received by GPS. But in the case in which terminals don't receive the GPS location, it is necessary to estimate the terminals' location alone. Conventional positioning systems are low accuracy and has some problems under communication model. The proposal system has improved the location estimation accuracy and solves the communication problems. In simulation. Finally we confirm the proposal system usefulness.

### 1. はじめに

アドホックネットワークは事前に配備されたインフラに依存せず、端末の直接的な通信のマルチホップにより通信を確立する通信モデルである。アドホックネットワークは、自律分散型のネットワークを形成し、短期的に構成トポロジーが変化するネットワークである。

アドホックネットワークの活躍の場として、簡易的に構築するのが求められるイベント会場、建設工事現場、砂漠、災害現場などで利用することが考えられている。災害現場などの破壊されたような状態では、救援支援の指揮系統確立や連携活動のための情報交換、情報の共有などに利用可能とされる。

アドホックネットワークは無線端末の位置情報を利用することで従来では考えられなかった質の高いサービスが期待できる。また、位置情報は新たなサービスを期待させるだけでなく、アドホックネットワークの経路制御にも利用可能である。位置情報により冗長なパケットの転送を減らし、通信の効率化が可能となる。

無線端末の位置を推定し取得する手法としては

GPS(Global Positioning System) が主流である。一方で、GPS の装備にかかる経済的なコストを削減する点、あるいは、GPS のカバーできない領域を補完する点から、一部の GPS 装備端末からの相対的な位置関係により位置を推定する研究が行われている。本稿では利用可能な GPS 設置端末を削減した場合でも利用可能な新たな位置推定手法を提案する。

### 2. 関連研究

無線通信を利用した位置推定手法は、電波特性を利用した手法と電波特性を利用しない手法がそれぞれ数多く提案されている。電波特性を利用した手法として、電波強度、電波伝搬時間や指向性アンテナを用いた電波の受信角度を利用することが考えられている。

RADAR<sup>1)</sup>、Active Badges<sup>2)</sup> は基地局から受信した電波の強度により端末位置を推定する手法である。事前の綿密なインフラの敷設が必要である。SpotON は無線電波を発信するタグを装着しタグが発する電波の強度からタグ間の距離を推定する手法である。電波強度の測定による位置推定は、電波のマルチパスの影響のため、完全に正確には求まらない。また、無線電波を受発信するタグの事前の配備が必要となる。

電波の到達時間差を利用する手法として、TOA 方

<sup>†</sup> 名古屋工業大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of  
Technology

式<sup>4)</sup>やTDOA方式が提案されている。電波の到達時間は発信と受信の端末において時刻同期を必要とする。電波の角度差を利用するAOA方式<sup>5)</sup>は、指向性アンテナの精度に位置推定の精度は依存する。Cricket<sup>6)</sup>は電波速度の異なる2種類の無線電波を用いて、到達時間差により距離を測定し、位置を推定する手法である。時刻同期は必要なくなるが、Cricketでは正確な電波の発信機器を要する。

なお、電波強度を用いた位置推定手法としてGPS free positioning<sup>7)</sup>やAPIT手法<sup>8)</sup>が提案されている。GPS free positioningでは電波の誤差として通信半径の5%を標準偏差とする正規分布に基づく誤差を仮定している。APITではGPS位置を取得可能な端末を30程度配置した条件を仮定し、事前のインフラ構築を要する。DV-distance<sup>9)</sup>は電波強度を利用した手法であるが、位置誤差が非常に大きい。

以上のように電波特性を利用した位置推定手法では、事前のインフラの敷設と位置推定のために高価な無線電波送受信デバイスを要する。従って、アドホックネットワークのような簡易的で、短期的なネットワークにおいては電波特性を利用した位置推定は適合しない。

一方、電波特性を利用しない手法は主にGPS設置端末のGPS位置とホップ数という粒度の粗い情報のもとに位置推定を行う。Centroid手法は、GPS設置端末から得られるGPS位置の平均を推定位置とする。GPS設置端末が偏った配置をする場合、誤差が非常に大きい。DV-hop<sup>9)</sup>は全てのGPS設置端末間に対して無線電波1ホップ当りの平均距離を算出する。平均距離と到達ホップからGPS設置端末との距離を計算する。DV-hop手法は平均距離を利用するため、簡易的に構築可能な手法であるが、非常に誤差が大きい。

Gomashio手法<sup>10)</sup>はGPS設置端末から広告された最短ホップ数から最大通信可能距離を求める。GPS設置端末を中心として、最大通信可能距離を半径とする円を描く。複数の円から得られる重複部分の矩形の重心を推定点とする。遠方に存在するGPS設置端末からの単一の情報しか得られない場合、GPS位置がそのまま推定位置となる。得られる位置情報の数が極めて少ない場合、推定精度は悪く、また、遠方から得られる位置情報は価値が失われるため、方式に問題がある。

SOMを用いた推定手法<sup>11)</sup>は競合学習により位置推定を行う。各端末は周囲の端末と推定位置の情報を交換をしつつ、推定トポロジーを実際のネットワークトポロジーへと近づける。1度の学習で1度の情報交換が必要となり、数百の学習を仮定する同手法では膨

大なトラフィックを発生させる。

多次元尺度法MDSを用いた手法<sup>12)</sup>は、対象間の距離を入力とし、2次元空間に座標を表示する手法である。距離は非類似性とも呼ばれ、似ている程近く、似ていない程遠い値を示す。MDSは端末間距離の類似性を表現することでデータの構造を可視的に解釈する。MDSを用いる手法では、全端末間の接続関係を収集し、コーディネータによる計算を要する。自律分散処理を前提とするアドホックネットワークにおいて、コーディネータを要することは問題となる。また、遠方ホップの情報を要するため、トポロジーの変化に弱い。

### 3. KKモデルを適応した位置推定

#### 3.1 通信モデル

本研究で想定するアドホックネットワークの無線端末について前提条件を示す。端末は、既存のプロトコルにおけるパケット転送により、双方向通信可能であるとする。無線端末の通信可能範囲として通信半径を設定するが、正規分布に基づく通信可能半径の変動を考慮する。各端末の通信は混信の影響を受けず、複数の端末との同時通信を許容する。以上の無線端末を1x1の全域にランダムに配置し、任意の無線端末が任意の無線端末位置を推定することを考える。位置情報を取得可能な端末、あるいはAP(Access Point)をランドマークと呼び、ランドマークの位置情報を位置推定に利用する。

電波特性非利用型の位置推定では、遠方hopへの情報転送を禁止し、位置推定に要するコントロールパケットが増加するのを抑制する必要がある。従って、電波特性非利用型の位置推定手法は近隣 $\rho$ ホップまでの情報転送で利用可能である必要がある。一方で、情報の転送ホップ数を限定すると、任意の無線端末の位置を推定したい場合に、獲得する情報が不十分となる場合がある。すなわち、目的の端末が $\rho$ ホップを越えた位置に存在する場合は、位置の推定が可能ではない。端末が $\rho$ ホップを越えた位置に存在する場合は必要に応じて情報を獲得するようにする。

近隣の情報転送に限定する点と必要な場合にのみ情報転送を許容する点を同時に行う通信モデルは、ZRP型<sup>13)</sup>の通信モデルが適合する。すなわち、近隣の無線端末から推定に必要な情報を適当な間隔で獲得するプロアクティブな通信処理と、必要に応じて遠方の無線端末に向けてコントロールパケットを転送するリアクティブな通信処理を併せた処理が可能となる。図1に通信処理の様子を示す。

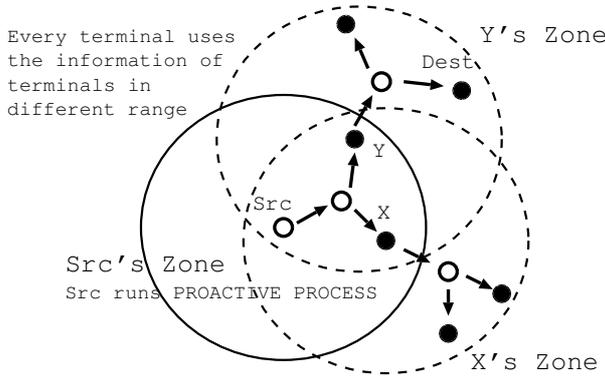


図1 Communication model similar with ZRP

### 3.2 プロアクティブ位置推定処理

プロアクティブ処理では近隣  $\rho$  ホップの端末の位置を端末ごとに独立に推定し、それらの推定位置を保持する。プロアクティブ処理によって自身を中心とする  $\rho$  ホップで隣接する端末に対する推定位置を保持する。プロアクティブ処理は適当な更新間隔で実行され、最新の位置推定結果を保持する。各端末は自身の存在位置を推定するだけでなく、近隣に存在する他の端末位置を推定する。尚、本稿では、ZRP で適当とされている値として  $\rho$  の値を 2 に設定する。各端末において自身を中心とする 2 ホップ以内に存在する端末の集合をサブセットと定義し、サブセットに含まれる端末を推定対象とする。

表1 Proactive Process

1. サブセットからの情報収集 (3.2.1)
2. 端末間距離の計算 (3.2.2)
3. サブセット端末の推定候補位置の決定 (3.2.4)
4. 全候補位置の全組合せに対するばねエネルギー計算 (3.2.5)
5. 推定位置保存 (3.2.6)

#### 3.2.1 情報収集

自身を中心として近隣 2 ホップ以内に存在するサブセット端末をプロアクティブ処理で取り扱う範囲とする。ホップ転送の数はパケットに  $TTL$  を設定することで制御可能である。 $TTL = 2$  と設定した Proactive Process Request (PPREQ) メッセージを送信する。PPREQ を受信した端末は (端末 ID、隣接する端末 ID) の情報を記述した Proactive Process Reply (PPREP) メッセージを送信元端末に返信する。ランドマークが PPREQ を取得した場合、そのランドマークの絶対位置情報を記述する。サブセット端末からの情報を収集し、接続関係を抽出する。サブセット端末間では 2 端末間全ての組合せに対する最短 hop 数が取得可能となる。

#### 3.2.2 1 ホップ間の近似距離計算

1 ホップで接続した端末どうしの端末間距離を近似することを考える。1 ホップで繋がれた端末と他の端末で構成される 3 つの端末が *CYCLE* を形成する確率に注目し端末間距離を近似する。*CYCLE* とは 3 つの端末同士が相互接続可能な関係を言う。図 2 のように、1hop で繋がれた端末  $i, j$  が存在するとする。この時  $i, j$  と第三の端末が *CYCLE* になる領域とは  $i, j$  を中心とする 2 円の重複領域 (AND) で表される。*CYCLE* にならない領域は  $i, j$  を中心とする 2 円の領域和から重複部分を引いた領域 (OR-AND) で表される。図 2 では  $o_2, o_3, o_5$  が *CYCLE* になり、 $o_1, o_4, o_6$  は *CYCLE* とはならない。

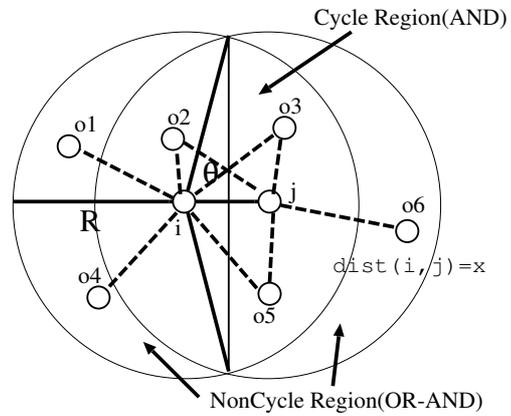


図2 the distance between 1hop neighbors and the cycle region proportion

*CYCLE* になる確率を、 $i, j$  端末と 1hop で繋がれている端末が  $i, j$  と *CYCLE* を形成する確率と定義する。図 2 のように端末  $i$  と  $j$  が 1hop で接続されている場合に 1hop 間距離を求めることを考える。 $i$  と接続している第三の端末が  $j$  と *CYCLE* になる時の理論的な確率  $\alpha_{ideal}$  は、式 (1)、式 (2) を用い、*CYCLE* を形成する面積比から求められる。

$$\alpha_{ideal} = f(x) = \frac{2\theta}{\pi} - \frac{x \sin \theta}{\pi R} \quad (1)$$

$$\theta = \arg(\cos \frac{x}{2R}) \quad (2)$$

端末間距離が 0 すなわち、2 端末が全く同位置に存在する場合、式 (1)、式 (2) に  $x = 0$  を代入することにより、理論確率  $\alpha_{ideal} = 1$  が得られる。 $i, j$  と接続する端末は必ず  $i, j$  と *CYCLE* を形成する。端末間距離が  $R$ 、すなわち、2 端末が最大通信可能距離で接続する場合、 $x = R$  を代入することにより、理論確率  $\alpha_{ideal} = 0.39$  が得られる。この時、 $i, j$  と接続する端

末は *CYCLE* を形成する確率が 0.39 であることを示す。関数  $f(x)$  は値域が 1 から 0.39 までの単調減少関数となる。

*CYCLE* を形成する確率は、端末の接続関係を実際に観測することで得ることができる。1 ホップで繋がれた端末  $i, j$  について、 $i$  と 1hop で接続する別の端末  $o$  が  $i, j$  と *CYCLE* を形成する端末数を  $C_{(u,v)}$  とし、 $i$  と 1hop で接続する端末の総数を  $N_i$  とするならば、*CYCLE* を形成する確率値  $\alpha_{observation}$  を式 (3) から求められる。観測から得られた *CYCLE* を形成する確率値を式 (4) のように  $f$  の逆関数に入力し端末間距離を得ることができる。

$$\alpha_{observation} = \frac{C_{(i,j)} + C_{(j,i)}}{N_i + N_j} \quad (3)$$

$$x = f^{-1}(\alpha_{observation}) \quad (4)$$

### 3.2.3 2 ホップ間の近似距離計算

3 端末で構成される三角形の辺の関係では、三角不等式の関係が常に成り立つ。つまり、どの 2 辺の和も他の 1 辺の大きさ以上になる。2 辺の和が他の 1 辺の大きさと等しい場合は、それら 3 頂点が一直線上に並ぶ時である。アドホックネットワークにおいて、2hop の端末間距離は中継端末により作られる 2 辺の和と関係する。

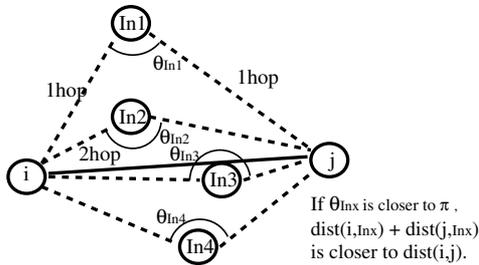


図 3 2hop approximated distance using triangle edges relationship

2hop の端末間距離は三角不等式の関係を利用すれば、中継端末の 1hop 間距離の和の最小値として式 (5) のように近似可能である。三角不等式は恒等的に成り立ち、中継端末がそれぞれの端末となす角度が  $\pi$  である時に等号が成り立つ。したがってランダムに端末を配置した場合、2hop 間の中継端末数が多い程、近似値が真値に近づく (図 3)。

$$dist_{(i,j)} = \min(dist_{(i,IN)} + dist_{(IN,j)}) \quad (5)$$

### 3.2.4 推定候補位置の決定

ランドマークの位置情報と近似された端末間距離を利用し推定候補位置を決定する。サブセットに含まれる各端末がランドマークと 1 ホップ、あるいは 2 ホップで接続している場合、ランドマークを中心として端

末間距離分離した円を描く。対象となるランドマークが複数ある場合、1 ホップで接続するランドマークを優先する。図 4 のように交点を推定候補点とする。推定候補点の片方を推定点として決定する方法は 3.2.5 で示す。交点ができない場合、ランドマーク間の中心位置を推定点として一意に決定する。1 ホップ、あるいは 2 ホップで接続するランドマークが 2 以上存在しない場合、その時点では候補位置は決定されない。本手法は位置推定の結果を新たにランドマークとして扱い、位置推定を再帰的に行う。

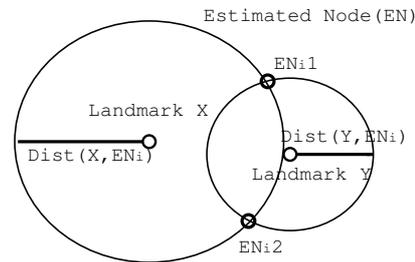


図 4 alternative to two estimated points

### 3.2.5 ばねエネルギー計算

サブセット端末に対して、推定候補点が定まる。各推定候補点の片方を推定点として選択する。各推定位置とランドマークを頂点として、1 ホップ、あるいは 2 ホップで接続した端末間の通信リンクを辺とすると、推定候補位置にある端末やランドマークは無向グラフとなる。推定  $n$  端末に対して、推定候補位置がそれぞれ、1 点もしくは 2 点存在するため、形成し得る無向グラフは  $2^n$  以下の組合せを持つ。

事前の処理により辺の長さが近似されている。すなわち、全ての頂点間の理想的な頂点間距離が得られている。従って、推定候補点を頂点として、辺が与えられたグラフにおいて、KK モデル<sup>14)</sup> 同様に、各辺をばねと見なし、ばねのエネルギーを計算することが可能である。

式 (6) は系全体のばねエネルギーの総和を示す式である。グラフにおける頂点  $i, j$  において頂点間の距離は  $dist_{(i,j)}$  となる。同頂点間の理想的な距離は 3.2.2 で近似された端末間距離となる。式 6 により、系全体のばねエネルギーを計算し、エネルギーが小さい程、理想的な接続関係に近い関係となる。式 (6) において  $k_{(i,j)}$  はばね定数を示し、頂点間のホップ数の違いにより重みとして設定可能となる定数である。本稿では経験的に端末どうしが 1 ホップで接続される場合に  $k$  の値を 1 と設定し、2 ホップで接続される場合に  $k$  の値を 0.2 と設定した。

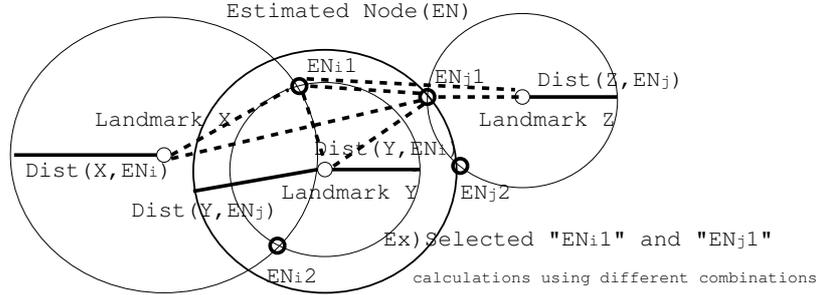


図5 Spring Energy Calculation of selected estimated points

$$E = \sum_{(i \in S)} \sum_{(j \in S)} \frac{1}{2} k_{(i,j)} (dist_{(i,j)} - length_{(i,j)})^2 \quad (6)$$

図5は、 $i, j$ における推定候補点のうち、 $EN_{i1}, EN_{j1}$ を選択した場合において、系全体のばねエネルギーを計算した状態を示す。同計算を別の推定候補点を頂点とする全ての無向グラフについて行う。最小のばねエネルギーを持つ組合せを各推定端末における推定点と決定できる。以上の操作により、近隣2ホップをサブセットとするサブセット端末において接続関係に適合した位置の推定が可能となる。

推定可能となった端末位置を新たにランドマーク位置とすることで、推定の伝播が可能になる。推定候補位置決定処理とばねエネルギー計算による推定点決定処理を収束するまで、再帰的に実行する。

### 3.2.6 推定位置の保存

最小のばねエネルギーを示した、推定候補位置を各サブセット端末における推定点とし、推定位置を更新、保存する。最小ばねエネルギー値も同時に保存する。

## 4. リアクティブ位置推定処理

近隣2ホップで接続されていない端末を目的端末として位置推定を行う場合、自身の処理するプロアクティブ処理では、目的端末をカバーできない。そこで、プロアクティブ処理におけるサブセット以外の端末集合に位置推定要求を送信する必要がある。オンデマンドに推定位置を要求する処理をリアクティブ処理と定義する。各端末は目的端末を探し、位置情報を得るため、アドホックネットワークに属する端末全てに Reactive Process Request メッセージ (RPREQ) をフラッディング転送する。要求された端末 ID における位置情報を推定テーブルに持つ端末は RPREQ に対して Reactive Process Reply メッセージを返信する。返信する情報の内容は、目的端末の推定位置とばねエネルギーとする。リアクティブ処理の概要を表2に示す。プロアクティブ処理では目的端末の位置を知る端末

表2 Reactive Process

- |                           |
|---------------------------|
| 1. RPREQ 送信               |
| 2. 収集した推定位置情報から最適な推定位置の選択 |

が発見されたら、それ以後の packets 転送を停止するメカニズムを採用できる。packets 転送の停止処理により、冗長な packets 転送は削減可能である。一方で、全ての端末から目的端末の推定位置情報を得られれば、複数の推定位置から適切な推定位置を選択することが可能となる。

以上のように、プロアクティブ処理では、定期的に近隣端末の位置推定を行い、リアクティブ処理では、必要に応じて推定位置の取得を行う。本手法により、packets の転送範囲を必要最小限に抑え、通信モデルを考慮した、効率の良い位置推定が可能になる。

## 5. シミュレーションによる性能評価

### 5.1 1hop 間距離の近似

本手法における端末間距離の近似性能を計算機シミュレーションにより評価する。通信半径を 0.25 に固定する。近似距離と実際の端末間距離の誤差を距離誤差とする。端末間距離をサイクル確率により近似する (提案手法) 場合と通信半径の  $\frac{1}{2}$  に一意に近似する (従来手法) 場合の距離誤差を比較する。表3で与える測定環境において計算機シミュレーションにより実験を行った。

従来手法の結果を図6に、提案手法の結果を図7に示す。横軸は距離誤差、縦軸は距離誤差の出現頻度である。ランダムに端末を配置しているため、端末間距離を通信半径の  $\frac{1}{2}$  に一意に近似すると、誤差が発生する。図6によると、距離誤差は、ほぼ一様に分布していることが確認できる。したがって、このように誤差の大きい端末間距離を利用すると、位置推定が正確に行えないことが予想できる。図7の補助曲線は平均  $\mu = -4.27\% (: r)$ 、標準偏差  $SD = 13.74\% (: r)$  の時

パラメーター	値
全域	1x1
通信半径 r	0.250
総端末数	100
1hop 端末間距離	CYCLE 確率による近似 (提案手法) 0.5r 近似 (従来手法)
配置	ランダム配置
測定端末対	300
端末移動	なし (snapshot)

の正規分布曲線を示す。従って、通信半径を 0.25 とした場合、提案手法による端末間距離の近似では、従来の一意的値に近似する手法に比べて、誤差を小さく抑えることが確認できた。

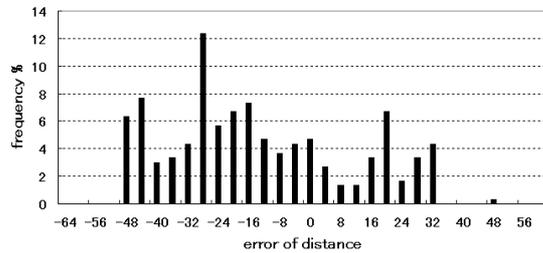


図 6 1hop distance error and frequency (conventional))

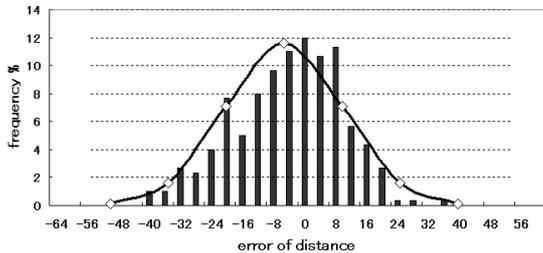


図 7 1hop distance error and frequency (proposal))

## 5.2 位置推定評価

### 5.2.1 接続次数と位置誤差の関係

提案する位置推定手法を計算機シミュレーションにより評価する。シミュレーションでは、端末間距離の近似と位置推定を行う。3.2.2 のように、CYCLE になる接続関係を観測することで端末間距離を近似し、接続関係に応じたばねエネルギーを計算することで適した推定位置を得る。

実験環境は表 4 のように与え、通信半径を変えた状況でどの程度の位置誤差になるかを確認する。比較対象として、Centroid、DV-hop、Gomashio を与えた。位置誤差の平均と中央値、位置推定のカバー率をトポロジーを 10 変えて測定した。実験環境を表 4 に示す。

位置誤差の中央値、カバー率を測定した結果を図 8、図 9 に示す。

パラメーター	値
全域	1x1
通信半径	0.125,0.167,0.200,0.250,0.300
通信半径誤差	標準偏差 5%の正規分布に基づく誤差
総端末数	100
ランドマーク数	20%
測定端末数	10 トポロジー分
配置	ランダム配置
比較対象の手法	Centroid、DV-hop、Gomashio
端末移動	なし (snapshot)
ばね係数 k	1(1hop 接続),0.2(2hop 接続)

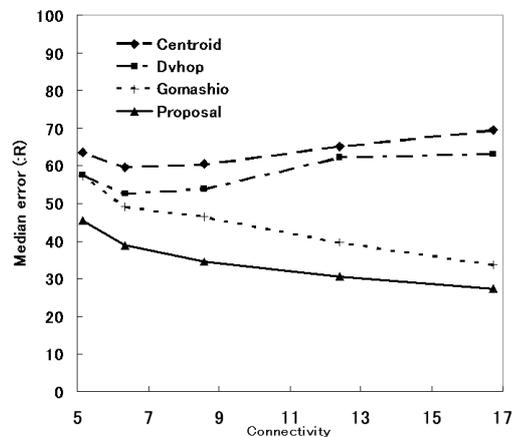


図 8 Median Error and Connectivity)

図 8 は横軸を平均接続次数、縦軸を位置誤差の中央値を示す。接続次数が 5 程度の場合、サブセットに含まれるランドマークの数が少ない。そのため、gomashio 手法では、複数のランドマークから情報が得られず、単一のランドマークからしか位置情報が得られない端末が増加する。そのため、位置誤差が大きくなってしまいます。接続次数が 5 程度の場合、提案手法では、サブセットに含まれる端末数が少なく、端末間距離の近似が正確にならない。従って、接続次数 5 程度の場合、提案手法による推定では位置が大きくなり、接続次数を増やす程、位置誤差は低減する。従来手法 Centroid、DV-hop、Goamshio に比べて、提案手法では中央値が大幅に小さいことが確認できる。

図 9 では、位置推定が可能となった端末のカバー率を示す。カバー率が 1 であれば、全ての端末で位置推定が可能となり、0 であれば、全ての端末で位置推定が不可能であることを示す。提案手法ではサブセットに含まれるランドマーク数が 3 以上ない場合に推定ができず、従来手法に比べて、カバー率は低い。

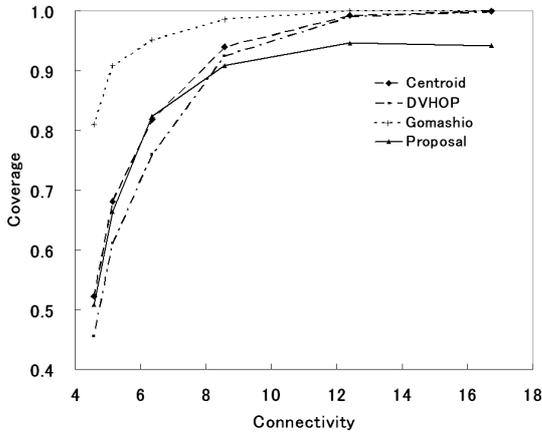


図9 Coverage and Connectivity)

### 5.2.2 ランドマーク数と位置誤差の関係

次に、ランドマーク数の位置誤差に与える影響を評価する。少ないランドマークで位置誤差を小さくできる程、良い位置推定手法である。実験環境を表5に示す。位置誤差の中央値、カバー率を測定した結果を図10、図11に示す。

表5 Location Error and Landmark Number

パラメーター	値
全域	1x1
通信半径	0.250
通信半径誤差	標準偏差 5%の正規分布に基づく誤差
総端末数	100
ランドマーク数	5%、10%、15%、20%、25%、30%
測定端末数	10 トポロジー分
配置	ランダム配置
比較対象の手法	Centroid、DV-hop、Gomashio
端末移動	なし (snapshot)
ばね係数 k	1(1hop 接続), 0.2(2hop 接続)

Gomashio はランドマークが増加する程、存在可能性のある範囲を小さくすることが可能となる。従って、ランドマークが多い状況では、Gomashio 手法は推定精度が向上している。一方で、得られるランドマークの情報が単一であるようなランドマーク数が少ない場合には、位置誤差が大きい。提案手法では、端末間距離を近似し、位置推定を行う。前述の実験ように平均接続数の多い場合、端末間距離を適切に近似可能である。従って、近似距離を利用し、ランドマーク数が少ない場合でも位置誤差を著しく低減できた。

図11は横軸にランドマーク存在比率、縦軸に位置推定のカバー率を示す。提案手法では、サブセットに含まれるランドマーク数が3以上ある必要がある。そのため、必要ランドマーク数が1である Gomashio 手法に比べ、カバー率は悪い。しかし、必要ランドマー

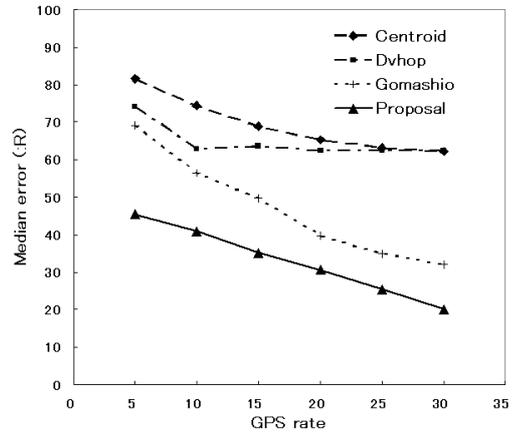


図10 Median Error and Landmark Number)

ク数が同じ3である DV-hop や提案手法よりも少ない必要ランドマーク数が2である Centroid に比べカバー率が良い。位置推定誤差、カバー率を総合して考えると、提案手法は接続次数の多い、すなわち、端末密度が密な状況において、あるいは、ランドマーク数が少ない場合において、従来手法と比較して有効であると言える。

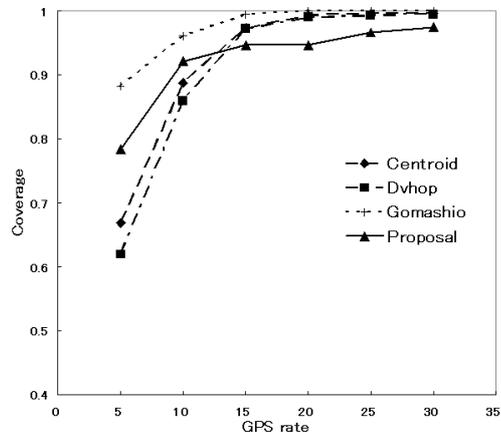


図11 Coverage and Landmark Number)

### 5.3 各位置推定手法の特徴

各位置推定を別の観点から捉える。表6にそれぞれの手法の特徴を示す。接続次数の依存度では、位置推定手法の推定精度が接続次数に依存する程度を示す。Free は推定精度が接続次数に依存しないことを示す。ランドマーク数の依存度は、位置推定手法の推定精度がランドマーク数に依存する程度を示す。Free はランドマーク数が接続次数に依存しないことを示す。

表 6 Feature of each method

方式	Centroid	DV-hop	Gomashio	using SOM	using MDS	PROPOSAL
接続次数の依存度	Free	Free	Dependent	not clear	Dependent	Dependent
ランドマーク数の依存度	Free	Free	Dependent	not clear	Dependent	Dependent
精度	not good	not good	fair	fair	accurate	accurate
情報収集範囲	small	small	small	small	very large	small
情報収集回数	small	small	small	huge	small	small
自律分散処理	disputed	disputed	disputed	disputed	centrized	disputed
推定範囲	self	self	self	1,2hop neighbors	all	1,2hop neighbors
推定カバー率	good	not good	good	good	good	not good

表 6 に示すように、基本的には、収集する情報量と位置推定精度はトレードオフの関係にある。また、計算量や分散処理の可能不可能を考慮すると、全ての点で優れる手法を述べることは難しい。提案手法は特徴として、推定精度が良い見込みのある推定端末については、極めて高精度に位置推定を行い、推定精度が良い見込みのない推定端末については、位置推定を放棄する手法であるといえる。したがって、図 10、図 11 のように、推定精度の向上と推定カバー率の低下が結果的に確認された。

## 6. ま と め

アドホックネットワークにおける従来の位置推定手法は、位置誤差が大き、あるいは、通信モデルとして、実用に向かない問題があった。本稿では、位置情報は遠方になる程、情報価値が損なわれるという考えの元、絶対位置の有効範囲に制限を持たせた。近隣の 2 ホップを情報収集範囲としたプロアクティブ処理では、端末の適切な近似の処理と、ばねモデルを適応した接続関係に適合する位置の推定を可能にした。プロアクティブ処理の推定結果を利用したオンデマンドなりアクティブ処理により、柔軟性のある位置推定手法となった。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤 C（2）15500037,2003-04）の支援を受けた。

## 参 考 文 献

- [1] P.Bahl and V.N.Padmanabhan:RADAR:An In-Building RF-based User Location and Tracking System,Proceedings of the IEEE Infocom 2000,vol.2,pp. 775-784,2000.
- [2] R.Want,A.Hopper,V.Falcao and J.Gibbons:The Active Badge Location System,ACM Transactions on information Systems 1992 January.
- [3] J.Hightower,G.Boriello and R.Want:SpotON:An indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength,University of Washington CSE Report#2000-02-02 '01 February
- [4] J.Caffery,Jr:A New Approach to the Geometry of TOA Location, In IEEE Vehicular Technology Conference(VTC),Boston,Mass,'00 September
- [5] D.Niculescu and B.Nath:Ad Hoc Positioning System(APS) Using AOA,INFOCOM '03,San Francisco,CA '03
- [6] N.B.Priyantha,A.K.L.Miu,H.Balakrishnan and S.Teller:The Cricket Compass for Context aware Mobile Applications,ACMIEEE Mobicom, '01 July
- [7] S.Capkun,M.Hamdi and J.P.Hubaux:GPS-free positioning in mobile Ad-Hoc networks,Hawaii International Conference On System Sciences,HICSS-34 '01 January
- [8] Tian He,Chengdu Huang,Brian M.Blum,John A.Stankovic and Tarek Abdelzaher:Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks,MobiCom 2003
- [9] D.Niculescu and B.Nath:Ad Hoc Positioning System(APS),In Proceedings of IEEE GLOBECOM '01 November
- [10] 岩谷晶子,西尾信彦,村瀬正名,徳田英幸:ごましお:アドホックセンサネットワークにおけるノード位置決定方式,情報処理学会,モバイルコンピューティングとワイヤレス通信研究会 Vol.2001(108),pp.22-30,2001
- [11] 保坂幸治,呉屋健,梅原大祐,川合誠:SOM アルゴリズムを用いたネットワークポロジの再現,電気通信学会電子・情報・システム部門誌,Vol.122-C,No.2,pp.208-216(Mar. 2002)
- [12] Y.Shang,W.Rumi,Y.Zhang and M.Fromherz:Localization from Connectivity in Sensor Networks,IEEE Transactions on parallel and distributed systems , vol.15,no.11 November 2004
- [13] Z.J.Haas and M.R.Pearlman:The Zone Routing Protocol(ZRP) for ad hoc networks,IETF Mobile Ad-hoc Network(MANET) Working Group '98
- [14] T.Kamada and S.Kawai:An Algorithm for Drawing General undirected Graphs,Information processing Letters,Vol.31,No.1('89),pp.7-15