6V-7

センサネットワークにおける非線形連立方程式の解法による位置推定方式の実現

鮫島清豪† 鈴来和久†† 横田裕介††† 大久保英嗣†††
†立命館大学理工学部 ††立命館大学大学院理工学研究科 †††立命館大学情報理工学部

1 はじめに

近年，無線デバイス，各種センサの小型化，低コスト化により，センサが自律的にネットワークを構築し，環境情報を取得するセンサネットワークの研究が進められている．センサネットワーク技術により，有線接続と比較して，ネットワークを構築する手間やコストが削減可能となる．また，容易に広範囲に分散した環境情報が取得可能となる．

従来からの測位技術として，GPS (Global Positioning System) があるが，高コスト，高消費電力であり，屋外での利用に限定される．そのため，センサネットワークの屋内での使用も考慮して，屋内外を問わず利用可能な位置特定機構を検討する必要がある．

現在，多くの位置測位システムに multi-lateration [1][2] が利用されている．しかし，multi-lateration には，測位が繰り返されると誤差が蓄積されていくという問題がある．したがって，誤差に関して安定的な数値解法が必要となる．

そこで，本稿では，multi-lateration による測位の際に利用される最小二乗法によらず，オリジナルの方程式を直接的に解く安定的な手法を提案する．提案手法は，パラメータの埋込みによって，オリジナルの方程式を常微分方程式の初期値問題に変換することで，そのままの形で解く．また，提案手法による測位誤差の評価を行うために，米 Crossbow 社のセンサノード Cricket [3] を用いて，multi-lateration による測位誤差と比較を行った結果を示す．

以下，本稿では，2 章で測位の概要，3 章で提案手法について述べる．そして，4 章で提案手法の評価を行い，5 章でまとめと今後検討すべき課題について述べる．

2 測位の概要

測位は，距離の推定と位置の推定のフェーズから構成され，位置が既知の点と測位を行う点との距離を利用して行う．ここで，位置が既知であるセンサをビーコンノード，位置が不明であるセンサを未知ノードと呼ぶ．測位の手順を次に示す．

- センサネットワークが設置された後，ビーコンノードは，自身と近接する未知ノードに自身の位置をブロードキャストする．
- 近接する未知ノードは，測位に要するビーコンノードの個数以上のビーコンノードからの距離を測定し，自身の位置を推定する．
- 未知ノードが自身の位置を推定すると，自らビーコンノードとなり，近接する未知ノードへ自身の位置をブロードキャストする．
- 以上の処理を，すべての未知ノードが自身の位置を推定するまで繰り返す．

3 提案手法

multi-lateration で用いられる最小二乗法は，反復して測位が繰り返されると，誤差が蓄積されていくという問題がある．また，最小二乗法は計算過程で距離情報や座標情報を二乗するため，誤差が拡大するという欠点がある．したがって，誤差に関して安定的な数値解法が必要となる．本章では，最小二乗法によらず，オリジナルの方程式を直接的に解く安定的な手法について述べる．

3.1 問題の定義

オリジナルの方程式そのままの形で解く．

$$F_i(X) = y^{(i)} - \sqrt{(x_1 - z_1^{(i)})^2 + (x_2 - z_2^{(i)})^2 + (x_3 - z_3^{(i)})^2} = 0$$

ここで，(x_1, x_2, x_3) は未知ノードの座標，$(z_1^{(i)}, z_2^{(i)}, z_3^{(i)})$ はビーコンノードの座標，$y^{(i)}$ はビーコンノードと未知ノード間の距離である．ただし，$i = 1, 2, \cdots, m$ である．ベクトル表現は，以下のようになる．

$$F(x) = 0$$

ただし，$F(x) = (F_1(X), F_2(X), \cdots F_m(X))^T$ である．

3.2 初期値問題への変換

パラメータの埋込みによって，オリジナルの方程式は，常微分方程式の初期値問題に変換可能である．

初期値問題を導出するために，実パラメータ t を $F(x) = 0$ に導入する．すなわち，次の新しい方程式を導入する．

$$H(t, x) = a(t)F(x) + b(t)G(x) = 0 \tag{1}$$

未知パラメータ x の探索領域は，ユークリッド空間であり，$a(t), b(t), G(x)$ は，次の条件を満足するように決定される．

$$H(t_0, x_0) = 0, \quad H(t_1, x) = F(x) \tag{2}$$

式 (1) は，すべての $t \in I_t$ に関して $H_x(t, x(t))$ が正則である解を持てば，$(dH/dt) = 0$ であるので，次の初期値問題と等価になる．

$$dx(t)/dt = -H_x(t, x)^{-1} H_t(t, x), \quad x(0) = x_0 \tag{3}$$

式 (3) は，パラメータの埋込みによって，次の方程式に変換される．

$$dx(t)/dt = -J_{F^+}(x)F(x), \quad x(0) = x_0 \tag{4}$$

ここで，$J_{F^+}(x)$ は，関数 $F(x)$ のヤコビアン行列の一般化逆行列である．

初期値問題を解くために，代表的な 1 ステップ手法であるルンゲクッタ法を用いる．さらに，次の一般的なパラメータの埋込みを用いる．

$$H(t, x) = F(x) - e^{-\alpha t} \cdot F(x_0) \tag{5}$$

式 (4) に式 (5) を埋め込むことで導出される次の初期値問題について考える．

$$d(x)/dt = -\alpha J_{F^+}(x)F(x), \quad x(0) = x_0 \tag{6}$$

3.3 h と α の決定方法

ルンゲクッタ法における刻み幅 h と α を次の条件を満たすように設定する．

$$0 < \alpha_i \cdot h_i \leq 1 \ \ (i = 1, 2, \cdots) \tag{7}$$

ただし，反復の各段階で α のみを変更する．すなわち，すべての i に関して $h_i = h^*$ を固定する．したがって，

$$\alpha_i = c_j, \quad 0 < c_1 < c_2 < \cdots < c_N \leq 1/h^* \tag{8}$$

ただし，c_j を以下のノルムを最小化するように選択し，k はルンゲクッタ法における勾配である．

$$\left|\left|F(x_n - c_j \cdot h \cdot k)\right|\right| \tag{9}$$

Implementation of a Location Estimation Method in Sensor Networks by Solving Nonliner Simultaneous Multi-lateration Equations

Kiyohide Sameshima†, Kazuhisa Suzuki††, Yusuke Yokota††† and Eiji Okubo†††
†College of Science and Engineering, Ritsumeikan University
††Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
†††College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

表 1　測位可能なノードの配置状況

ビーコンノード数	ビーコンノードの位置	提案手法	multi-lateration
4 個以上	同一超平面上にない	○	○
	同一超平面上にある (未知ノードを含まない)	△	×
	同一超平面上にある (未知ノードを含む)	△	×
3 個	同一超平面上にある (未知ノードを含まない)	△	×
	同一超平面上にある (未知ノードを含む)	△	×

3.4　提案手法のアルゴリズム

提案手法のアルゴリズムを次に示す.

1. 初期値 $x_0 = x(0)$ と刻み幅 h を指定する.
2. 関数 $F(x)$ のヤコビアン行列を x_0 で評価する.
3. 初期値 ν_0 を計算する.
4. ルンゲクッタ型公式を評価する.
5. α_{n+1} の最適値を決定し，次式を計算する.

$$x_{n+1} = x_n - \alpha_{n+1} hk \tag{10}$$

6. $\left\|x_{n+1} - x_n\right\|$ あるいは $\left\|F(x_n)\right\|$ があらかじめ決定された基準よりも小さい場合は，反復を終了する.
7. ν_{n+1} の値を計算し，ステップ 4 に戻る.

4　評価

本章では，センサノード Cricket を用いて，既存の位置測位手法である multi-lateration と提案手法による測位可能な状況，及び，誤差の比較結果を示す.

4.1　提案手法と最小二乗法の比較

提案手法，multi-lateration 各々の場合において，測位可能なノードの配置状況を表 1 に示す．表 1 において，○は解法可能であることを示し，×は解法不可能であることを示し，△は解法可能であるが，複数解が存在するため解は初期値に依存することを示している．表 1 に示すように，既存手法である multi-lateration と比較して，提案手法は解法可能な状況が多く測位手法として適している.

4.2　Cricket の概要

Cricket は，電波と超音波を用いた TDoA (Time Difference of Arrival) により距離を推測する．TDoA とは，伝送速度の異なる 2 つの信号を用いて，2 つの信号の到着時間差から距離を推定する手法である．Cricket における測距可能範囲は 10.5m 以内である．測距誤差は 3.5m までの範囲で 1cm，10.5m までの範囲で 2cm であり高精度な測距が可能である.

4.3　測位実験

Cricket を 8 個用いて 3 次元環境における測位実験を実施した．未知ノード 1 個を，ビーコンノード 7 個までの距離情報を基に測位を行う．測位した未知ノードの座標と，真の座標との誤差を評価項目とした．ビーコンノードと未知ノードの距離は，Cricket から測距情報を 9 回取得し，メヂアン値を採ることで決定した．ビーコンノードを b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7，未知ノードを u とし、一辺が 100cm の立方体の頂点にセンサノードをそれぞれ配置する．ビーコンノードの座標は，b1(0,100,0),b2(0,0,0),b3(100,0,0), b4(0,100,100),b5(0,0,100),b6(100,0,100),b7(100,100,0) であり，未知ノードの座標は，u(100,100,100) である．ノードの配置を図 1 に示す.

ビーコンノードの初期配置は b1,b2,b3 のみであり，b4 から b7 まで 1 個ずつ順に追加して未知ノードを測位し，測位誤差を計測した．測位誤差を図 2 に示す．ただし，図 2 中のビーコンノードが 3 個の場合において，multi-lateration の測位誤差は示されていない．これは，3 次元環境における提案手法による測位の必要条件がビーコンノード 3 個以上であるのに対し，multi-lateration による測位の必要条件はビーコンノードが 4 個以上であるためである．また，Cricket は電波に加えて指向性がある超音波を用いて測距を行うため，センサノードを適宜適切な方向に向けて設置し，距離を取得した.

4.4　考察

図 2 より，提案手法は，multi-lateration と比較して高精度な測位が可能なことが確認できる．加えて，提案手法は測位に要するビーコンノードが 3 個以上であるのに対し，multi-lateration が測位に要するビーコンノードが 4 個以上である.

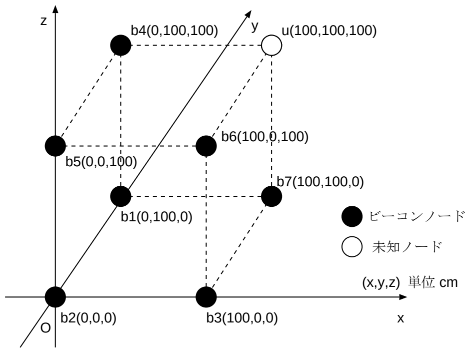

図 1　ノードの配置

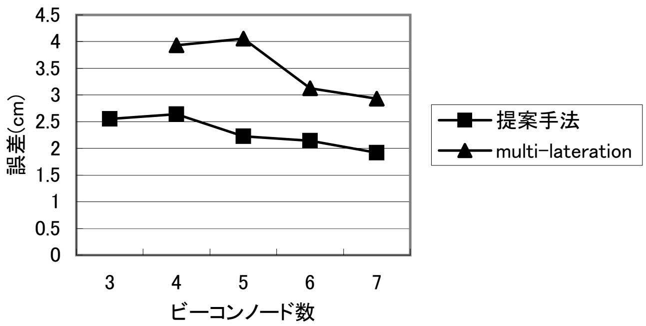

図 2　測位誤差

また，表 1 より，提案手法は，ノードの配置においても制約条件が少なく，測位可能な状況が多いことが確認できる．今回実施した測位実験は，測位に用いたビーコンノードが同一超平面上に配置されていなかったため，multi-lateration による測位が可能であったが，同一超平面上に配置されていた場合は，ビーコンノードの数に係わらず測位は不可能であった.

提案手法は，測位精度，測位に要するビーコンノード数，センサノードの配置条件の 3 点から，multi-lateration による測位と比較して優れた測位手法であるといえる.

5　おわりに

本稿では，multi-lateration による測位の際に利用される最小二乗法によらず，オリジナルの方程式を直接的に解く安定的な手法を提案した．提案手法は，パラメータの埋込みによって，オリジナルの方程式を常微分方程式の初期値問題に変換することでそのままの形で解き，ルンゲクッタ法，ヤコビアン行列の一般化逆行列を用いて解を導出する．また，提案手法による測位誤差の評価を行うために，米 Crossbow 社のセンサノード Cricket を用いて，multi-lateration による測位誤差と比較を行った結果を示した．その結果，測位精度，測位に要するビーコンノード数，センサノードの配置条件の 3 点において，提案手法が優れていることが確認できた.

今後の課題として，Cricket を用いた提案手法，multi-lateration による測位結果を基に，測位精度の比較，誤差の蓄積の影響について検証を行う予定である.

参考文献

[1] Andreas Savvides, Chih-Cheih Han, Mani B. Strivastava, Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-hoc Networks of Sensors, International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.166-179, 2001.

[2] 西田佳史, 堀俊夫, 相澤洋志, 柿倉正義, 超音波式 3 次元タグを用いた人の日常活動の頑健な計測, 第 20 回日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 3C18(1)-(4), 2002.

[3] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, Hari Balakrishnan, The Cricket Location-Support system, International Conference on Mobile Computing and Networking, pp32-43, 2000.