

# ノード間通信とノード間相対距離情報を用いたノード位置推定手法

角間 共訓<sup>†</sup> 秋田 純一<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> <sup>‡</sup> 金沢大学自然科学研究科電子情報科学専攻 〒920-1192 石川県金沢市角間町

E-mail: <sup>†</sup> kakuma@ifdl.jp, <sup>‡</sup> akita@is.t.kanazawa-u.ac.jp

**あらまし** 屋内位置測位は、多様な分野で必要性が高いにもかかわらず、有効な手法が存在せず、さまざまな研究が行われている。本研究では、多数のノードが、電波強度等から誤差を含む相互距離情報を、相互通信によって共有する条件の下で、この情報を用いてノード位置を推定する手法と、その精度について検証した結果について述べる。

## Node Position Estimation Method Using Inter-node Distance Information

Tomonori KAKUMA<sup>†</sup> Junichi AKITA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> <sup>‡</sup> Division of Electrical and Comp. Eng., Kanazawa University Kakuma, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192 Japan

E-mail: <sup>†</sup> kakuma@ifdl.jp, <sup>‡</sup> akita@is.t.kanazawa-u.ac.jp

**Abstract** Although in-door positioning is an important technology in various applications, there are a lot of studies for implementation and improvement. In this study, the authors describe an in-door positioning method based inter-node distance information. The distance between nodes are measured by using RSSI or other technologies, which contains some error. The distance information are shared among all the nodes using the inter-node communication, and the positions of nodes are estimated by using the shared inter-node distance information. The algorithms and its evaluations are described.

### 1. はじめに

現在、屋内測位は、多様な分野で必要性が高いにもかかわらず、有効な手法が存在せず、電波強度を用いて測位を行う、Wi-Fi 測位や iBeacon、信号到来時間を用いたインパルス UBI、IMES、内蔵センサーと絶対位置補正を用いた PDR などさまざまな研究が行われている[2].

本稿では、領域内に複数ノードデバイスが存在し、電波強度などの計測によって各ノード間の誤差を含む距離情報を、ノード間通信によって各ノードが共有する条件の下で、ノード間の相対位置関係を求める屋内測位手法を提案する。これはノード間距離情報に含まれる計測誤差の影響を、多数のノードに対する総体的な最適化によって低減する方策といえる。本稿では、このような屋内測位のアルゴリズムと、その精度評価について述べる。このようなノードデバイスは全身に装着することでノードの位置関係から人体の姿勢計測などへの応用も可能である。また、粘土は、容易に変形させたり、伸ばす・ちぎるなどの行為を促す素材である。粘土内部にノード類を内蔵し、粘土の形状を認識することも可能である[3].

### 2. ノード位置推定アルゴリズム

#### 2.1 ノードの機能

本稿で述べる測位手法は、決められた領域内に複数個存在するノードデバイス同士の通信によって得られる距離情報からノード同士の相対位置関係を推定するものである。相対位置関係推定のために、各ノードに以下のような機能を仮定する。(図 1)

- 固有の ID を持つ。
- 全ノードと相互通信が可能(アドホック通信も含む)。
- 別のノードの ID と、それとの相対距離情報を計測できる。

このような機能をもつノードを用いて、各ノードの相対位置を推定するアルゴリズムを考える。

#### 2.2 推定アルゴリズム

図 2 に位置計測手法の概要を示す。

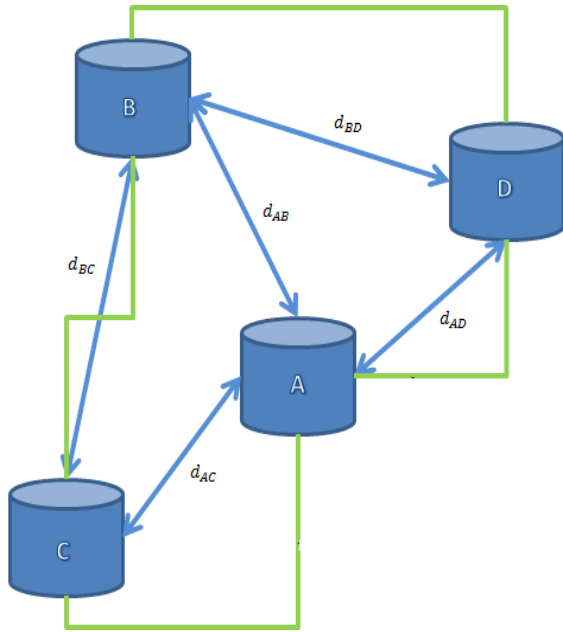


図1 本稿で仮定するノードシステムの構成

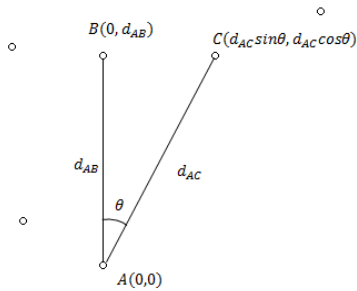


図2 推定アルゴリズム

これは3点の相対位置関係を推定する手法として3点間の相対距離情報と1つの角度を知ることができれば相対位置関係を推定できる。原点からの長さや軸とのなす角で点の座標を指定する極座標での表示形式を3点間の相対位置関係を推定するのに利用する。複数のノードの内3つのノードを選び出す。以下選んだノードをA, B, Cとしノード*i, j*の距離情報を $d_{ij}$ とする(ノードAとBでは $d_{AB}$ )3点の距離情報から余弦定

理を用いて一つの角の余弦を求める。  
 角度 $\theta$ は以下の式で求めることができる。

$$\cos\theta = \frac{d_{AB}^2 + d_{AC}^2 - d_{BC}^2}{2d_{AB}d_{AC}}$$

ここで $A(A_x, A_y)$ を原点に移動させる。ここで全ノードにx座標に対して $-A_x$ , y座標に対して $-A_y$ 並進による変換を行ったことになる。またノードBがy軸上にくるように回転による変換を行う。これによりノードCの座標を $C(d_{AC}\sin\theta, d_{AC}\cos\theta)$ とでき、ノードCを他ノードと入れ替え同じ処理を繰り返す。これにより相対位置関係を推定できる。

ノード間の距離情報が正確なものであれば上記の処理で相対位置関係を高い精度で推定できる。しかし、実装する際にはノード間の通信でえられる距離情報には計測誤差が含まれてくる。

上記の方法は与えられた距離情報から座標を方程式を解く形で推定するため、距離情報に誤差が含まれていた場合方程式を解くことはできない。よって上記の方法で推定した相対位置関係は多くの場合本来の真値であるところの相対位置関係位置と大きく違っている。

ここでノード*i, j*間の誤差が含まれた距離情報 $\tilde{d}_{ij}$ を以下のように定義する。

$$\tilde{d}_{ij} = d_{ij} + d_{ij} \times e_{ij}$$

$d_{ij} \times e_{ij}$ とは測定によって発生する計測誤差であり、 $e_{ij}$ は $[-e_{max}, e_{max}]$ 内でランダムに生成され $e_{max}$ を誤差率と呼ぶ。

また、誤差の入った距離情報からえられる真値ともっとも近い推定値として $h(p)$ を以下のように定義する。

$$h(p) = \frac{\sum_{i=1}^N (\sum_{j \in M(i)} |\hat{p}_i - \hat{p}_j| - \tilde{d}_{ij})^2}{N_d}$$

$h(p)$ が最小になる推定値がもっともよいと考えられる。しかし、測定値に誤差が含まれているため $h(p)$ が0になることはなく、最急降下法を用いて以下の $h(p)$ が極小となるノードの座標の集合 $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3, \dots, \hat{p}_N$ を求めることになる。ノード*i*の*n*回目の位置推定値を以下のように定める。

$$\hat{p}_i(n) = (\hat{p}_{x_i}(n), \hat{p}_{y_i}(n))$$

そうすると位置推定値の更新式は以下のように定めることができる。

$$\hat{p}_i(n+1) = \hat{p}_i(n) - a \frac{\partial h(p)}{\partial \hat{p}_i}$$

$$\frac{\partial h(p)}{\partial \hat{p}_i} = 2 \sum_{j \in M(i)} \left(1 - \frac{\tilde{d}_{ij}}{|\hat{p}_i - \hat{p}_j|}\right) (\hat{p}_i - \hat{p}_j)$$

$a$  は最急降下法におけるステップ幅である。この更新を複数回繰り返すことによって  $f(p)$  を最小にするような推定値に収束する。

なお、最急降下法の特性上、極小解ではなく局所解に収束する場合がある。局所解に陥った場合は最適な値をえることができない。この場合、初期値を複数回変更することにより局所解から脱出することが可能である。このアルゴリズムはノードの総数を  $n$  とした場合最大計算量  $O(n^2)$  である。

### 2.3 ノードの相対位置関係及び評価方法

ノードの位置の表現には、 $xy$  座標系を用いる。ノードの相対位置関係の扱いや推定によって得られた相対位置関係の評価する方法を示す。

$p = (p_x, p_y)$  に存在するノードに対して行われる変換を原点における回転変換  $T_\theta$ 、並進による変換  $T_s$ 、反転による変換  $R$  として以下のように定義する。

$$T_\theta = (p_x \cos \theta - p_y \sin \theta, p_x \sin \theta + p_y \cos \theta)$$

$$T_s = (p_x + s_x, p_y + s_y)$$

$$R = (-p_x, p_y)$$

本研究では各ノード同士の相対距離情報から得られるノードの位置関係を推定するものである。したがって上記にある変換のいずれか、もしくはその組み合わせを全てのノードに同時に適用させたノード位置関係と適用前のノード位置関係は等しいものとする。推定したノードの位置関係の精度を評価する基準として、実際のノード同士の相対距離である真値と推定したノードの位置情報から相対距離を求めた推定値との最小

二乗誤差の大きさの合計と実際のノードの座標と推定で得られたノードの座標との最小二乗誤差の大きさの合計の二つを使用する。ここで求めたい相対距離で求められる最小二乗誤差を  $f(p)$ 、ノード座標から求めることのできる最小二乗誤差を  $g(p)$ 、ノードの総数を  $N$ 、ノード  $i, j$  間の距離の真値を  $d_{ij}$ 、距離情報の総数を  $N_a$ 、領域内のノード  $i$  以外のノードの集合を  $M(i)$ 、推定によって得られたノード  $i$  の座標  $\hat{p}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$  から以下の精度を評価する関数を定義する。

$$f(p) = \frac{\sum_{i=1}^N (\sum_{j \in M(i)} |\hat{p}_i - \hat{p}_j| - d_{ij})^2}{N}$$

$$g(p) = \frac{\sum_{i=1}^N (|\hat{p}_i - p_i|)}{N}$$

:

## 3. シミュレーション及び評価

### 3.1 シミュレーション条件

本節では、前述の位置計測アルゴリズムの精度を、以下の条件の下で行うシミュレーションによって評価する。

- ノードの存在する範囲は一辺が 100 の正方形の領域内
- ノードは一様乱数から配置する。
- ノード数 10 個及び 100 個におけるシミュレーションで計測されるノード間距離の真値と比較した誤差率を 0.01~0.05 まで 0.01 刻みの 5 種類を使用する。

正確に推定できているかどうかの評価基準として以下の関数を使用する。

$$f(p) = \frac{\sum_{i=1}^N (\sum_{j \in M(i)} |\hat{p}_i - \hat{p}_j| - d_{ij})^2}{N}$$

$$g(p) = \frac{\sum_{i=1}^N (|\hat{p}_i - p_i|)}{N}$$

この値が小さければ小さいほど精度がよいと言える。基準として  $f(p), g(p, \hat{p})$  の二種類があるが、最急降下法を用いて収束させた関数  $h(p)$  は関数  $f(p)$  の距離情報に誤差の有無の点でしか違いがなく、関数  $f(p)$  も最小に近くなりやすいのではないかと考え、また  $f(p)$  は距離情報で評価を行うため、距離情報が 5 ずれていた場合、 $x$  方向に 1、 $y$  方向に 2 ずれていた場合と  $x$  方向、 $y$  方

向ともに $\sqrt{5}$ ずれていた場合も同じ精度と判断されてしまうので、推定した座標と真値の座標を比較した $g(p, \hat{p})$ を基準として優先させる。

また、推定によって得られた座標は推定作業の初期値を与える時点で基準ノードの初期座標と真値についての基準ノードの座標のズレや2つの基準ノードと軸とのなす角の差が原因で直接真値の座標と比較することができない。そのため推定されたノードの座標に並進, 回転, 折り返しの変換を行い真値の座標に近づけ重ね合わせるという作業が必要になる。重ね合わせる作業はまず2個ノードを選び一つを並進変換し同じ座標に合わせる。次に回転変換を行い二つ目が重なるように合わせる。そして2個のノードからなる直線に対して折り返しの変換を行いその他のノードが重なるように合わせる。並進による変換 $T_s$ , 回転による変換 $R_\theta$ , 折り返しの変換 $BR_\theta$ を以下のように定義する。

$$T_s = (p_x + s_x, p_y + s_y)$$

$$R_\theta = (\hat{p}_x \cos \theta - \hat{p}_y \sin \theta, \hat{p}_y \cos \theta + \hat{p}_x \sin \theta)$$

$$BR_\theta = (\hat{p}_x \cos 2\theta + \hat{p}_y \sin 2\theta, \hat{p}_x \sin 2\theta - \hat{p}_y \cos 2\theta)$$

2個のノードを選ぶ基準は推定により得られた距離情報と真値の距離情報の差が最も小さいものの組み合わせで選ぶものとする。

### 3.2 シミュレーション結果

まず図3にノード数10個, 真値の点を○, 推定値を+で表したシミュレーション結果を示す。

次に図4にノード数100個, 真値の点を○, 推定値を+で表したシミュレーション結果を示す。

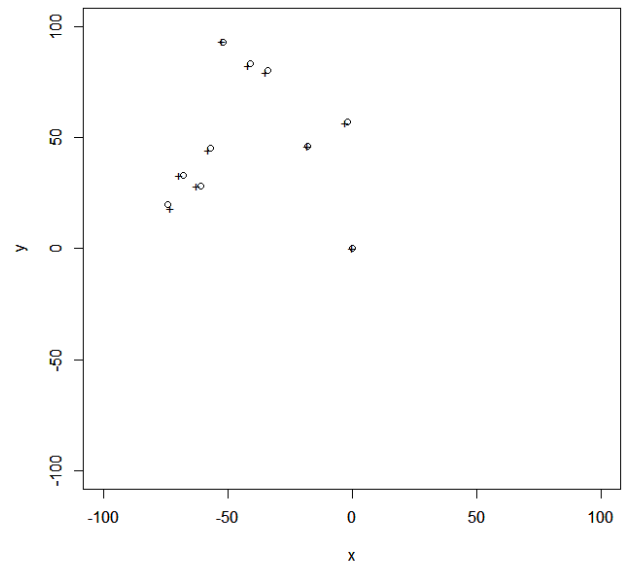


図3:ノード数10個における位置推定

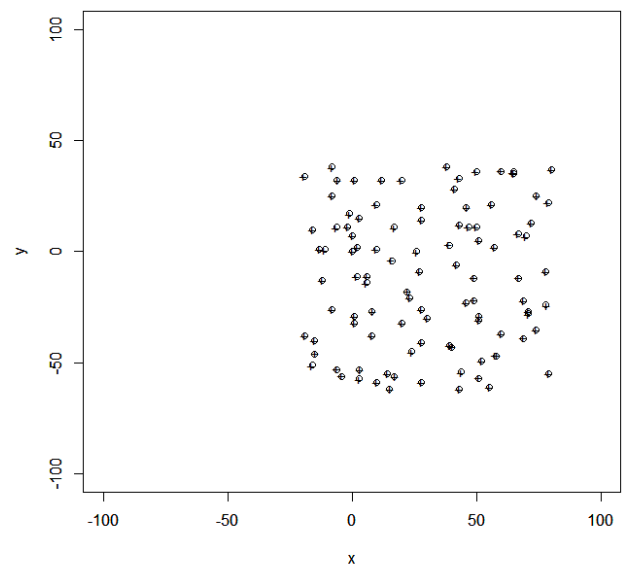


図4:ノード数100個における位置推定

この図から真値に近い形で位置推定されていることがわかる。

表 1:ノード数 10 個によるシミュレーション結果

誤差率	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
f(p)	0.84	0.57	0.74	0.66	1.00
g(p)	13.85	15.22	14.66	16.4	15.5

表 2:ノード数 100 個によるシミュレーション結果

誤差率	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
f(p)	0.42	0.5	0.64	0.15	0.18
g(p)	14.3	13.93	18.24	19.08	13.76

表 3:ノード数 10 個による評価関数 g(p)のばらつき

誤差率 g(p)の値	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
~10	52%	51%	52%	47%	46%
10~20	10%	8%	9%	7%	10%
20~30	20%	17%	15%	24%	28%
30~40	15%	15%	19%	16%	12%
40~50	2%	8%	4%	4%	2%
50~60	1%	1%	1%	2%	2%
60~	0%	0%	0%	0%	0%

表 4:ノード数 100 個による評価関数 g(p)のばらつき

誤差率 g(p)の値	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
~10	54%	54%	45%	45%	58%
10~20	10%	5%	6%	4%	5%
20~30	11%	17%	12%	8%	9%
30~40	19%	19%	30%	33%	19%
40~50	6%	4%	7%	8%	7%
50~60	0%	1%	0%	1%	2%
60~	0%	0%	0%	1%	0%

精度について調査を行うためノード数 10 個及び 100 個で誤差率を 0.01 から 0.01 刻みで 0.05 まで変化させ試行回数 100 回でシミュレーションを行った結果を表 1~4 にまとめたものを示す。

まず表 1 及び表 2 に評価関数 f(p)及び g(p)で精度の評価を行った結果を示す。

以下表内の f(p)及び g(p)は試行 100 回で得られた各値の平均をとったものである。

また評価関数 g(p)においては結果の数値のばらつきが大きく、試行 100 回の平均をとったものでは評価を行うことが難しいと考えられるため、各試行によって得られた評価関数 g(p)の値を大きさ別に分類し、その割合を表 3 及び表 4 に表す。

### 3.3 考察

表 1 及び表 2 の評価関数 f(p)の値から最急降下法により距離情報は収束に向かっていることが確認できる。

当初シミュレーションを行う前の段階ではノード数が多い方が精度がよく誤差率が低い方が精度がよいのではないかと予想されるが、評価関数 f(p)を見ればノード数が多い方が精度がおおむねよいことが確認される。しかし、誤差率の高さの相関関係は今回行ったシミュレーションでは確認できなかった。

また評価関数 g(p)に関してはノード数と誤差率ともに大きな相関関係が見られず、おおむね試行の半分の結果は g(p)の値が 10 以下のある程度正確に位置推定が行われていると考えられる結果であった。

これは推定に用いたアルゴリズムは初期値を求めその値を用いて最急降下法を行うため、初期値に依存しているという点があるため最急降下法の解が局所解に陥っていた場合推定が正確に行われない。また重ね合わせの処理の際にも基準としたノードの位置関係によっては全体から見てよくない形に重ね合わせるようになる可能性もあると考えられる。例えばノードの集合の中心部分に基準のノードが集中していた場合回転、折り返しの変換の影響がよい方向に現れるのではないかと考えられ、また基準のノードがノード集合の端にあった場合回転変換と折り返しの変換の影響が大きく、悪い方向に影響が出た場合、評価関数 g(p)の値が大きくなってしまわないかと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究ではノード間の距離情報からノードの相対位置関係が推定できることを示した。推定手法としては初期値を与えその値と距離情報から最急降下法を用いて位置を推定していく方式を提示し検証を行った。

今回提示した手法からシミュレーションを行い得られた結果からは試行により精度の良し悪しが分かれるものとなった。

原因としては考察で述べたとおり、最急降下法の局所解による影響や評価する際の重ね合わせの処理による影響が考えられる。

しかし、今回行ったシミュレーションでは局所解による影響と重ね合わせの処理の精度の影響両方の可能性があり、どちらの影響が大きいのか吟味するのは困難であった。

また今回用いたアルゴリズムの計算量はノード数に依存しているため、ノード数を増やしたシミュレーションではどうしても計算量が大きくなってしまう。

改善点として、基準ノードがノードの集合の端に存在していた場合の別の重ね合わせの処理を考案し、基準ノードの位置によって処理を変えることにより重ね合わせ処理における精度を向上させ、局所解の影響との差別化を図ることにより、より精度の低い試行の原因を明確にすることができると考えられる。また、時間計算量においての問題は例えば 1000 個のノードを 100 個×10 のグループに分けそれぞれ 100 個で処理を行ったものを 10 グループ合わせるといった手法を使用することにより計算量は十分の一に軽減することができる。

#### 文 献

- [1] 島村和希：センサの相対位置推定のための最適化手法：2012 年度千葉大学大学院修士論文
- [2] 中尾浩一：屋内測位技術の動向について：  
[http://www.apptec.co.jp/technical\\_report/pdf/vol22/technical\\_report\\_vol\\_22-09.pdf](http://www.apptec.co.jp/technical_report/pdf/vol22/technical_report_vol_22-09.pdf)
- [3] 山岡・寛：NeonDough: 光る粘土を用いた粘土細工の提案：インタラクシオン 2012 予稿集(2012)