

レンジベース手法とレンジフリー手法の併用によるセンサーネットワークの自己位置推定

薬師寺 将 光*・桜 間 一 徳*

Localization of Sensor Network by Combination of Range-based Method and Range-free Method

Masamitsu YAKUSHIJI* and Kazunori SAKURAMA*

1. 諸 言

1.1 研究背景

近年、マルチエージェントシステムという、複数のエージェントから構成されるシステムによる問題解決手法が注目されている¹⁾。これは多数のエージェントの相互作用・協調動作によって問題を解決するという概念で、特に工学分野においては群ロボットなどを扱う研究分野がある。群ロボットの研究にあたっては群行動という概念が用いられる。群行動とは、ごく限られた能力しか持たないエージェントが周囲のエージェントと情報を交換し互いに協調し合うことで、群れ全体として高度なパフォーマンスを実現するものである。自然界における軍隊アリのフォーメーション行動、生物の体内における免疫系などが知られている²⁾。このような概念に基づく工学的マルチエージェントシステムとして、センサーネットワークという、多数のセンサーノードをエージェントとしたセンシング技術の研究に注目する。これは単体ではごく狭い範囲のセンシング能力しか持たない簡易的なセンサーノードを多数散布することで面でのセンシングを行う手法である。このとき、例えば気温や放射線などの測定値の分布を計測しようとする、情報を実際の座標と対応させなければならない。そのため、各センサーノードには自己位置を推定する能力が必要とされる³⁾。また、群ロボットの協同作業、特にフォーメーション制御においても、しばしばロボット同士の位置関係や全体としての位置関係が情報として必要となる。既存の自己位置推定手法としては大きくレンジベース手法とレンジフリー手法に二分される⁴⁾。レンジベース手法については位置情報が既知のノード（以下アンカーノード）からの信号到来時間（TOA）や信号到達強度（RSS）によって距離を測定し、3点からの重ね合わせによって位置を特定する手法、アンカーノード2点でよいが指向性のセンサーが必要な

到来方向（AOA）に基づく手法などがある。いずれも精度は良いが、センサーノードがアンカーノードからの信号を直接受け取る必要がある。レンジフリー手法は、通信可能なアンカーノードの平均座標をとる Centroid 法、アンカーノードからのホップ数に基づいて推定する DV-HOP 法、アンカーノードのうち3点の組み合わせで三角形を形成して判別する APIT 法などがある。これらはいずれも周囲のノードとの通信のみで位置推定が可能だが、精度が低い。

1.2 研究目的

本研究では、通信機能のあるセンサーノード群がネットワークを形成した際に、ノードが相互の位置関係を把握するための新規手法を提案する。ごく限られた範囲の通信機能しか持たないノード群を考え、ネットワーク全体のグローバルな情報であるホップ数と、近傍ノードとの物理的距離というローカルな情報を組み合わせる方法を提案する。この手法によって最終的に得られる推定座標の精度が向上を期待される。その成否をシミュレーションによって考察する。

2. 問題設定

2.1 想定するセンサーネットワーク

本研究が目的とするのは、以下のようなセンサーネットワークの各ノードの自己位置推定である。予め設置してあり位置が既知であるアンカーノード $A = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ と、ランダムに散布され位置の分からないセンサーノード $S = \{m+1, m+2, m+3, \dots, m+n\}$ によって構成される。すべてのノードは1から $m+n$ までの固有のIDを持つ。各センサーノード $k \in S$ の自己位置を $P_k = (x_k, y_k)$ とおく。これは未知であるとする。各センサーノードの持つ自身の推定座標を $\hat{P}_k = (\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ とする。また、周囲の一定範囲（通信半径 r ）内のノード $l \in N_k \subset S \cup A$ と通信可能であり、保持するID、推定座標などの情報を送受信できるとする。また通信可能なノードとの距離 $D_{(k,l)}$ が測定可能であるとする。すなわち、各センサーノードが得られる物理的情報は、通信可能な範囲内に存在する各ノードとの距離のみであり、角度

* 鳥取大学

* Tottori University

や座標の情報は得られないものとする。ネットワークの例を Fig.1 に示す。

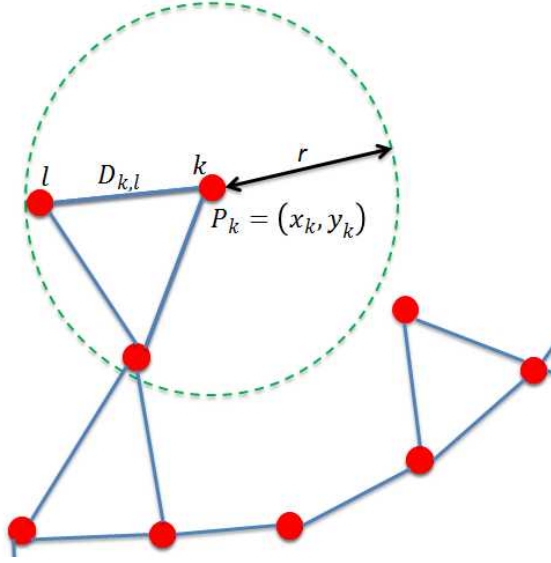


Fig. 1 ネットワーク図解

各アンカーノード $i \in A$ から他のアンカーノード $j \in A$ までのネットワーク上の最短経路数^{8) 9)} を $h_{(i,j)}$ とおく。これはダイクストラ法¹⁰⁾ と同様のアルゴリズムによって計測できるとする。一例を Fig.2 に示す。四隅の青色の円がアンカーノードであり、赤色の円がセンサーノードである。ノード間の線は通信可能範囲にあり、直接接続していることを示す。各ノードが表示している数字が、左下のアンカーノードからのホップ数となる。

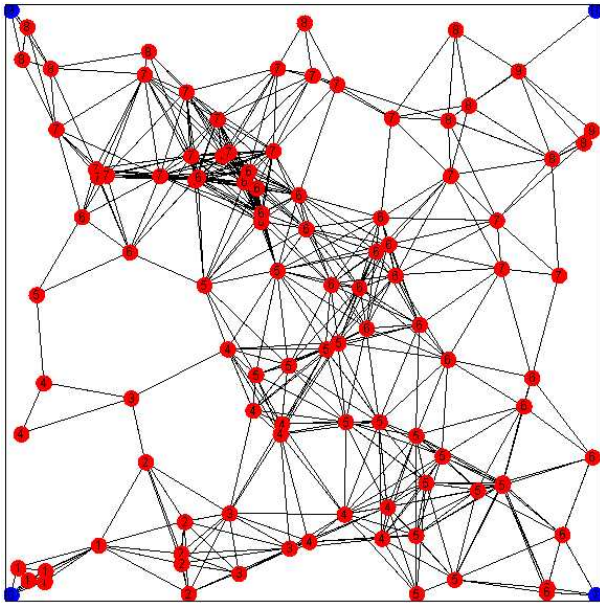


Fig. 2 ネットワーク例

ここから各アンカーノードからの 1 ホップあたりの平均距

離 d_i は次のように定義され、ネットワーク上に伝達される。

$$d_i = \frac{1}{m-1} \sum_{j \in A \setminus \{i\}} \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{h_{(i,j)}}$$

センサーノード k は各アンカーノードからの 1 ホップあたりの平均距離 d_i とアンカーノード i からの最短ホップ数 $h_{(i,k)}$ によって、アンカーノード $i \in A$ からの推定距離 $\hat{d}_{(i,k)} = d_i h_{(i,k)}$ を得る。

2.2 制御目的

各センサーノードの推定座標 $\hat{P}_k = (\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ と未知である真値 $P_k = (x_k, y_k)$ の間の距離の差の和を表す次の関数を考える。

$$F(\hat{P}_1, \hat{P}_2, \hat{P}_3, \dots, \hat{P}_n) = \sum_{k \in S} \sqrt{(\hat{x}_k - x_k)^2 + (\hat{y}_k - y_k)^2}$$

この目標関数が 0 となるような \hat{P}_k をを見つける方法を考える。これは各センサーノードが計算する自身の推定座標 \hat{P}_k を、未知である真値 P_k と合致させることと等しい。

3. 提案手法

センサーネットワークの自己位置推定手法は、距離情報が必要としないレンジフリー手法と、距離や角度の情報を測定するレンジベース手法に大別される。本研究においてはレンジフリー手法のうち、DV-HOP 法と、距離のみに基づくレンジベース手法の組み合わせを提案する。

3.1 レンジフリー手法

本研究ではレンジフリー手法のうち、DV-HOP 法を用いる。これはセンサーノードが均一に分布するとき、あるノードから他のノードまでの物理的距離とホップ数に相関があることを利用して位置を推定する。Fig.3 のネットワーク図は、左下隅のアンカーノードからのホップ数とセンサーノードの色を対応させ、赤色から青色への変化でホップ数が大きくなったことを示す。色の変化すなわちホップ数の変化が、左下のアンカーノードからの距離に概ね対応していることが分かる。

この情報に基づいて位置を推定するため、各センサーノード k は、アンカーノード $i \in A$ からのホップ数に基づく推定距離 $\hat{d}_{(i,k)}$ と、自己推定座標 \hat{P}_k とアンカーノード座標 P_i の間の距離の差の二乗和を表す次の関数を考える。

$$f_k(\hat{P}_k) = \sum_{i \in A} \left(\hat{d}_{(i,k)} - \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \right)^2$$

この目標関数が最小になる推定座標 $\hat{P}_k = (\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ を求める。そのため、 \hat{P}_k の値を以下の式と定数 a によって、ステップ t ごとに逐次更新する^{5) 6) 7)}。概要を Fig.4 に図解する。

$$\hat{P}_k(t+1) = \hat{P}_k(t) - a \frac{\partial f_k(\hat{P}_k)}{\partial \hat{P}_k}$$

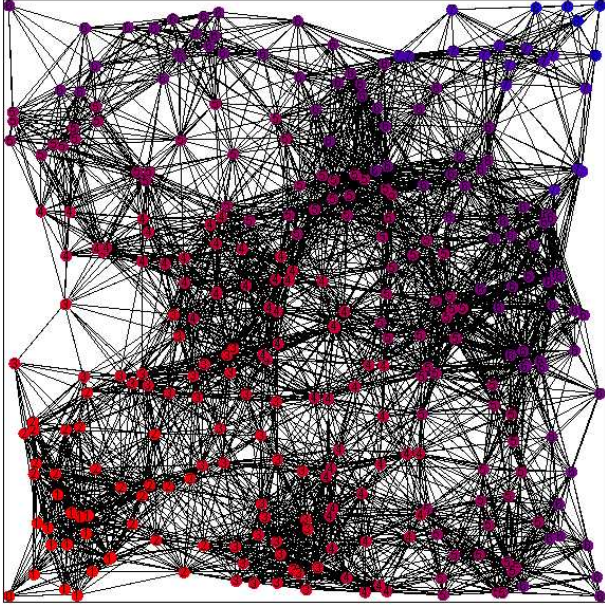


Fig. 3 ホップ数色調表示図

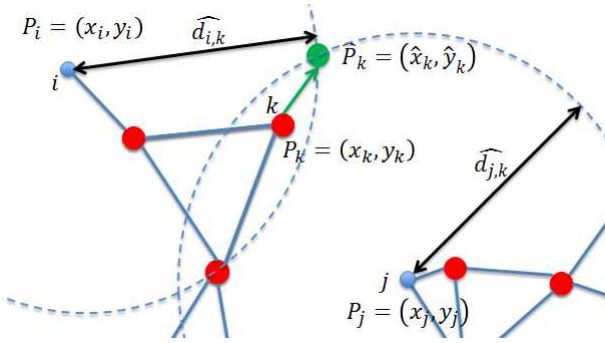


Fig. 4 DV-HOP 法図解

この手法の欠点としては、最小解像度が各アンカー間距離をホップ数で割った値になり、粗い解、つまりネットワーク全体から見れば概ね正しいが、当該ノード近傍の相互の位置関係としては測定した距離から矛盾する解が求まることにある。

3.2 レンジベース手法

レンジベース手法では、各センサーノードが直接測定可能な情報である通信可能なノードとの距離 $D_{(k,l)}$ に基づいて位置推定を行う。まず、センサーノード $k \in S$ がそれぞれ周囲の一定範囲 (通信半径 r) 内のノード $l \in N_k \subset S \cup A$ から受け取った推定座標 $\hat{P}_l = (\hat{x}_l, \hat{y}_l)$ と、そのノードとの測定距離 $D_{(k,l)}$ との差の二乗和を表す次の関数を考える。

$$g_k(\hat{P}_k) = \sum_{l \in N_k} \left(D_{(k,l)} - \sqrt{(\hat{x}_k - \hat{x}_l)^2 + (\hat{y}_k - \hat{y}_l)^2} \right)^2$$

次に、この関数が最小となる点へと、 $\hat{P}_k(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ の値を以下の式と定数 b によってステップ t ごとに逐次更新する。概要を Fig.5 に図解する。

$$\hat{P}_k(t+1) = \hat{P}_k(t) - b \frac{\partial g_k(\hat{P}_k)}{\partial \hat{P}_k}$$

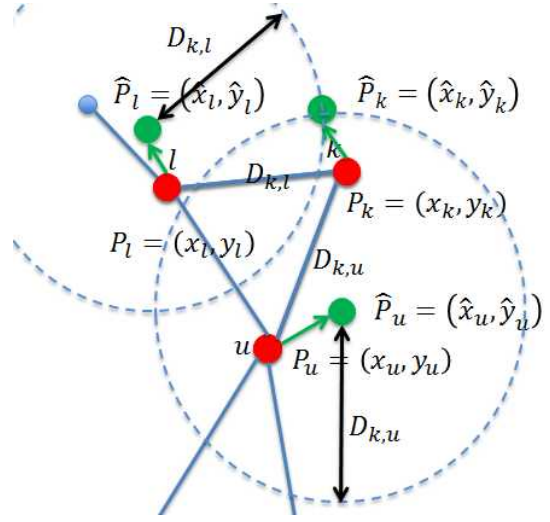


Fig. 5 レンジベース手法法図解

各ノードがこれを繰り返すことで、全ノードにとって互いの推定位置と測定距離に矛盾のない推定位置を算出することができる。長所としては当該ノード近傍の位置関係としては正確な相互座標が素早く出せることとなる。短所として、ネットワークが大規模化すると全体から見て正しい座標からずれ、また必要な計算量・通信量が著しく増える。前提として、ネットワーク全体から見て正しい座標を持つアンカーノード近傍のセンサーノードが概ね正しい座標推定を行い、その近傍のノードも概ね正しい推定を行う。この流れが、中間に生ずるいずれのアンカーからも遠い層によって妨げられることにあると考えられる。

3.3 2手法の併用

そこで、この2手法を併用することによる問題解決を考える。すなわち、先ずレンジフリー手法によってネットワーク全体から見て概ね正しい解を求め、レンジベース手法によって近傍ノードとの位置関係を正確に合わせる。具体的には、第一段階としてレンジフリー手法による推定を $a \frac{\partial f_k(\hat{P}_k)}{\partial \hat{P}_k}$ が一定の閾値 c 以下になるまで行ったのち第二段階に移行し、第二段階に移行したセンサーノード同士でレンジベース手法による推定を行う。フローチャートを Fig.6 に示す。

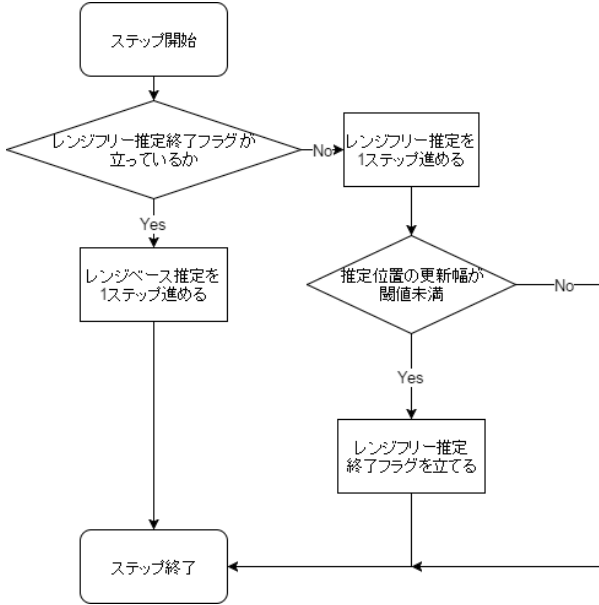


Fig. 6 2手法併用フローチャート

また、レンジベース手法の目標関数、値の更新について、レンジフリー手法のために測定した、それぞれのアンカーノードからのホップ数のうち最低の値 $\min_{i \in A} h(i, k)$ と定数 G に基づいた重み付けを加えた以下の式を用いる。

$$q_k(\hat{P}_k) = \sum_{l \in N_k} \left\{ \left(D_{(k,l)} - \frac{\sqrt{(\hat{x}_k - \hat{x}_l)^2 + (\hat{y}_k - \hat{y}_l)^2}}{G + \min_{i \in A} h_{i,k}} \right)^2 \right\}$$

これはレンジベース手法の計算手順上、いずれかのアンカーノードに近いノードほど正確な推定を行っている可能性が高いと考えられるためである。また、この式を用いると $h(i, k)$ が小さいアンカーノード近傍のノードの推定位置が発振する傾向にあるため、更新に用いる式に定数 T を加え、以下のように入振が抑制されるよう変更する。

$$\hat{P}_k(t+1) = \hat{P}_k(t) - b \frac{\partial q_k(\hat{P}_k)}{\partial \hat{P}_k} \cdot \frac{1}{t+T}$$

4. シミュレーション環境

2種の環境において、レンジベース手法、レンジフリー手法、2手法の併用についてシミュレーションする。第一に環境 α として、 50×50 の二次元空間の四隅に4つのアンカーノードを配置、300個のセンサーノードを、 $t=0$ における座標 $P_k(0)$ 及び推定座標 $\hat{P}_k(0)$ を一様に分布するようランダムに配置し、通信可能距離 $r=10$ としてシミュレーションを行った。シミュレーションにおけるネットワーク図の一例をFig.7に示す。四隅の青色の円がアンカーノードであり、赤色の円がセンサーノードである。ノード間の線は通信可能範囲にあり、直接接続していることを示す。

第二に環境 β として、 70×70 の二次元空間の四隅に4つのアンカーノードを配置、600個のセンサーノードを、 $t=0$

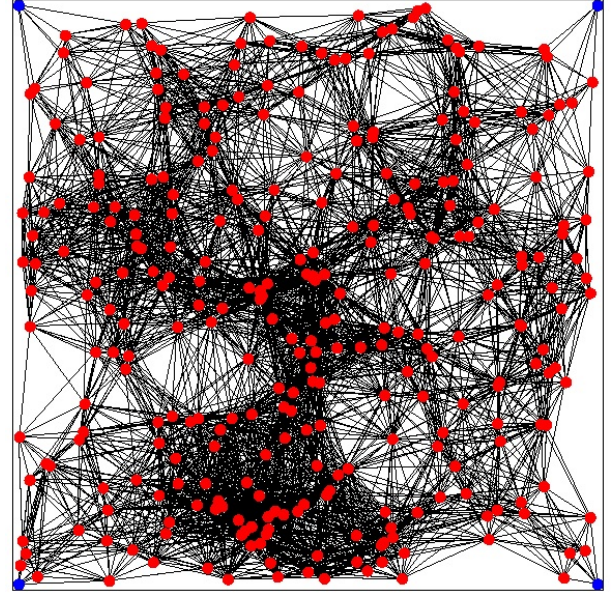


Fig. 7 環境 α ネットワーク例

における座標 $P_k(0)$ 及び推定座標 $\hat{P}_k(0)$ を一様に分布するようランダムに配置し、通信可能距離 $r=10$ としてシミュレーションを行った。シミュレーションにおけるネットワーク図の一例をFig.8に示す。四隅の青色の円がアンカーノードであり、赤色の円がセンサーノードである。ノード間の線は通信可能範囲にあり、直接接続していることを示す。

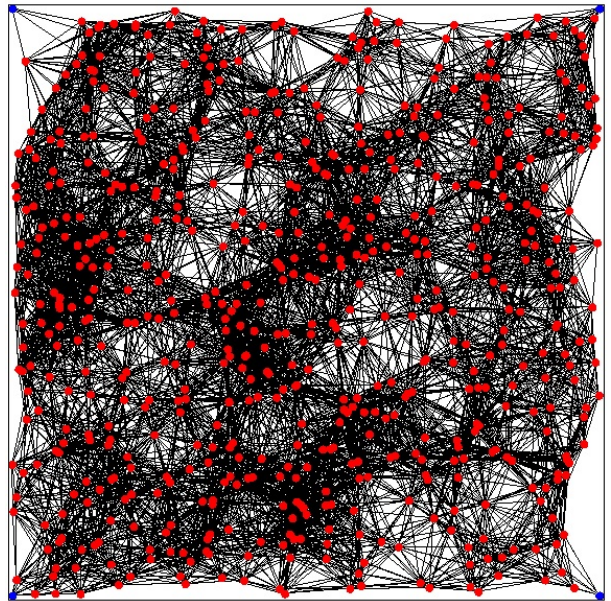


Fig. 8 環境 β ネットワーク例

5. 実験結果

各手法ごとに10回ずつ試行し、各センサーノードごとの

座標の真値と推定値の差を表す次の関数を考える．

$$E_k(\hat{P}_k) = \sqrt{(\hat{x}_k - x_k)^2 + (\hat{y}_k - y_k)^2}$$

各手法のシミュレーション結果として，この関数の平均値および最大値の推移についてグラフ化した結果を以下の Fig.9 から Fig.12 に示す．各線はそれぞれ独立した試行を表す．赤色の線がレンジベース手法，緑色の線が DV-HOP 法，青色の線が 2 手法の併用による試行である．

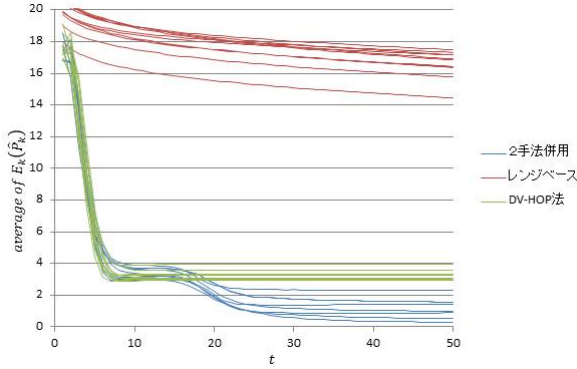


Fig. 9 環境 α 平均誤差推移

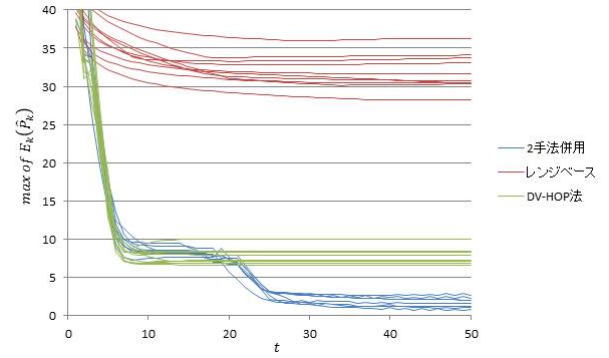


Fig. 11 環境 α 最大誤差推移

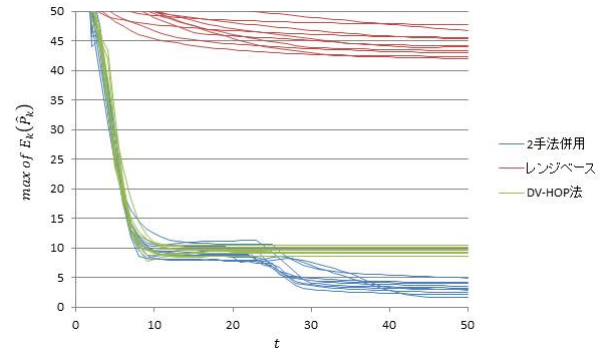


Fig. 12 環境 β 最大誤差推移

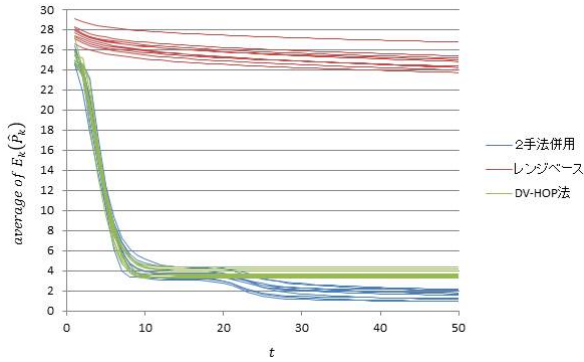


Fig. 10 環境 β 平均誤差推移

Fig.9 から Fig.12 までの各図で推移を比較すると，環境 α, β, 平均誤差，最大誤差ともに，2 手法併用では $t = 10$ 程度までは第一段階の DV-HOP 法によって急激に降下し， $t = 20$ 程度で第二段階のレンジベース手法に移行し最も正確な値に近づく．この実験結果から，2 手法の併用は，DV-HOP 法の限界をレンジベース手法で補う形で，センサーノードの自己位置推定能力を向上させたと考えられる．

次の Fig.13 から Fig.18 は環境 α での 2 手法併用による $t = 0, t = 10, t = 20, t = 30, t = 40, t = 50$ における推定座標推移の一例である．四隅の青色の円がアンカーノードであり，赤色の円がセンサーノード，センサーノードから伸びる

矢印の先がその時点における推定座標である．ノード間の線は通信可能範囲にあり，直接接続していることを示す．センサーノードの赤色が薄く変色しているのは，DV-HOP 法による推定を終え，レンジベース手法による推定を行っていることを表す．

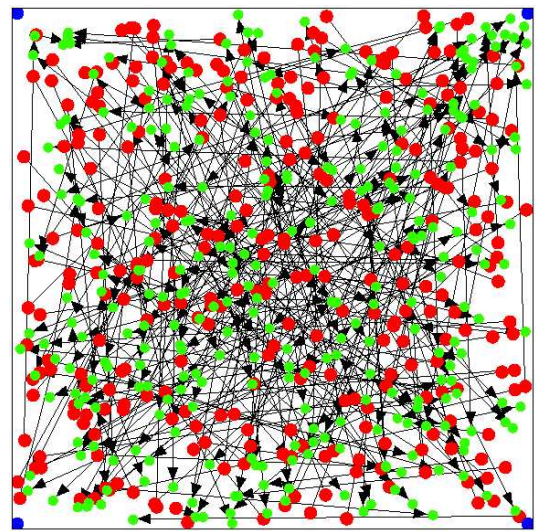


Fig. 13 $t = 0$

Fig.14 に注目する．この図が示すのは $t = 10$ における各

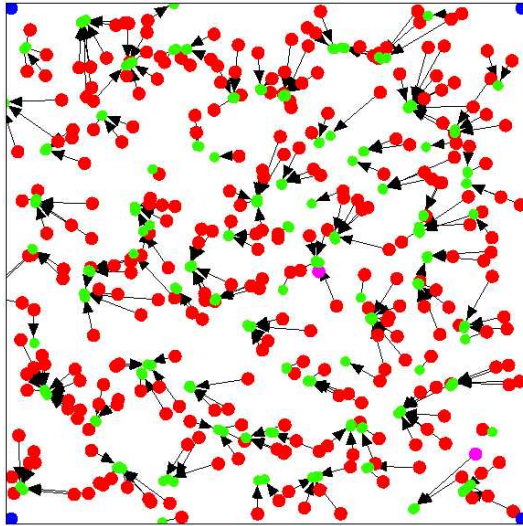


Fig. 14 $t = 10$

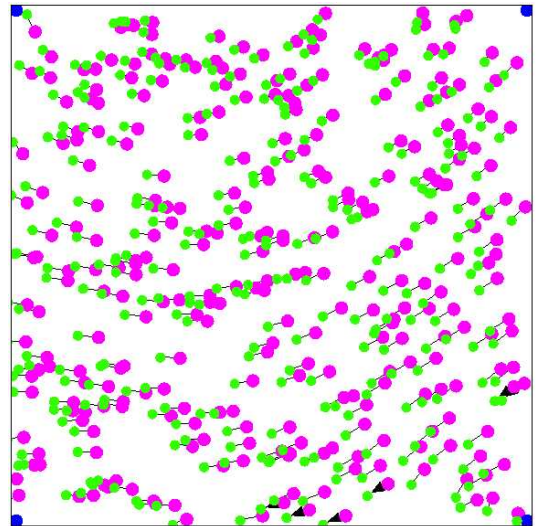


Fig. 16 $t = 30$

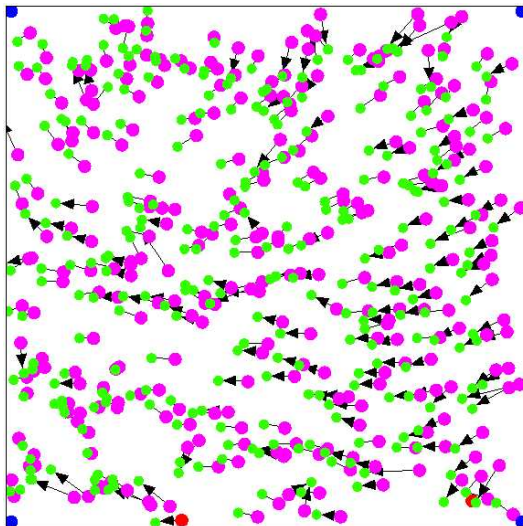


Fig. 15 $t = 20$

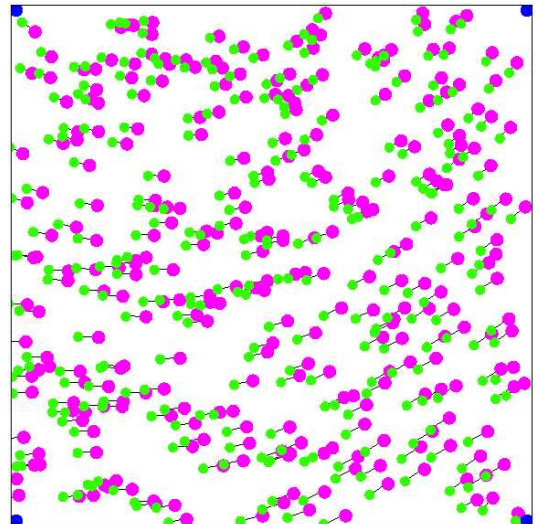


Fig. 17 $t = 40$

ノードの推定座標であるが、すなわち Fig.4.3, Fig.4.5 から分かるように、DV-HOP 法による推定の限界に相当する状況である。近いホップ数を持つのであろうノード群が、それぞれ同一の位置を自己位置として推定しているのが見て取れる。ここからレンジベース手法に移行した Fig15 以降の推移を見ると、この問題が解消されていることが分かる。このことから、2 手法の併用について、DV-HOP 法の限界をレンジベース手法で補う形でセンサーノードの自己位置推定能力を向上させたとする推測を裏付ける挙動を示していると言える。

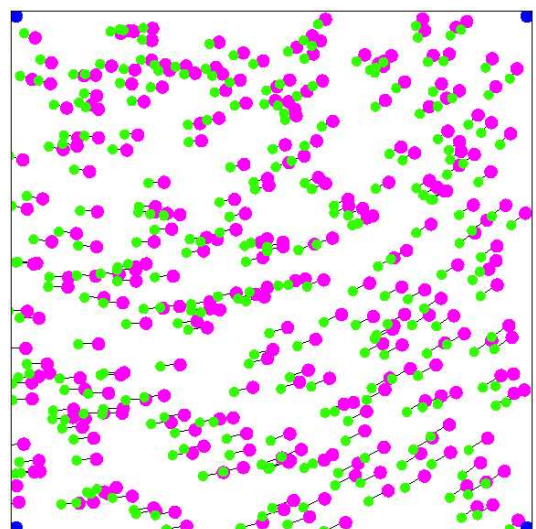


Fig. 18 $t = 50$

6. 結 言

本研究では、センサーネットワークの自己位置推定における精度向上のため、レンジフリー手法とレンジベース手法の組み合わせを提案した。結果、レンジフリー手法である DV-HOP 法の、ネットワーク全体から見て概ね正しい位置が求まるグローバルな正確性と、レンジベース手法の特長である近傍ノードとの位置関係の整合性によるローカルな正確性を組み合わせることで、双方の短所を補い合うことに成功した。

今後の課題として、GPS と比較した場合の優位性を明確にするため、通信を阻害する障害物のある環境で比較する必要がある。入り組んだ閉鎖環境でもネットワーク構造さえ成立すれば位置推定が可能なが実証できれば、GPS に対する明確な長所となる。

参 考 文 献

- 1) 沼岡千里, 大沢栄一, 長尾確, “マルチエージェントシステム”, 共立出版, (1998)
- 2) メラニー・ミッチェル, “ガイドツアー 複雑系の世界 サンタフェ研究所講義ノートから”, 紀伊國屋書店, (2011)
- 3) 戸部義人, “無線センサネットワークの技術動向”, 電子情報通信学会誌 A Vol.J90-B No.8 pp.711-719, (2007)
- 4) 大野翔平, 足立直世, 滝沢泰久, “無線センサネットワークにおける自己組織化位置推定方式の提案”, 情報処理学会論文誌 Vol.53 No.7 pp.1774-1782, (2012)
- 5) 矢部博, “工学基礎 最適化とその応用”, 数理工学社, (2006)
- 6) 鈴木大慈, “確率的最適化”, 講談社, (2015)
- 7) 永田靖, 棟近雅彦, “多変量解析法入門”, サイエンス社, (2001)
- 8) 若宮直紀, 荒川伸一, “生命のしくみに学ぶ情報ネットワーク設計・制御”, コロナ社, (2015)
- 9) David Easley, Jon Kleinberg, “ネットワーク・大衆・マーケット”, 共立出版, (2013)
- 10) 秋葉拓哉, 岩田洋一, 北川宣稔, “問題解決のアルゴリズム活用力とコーディングテクニックを鍛えるプログラミングコンテストチャレンジブック 第二版”, 株式会社マイナビ, (2012)