

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：11201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14262

研究課題名(和文) マイクロ波強度情報のみを用いた高精度測位法

研究課題名(英文) Accurate positioning method using only microwave signal strength information

研究代表者

本間 尚樹 (Honma, Naoki)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：70500718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：屋外ではGPS等の衛星測位が可能であるが、信号が得られない屋内では衛星測位が不可能である。本研究課題では、複数の指向性を持つ3素子アレーを用いた無線ビーコンを使い、信号強度情報だけから受信端末自らの位置を推定する方式を確立・実証した。複数の指向性を実現するアレーアンテナ給電回路を実現し、そのような給電回路を持つ無線ビーコンを試作した。複数の屋内ビーコンの出発角情報から三角法により位置を特定可能とした。本研究によって、従来の屋内測位法と比べて飛躍的に高い0.7 m(中央値)の位置精度を実現した。

研究成果の概要(英文)：Though positioning systems using satellites has been well used in the outdoor environment, the indoor positioning using satellite cannot be realized since the satellite signal is not available. This research has established an accurate indoor positioning method using three-beam beacons, where the terminal estimates its location only from the signal strength information. We realized the array antenna feed network for multi-beam excitation, and fabricated beacons having the developed feed networks. The receiving terminal estimates its directions from multiple beacons, and its location is calculated by using triangulation technique. This study revealed the accuracy of the newly developed technique is 0.7 m at 50 percentile value, which is significantly better than the conventional technique.

研究分野：通信ネットワーク工学

キーワード：アンテナ 方向推定 強度情報 位置推定

1. 研究開始当初の背景

衛星測位が不可能な屋内環境では、無線ビーコンを用いた位置推定方式が主流である。これらは主に、信号強度からビーコンとの距離を推定し、複数のビーコンとの距離を推定することで受信端末位置を推定する。しかし、多重波環境である屋内では信号強度の距離変動は複雑で距離推定を行うことは困難であり、位置の推定誤差は数 m に及ぶ。一方、そのような複雑な強度分布をデータベース化しマッチングにより位置推定を行う位置指紋方式は測位精度が高いが、什器の移動等で伝搬環境が変化すると測位が不可能になる。一方、アレーアンテナで方向推定を行い三角法により位置推定を行う手法は、多重波や環境依存の問題解決に有効である。しかし、アレーアンテナ各素子の信号の位相情報が必要になるため、ビーコンで用いる簡易なハードウェアでは実現できない。モノパルス方式ではアレーアンテナと、信号の和と差を出力するアナログ検出回路を用いて、信号強度だけを用いて方向推定を行う。しかし、常に虚像が発生するという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、モノパルス方式の発想を転換して送受信を入れ替えることで、固定局であるアレーアンテナはモノパルス給電回路の和信号と差信号に対応する指向性で信号を送信し、移動体は単一アンテナであるにもかかわらず、信号の出発角 (DOD: Direction-of-Departure) を振幅情報のみに基づいて推定する方式の確立および実証を行う。

3. 研究の方法

本研究では、振幅情報 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) から DOD を推定する方法を新たに導入・考案した。見通し環境の場合、推定した DOD 情報に三角法を適用することによって、距離によらない位置推定が可能である。また、DOD を用いる方法はデータベースが不要であり、屋内環境などのフェージング環境への適応可能である。しかし、DOD 推定は一般的に信号の位相情報を必要とするため、位相情報が含まれない RSSI だけでは実現が難しいという問題があった。この問題を解決する方法として、RSSI 情報のみを用いた DOD 推定法を考案した。この方式は、2 素子アレーアンテナに接続された 180 度ハイブリッドのポートの電力差と 90 度ハイブリッドのポートの電力差を用いて方向推定を行う。2 素子アレーアンテナにそれぞれ 180 度ハイブリッドと 90 度ハイブリッドを経由して給電することで、4 つの送信信号が異なるアンテナ指向性で送信される。この送信信号を受信し、観測される信号の受信信号強度のみから伝搬チャネルの相関行列を推定し、推定した相関行列を用いて DOD を推定する。位置推定は複数の DOD 情報に三角法を適用し、受信端末自らの位置を推定する。

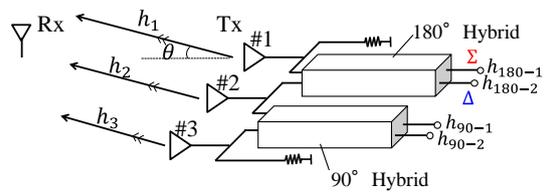


図1. 提案システム構成

申請者はさらに、使用アンテナを 2 素子アレーアンテナから 3 素子アレーアンテナに拡張することで、RSSI を用いた DOD 推定の精度を向上させる方法を考案した[1]. 一般には、到来方向推定を行う際にアンテナ素子数を増やすことにより、推定精度が向上することが知られており、2 素子アレーアンテナを 3 素子アレーアンテナに拡張することで、位置推定精度の向上が期待できる。

(1) 受信信号強度のみを用いた DOD および位置推定法

図 1 に本検討の提案システム構成を示す。ビーコン側の 3 素子アレーアンテナから送信される信号を、端末アンテナである 1 素子アンテナで観測する構成となっている。図 1 では送受信アンテナ間には十分に遠方であると仮定し、すべての送信アンテナからの受信アンテナへの放射方向は等しいとする。3 素子のアレーアンテナには合成器が接続されており、180 度ハイブリッドおよび 90 度ハイブリッドを経由し給電することで、4 つのビーコン信号が送信される。送信アンテナ #1 と #2 には 180 度ハイブリッド、送信アンテナ #2 と #3 には 90 度ハイブリッドがそれぞれ接続されており、180 度ハイブリッドは和と差のパターンを形成するために接続され、90 度ハイブリッドは右と左のパターンを形成するために接続される。つまり、4 つの放射パターンが使用され、それぞれに個別のビーコン信号が割り当てられる。アレーの両側に接続されている合成器の 2 つの入力ポートのうち 1 つは、励起振幅を等しく維持するために終端されている。図中の h_1, h_2, h_3 は送受信アンテナ間の伝搬チャネルを表し、 h_{180-1}, h_{180-2} は 180 度ハイブリッドの入力ポートを表し、 h_{90-1}, h_{90-2} は 90 度ハイブリッドの入力ポートを表している。この構成により得られる 4 つのビーコン信号の RSSI から伝搬チャネルの相関行列を推定する。相関行列 R は、

$$R = h^H h = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |h_1|^2 & h_1^* h_2 & h_1^* h_3 \\ h_1 h_2^* & |h_2|^2 & h_2^* h_3 \\ h_1 h_3^* & h_2 h_3^* & |h_3|^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

のように表される。ここで、 $\{\cdot\}^H$ は複素共役転置、 $\{\cdot\}^*$ は複素共役を示す。180 度、90 度ハイブリッドの各ポートと受信アンテナ間のチャネルは、180 度・90 度ポート特性より、合成器による損失を考慮すると、

$$h_{180-1} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2) \quad (2)$$

$$h_{180-2} = \frac{1}{2}(h_1 - h_2) \quad (3)$$

$$h_{90-1} = \frac{1}{2}(h_2 + jh_3) \quad (4)$$

$$h_{90-2} = \frac{1}{2}(jh_2 + h_3) \quad (5)$$

と表される。このシステムでは各入力ポートに給電される電力は等しく既知であるものとしている。そのため、RSSI から式(2)~(5)の左辺のチャンネルの利得が観測される。観測されるチャンネル利得は、

$$|h_{180-1}|^2 = \frac{1}{4}(|h_1|^2 + |h_2|^2 + h_1 h_2^* + h_1^* h_2) \quad (6)$$

$$|h_{180-2}|^2 = \frac{1}{4}(|h_1|^2 + |h_2|^2 - h_1 h_2^* - h_1^* h_2) \quad (7)$$

$$|h_{90-1}|^2 = \frac{1}{4}(|h_2|^2 + |h_3|^2 - jh_2 h_3^* + jh_2^* h_3) \quad (8)$$

$$|h_{90-2}|^2 = \frac{1}{4}(|h_2|^2 + |h_3|^2 + jh_2 h_3^* - jh_2^* h_3) \quad (9)$$

と表すことができ、これらを用いて相関行列の推定を行う。

180 度ハイブリッドを介して得られる利得の差に注目すると、 $R_{21} = R_{12}^*$ の関係より、

$$\begin{aligned} |h_{180-1}|^2 - |h_{180-2}|^2 &= \frac{1}{2}(h_1 h_2^* + h_1^* h_2) \\ &= \frac{1}{2}(R_{12} + R_{21}) = |R_{12}| \cos \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

と表すことができ、 R_{12} および R_{21} の実部を求めることができる。ここで、 α は R_{12} の偏角を表す。また、180 度ハイブリッドを介して得られる利得の和に注目すると、相加相乗平均の関係より、

$$\begin{aligned} |h_{180-1}|^2 + |h_{180-2}|^2 &= \frac{1}{2}(|h_1|^2 + |h_2|^2) \\ &\geq |h_1 h_2| = |R_{12}| \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる。2 素子の送信アンテナから受信アンテナまでの伝搬損が等しく $|h_1| = |h_2|$ であると近似すると、式(11)の両辺は等しくなるため、 R_{12} の偏角である α は

$$\alpha \approx \pm \cos^{-1} \left(\frac{|h_{180-1}|^2 - |h_{180-2}|^2}{|h_{180-1}|^2 + |h_{180-2}|^2} \right) \quad (12)$$

と書くことができる。同様に 2 素子の送信アンテナから受信アンテナまでの伝搬損が等しく $|h_1| \approx |h_2|$ であると近似すると、

$$\begin{aligned} |R_{11}| &= |R_{12}| = |R_{21}| = |R_{22}| \\ &= |h_{180-1}|^2 + |h_{180-2}|^2 = A \end{aligned} \quad (13)$$

と書ける。ここで、 A は実数の定数である。式(1)に示される相関行列のうち 180 度ハイブリッドを経由して励振されるアンテナに関する相関行列を R_{180} と定義すると、 A および α を用いて表すと、

$$R_{180} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & Ae^{j\alpha} \\ Ae^{-j\alpha} & A \end{pmatrix} \quad (14)$$

となる。次に、90 度ハイブリッドを介して得られる利得の差に注目すると、

$$\begin{aligned} |h_{90-1}|^2 - |h_{90-2}|^2 &= \frac{1}{2}(-jh_2 h_3^* + jh_2^* h_3) = \\ &= \frac{1}{2}(jR_{23} - jR_{32}) = -|R_{23}| \sin \beta \end{aligned} \quad (15)$$

と表すことができ、 R_{23} および R_{32} の虚部を求めることができる。ここで、 β は R_{23} の偏角を表す。また、90 度ハイブリッドを介して得ら

れる利得の和に注目すると、相加相乗平均の関係より、

$$\begin{aligned} |h_{90-1}|^2 + |h_{90-2}|^2 &= \frac{1}{2}(|h_2|^2 + |h_3|^2) \geq |h_2 h_3| \\ &= |R_{23}|. \end{aligned} \quad (16)$$

と表すことができる。したがって、 R_{23} の偏角である β は、2 素子の送信アンテナから受信アンテナまでの伝搬損が等しく $|h_2| \approx |h_3|$ であると近似すると、

$$\begin{aligned} \beta &\approx \sin^{-1} \frac{-|h_{90-1}|^2 - |h_{90-2}|^2}{|h_{90-1}|^2 + |h_{90-2}|^2} \\ \pi - \sin^{-1} \frac{|h_{90-1}|^2 - |h_{90-2}|^2}{-|h_{90-1}|^2 + |h_{90-2}|^2} \end{aligned} \quad (17)$$

と書くことができる。同様に $|h_2| \approx |h_3|$ であると近似すると、

$$\begin{aligned} |R_{22}| &= |R_{23}| = |R_{32}| = |R_{33}| \\ &= |h_{90-1}|^2 + |h_{90-2}|^2 = B \end{aligned} \quad (18)$$

と書ける。ここで、 B は実数の定数である。式(1)に示される相関行列のうち 90 度ハイブリッドを経由して励振されるアンテナに関する相関行列を R_{90} と定義すると、 B および β を用いて表すと、

$$R_{90} = \begin{pmatrix} R_{22} & R_{23} \\ R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B & Be^{j\beta} \\ Be^{-j\beta} & B \end{pmatrix} \quad (14)$$

となり、相関行列が推定される。しかし、偏角が α と β でそれぞれ 2 通りずつ推定されるため、4 通りの解が推定されることとなる。そのため、真の解を選択する必要がある。ここで、 α および β はそれぞれ $h_1 \Leftrightarrow h_2$ 間と $h_2 \Leftrightarrow h_3$ 間の位相差を表している。散乱波が無く全アンテナから端末への出発角が全て等しい理想的な場合は、リニアアレーアンテナを用いているため α と β は等しい値になるはずである。本方式では α と β が近い値になるもの仮定し、解の選択は α と β の差を求め、差が一番小さい組み合わせを α と β の真の解とする。また、 R_{13} は送信アンテナ #1 と #3 の間の信号の相関を表している。 R_{13} は求めた $|R_{23}|$ を用いて、 $R_{13} \approx |R_{23}| e^{j(\alpha+\beta)} = Be^{j(\alpha+\beta)}$ (15) と表すことができる。

以上より、推定された相関行列は、

$$R = \begin{pmatrix} A & Ae^{j\alpha} & Be^{j(\alpha+\beta)} \\ Ae^{-j\alpha} & A & Be^{j\beta} \\ Be^{-j(\alpha+\beta)} & Be^{-j\beta} & B \end{pmatrix} \quad (21)$$

となる。以上より相関行列 R を推定することによって、受信信号のチャンネル利得のみから相関行列の位相情報を復元できる。推定した相関行列に MUSIC (Multiple Signal Classification) 法[3]を用いることで受信アンテナの方向推定を行う。

(2)位置推定法

提案法では、推定した複数の DOD 情報に推定誤差の確率分布を与え、DOD 情報に広がりを持たせることで、4 点からの DOD 推定のうち 1 点からの大きな誤差に影響されることなく高精度な位置推定を行う。図 2 に確率分布に

よる位置推定の概念図を示す．図中の n_i は送信アンテナ Tx_i の法線ベクトル， θ_{loc} はアンテナ Tx_i の法線ベクトルに対する点 $S(x, y)$ への方向を表し， θ_{est} は相関行列から求めた送信アンテナ Tx_i の DOD を表す．各送信アンテナ Tx_i の点 S における存在確率 f_i は，正規分布より，

$$f_i(\mathbf{r}_{ST_i}, \theta_{est}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\theta_{loc}(\mathbf{r}_{ST_i}) - \theta_{est})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (22)$$

と定義される．ここで， \mathbf{r}_{ST_i} は送信アンテナ Tx_i から点 $S(x, y)$ への方向ベクトル， σ^2 は分散を表し，分散の値は任意の値を決める必要がある．この確率分布をすべての送信アンテナに適用した確率 $F(\mathbf{r}_{ST_i})$ は

$$F(\mathbf{r}_{ST_i}) = \prod_{i=1}^N f(\mathbf{r}_{ST_i}) \quad (23)$$

と表される．式中の N は送信アレー数を示す．この式を用いて指定範囲内の確率分布を求め，最大となる位置を探索することで位置推定を行う．

(3) 実験条件および実験環境

図 3 に実験環境，図 4 に実験風景を示す．にチャンネル測定条件を示す．本実験は，測定範囲が縦 14 m×横 10 m の屋内環境にて行われた．送信アンテナは実験環境の壁に対して 45°傾けて測定範囲の四隅に配置し，受信アンテナを図 3 中に示す丸印 65 カ所いずれかの測定位置に配置することで，各位置に受信アンテナを配置したときのチャンネルを測定した．本実験では送信アンテナに 3 素子パッチアレーアンテナ，受信アンテナにスリーブアンテナを使用した．アレーアンテナの素子間隔は，パッチアンテナの中心周波数である 2.47125 GHz の 0.5 波長とした．また，本実験の使用周波数帯域は 2.4 GHz 帯で測定し，アンテナ高は 1.0 m とした．

4. 研究成果

本検討による推定法の有効性を確認するため，本提案位置推定法による位置推定精度と，2つの従来位置推定法による位置推定精度の比較を行う．2つの従来位置推定法は，2素子アレーアンテナを用いた DOD 推定法による位置推定法，RSSI 距離換算法による位置推定法とする．図 5 に RSSI を距離情報に換算する方法の概念図を示す．観測した RSSI を円として距離情報に換算し，複数の円の交点を求め，求めた交点を平均することにより位置を推定する．図 6 に各 Tx に対応する RSSI の分布を示す．図 6 では，各アンテナを構成する 3 素子で観測した平均値を表している．RSSI は送信アンテナからの距離と共に減衰するが，減衰の程度は送信アンテナからの方向に依存することがわかる．図 7 に距離に対する受信電力の関係を示す．図 7 は図 3 に示した環境において，各送信アンテナから送信され，受信した電力とその時の距離から算出している．図 7 から距離が遠くなるにつれて受信電力が小さくなる傾向が分かる．推定法としては，推定範囲を事前に設定し，推定範囲内に生じる

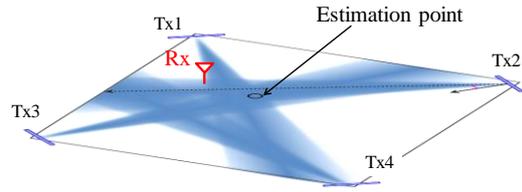


図2. 確率分布概念図

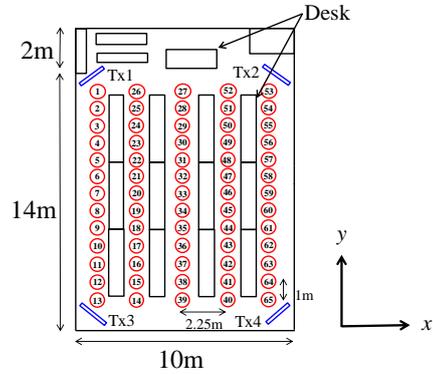


図3. 実験環境

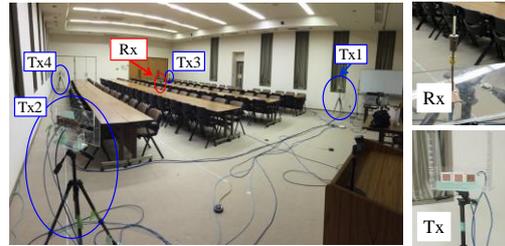


図4. 実験環境 (写真)

表1. チャンネル測定条件

送信アンテナ	3 素子 パッチアレーアンテナ (0.5 波長間隔)
受信アンテナ	スリーブアンテナ
アンテナ高さ (送信/受信)	1.0 m
測定範囲	10 m × 14 m
測定ポイント数	65 ポイント
測定周波数帯	2.4 GHz 帯

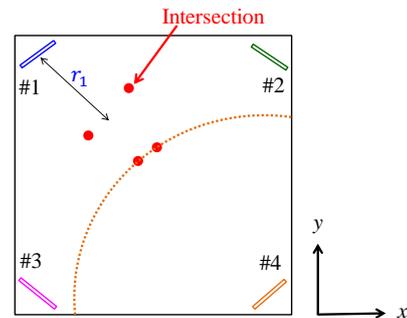


図5. RSSI換算を用いた位置推定法

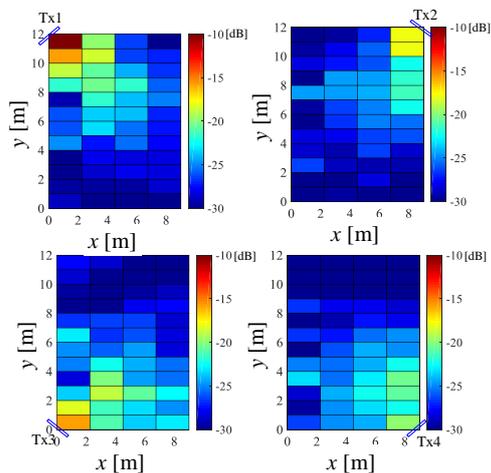


図6.各アンテナのRSSI分布

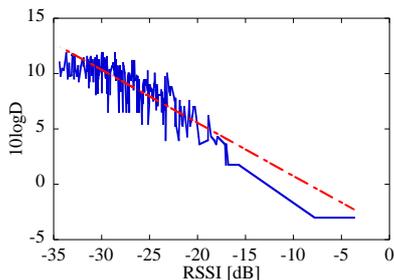


図7.距離に対する受信電力

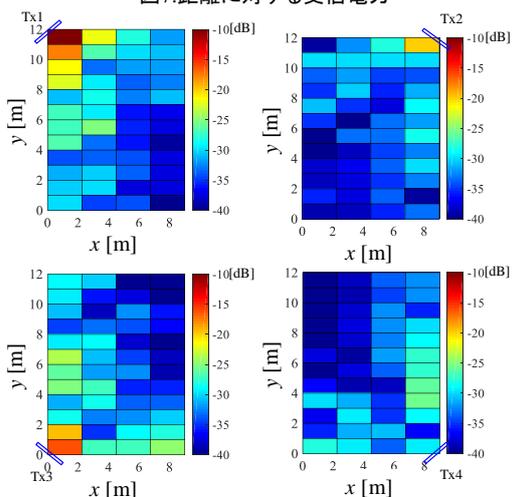


図8.各アンテナのRSSI 分布(180-1 ポートに給電)

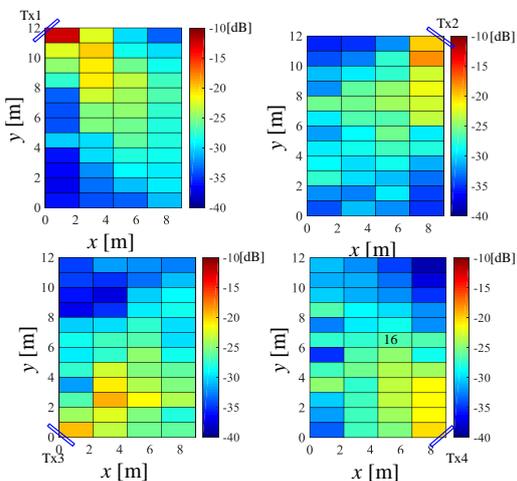


図9.各アンテナのRSSI 分布(180-2 ポートに給電)

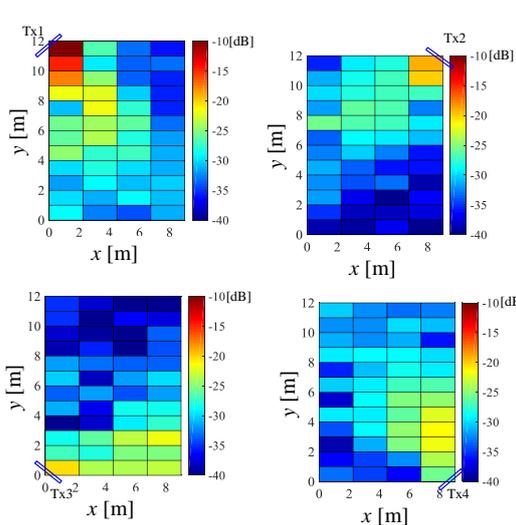


図10.各アンテナのRSSI 分布(90-1 ポートに給電)

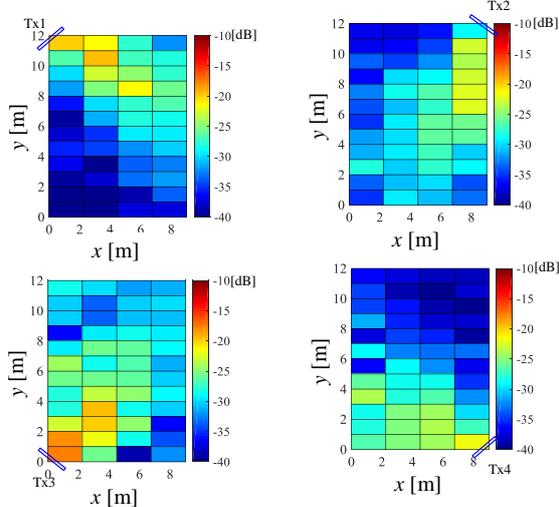


図11.各アンテナのRSSI 分布(90-2 ポートに給電)

交点のみを平均することで位置推定を行う.

図 8~図 11 にハイブリッドが接続された状態における各アンテナで観測された RSSI の分布を示す. 図 8~図 11 に示されている通り, 180 度, 90 度ハイブリッドを経由することにより, 4 つの異なるアンテナ指向性で信号が送信されていることが確認できる. この指向性によって生じる受信電力差により方向推定を行った. 図 12 に角度推定誤差の CDF (Cumulative-Distribution-Function) を示す. 図 12 において, 従来検討である 2 素子アレーアンテナを用いて DOD 推定する従来法 (Conventional DOD) と 3 素子アレーアンテナを用いた提案法 (Proposed DOD) の比較を行った. なお, 方向推定には MUSIC 法を用いた. 本実験における角度推定誤差の中央値を比較すると, 提案法が 3.9°, 従来法が 5.6° となっていることが確認できる. この結果から, 2 素子を用いる従来方法に比べ 1.7° 改善し, 方向推定精度が向上したことが確認できる.

図 13 に位置推定誤差の CDF を示す. 図 13 において, 提案法と従来検討である 2 素子アレーアンテナを用いた位置推定法の比較に加え, RSSI 距離感算法 (RSSI-ranging) による位置推定法との比較を行った. この結果から, 本実

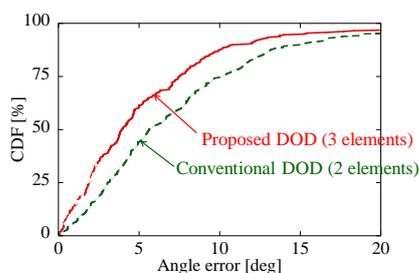


図12 角度推定精度評価CDF

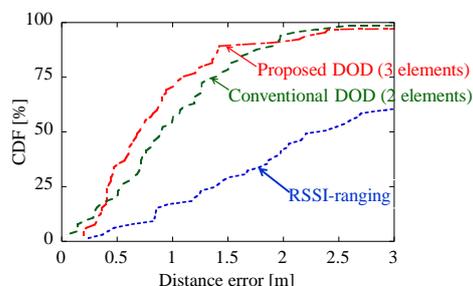


図13. 位置推定精度評価CDF

験で測定した RSSI 情報では、RSSI 換算法による位置推定を行うことが困難であることが確認できる。これは、RSSI 距離換算法がアンテナからの距離に応じて RSSI が減衰することを前提に位置推定を行うが、図 6 に示すとおり、距離に対応した RSSI の減衰が得られない場所が複数存在し、正確な距離の換算を行うことができないためである。次に、3 素子アレーアンテナを用いた方法(Proposed DOD)と、2 素子アレーアンテナを用いた方法(Conventional DOD)を比較する。本実験における位置推定誤差の中央値を比較すると、提案法である 3 素子アレーアンテナを用いた位置推定法が 0.7 m、従来法である 2 素子アレーアンテナを用いた位置推定法が 0.9 m となり、提案法は従来法に比べ位置推定誤差を 0.2 m 改善することが確認できる。以上の結果より、3 素子アレーアンテナを用いて位置推定を行う提案法が、最も高精度に位置推定可能であることが分かった。

<引用文献>

- [1] 田澤遼太, 本間尚樹, 三浦 淳, 南澤博仁, “3 素子アレーを用いた実ビーコン RSSI による DOD 推定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-143, Sept. 2016.
- [2] R. Tazawa, N. Honma, A. Miura, and H. Minamizawa, “RSSI-Based Localization Using Wireless Beacon with Three-Element Array,” IEICE Trans. Commun., Vol. E101-B No. 2, pp. 400-408, Feb. 2018.
- [3] 菊間信良, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版社, 1998.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件, 査読有)

- ① R. Tazawa, N. Honma, A. Miura, and H. Minamizawa, “RSSI-Based Localization Using Wireless Beacon with Three-Element Array,” IEICE Trans. Commun., Vol. E101-B No. 2, pp. 400-408, Feb. 2018.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 菊地幸汰, 田澤遼太, 本間尚樹, 菅原雄介, 三浦淳, 南澤博仁, “RSSI に基づく DOD と端末センサ情報を用いた屋内位置推定法における局数と位置推定精度の関係,” 信号処理シンポジウム, P-9, 2017 年 11 月
- ② K. Kikuchi, R. Tazawa, N. Honma, A. Miura, and H. Minamizawa, “Feasible Calibration of DOD-Based BLE Beacon for Indoor Localization Application,” 2017 International Symposium on Antennas and Propagation, POS3.21.1229, Oct. 2017
- ③ N. Honma, R. Tazawa, K. Kikuchi, A. Miura, Y. Sugawara, and H. Minamizawa, “Indoor-positioning using RSSI: DOD-based technique versus RSSI-ranging technique,” Eighth International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, WIP171, Sep. 2017
- ④ 菊地幸汰, 本間尚樹, 田澤遼太, 菅原雄介, 南澤博仁, 三浦淳, “RSSI に基づく DOD と端末センサ情報を用いた屋内位置推定法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-127, 2017 年 9 月
- ⑤ 田澤遼太, 本間尚樹, 三浦 淳, 南澤博仁, “3 素子アレーを用いた実ビーコン RSSI による DOD 推定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-143, 2016 年 9 月

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：無線通信装置を用いた位置推定方法、位置推定装置及び携帯通信装置
 発明者：本間尚樹, 三浦 淳, 菅原 雄介, 千葉 隆広, 水野 節郎
 権利者：岩手大学
 種類：特許出願
 番号：特願 2017-163811
 出願年月日：2017 年 8 月 28 日
 国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

本間 尚樹 (HONMA NAOKI)
 岩手大学・工学部・准教授
 研究者番号：7 0 5 0 0 7 1 8