

アンカー配置を考慮した UWB 無線測位と カルマンフィルタによる精度改善

UWB radio positioning with anchor placement and improved accuracy using the Kalman filter

原田 知幸[†], 中村 康一郎[†], 徳永 凜[†], 東野 武史[†] 岡田 実[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学領域

Chisato Harada[†], Koichiro Nakamura[†], Rin Tokunaga[†], Takeshi Higashino[†], and Minoru Okada[‡]

[‡] Nara Institute of Science and Technology

Abstract Recently, indoor positioning systems based on ultra-wideband (UWB) wireless communications have been considered. This system primarily utilizes time-of-flight (ToF) and time-difference-of-arrival (TDoA) techniques, the former of which involves setting up multiple anchors and measuring the distance difference between them and the target tag. The latter method provides multiple anchors and observes the distance difference between the target tag and the anchors. In the past, the authors have used the Gauss-Newton (GN) method, which uses the error gradient in space as a norm, and applied a Kalman filter (KF) to the output to stabilize the positioning solution. However, this method is not effective in reducing observation noise, which limits the accuracy of positioning. In this article, we discuss anchor placement and the shape of the error gradient, and investigate a method of anchor placement that is advantageous for TDoA positioning. Furthermore, we propose the application of KF to reduce the TDoA observation error. The proposed method is evaluated through computer simulations and proof of concept.

1 はじめに

近年、人や所有物の位置情報が様々な分野で活用されている。この位置測位の方法として、屋外では GPS を用いた手法が主流であるが、屋内や地下街などの衛星の電波が届かないエリアにおいては位置推定の精度が著しく低くなる。そのため、屋内でも利用可能な高精度な位置測位システムが検討されている。

本稿では超広帯域 (UWB) 無線通信を用いた屋内位置測位システムに着目する。UWB の特徴として、周波数帯域幅が非常に広い点が挙げられる。具体的には中心周波数が 7987.2MHz、周波数帯域幅が 499.2MHz の規格が多く使用されており、1 ナノ秒以下のパルス状信号を発射し、その信号の到來飛行時間 (ToF) や到着時間差 (TDoA) を測定し、測位アルゴリズムを用いて位置測位を行う。特に TDoA は図 1 に示すように、複数のアンカーを用意し、測位対象のタグとの間の距離差を測定するために用いられる。この方式は端末間の時間同期を不要とするため、消費電力を抑える特徴を持つ。

これまでに筆者らは、測位アルゴリズムとして空間上の誤差勾配を規範とするガウス・ニュートン (GN) 法を使用し、出力にカルマンフィルタ (KF) を適用して測位解を安定させる方法を提案してきた [1]。しかし、この手法では観測雑音を低減させる効果がないため、測位精度に限界が生じる。本稿では、アンカーの配置と誤差勾配の形状について考察し、TDoA による測位に有利なアンカー配置法を調べる。また、TDoA 観測誤差を低減するために、KF の適用を提案する。本稿ではさらに提案方式について、計算機シミュレーションおよび概念実証実験によって評価を行った。

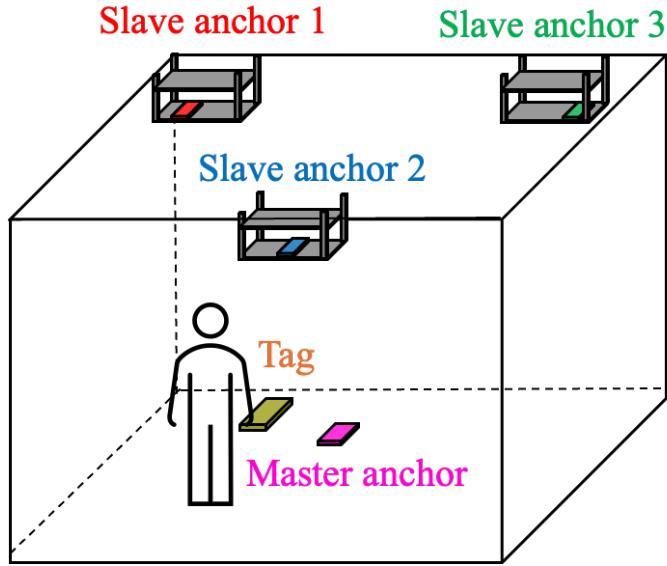


図 1: TDoA による屋内位置測位システムの概要

2 提案方式

2.1 到着時刻差 (TDoA) の観測

ここでは、マスター・アンカー (Master anchor)1 台と n 台のスレーブ・アンカー (Slave anchor) が既知の位置に設置されていると仮定し、タグ (Tag) が自己の位置を能動的に測位する。アンカーグループは時間軸は共通であり、タグの時間とは非同期である。前者をアンカー時刻、後者とタグ時刻と呼ぶ。マスター・アンカーからのトリガを受けたスレーブ・アンカーがあらかじめ定められた順にレスポンスを返す。トリガとレスポンスにはアンカー時刻が記録されており、いずれもタグが受動的に受信する。タグはトリガとレスポンスを受信したタグ時刻を記録する。ここで簡単のため、マスター・アンカー、スレーブ・アンカー、タグがそれぞれ 1 台と仮定する。トリガを発したアンカー時刻を T_1^{Tx} と表し、スレーブがレスポンスを発したアンカー時刻を T_2^{Tx} と表す。一方、タグがトリガとレスポンスを受信したタグ時刻をそれぞれ t_1^{Rx}, t_2^{Rx} と表すと、マスター・アンカーからタグへの飛行時間、およびスレーブ・アンカーからタグへの飛行時間はそれぞれ、 $t_1^{Rx} - t_1^{Tx}, t_2^{Rx} - t_2^{Tx}$ と表せるので、到着時刻差 ($tdoa$) は、飛行時間の差より、

$$tdoa = t_2^{Rx} - t_2^{Tx} - (t_1^{Rx} - t_1^{Tx}), \quad (1)$$

$$= t_2^{Rx} - t_1^{Rx} - (t_2^{Tx} - t_1^{Tx}), \quad (2)$$

と表せる。第 1,2 項はタグ時刻のみで処理が可能であり、第 3,4 項はアンカー時刻のみで処理が可能であるので、アンカー時刻とタグ時刻は非同期でよいことがわかる。

2.2 測位処理の流れ

図 2 に提案方式の構成を示す。1 台のマスターから送信されたトリガを受信した n 台のアンカーがあらかじめ決められた順にレスポンスを返す。トリガとレスポンスがタグに到着する時刻から、雑音を含む n 個の到着時刻差 (TDoA) の観測値が得られるので、これらを n 次元ベクトルとして前置カルマンフィルタの入力とする。 n 次元のカルマンフィルタの出力ベクトルをガウス・ニュートン法への入力とし、3 次元の測位座標を出力する。



図 2: 提案方式の構成

2.2.1 カルマンフィルタ

観測値を取得した離散時間 t における n 次元入力ベクトル \mathbf{y}_t に対する線形離散時間状態空間モデルを,

$$\mathbf{x}_{t+1} = F\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t, \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_t = H\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t, \quad (4)$$

のように設定する. ここで, F, H はそれぞれ, 状態遷移行列, 観測行列と呼ばれる. $\mathbf{w}_t, \mathbf{v}_t$ はそれぞれシステム雑音, 観測雑音を表す. 事前状態推定ベクトル \mathbf{x}_t^- , および事前誤差共分散行列 P_t^- は,

$$\mathbf{x}_t^- = F\hat{\mathbf{x}}_{t-1}, \quad (5)$$

$$P_t^- = FP_{t-1}F^T + Q, \quad (6)$$

で得られる. ここで, Q はシステム雑音 \mathbf{w}_t の共分散行列である. カルマンゲイン K_t , 状態推定値 $\hat{\mathbf{x}}_t$, 事後誤差共分散行列 P_t はそれぞれ,

$$K_t = P_t^- H^T (HP_t^- H^T + R)^{-1}, \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t = F\hat{\mathbf{x}}_t^- + K_t(\mathbf{y}_t - H\hat{\mathbf{x}}_t^-), \quad (8)$$

$$P_t = (I_n - K_t H)P_t^-, \quad (9)$$

のように処理する. ここで, R は観測雑音 \mathbf{v}_t の共分散行列である. I_n は n 次の単位行列を表す.

2.2.2 ガウス・ニュートン法

今回は簡単化のため, 2 次元座標の測位を仮定する. マスターアンカー 1 台と n 台のスレーブアンカーの位置座標をそれぞれ $(x_M, y_M), (x_{S_j}, y_{S_j})$ と表す. ここで, j はスレーブアンカーのインデックス ($j = 1, \dots, n$) を表す. 任意の座標 $\mathbf{p} = (x_{var}, y_{var})$ に対するマスターアンカーと j 番目のスレーブアンカーの距離差 Δd_{MS_j} は,

$$\Delta d_{MS_j} = \sqrt{(x_{var} - x_M)^2 + (y_{var} - y_M)^2} - \sqrt{(x_{var} - x_{S_j})^2 + (y_{var} - y_{S_j})^2}, \quad (10)$$

$$= d_M - d_{S_j}, \quad (11)$$

と表せる. Δd_{MS_j} と観測した到着時刻差 ($tdoa_{MS_j}$) を用いて, ガウス・ニュートン法の評価関数を以下に示す 2 乗誤差を,

$$S(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (\Delta d_{MS_j} - c \cdot tdoa_{MS_j})^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n r_{MS_j}^2, \quad (12)$$

と表すと,

$$\nabla S(\mathbf{p}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial S}{\partial x_{var}} \\ \frac{\partial S}{\partial y_{var}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{var} - x_M}{d_M} - \frac{x_{var} - x_{S_1}}{d_{S_1}} & \frac{y_{var} - y_M}{d_M} - \frac{y_{var} - y_{S_1}}{d_{S_1}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x_{var} - x_M}{d_M} - \frac{x_{var} - x_{S_n}}{d_{S_n}} & \frac{y_{var} - y_M}{d_M} - \frac{y_{var} - y_{S_n}}{d_{S_n}} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} r_{MS_1} \\ \vdots \\ r_{MS_n} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$= A^T \mathbf{r}, \quad (14)$$

と表せる。ここで、行列 A はヤコビ行列と呼ばれる。ガウス・ニュートン法では、 $\nabla^2 S(\mathbf{p}) = A^T A$ と近似し [2]、以下に定義する修正ベクトル $\Delta\mathbf{p}$,

$$\nabla^2 S(\mathbf{p}) \Delta\mathbf{p} = -\nabla S(\mathbf{p}), \quad (15)$$

$$\Delta\mathbf{p} = -(A^T A)^{-1} A^T \mathbf{r}, \quad (16)$$

を用いて $\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \Delta\mathbf{p}_k$ 、なる繰り返しを行う。ここで、 k は繰り返しのインデックスを表す。

3 計算機シミュレーション

本節では計算機シミュレーションを用いてアンカーの配置と誤差勾配の形状について考察し、TDoA による測位に有利なアンカー配置法を調べる。

表 1 に示すパラメータを用いて、計算機シミュレーションによる TDoA による位置測位を行った。パラメータは各アンカーおよびタグの二次元座標を示している。この値をプロットしたものを図 3 の左側に示す。各シミュレーションの相違点として 3 台目のスレーブアンカーの位置座標が挙げられる。シミュレーションによる誤差勾配を色付けした結果を図 3 の右側に示す。

図 3 より、スレーブアンカーの範囲外にタグを設置した場合、範囲内に設置した場合と比べて誤差勾配が広がることが確認できる。以上のことから、Tag をスレーブアンカーが囲むように配置することで、測位精度の向上につながると考える。

表 1: Simulation parameter

	(a) simulation 1	(b) simulation 2
Master anchor		(6, 10)
Slave anchor	(-3, 5), (13, 4), (-10, 13)	(-3, 5), (13, 4), (-4, 5)
Tag		(-7, 9)

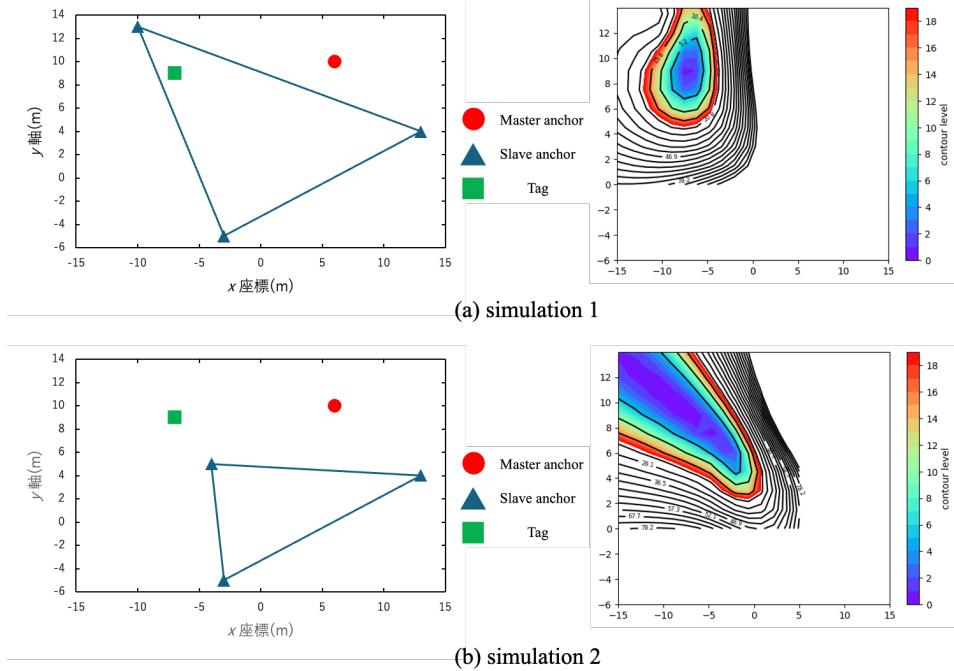


図 3: 誤差 S の分布

4 実験的評価

本章では3章の結果によるアンカーの配置の問題に着目し、実機を用いたTDoAによる静的測位および動的測位を行う。また、2.2.1小節で述べたカルマンフィルタを導入し、導入前との出力結果の比較を行う。

4.1 実験環境

主な実験器具と実験環境を表2に示す。本評価ではMaster anchor 1台、Slave anchor 3台、Tag 1台の構成で位置測位を行った。

表2: 実験環境

項目	種類、値
UWB module	Type 2BP NXP SR150
serial I/F bit rate [Mbps]	3
測定場所	奈良先端科学技術大学院大学 情報科学棟4階A408
Master anchor [台]	1
Slave anchor [台]	3
Tag [台]	1

4.2 静的測位

評価実験の設定値と配置構成を、表3および図4にそれぞれ示す。本実験では、① Slave anchor の範囲内、② Slave anchor の範囲外 1m 以内、③ Slave anchor の範囲外 1m 以上、の異なる条件下で Tag を配置し、各配置で 500 点の測定を行った。また、誤差共分散行列 $P = \text{diag}(p_0, \dots, p_0)$ 、システム雑音の共分散行列 $Q = \text{diag}(q, \dots, q)$ 、観測雑音の共分散行列 $R = \text{diag}(r, \dots, r)$ 、などの前置カルマンフィルタのパラメータについて、同じく表3に示す。図4には静的測位におけるタグとアンカー群の配置を示す。

表3: 静的測位における設定値

	① Slave anchor の範囲内	② Slave anchor の範囲外 1m 以下	③ Slave anchor の範囲外 1m 以上
測定回数 [回]	500		
Master anchor	(3.9, 4.2)		
Slave anchor	(0.05, 0.15) (3.85, 6.3) (7.23, 0.15)		
Tag	(3.9, 1.7)	(7.23, 1.7)	(8.0, 6.3)
F, H		I_n	
p_0, q, r		1e-6, 1e-6, 1e-4	

これらの条件でTDoAによる観測を行った。図5に表3②の条件であるSlave anchorの範囲外 1m 以下の結果を示す。TDoAの観測値を左図に、カルマンフィルタ出力を右図に示している。図5よりTDoA観測値には雑音が含まれること、ならびにカルマンフィルタのスムージングが問題なく得られていることがわかる。①,③の条件でも同様の結果が得られた。表4に定量的評価をまとめた。表中の距離誤差は $\{|p - p_{GN}|^2/N\}^{1/2}$ を表す。前置KFにより、距離誤差は変わらないものの標準偏差を約67%低減できることがわかった。

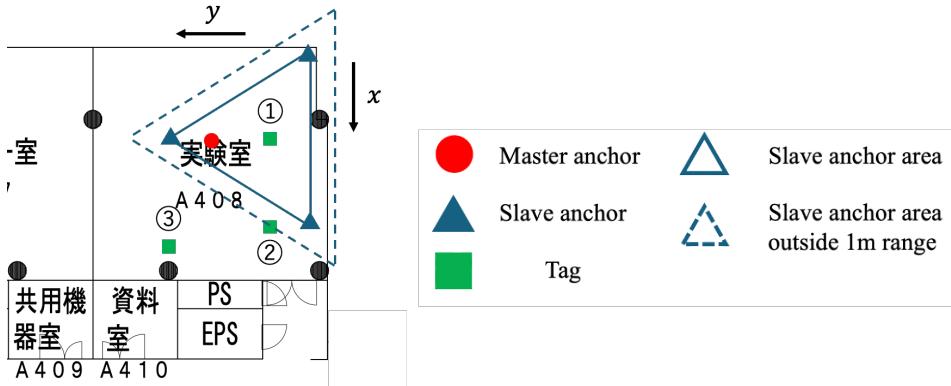


図 4: 静的測位におけるタグとアンカーグループの配置

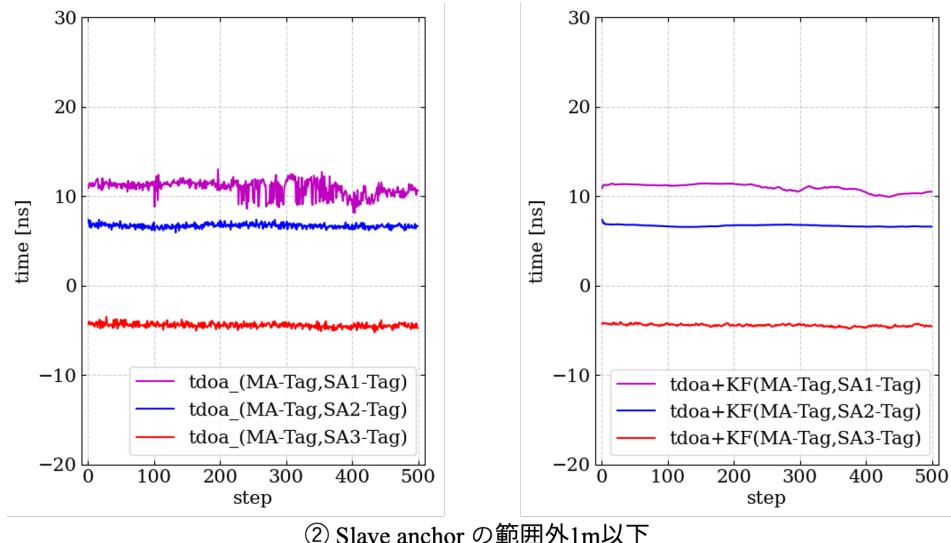


図 5: 静的測位における TDoA 観測値とカルマンフィルタ出力

4.3 動的測位

これまで静的な状態で位置推定の評価を行ってきたが、歩行者など動的測位に効果的かを確認するため検証を行った。タグを所持した状態で、試験的に実験室内を一周し、本提案方式で位置推定を行った結果を図 4 に示す。(a) に示す各曲線は、タグから観測した各スレーブの到着時刻差 ($tdoa_{MS_j}$; $j=1,2,3$) に速度 c を掛けた距離を示している。また KF を適用させた結果を同じ図に黒い線で示す。この結果に対し GN 法で測位結果をプロットしたものを (b) に示す。ここで緑と紫の曲線は KF 無と有の場合を各々示している。本実験では、歩行者が移動するため表 4 における①②③の条件が混在しているが、概ね安定した結果が得られることが判明した。

表 4: 静的測位定量評価

各条件	(1)		(2)		(3)	
座標軸	x	y	x	y	x	y
真値 座標, \mathbf{p}	3.9	1.7	7.23	1.7	8.0	6.3
GN 法 出力座標 \mathbf{p}_{GN}	4.14	1.79	6.78	1.60	7.73	6.24
GN 法 距離誤差 [m]	0.26		0.46		0.28	
GN 法 標準偏差 [m]	0.07	0.14	0.38	0.13	0.90	0.88
KF +GN 法 出力座標	4.14	1.79	6.76	1.60	7.58	6.08
KF +GN 法 距離誤差 [m]	0.26		0.48		0.47	
KF+ GN 法 標準偏差 [m]	0.02	0.04	0.17	0.06	0.22	0.17

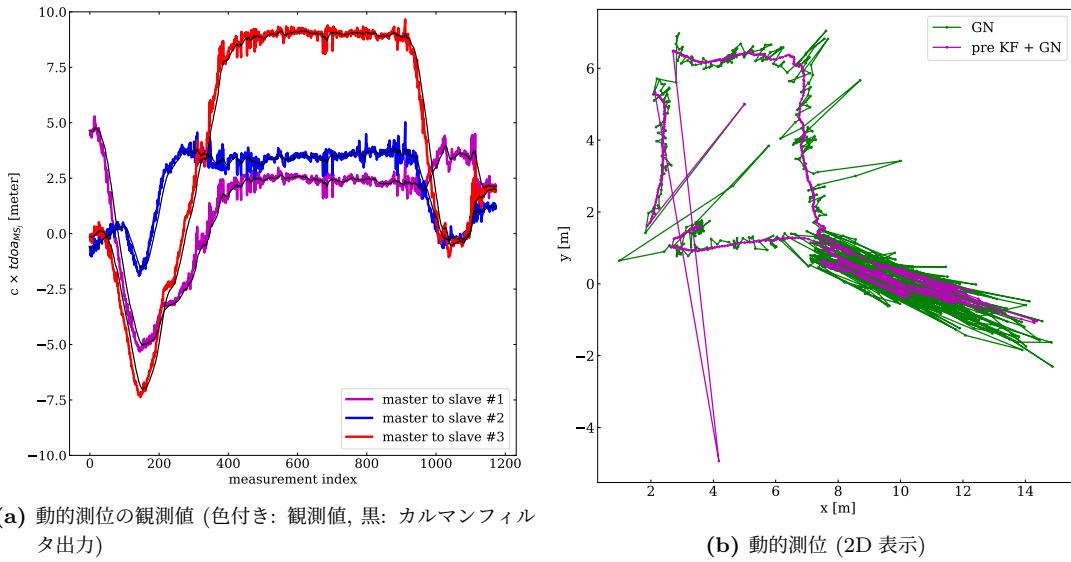


図 6: 動的測位.

5 まとめ

本稿では UWB 無線通信を用いた屋内位置推定システムに着目し, TDoA による測定値に対してカルマンフィルタを適用して観測雑音を低減させる手法を提案した. また室内に配置されたスレーブアンカーの範囲内にタグが存在するか否かが推定誤差に影響を与えることをシミュレーションおよび実験で検証した. さらにタグの位置がどの場所にあっても提案方式は従来方式に比べ安定した測位結果を出力することを確認した. 最後に歩行者を対象とした位置推定を行い概ね安定した位置推定結果が得られることを示した. 今後は実験を重ねて統計的検証を行う予定である.

参考文献

- [1] 中村康一郎, 徳永凜, 依岡寛人, and 東野武史, “カルマンフィルタによる IR-UWB 高精度測位,” 電子情報通信学会, vol. 1, no. 1, pp. ppA-9–04, 2024.
- [2] W. H. Foy, “Position-location solutions by taylor-series estimation,” *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, no. 2, pp. 187–194, 1976.