

## UWB と IMU のセンサフュージョンによる 3 次元の位置推定の検討 Study of 3D position estimation using sensor fusion of UWB and IMU

岡村 昂志郎<sup>‡</sup> 島田 英之<sup>‡</sup> 尾崎 亮<sup>‡</sup>  
Koshiro Okamura Hideyuki Shimada Ryo Ozaki

### 1. 緒言

GNSS (Global Navigation Satellite System) 衛星不可視の状況での位置測位技術として、UWB (Ultra Wide Band) と IMU (Inertial Measurement Unit) が挙げられる。UWB では、送信機が発する電波を複数のアンテナで受信し、距離と角度の情報を得て 3 次元位置を推定できるが、送信機からの電波の到来角が大きくなるにつれて位置情報の誤差が増大する。IMU は加速度と角速度センサによって移動した 3 次元位置を推定できるが、時間とともに誤差が蓄積される。

4 台以上の UWB の受信機で距離の情報を得て、3 次元位置推定を行う手法[1]が提案されているが、多数のセンサの使用は複雑であり、また、環境によっては 4 台以上で受信できない場合がある。

そこで、本研究では 2 台の UWB と IMU のデータを Kalman filter で補正し、高精度な 3 次元位置推定を実現するための検討を行った。本稿では、Kalman filter による軌跡推定のシミュレーション結果について報告する。

### 2. 関連技術

#### 2.1 UWB

UWB とは、超広帯域の周波数帯域幅を利用する無線通信である。特徴として、高精度な位置測位が可能な点、広帯域により他の通信に対して干渉しにくい点が挙げられる。利用制限なく UWB 無線システムを利用できる周波数帯は、7.587GHz - 8.4GHz である。UWB 無線通信を用いた位置測位の方法として、2 台の UWB デバイス間での飛行時間から測距する TWR (Two Way Ranging) と、UWB デバイス付属のアンテナを用いた角度測定が代表的である。本研究で使用するデバイスはアンテナを 3 基備えており、受信した電波の位相差から方位角と仰角を測定できる。

#### 2.2 IMU

IMU とは、3 次元の加速度と角速度を検出する装置である。加速度と角速度を検出できる IMU を 6 軸 IMU と呼ぶ。6 軸に地磁気加わると 9 軸 IMU となる。加速度を積分すれば速度を推定でき、角速度を積分すれば移動した角度を推定することができる。本研究では屋内での使用を想定するため 6 軸 IMU を使用する。

#### 2.3 Kalman filter

Kalman filter とは、不確実な 2 つのセンサの値を合成することで直接観測できない状態を推定するアルゴリズムである。計算式を以下の(1)と(2)に示す。

$$\text{状態方程式} \quad x_t = Fx_{t-1} + Bu_t + w_t \quad (1)$$

$$\text{観測方程式} \quad z_t = Hx_t + v_t \quad (2)$$

ここで、 $t$  は時刻、 $x$  は状態値、 $u$  は制御値、 $z$  は観測値、 $F$ 、 $B$ 、 $H$  は係数、 $w$  は平均 0 分散  $Q$  の状態値の雑音、 $v$  は平均 0 分散  $R$  の状態値の観測値の雑音を表す。本研究では状態方程式に IMU のデータ、観測方程式に UWB のデータを使用する。

状態方程式や観測方程式における二乗関係や三角関数関係など、実際のシステムには必ずある程度の非線形性が存在する。非線形モデルに適用できる Kalman filter は EKF (Extended Kalman Filter) と UKF (Unscented Kalman Filter) である。EKF では非線形モデルを線形に近似して推定する。UKF では非線形モデルのまま推定する。

### 3. 提案手法

2 つのシミュレーションを行う。まず、指定した位置で 30 回測位を行い、UWB の観測値に Kalman filter を適用する。UWB のみの観測値と Kalman filter による推定値の分散を比較し有効性を確認する。次に、UWB を移動させ、UWB の観測値に Kalman filter を適用する。UWB のみの観測値と Kalman filter による推定値の軌跡推定を行い、真値との平均測位誤差を比較し有効性を確認する。

Kalman filter として EKF、UKF をそれぞれ適用し、比較する。

UWB の観測値  $z$  は式(3)で与えられる。

$$z = x + v_1 + v_2 \quad (3)$$

$x$  は UWB の真の位置、 $v_1$  は UWB デバイスに含まれる系統誤差、 $v_2$  は平均 0 分散  $R$  の偶然誤差を表す。分散  $R$  は事前に計測したデータを使用する。

観測した距離  $d$ 、方位角  $\theta$ 、仰角  $\varphi$  をもとに 3 次元座標を計算する。3 次元座標への変換を式(4)、(5)、(6)に示す。

$$X = d \sin(\theta) \cos(\varphi) \quad (4)$$

$$Y = d \cos(\theta) \cos(\varphi) \quad (5)$$

$$Z = d \cos(\theta) \sin(\varphi) \quad (6)$$

観測値の距離、方位角、仰角はキャリブレーション後のデータを使用する。

### 4. 実験内容

#### 4.1 Kalman filter による分散の推定

送信機の UWB デバイスを指定した位置で 30 回測位を行い、観測した距離、方位角、仰角をもとに 3 次元座標を求める。3 次元座標に 2 つの Kalman filter を適用する。UWB のみの観測値と EKF、UKF の推定値による 3 次元座標の分散を比較する。シミュレーションでは事前に計測した距離、方位角、仰角の分散を使用する。位置は距離 200cm、方位角 48deg、仰角 36deg を想定する。受信機の座標は(0, 0, 0)、送信機の座標は(120, 108, 79)である。

<sup>‡</sup> 岡山理科大学 Okayama University of Science

## 4.2 Kalman filter による軌跡の推定

送信機の UWB デバイスを移動させ軌跡推定を行う。UWB のみの観測値と EKF, UKF の推定値による真値との平均測位誤差を評価する。また、同じシミュレーションを系統誤差ありと系統誤差なしの場合で 50 回行い、平均測位誤差が最小の回数を計測する。周期は 0.1s, 速度は 10cm/s, 方位角・仰角の角速度は 0.1rad/s で合計 628 回測位し、送信機を円形に移動させる。受信機の座標は(0, 0, 0)に固定し、送信機の初期座標は(0, 200, 0)とする。

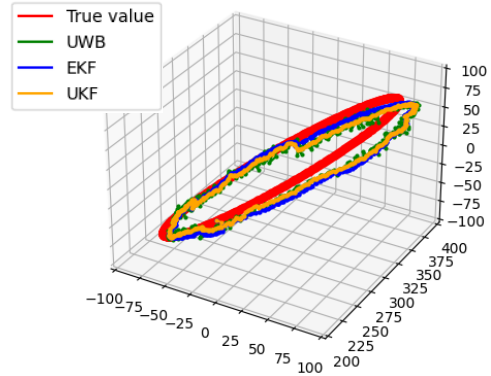


図 2 観測値と EKF と UKF の軌跡の比較(単位:cm)

## 5. 実験結果

### 5.1 分散の推定

分散の推定結果を表 1 に示す。図 1 は UWB のみの観測値と EKF, UKF を適用した結果を示す。赤が真の位置, 緑が観測値, 青が EKF の推定値, 黄が UKF の推定値を示す。UWB のみでは X 座標の分散は 36.92 であり, X 座標の平均値 120.17cm から最大 12cm のばらつきがある。EKF を適用した場合には X 座標の分散は 5.19 であり, X 座標の平均値 120.24cm から最大 5cm のばらつきがある。UKF を適用した場合には X 座標の分散は 1.64 であり, X 座標の平均値 120.48cm から最大 2cm のばらつきがある。分散は UKF を適用した場合がすべての座標において最小になった。UKF は EKF に比べて非線形の表現が近いいため分散が最小になったと考察できる。

表 1 分散の推定結果

	分散		
	X	Y	Z
UWB	36.92	42.45	55.54
EKF	5.19	13.24	26.09
UKF	1.64	12.48	18.56

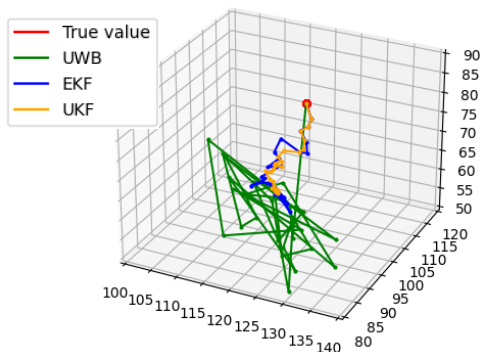


図 1 観測値と EKF と UKF の分散の比較(単位:cm)

### 5.2 軌跡の推定

軌跡の推定結果を表 2 に示す。図 2 は UWB の観測値と EKF, UKF を適用した結果を示す。赤が真の位置, 緑が観測値, 青が EKF の推定値, 黄が UKF の推定値を示す。平均測位誤差は EKF を適用した場合が最小になった。

表 2 軌跡の推定結果

	UWB	EKF	UKF
平均測位誤差(cm)	13.89	13.31	13.52

先行研究[2]では系統誤差なしの場合, UKF を適用した結果が最も良い測位性能になると報告されている。ここで, 同じシミュレーションを系統誤差ありと系統誤差なしの場合で 50 回行い, EKF と UKF の測位誤差が最小の回数を計測した。系統誤差ありの場合を表 3, 系統誤差なしの場合を表 4 に示す。系統誤差ありの場合は EKF と UKF は同じ回数であり, どちらも同じ性能をしていることが確認できる。系統誤差なしの場合は UKF が最も多く, 最も位置推定能が高いことが確認できる。したがって, 系統誤差の有無で Kalman filter の精度は変化することが考察できる。つまり, 2 台のみの UWB デバイスでも観測値に Kalman filter を適用することで, 最大で平均測位誤差 13.31cm の精度で 3 次元位置推定を実現することができ, 多数のセンサの使用による複雑さを低減することができる。

表 3 系統誤差ありの場合

	UWB	EKF	UKF
誤差が最小の回数	0	25	25

表 4 系統誤差なしの場合

	UWB	EKF	UKF
誤差が最小の回数	0	0	50

## 6. 結言

本研究では, UWB と IMU のセンサフュージョンによる 3 次元の位置推定について検証した。UWB の観測値に UKF を適用することで分散を最小にすることができた。また, Kalman filter を適用することで最大で平均測位誤差 13.31cm の精度で 3 次元位置推定を実現することができた。今後, リアルタイムで位置を推定できるシステムへの応用に取り組む。

### 参考文献

- [1] Weide You, Fanbiao Li, Liqing Liao, Meili Huang, "Data Fusion of UWB and IMU Based on Unscented Kalman Filter for Indoor Localization of Quadrotor UAV", in IEEE Access, Vol.8, pp.64971-64981 (2020).
- [2] D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang, X. -G. Xia, "Kalman-Filter-Based Integration of IMU and UWB for High-Accuracy Indoor Positioning and Navigation", in IEEE Internet of Things Journal, Vol.7, no.4 (2020)