

RM-004

センサネットワークにおける Hop-Vector に基づくノード位置推定手法の検討  
 An Examination of Estimation Method of Geographical Location  
 based on Hop-Vector for Sensor Networks

河内 康佑<sup>†1</sup>

佐藤 雄亮<sup>†1</sup>

油田 健太郎<sup>†2</sup>

岡崎 直宣<sup>†3</sup>

富田 重幸<sup>†3</sup>

Kosuke Kawachi<sup>†1</sup>

Yusuke Sato<sup>†1</sup>

Kentaro Aburada<sup>†2</sup>

Naonobu Okazaki<sup>†3</sup>

Shigeyuki Tomita<sup>†3</sup>

1. はじめに

近年、無線通信技術の発達と無線通信デバイスの小型軽量化に伴い、無線通信機能と計算機能を有した小型センサ（以下、センサノード）を多数配置し、センサノード同士が相互に自律的に接続して構築されるセンサネットワークが注目を集めている。センサネットワークから利用者が得られる情報は、センサから取得されたセンシングデータであるが、震度や気温など環境をセンシングするアプリケーションでは、位置情報が重要となる。位置情報を取得する手段として最も一般的であるのはGPS(Global Positioning System)の利用であるが、GPSを利用するためには端末に受信機を搭載する必要があり、一度に数百から数千のセンサノードの利用を想定している、センサネットワークの全センサノードに対して受信機を搭載すると、非常に高コストなシステムになってしまう。そこで、位置情報を保有する一部のノード（以下、ランドマーク）とのホップ数や位置関係から位置情報を保有しない他ノード（以下、一般ノード）の位置を自律的に推定する手法の研究が行われている[1][2][3]。しかし、既存の位置測定手法は、高精度の位置測定を行うためには多くのランドマークが必要であり、システムのコストが増大してしまう。

そこで、本研究では少ないランドマーク数で高精度の位置測定を可能とする位置測定手法を提案する。本提案手法では、位置情報を用いないルーティング方式の一つであるHVGF[5][6]がアドレスの代わりに用いるホップ数ベクトルに着目し、ホップ数ベクトルから算出するノルムと実距離との相関を利用した、回帰分析に基づく位置測定を行う手法を検討する。

以下、2.でセンサネットワークについて述べ、3.にて既存の位置測定手法について述べる。次に4.にて本研究の対象であるHVGF方式について説明する。そして、5.で提案手法について述べ、6.で提案手法についてシミュレーション評価・考察を行う。最後に7.でまとめと今後の課題について述べる。

2. センサネットワーク

ここでは、対象ネットワークであるセンサネットワークについて述べる。各センサノードは自律的に動作し、温度、湿度、光量などの測定を行い、取得したセンシングデータは無線を使用してシンクノードへ転送される。簡単な構成例を図1に示す。センサネットワークの利点として、設置制約が少ないことと観測者は欲しい情報のみを取得可能であることが挙げられる。人や物の状況や

<sup>†1</sup> 宮崎大学大学院

<sup>†2</sup> 熊本県立大学

<sup>†3</sup> 宮崎大学

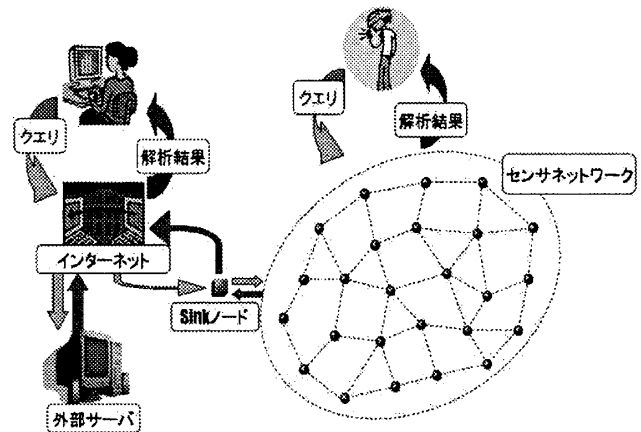


図1. センサネットワークの構成例

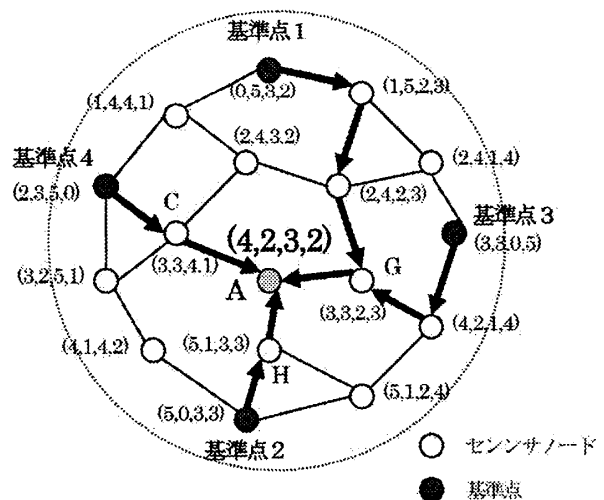


図2. HVGF方式によるホップ数ベクトルの作成例

周辺の環境などをセンサノードが認識し、センサノード同士の自律的な情報の流通により、状況へのリアルタイムな対応を可能にすることで、医療や福祉、防災、環境リスクへの対応など、社会・経済活動における情報コミュニケーション技術の支援強化が期待されている[4]。環境モニタリングなどのアプリケーションでは、位置情報を伴うデータは重要である。また、リアルタイムな対応を可能にするためにも、位置情報は有益な情報である。

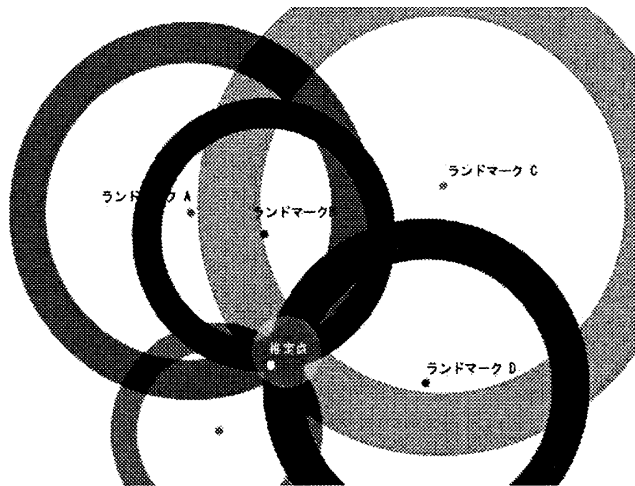


図3. 提案手法における位置測定の概要

### 3. 関連研究

既存の位置測定手法は、レンジベース位置測定とレンジフリー位置測定の2系統の考え方に基づいて行われている[7]。レンジベース位置測定は、電波や磁気、音波など「特殊な情報」から各デバイス間の距離を測定し位置を測定する手法である。高精度の位置測定を行うことが可能であるが、特殊なデバイスを増設する必要がある上、デバイス使用時の消費電力が大きいことから、低コスト・省電力化を追求するセンサネットワークに対しては適切ではない。一方、レンジフリー位置測定は「特殊な情報」を用いず、ネットワーク内の通信時に得られるホップ数や位置関係を用いて位置測定を行う手法である。ランドマークからのホップ数や位置関係から位置を推定する手法であるため、特殊なデバイスを必要とせず、低コストで実現可能であるが位置測定の精度が低く、精度を向上させるためにはランドマーク数を増やさなければならないという問題がある。

### 4. HVGF方式

本章では研究対象となるHVGFについて説明する。

HVGFは位置情報を用いないルーティング方式の一つであり、任意のノード間の通信を省電力かつ効率よく行うことを目的としたプロトコルである。

センサネットワークでは、センサノードのバッテリー枯渇を避けるため、最小限の通信で経路制御やセンシングデータのやり取りを可能とする、省電力化を追求したルーティングプロトコルが必要である。センサネットワークにおけるルーティング方式は、位置情報を用いる手法と用いない手法の二系統に大別される。位置情報を用いる手法では、GPSや電波、音波、磁気などで位置情報を取得するために特殊なデバイスが必要となり、コストが高くなってしまふ。そのため、位置情報を用いないルーティング方式の研究が盛んに行われている。HVGFでは、4個の基準点からのホップ数を基にした4次元ベクトルを各ノードに対してラベル付けし、ラベル情報を基にルーティングを行う。HVGF方式についての簡単な概要を図2に示す。位置情報を用いることなく既存の位置情報を用いる手法と同等以上の性能を持つが、位置情報を必要とするアプリケーションへの適応が困難である。そこで本研

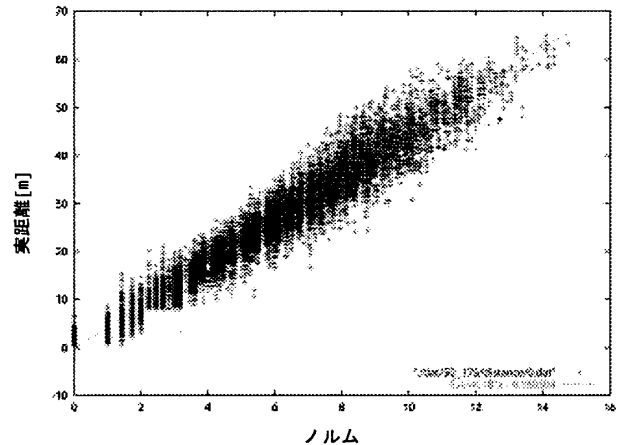


図4. 100[m]×100[m]における相関図

究では、ノルムと実距離との相関関係に着目した位置測定手法の提案を行う。レンジフリー位置測定の考え方に基づく位置測定手法であるため、完全にGPSを利用しないというHVGFの利点を損なうことになるが、位置情報を各センサノードが自律的に求められることでHVGFの適応アプリケーションの幅が広がり、より実用的なセンサネットワークの構築が期待できると考えられる。

### 5. 提案手法

本研究では、レンジフリー位置測定の考え方に基づいて、少数のランドマークで実用的な位置測定が可能な位置測定手法の提案を行う。対象ネットワークとして、HVGFを適用したルーティング環境下にあるセンサネットワークを想定し、自身の位置を正確に知るランドマークがいくつか存在しているものとする。

提案手法の要点を以下に述べる。一般ノードは、ホップ数ベクトルから算出されるノルム値から、回帰分析を基に任意のランドマークとの距離を推定する。ここで注意しなければならないのは、離散値であるホップ数ベクトルを基に算出されるノルムから連続値である実距離を推定するため、ある程度の誤差が必ず含まれることである。そのため、ある程度の幅を考慮した距離推定を行う必要がある。本研究での手法は、ある一定の確率で一般ノードが存在する領域（以下、距離領域）を導出するようにしたものである。一般ノードは、導出された複数の距離領域の重なりから、自身が存在すると推定される領域を絞り込み、絞り込まれた領域の重心を自身の位置とする。提案手法における位置測定の様子を図3に示す。提案手法の詳細を次に示す。

#### 5.1 仮想グリッドの作成

一般ノードは、一辺が一定長の正方形となるように仮想的なグリッドを作成し、フィールド左下のグリッド点を $(x, y) = (0, 0)$ とする座標平面を作成する。各グリッドの中心点を推定座標の候補点とし、候補点が距離領域内にあると判定するとグリッドに点数付けを行う。提案手法では、距離領域の面積について正規化した得点を用いて点数付けを行い、領域を絞り込む。

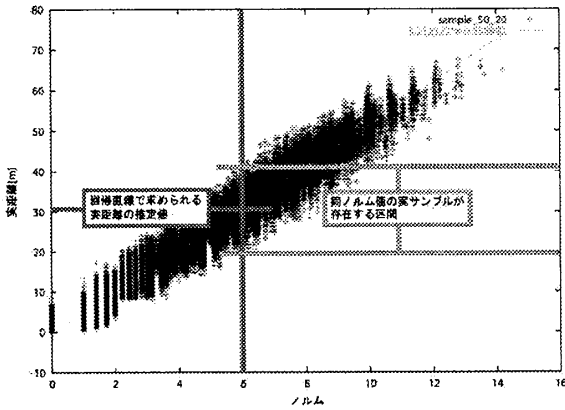


図5. 50[m]×50[m]における相関図

### 5.2 回帰分析に基づく距離推定

ここでは、まずノルムと実距離の相関について述べる。次に本提案手法で用いる距離推定手法の詳細について説明する。

#### 5.2.1 ノルムと実距離の相関

回帰分析による距離推定が可能であることを示すために、サンプルデータを基にノルムと実距離との相関関係を明らかにする。ノード密度7個/100 m<sup>2</sup>、通信範囲8m、フィールド範囲100m×100mのパラメータに設定した仮想センサネットワークから得たサンプルデータを用い、相関関係の指標である相関係数の測定を行った。図4に相関図の一部を示す。これより、実距離とノルムの間には高い正の相関があることが分かる。

#### 5.2.2 同心円状の距離領域の導出

実距離とノルムの間に相関があることから、基礎実験を基に回帰直線を導出した。しかし、回帰直線を用いてノルムから実距離を推定すると必ず誤差を含むことから、幅を考慮した距離推定手法が必要である。ノルムと実距離の相関図において、同ノルム値の実サンプルが存在する区間をみると、確率密度関数を示す特徴がある。例として、フィールド範囲50m×50m、ノード密度20個/100 m<sup>2</sup>、通信範囲8mのパラメータに設定した仮想センサネットワークにおける相関図を図5に示す。各ノルム値区間に含まれるサンプル数の出現確率を正規分布に近似できるとすると、ある一定の信頼度を満たす標準偏差を基に内径と外径を求めることが可能である。しかし、サンプル出現確率を正規分布に近似するためには、センサノードの記憶資源や計算資源の制約により問題がある。そこで、ノルム値から内径と外径を求める回帰直線を基礎実験に基づいて定式化した。回帰直線から算出される内径と外径から同心円状の距離領域を導出する。

### 5.3 グリッドへの点数付け

導出した距離領域と推定位置座標の候補点の位置関係からグリッドに点数付けを行う。位置測定を行う一般ノードから、遠い場所に存在するランドマークまでの距離領域は、幅が広くなり大量のグリッドへ影響を及ぼすた

|   |   |   |   |   |    |    |   |   |   |
|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|
| 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 3 | 4 | 1 | 1 | 0  | 1  | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2  | 0  | 0 | 2 | 0 |
| 0 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2  | 0  | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8  | 9  | 5 | 2 | 2 |
| 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 12 | 10 | 8 | 5 | 4 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 6  | 2  | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1  | 2  | 0 | 1 | 2 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2  | 2  | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 0  |   |   |   |

図6. グリッドへの点数付け

め、信頼度の低い情報となる。このことを考慮し、点数付けは距離領域の面積について正規化した得点を用いて行う。内径円の半径を IR、外径円の半径を OR とし、得点 P の式を以下に示す。

$$P = \frac{1.0}{\pi * OR^2 - \pi * IR^2}$$

図6は、簡略化のために加算する得点をすべて1とした場合の例である。

### 5.4 位置測定

複数のランドマークから距離領域を導出し、全グリッドへ点数付けを行った後、最高得点となるグリッドを抽出する。抽出された領域の重心を計算し、算出された値を一般ノードの推定位置座標とする。

## 6. シミュレーション評価・考察

本研究では、提案手法を計算機上に C 言語で実装し、(1)位置測定に必要なランドマーク数、(2)適用可能なネットワークサイズ(規模拡張性)、(3)2つの観点についてシミュレーションを行い、シミュレーション結果から提案手法の性能評価を行う。以下にそれぞれの観点について行ったシミュレーション実験の結果を示し、考察を行う。

#### (1) ランドマーク数と平均誤差

フィールド範囲を固定し、ランドマーク数を増加させたときに、測定される位置座標と実座標との誤差を平均化した平均誤差について検討する。より少ないランドマーク数で平均誤差が低く抑えられていれば良いと考える。表1に評価を行うために想定したネットワークトポロジのパラメータを示す。同表で示すランドマークの割合とは、フィールドに設置する全ノード数に対する割合である。表1に基づき、計算機上に想定するネットワークトポロジに対して行ったシミュレーション結果を図7に示す。同図より、提案手法は、ランドマークの割合の増減による平均誤差への影響は少ないと考えられる。また、ノード密度を変化させても平均誤差が3m前後とほぼ一定であることから、提案手法は少ないランドマーク数であっても、目測で認識可能な誤差に抑えた位置測定が可能であると考えられる。

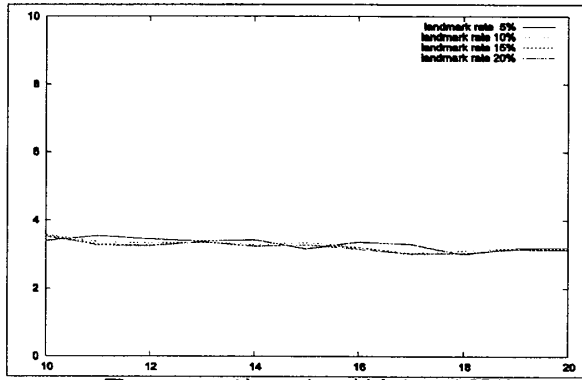


図7. ランドマークの割合と平均誤差

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| フィールド範囲   | 100[m]×100[m]                  |
| ノード密度     | 10 - 20[個/100 m <sup>2</sup> ] |
| ランドマークの割合 | 5 - 20[%]                      |

表1. シミュレーションパラメータ1

(2) 規模拡張性と平均誤差

ここでは、フィールド範囲を変動させたときに、測定される位置座標と実座標との誤差を平均化した平均誤差について評価し、提案手法の規模拡張性について考察する。本論文では、規模を大きくしたネットワークに提案手法を適用した場合に、実用的な誤差に平均誤差が収まるのであれば、ある程度規模の大きいネットワークに対しても適用が可能であると考えられる。表2に評価を行うために想定したネットワークトポロジのパラメータを示す。表2に基づき、想定するネットワークトポロジに対して行ったシミュレーション結果を図8に示す。シミュレーション結果から、フィールド範囲の変化によって、平均誤差が1m前後の変動を見せるが、今回行ったシミュレーション環境においては、目測で認識可能な誤差に抑えられているので、ある程度大きなネットワークへの適用が可能であると考えられる。

7. まとめ

本研究では、レンジフリー位置測定の考え方に基づく回帰分析を用いた位置測定手法の提案を行った。本提案手法では、一般ノードは任意のランドマークとのノルムを算出し、算出した値から回帰直線を用いて距離領域を導出する。各ノードは複数の距離領域を導出し、領域の重なり具合から自身の領域を絞り込み位置測定を行う。計算機上で任意の環境のセンサネットワークを想定し、シミュレーションにより提案手法の性能評価を行った。シミュレーション結果から、少ないランドマークの割合においても、目測で認識可能な程度の誤差に抑えた位置測定が可能であり、またある程度の大きなネットワークに対しても適用可能であると示された。今後の課題として、(1)フィールド上に遮蔽物が存在する場合の本提案手法の性能評価、(2)位置測定が可能なランドマーク数の限界値の解析、(3)今回のシミュレーション評価で対象としなかった大規模・小規模のネットワークへの適用の検討、(4)位置測定の候補領域となるグリッドの粒度の変化によ

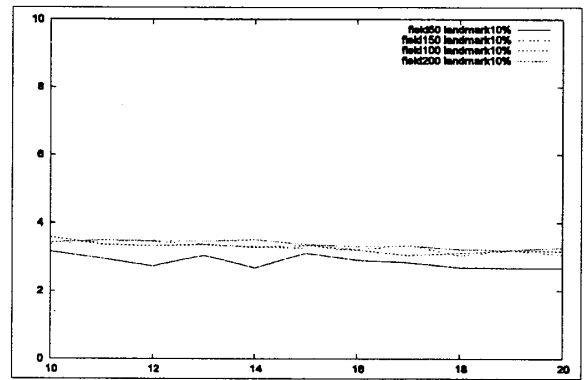


図8. フィールドの範囲と平均誤差

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| フィールド範囲   | 50[m]×50[m] -<br>100[m]×100[m] |
| ノード密度     | 10 - 20[個/100 m <sup>2</sup> ] |
| ランドマークの割合 | 5 - 20[%]                      |

表2. シミュレーションパラメータ2

る位置測定の誤差への影響、(5)既存手法との位置測定の精度比較の調査を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(20500069)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Dragos Niculescu, Badri Nathl. "DV Based Positioning in Ad Hoc Networks". Telecommunication System. 2003. Volume 22, Numbers 1-4.
- [2] Tian He, Chengdu Huang, Brian M. Blum, Lohn A. Stankovic, Tarek Abdelzaher. "Range-Free Localization for Large Scale Sensor Network". Proceedings of ACM/IEEE MOBI-COM'03. 2003.
- [3] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin. "GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices". IEEE Personal Communication Magazine. 2000. Vol 7, Number 5.
- [4] 株式会社フィクスターズセンサネットワーク技術資料, "センサネットワーク技術", [http://www.fixstars.com/essay/SensorNetworks\(1\).pdf](http://www.fixstars.com/essay/SensorNetworks(1).pdf).
- [5] 佐藤雄亮, 油田健太郎, 岡崎直宣, 富田重幸, 朴美娘. "データセントリックセンサネットワークにおけるルーティング方式の検討", 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC, Vol.107, No.39(20070510), pp. 125-130, 2007.
- [6] 油田健太郎, 佐藤雄亮, 岡崎直宣, 富田重幸, 朴美娘. "データセントリックセンサネットワークにおける位置情報を必要としないルーティング方式の提案", 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOM2007) 論文集, pp.722-732, 2007.
- [7] 安藤繁, 田村陽介, 戸部義人, 南正輝. "センサネットワーク技術 ユビキタス情報環境の構築に向けて", 東京電機大学出版局, May 2005