

BLE を用いた屋内位置推定における誤差低減の検討 A study on error reduction in indoor localization using Bluetooth Low Energy

廣田 海斗[†] 田中 圭[†] 島崎 仁司[†] 大柴 小枝子[‡]
Kaito Hirota Kei Tanaka Hitoshi Shimasaki Saeko Oshiba

1. はじめに

近年、ドローンは空撮や点検、測量といった多様な産業分野において活用されている。屋外では GPS を使用することで精度の高い位置推定を容易にできる一方で、屋内や地下では電波が届きにくいいため、屋内における位置推定は GPS 以外の方法で高い精度の実現が必要となる。GPS による現在地の測定が困難な空間においても高精度な屋内位置推定を行うために Wi-Fi や BLE ビーコンを用いた研究が進んでいる。

本研究ではドローン自己位置推定の手法として、RSSI を用いた距離の推定と、AoA[1]を利用した SA 複合による到来角推定を組み合わせた方法に補正をかけることで反射の影響を低減し、その有効性を検討した。

2. RSSI+ AoA による位置推定実験

RSSI を用いた距離推定ではフリスの公式を利用して距離を算出する。アンテナ間の距離 d は、送信アンテナと受信アンテナの利得を 1 とし、RSSI を用いてフリスの公式から逆算することで求められる。

角度推定は AoA 法を用いて、SA 複合[2][3]で行う。円形アレーの各素子から 2 素子を選択して考え、このサブアレーによる到来角は AoA 法により算出する。選択したすべてのサブアレーで到来角を算出し、その誤差を統計処理することで最も尤度の高い到来角を決定する。

RSSI から求めた距離と AoA で求めた角度を合わせることで 1 つのアレーアンテナで位置推定を行うことが出来る。

RSSI+ AoA 法は送信機である端末と、受信機である固定器(アレーアンテナ)で構成される。送信機として使用する端末は、評価ボード(NORDIC 社製, nRF52833-DK)である。RSSI と位相情報を CTE 波として出力する。

受信機である固定器は、6 素子円形アレーを使用する。6 個のアンテナが等間隔で設置されており、2 つのアンテナ間の位相差から到来角を求める。それぞれのアンテナ間の距離を設定しておくことで SA 複合を用いて PC アプリ(LL_AOD)上に到来角を計算し表示する。受信機と送信機を図 1 に示す。

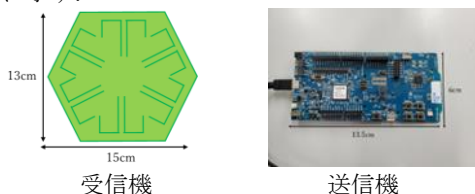


図 1. 受信機と送信機

2.1. 電波暗室での実験

電波暗室内で $3 \times 5\text{m}$ の範囲を 0.5m ごとに区切り、原点を除く 76 点で測定を行い、各地点における位置推定誤差を求めた。実験の概略図を図 2 に示す。原点にアレーアン

テナ送信機(固定器)を置き、76 の測定点に送信機(端末)を置いて位置を推定した。

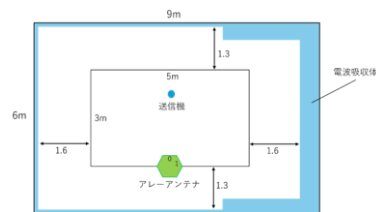


図 2. 実験系

2.2. 屋内での実験

3m 平方の測定範囲を 50cm ごとに区切り、原点を除く 48 点で測定を行い、各地点における位置推定誤差を求めた。電波暗室での実験と同様に、原点にアレーアンテナ送信機(固定器)を置き、48 の測定点に送信機(端末)を置いて位置を推定した。

3. 実験結果

3.1. 電波暗室での実験結果

各地点における位置推定誤差を図 3 に示す。距離が離れるにつれて RSSI の減少が緩やかになり理想の RSSI 特性からずれていくことで、原点から離れるにつれて誤差が大きくなる。また、角度誤差が大きい点ではグラフにピークがみられる。

距離によって誤差が大きくなっている原因は、距離を計算する際にアンテナの利得を 1 としていることに加え、実際には電波の伝播の減衰が距離の 2 乗に比例しないことが考えられる。RSSI から求めた距離の平均二乗誤差は 1.48m 、角度誤差の絶対値平均は 7.94° であり、位置推定の二乗平均誤差は 1.88m であった。

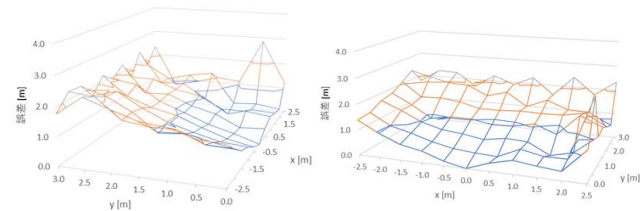


図 3. 位置推定誤差

3.2. 屋内での実験結果

電波暗室での実験と同様に、距離が離れるにつれて RSSI の減少が緩やかになり理想の RSSI 特性からずれていくことで、原点から離れるにつれて誤差が大きくなる。RSSI

特性は電波暗室内と屋内での違いは見られず、距離の平均二乗誤差は 1.42m であった。

また、角度誤差は電波暗室内よりも大きくなっており、絶対値平均は 13.13° であった。床や壁による反射の影響が大きいため、誤差が大きくなったと考える。位置推定の平均二乗誤差は 1.47m であった。

3.3. 誤差の低減

3.3.1. 距離誤差に対する補正

誤差を小さくするため、実際の距離に対する RSSI に対応させるような補正值を考える。同じ距離で測定された RSSI の平均値と標準偏差を求め、正規分布で上下 10% に当たる値を外れ値として除外する。RSSI の理論値との差を求めそれぞれの距離に対する誤差の平均をグラフ化し、その近似曲線から RSSI 特性に補正をかける。これによって伝播の減衰とアンテナ利得をまとめて補正する。距離推定の補正前後の結果を図 4 に示す。

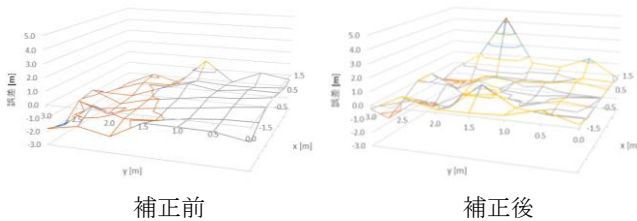


図 4. 距離の補正

補正前は距離が遠くなるにつれて RSSI が大きい値を示すことで誤差が大きくなっていましたが、補正を入れることで誤差が減少し、平均二乗誤差が 1.42m から 0.76m になった。外れ値を補正值の計算時に除外していることで反射の影響が大きい点では補正前よりも誤差が大きくなっている。

3.3.2. 角度誤差に対する補正

角度推定では SA 複合において計算時に制限尤度を設け、到来方向を制限することで、本来来るはずのない後方からの電波の尤度を下げる。これにより反射の影響を低減し、角度推定の精度を上げることが出来る。範囲を $-120 \sim 120^\circ$ に設定し、範囲外の尤度を下げて実験を行った補正前後の角度誤差を図 5 に示す。

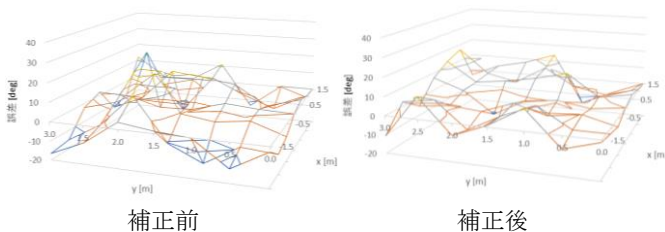


図 5. 角度の補正

角度制限を適用することでグラフのピークが減少し、絶対値平均が 13.13° から 10.33° になった。壁や床による反射の影響が小さくなり、誤差が減少したと考える。

3.3.3. 位置推定誤差

距離誤差に対する補正と角度誤差に対する補正を適用したときの位置推定誤差の比較を図 6 に示す。

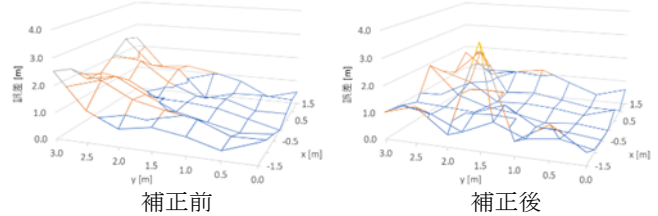


図 6. 位置推定誤差の比較

RSSI 補正を入れると理想特性に近くなることで、距離によって大きくなっていった誤差が減少した。また、角度制限によってグラフのピークが小さくなった。位置推定の平均二乗誤差が補正前は 1.47m だったものが補正後は 0.94m と減少し、精度の向上が確認できた。

4. まとめ

本研究ではドローン自己位置推定の手法として、RSSI を用いた距離の推定と、AoA を利用した SA 複合による到来角推定を組み合わせる方法の有効性を検討した。電波暗室と屋内での実験を行い比較した。距離が遠くなるにつれて増大していた誤差が、RSSI に補正をかけることで誤差が小さくなり、角度制限によって、角度誤差が低減することで位置推定の誤差が小さくなり精度が向上することを明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導いただきましたライフラボトリ株式会社の岩松隆則氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Martin Woolley, "Bluetooth Direction Finding", v 1.0, Bluetooth SIG (2019).
- [2] 岩松 隆則, 内藤 翔貴, 鈴木 和浩, 大柴 小枝子, "BLE における円形アレー二次元位置推定の一検討", 信学技報, Vol.122, No.397, CS2022-87, pp.83-88 (2023).
- [3] 岩松 隆則, 小杉友久, 鈴木 和浩, 廣田 海斗, 田中 圭, 島崎仁司, 大柴 小枝子, "BLE における円形アレー二次元位置推定の一検討", 信学技報, Vol.123, No.434, RCS2023-265, pp.65-70 (2024).