

青写真ベースの無線機器-位置マッチングにおける 精度限界の分析

土井 裕介¹ 米澤 祐紀¹ 坂本 岳文¹

概要: ビルや工場などにおいて、配線コスト削減、システムの柔軟性の向上などを目的として、制御のためのネットワークを無線化したいというニーズがある。照明など、多数の同一種類の機器を設置する場合には、どこに何が設置されたのか、施工図とつきあわせて確認する作業に工数がかかる。本研究では、施工図の情報と、無線機器間での受信信号強度とをつきあわせることで、どこに何が設置されたのかをアンカーノードを用いずに推定する方式 (BluMatch) を提案し、受信信号強度のノイズの標準偏差に対する精度限界について分析する。あわせて、実測データを用い、BluMatch で採用した基準 (不適合度) の妥当性について評価する。

1. はじめに

ビルや工場などの設備機器の無線化を行った場合、しばしば多数の同一機器を設置する。例えば、天井照明、エアコン室内機、人感センサなどがフロアあたり数十から数百個設置される場合がある。一方、センサやスケジュールにもとづく自動制御はエネルギーコストの削減や快適性の向上に有用である [11][9]。

標準的なビル制御システムではしばしばツイストペア線による複数デバイス制御を行う (DALI[1] 等)。有線による機器接続にはコストがかかるため、これを無線化する動きがある。例えば、ZigBee[2] や EnOcean[3] などでは無線化により設置コストを低減できるとしている。

一方、ビル・工場などのような大規模環境での無線による機器制御を実現する際、「どこにどの ID の機器が設置されたか」の判別は難しいという課題がある。本体に記載された MAC アドレス等の判読は手間がかかる上、天井や床下、壁外などのアクセス性の悪い場所に設置された機器について、そもそも本体ラベルなどを見るのが困難な場合がある。一方、同種の機器が多数設置される場合があること、また、施工業者は多品種の機器を同時に設置することなどから、設置時に「この場所にこの ID の機器を置く」「この種類の機器を設置したら確実に MAC アドレスを記録する」などといった個別指示を行うことも、工数の観点から困難である。

我々が提案する BluMatch は、設置済みの設備機器について、機器間の受信電力強度 (RSS) の測定結果から設備機器の位置を発見する手法である。本手法は、一般に設備機器では施工図等から機器種別毎の設置予定位置が確定して

いることを利用して、機器の位置と ID とをマッチングさせる手法であり、本論文では、特に座標ベースの位置推定技術に対比して、配置推定方式と呼ぶ。

以下、本論文では、BluMatch の手法を紹介した上で、その性能の限界を分析する。以下、2 節でノード位置推定に関する既存研究をまとめ、3 節で BluMatch の定式化を行う。簡単なシミュレーションによる分析を 4 節で行う。また、920MHz 帯を利用する IEEE 802.15.4 の無線機を用いた実験結果について 5 節で報告する。

2. 関連研究

無線機器の位置推定に対する研究は多数存在する。特に、センサーの位置推定に限ってもいくつかのサーベイ論文が存在するが、我々の知る限りにおいて、施工図などの位置候補情報を用いた、位置-機器マッチングを行う手法は存在しない。

Wang ら [12] はノードの位置推定に関する入力と目的に基づく分類を行った。彼らの分類によると、推定目的は次の 3 つのカテゴリに分類される: 1) 正確な座標推定, 2) 位置範囲の推定, 3) 存在確率分布の推定である。また, Han ら [7] は, 異なるサーベイを行っている。Han らによると, 位置推定方式は静的なランドマーク (アンカー) を中心に分類できる。我々のアプローチはランドマークを必須としておらず, 代わりに平面図を事前知識として活用する。

位置推定に関する有力なアプローチの一つは、フィンガープリンティング [4] と呼ばれる方法である。このアプローチでは、事前に複数の場所で n 台の基地局による信号強度を測定しておき、これによる n 次元の信号強度空間を構築し、各測定点に測定位置と方向のラベルをつけておく。実際に位置推定を行う場合は、基地局からの信号強度の測

¹ (株) 東芝 研究開発センター

定結果にもとづき、事前に構築した空間における近傍探索を行う。近年、Guan ら [6] により、測定点の数が少なくても精度を保つ確率的アプローチが提案された。

本研究は、問題設定が異なることから、我々のアプローチと既存のアプローチとの比較は行わない。現実には我々は天井面での信号強度を多数測定することはできず、また、場合によっては AP が設置されない場合もありうる。また、座標にもとづく位置推定方式の工事現場における適用、特に壁や足場などが日々変化する環境における正確性の評価などについては、我々の研究範囲外である。

3. BluMatch

1 節で説明した通り、我々のアプローチは平面図の情報にもとづく機器の配置推定である。ここで、機器の設置位置集合 P は平面図から既知であるとする。また、設置される機器集合 N もまた既知であり、設置位置の数と機器の数は等しいとする ($|P| = |N|$)。設置位置 ($p \in P$) と機器 ($n \in N$) との間には未知の対応関係が存在する。この対応関係の候補を仮説 h と呼び、全ての仮説集合を H と置く。

我々の仮定は全ての機器がメッセージの送受信ができ、これにともない RSS(受信信号強度) が計測できる、というものである。メッセージの受信時に、機器はメッセージの送信者のアドレスと共に RSS を記録する。これらを集めた、全ての機器間の RSS の対応表を R とし、 $r_{ij} \in R$ は機器 n_i から n_j までの通信における n_j での RSS を示す。

ここで、我々の課題は、 P, N, R が与えられた場合において、 H の中から正解に対応する仮説 h を発見することである。

よく知られるように、屋内環境におけるシャドウイングの効果は対数正規分布に従う [5]。従って、機器 n_i と n_j との間の RSS の分布は

$$r_{ij} \sim \mathcal{N}(\bar{r}_{ij}, \sigma_{[dB]}^2) \quad (1)$$

$$\bar{r}_{ij} = R_0 - 10\eta \log_{10} d_{ij}$$

に従う。ここで、 η は伝搬損失係数であり、 $\mathcal{N}(a, v)$ は、平均が a で分散が v の正規分布である。 R_0 は単位距離で受信した時の RSS である。

機器設置位置候補 P は事前に判明していることから、位置 p_k と p_l との間の距離 d_{kl} を求めることができる。仮説 h は、機器 n_i と n_j がそれぞれ p_k と p_l に存在すると仮定するので、仮説上の機器間距離 $\hat{d}_{ij} = d_{kl}$ も同様に求まる。RSS(r_{ij}) は実測可能であることから、 \hat{d}_{ij} と r_{ij} とを比較することで、計測された信号強度 R と位置候補 P のもとで、ある仮説 h がどの程度もっともらしいかを知ることができる。現実には、フェージング、シャドウイングおよびマルチパスにより信号強度と距離との関係は単純ではなく、計測された R は誤差を含むものとなる。

ここで、仮説 h がどの程度もっともらしいかを指標化する

ことを考える。本研究で提案する、仮説 h の不適合度 $c(h)$ は以下のように定義される：

$$c(h) = \sum c_1(h, o, i, j) \text{ under } h \\ \text{for } o, i, j \in N (o \neq i, o \neq j, i \neq j) \quad (2)$$

ただし c_1 は

$$c_1(o, i, j, h) = |y - x| \\ x = 10\eta \log_{10} \frac{\hat{d}_{oi}}{\hat{d}_{oj}} \text{ under } h \quad (3)$$

$$y = r_{oj} - r_{oi} \quad (4)$$

である。

ここで、個別の不適合度 $c_1(h)$ の定義は以下のような考えによる。一般に、近い機器からのメッセージほど強い信号となる。従って、中心 (origin) となる機器 n_o を一つ決め、任意の 2 つのターゲット機器 n_i と n_j において、 n_i が n_j より近ければ n_i からの信号は n_j からの信号よりも強い場合が多い。従って、もし $\hat{d}_{oi} > \hat{d}_{oj}$ であれば、 $r_{oj} > r_{oi}$ であることが自然である。

距離と RSS の組の不適合度を個別に定量化するために、以上に示した形で距離と信号強度の比較を x と y の形で定義した。RSS がデシベルで比較されることから、これにあわせて式 3 の距離もデシベルで比較した。以上の定義から、理想的な環境では $y = x$ となり、 (o, i, j) の組み合わせから得られる個別の点 (x, y) の、直線 $y = x$ からの距離が、この組み合わせの不適合度の尺度となる。従って、機器全て of の組み合わせの不適合度を合算したものを、仮説 h の不適合度 $c(h)$ とする。図 1 に、正解例とランダムな仮説のそれぞれに対する (x, y) の分布を示す。

4. 不適合度に関するケーススタディ

本節では、本研究で提案する不適合度 $c(h)$ のいくつかの側面について述べる。

以下の分析のための準備として、確率密度 $p(x)$ における値 x の絶対値の確率密度分布として、 $A(p(x))$ を定義する。つまり、 $\int_0^x A(p(x))dx = \int_{-x}^x p(x)dx$ であるような関数 $A()$ である。より具体的には、 $A(\mathcal{N}(\mu, \sigma))$ は、 $g(x)$ を $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ に対応するガウス関数として、確率密度関数

$$a(x) = \begin{cases} g(x) + g(-x) & (\text{if } x \geq 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

により与えられる。この関数の一例を図 2 に示す。

4.1 正解における不適合度

もし、仮説 h_t が正解である場合、 $c(h_t)$ の期待値は最小となる。この場合、式 3 における仮説上の距離 \hat{d} は真の距離 d と等しくなる。式 1 および 4 より、

$$y \sim \mathcal{N}\left(10\eta \log_{10} \frac{d_{oi}}{d_{oj}}, 2\sigma_{[dB]}^2\right)$$

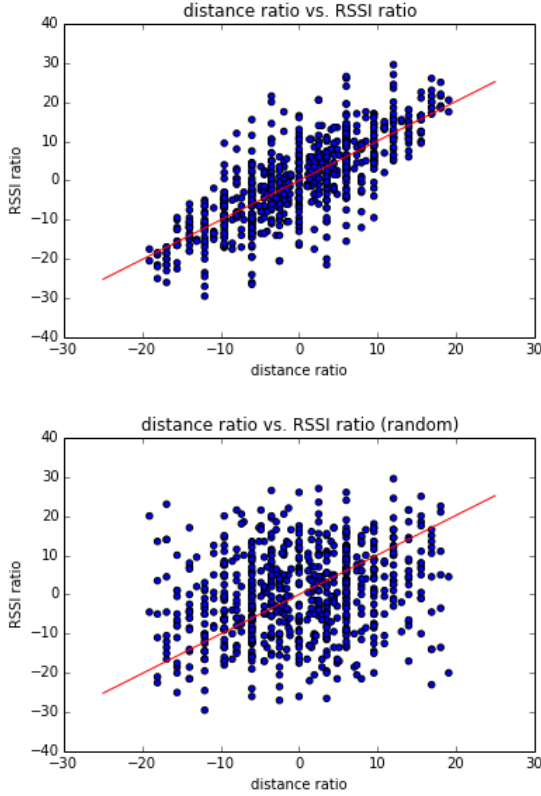


図 1 正解例 (上) とランダム仮説 (下) の個別不適合度を構成する (x, y) の 2 次元散布図. x 軸が距離の比であり, y 軸が受信信号強度の比を示す. 対角の赤い直線は理想的な関係を示す $y = x$ の直線である.

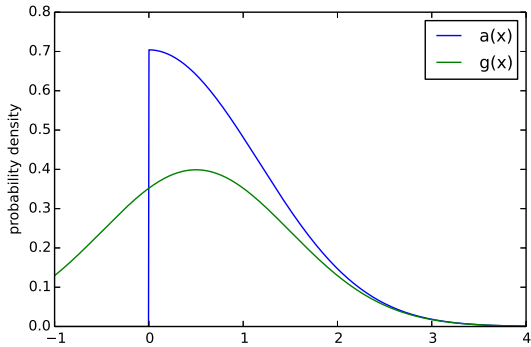


図 2 確率密度分布 $a(x)$ とガウス分布 $g(x)$ の例 ($\mu = 0.5, \sigma = 1$ の場合)

となる.

従って, 正解仮説 h_t における個別の不適合度は,

$$c_1(h_t, o, i, j) = |y - 10\eta \log_{10} \frac{d_{oi}}{d_{oj}}| \sim A(\mathcal{N}(0, 2\sigma_{[dB]}^2))$$

であり, 系全体の不適合度 $c(h_t)$ は

$$c(h_t) \sim A(\mathcal{N}(0, 2p\sigma_{[dB]}^2)) \quad (5)$$

となる. ただし, p は系全体における (o, i, j) の三つ組の数

である.

したがって, 正解に対する不適合度は, $\mu = 0$ となることから, ガウシアンノイズのみが残る形となり, 最小であると言える.

4.2 単純な不正解に対する分析

例として, $N = n_1, n_2, n_3$ および $P = p_a, p_b, p_c$ であり, n_1 が p_a , n_2 が p_b , n_3 が p_c に存在するシステムを考える. 以下, \hat{d}_{nm} において, アラビア数字での添字 n, m は仮説にもとづく機器間の距離を意味し, d_{ab} においてアルファベットの添字 a, b は位置候補間の実際の距離を示す.

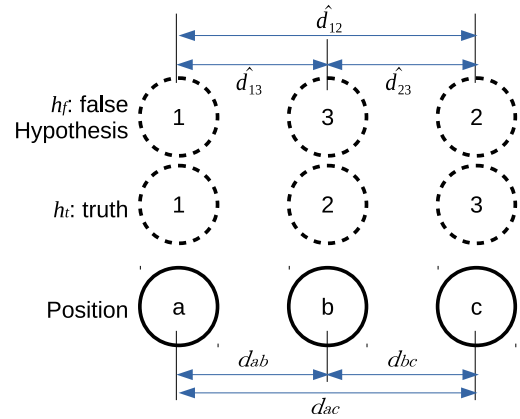


図 3 例示システムと誤った仮説 h_f

本節では, 誤った仮説 h_f として, 図 3 に示すように, n_1 が p_a , n_2 が p_c , n_3 が p_b に存在する環境を考える. ここでは, $\hat{d}_{12} = d_{ac}$ かつ $\hat{d}_{13} = d_{ab}$ である. 従って, 個別の不適合度 n_i, n_j, n_k に対する個別不適合度 $c_1(h_f, i, j, k)$ は

$$c_1(h_f, 1, 2, 3) = |(r_{13} - r_{12}) - 10\eta \log_{10} \frac{\hat{d}_{12}}{\hat{d}_{13}}| \sim A(\mathcal{N}(20\eta \log_{10} \frac{d_{ab}}{d_{ac}}, 2\sigma_{[dB]}^2))$$

$$c_1(h_f, 2, 1, 3) = |(r_{23} - r_{21}) - 10\eta \log_{10} \frac{\hat{d}_{21}}{\hat{d}_{23}}| \sim A(\mathcal{N}(10\eta \log_{10} \frac{d_{ab}}{d_{ac}}, 2\sigma_{[dB]}^2))$$

$$c_1(h_f, 3, 1, 2) = |(r_{32} - r_{31}) - 10\eta \log_{10} \frac{\hat{d}_{31}}{\hat{d}_{32}}| \sim A(\mathcal{N}(10\eta \log_{10} \frac{d_{ac}}{d_{ab}}, 2\sigma_{[dB]}^2))$$

となる. ここで, $c_1(h, i, j, k) = c_1(h, i, k, j)$ であることから, n_1, n_2, n_3 から 6 通りの i, j, k の組み合わせを合計した不適合度 $c(h_f)$ は,

$$c(h_f) = 2(c_1(h_f, 1, 2, 3) + c_1(h_f, 2, 1, 3) + c_1(h_f, 3, 1, 2)) \sim A(\mathcal{N}(40\eta \log_{10} \frac{d_{ab}}{d_{ac}}, 12\sigma_{[dB]}^2))$$

となる。

式 5 から、正解仮説 h_t に対する不適合度は

$$c(h_t) \sim A(\mathcal{N}(0, 12\sigma_{[dB]}^2))$$

となる。

$Pr(c(h_t) < c(h_f))$ は、 h_t と h_f のそれぞれの不適合度を比較した際、正解がより適切であると判断できる確率であり、本指標の性能を意味する。具体的には、 h_t と h_f それぞれに対応する不適合度の確率密度分布を $p(c_t), p(c_f)$ としたとき

$$Pr(c(h_t) < c(h_f)) = \int_0^\infty \int_{c_t}^\infty p(c_t) \cdot p(c_f) dc_f dc_t$$

で表すことができる。

図 4 は、以上の条件を直線上の対称となる環境 ($d_{ab} = d_{bc}, d_{ac} = d_{ab} + d_{bc}$) においてシミュレーションにより数値的に求めた結果を示している。明らかに、本指標の性能は RSS の標準偏差の強い影響を受ける。Seidel ら [10] の測定によると、おおよそ RSS の標準偏差 σ は 5dB から 12dB 程度であるとされる。 σ が 5dB を下回る際、本環境においてはほぼ全ての時点で $c(h_t) < c(h_f)$ となり、正解を導き出せる。もし σ が 12dB 程度の場合、推定試行のうち 7 割が正解を導き出す。なお、経験上、天井面固定設置の場合、RSS の時間変動はあるが、必ずしもシャドウイング成分に対する変動ではなく、多数回測定しても完全な独立試行とならない (偏った状態で固定される) 点に注意が必要である。

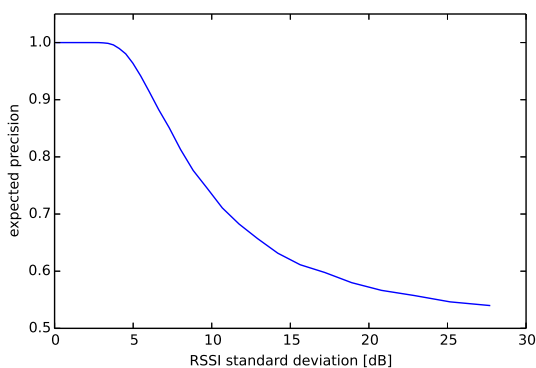


図 4 装置 3 つのシステムにおける RSS の誤差 σ に対する BluMatch の性能

5. 実験室環境における評価

BluMatch の評価のため、簡単な評価環境を実装の上、RSS を収集し、式 2 で定義した指標を算出した。本プロトタイプは提案方式の評価のためであり、プロトタイプ本体においては配置推定を実施しない。

5.1 評価実験

5.1.1 RSS 収集機

図 5 に我々が試作した RSS 収集機の概観を示す。収集機は、Raspberry-pi 2 をホストおよび RSS ログストレージとして用い、USB ポートに TESSERA 社製 RL7023 Stick-L(以後 RL7023) および市販の USB WiFi アダプタを付けたものである。WiFi アダプタは実験制御のための通信、つまり RSS データ収集開始/停止、および 920MHz 通信のパラメータ制御に用いるものである。本プロトタイプでは、RL7023 が設備機器に対応する。RL7023 は、Renesas 社製 RL78/G13 マイコンと、920MHz 帯無線機として Analog Devices 社製 ADF7023-J を持ち、電源供給さえあれば単独で無線機として動作する。本プロトタイプではマイコンに Trickle アルゴリズム [8] による状態共有のプロトコルを動作させ、全ての受信メッセージを USB 経由でホストに通知する。

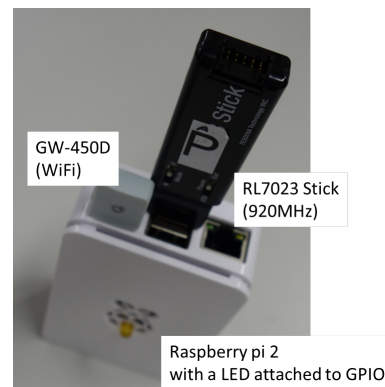


図 5 RSS 収集機

なお、各ノード対の RSS 測定値として、一連の測定の中の値を選択するか、というのは測定データの収集方法に関わる課題となりうる。本論文では単純に電力の平均値を利用したが、経験的には最大値であっても同等に良い結果を得られることがわかっている。また、伝搬損失係数 η については、我々の評価では $\eta = 2$ と仮定した場合であっても、 $\eta = 4$ と仮定した場合であっても同等の結果となっている。もし環境の伝搬損失係数が得られなかった場合は、既存の測定値 [10] を近似値として用いることで推定が可能である。

5.2 実測に基づく評価

5.2.1 レイアウト

本論文では、図 6 に示す直線レイアウトに関する結果を紹介する。この環境は単純な LOS(line-of-sight) 環境であり、機器 (RSS 収集機) はテーブルの上に置かれている。壁面は金属のパーティションであり、電波反射で RSS と距離との関係が崩れ、推定が難しくなることが期待できる。本データセットにおいては、各ノードが毎秒 1 パケット

のデータを送出する設定において、20 分間の測定を実施した。

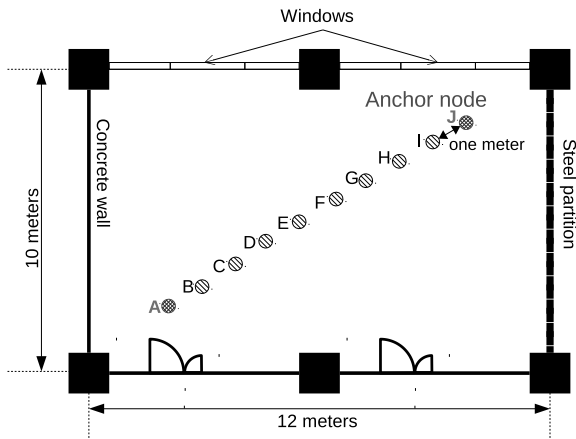


図 6 実験レイアウト: 各機器はテーブル上に設置

5.2.2 実測による評価

評価として、実測した RSS を用いて、正解に対応する仮説 h_t と、機器 X と Y を一組だけ入れ替えた誤った仮説 (不正解仮説) h_{XY} とを用意し、それぞれに対して不適合度を求めた。システムには 10 ノード存在することから、本システムに対しては 45 通りの誤った仮説が考えられる。

図 7 は、正解と誤った仮説との不適合度を示している。各点がそれぞれの仮説の不適合度をあらわし、それぞれの点は不適合度により整列されている。表 1 は、上位 5 つのもっともらしい誤った仮説と、正解の仮説 h_t とのそれぞれに対する不適合度を示している。

本実験において、 h_{IJ} は h_t よりも不適合度が低いが、第二位に正解が含まれ、不適合度 5% の範囲においてもう一つの仮説のみが存在することがわかる。

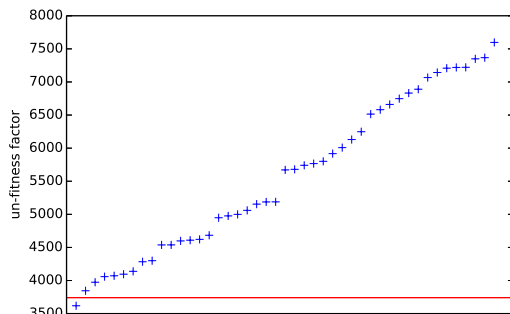


図 7 正解と不正解仮説に対する不適合度: 各点は h_{XY} のそれぞれの組み合わせを示し、水平の直線は正解 h_t に対する不適合度を示す

表 1 正解 h_t と、不正解仮説のうち不適合度が低かった (良かった) もの上位 5 つ。 h_{XY} は機器 X と機器 Y を入れ替えた仮説を示す。

	$c()$	difference from h_t
h_{IJ}	3618.3	-3.28 %
h_t	3740.9	0
h_{HJ}	3844.7	2.77 %
h_{CD}	3974.6	6.25 %
h_{HI}	4058.4	8.49 %
h_{FG}	4071.2	8.83 %

6. おわりに

本論文では、無線設備機器の配置推定問題において、機器位置のマッチング問題を解くための指標として、BluMatch を提案した。無線設備機器の配置推定問題は、商業ビルにおいて多数の機器が天井面に設置され、フィンガープリントなどといった既知の手法を用いた位置推定が困難である場合有用であると考えている。本論文では、機器と位置のマッチング問題を解くために、受信信号強度と仮説上の距離との関係から、ある仮説と別の仮説とのもっともらしさを比較するための指標 (不適合度) を提案した。不適合度は、図面から得られる機器の設置候補位置と、計測した RSS の値によって決まり、既設の基準位置ノードなどは必要としない。分析を通じて、 p をシステム内の機器の三つ組の組み合わせの数、 σ を経路シャドウイングによる RSS の誤差を対数正規分布によりモデル化した際の標準偏差としたとき、正解における不適合度の期待値は $A(\mathcal{N}(0, 2p\sigma))$ として表すことができ、分布の平均が 0 になることから最小であることが期待できることを示した。また、簡単な測定実験により我々の方式が正解の配置に対して十分に良い指標を示すことを確認した。

今後、実際の商業施設における適用や、別途報告する [13] 解の推定エンジンの改善など、実用性向上のための取り組みを通じた実用化と、機器の電波放射の指向性などを用いた推定精度の改善に取り組む。

参考文献

- [1] Digital addressable lighting interface. IEC Standard 62386, 2014.
- [2] ZigBee light link standard version 1.0. ZigBee Alliance Technical Specification, 2012.
- [3] EnOcean equipment profiles version 2.6.4. EnOcean Alliance Technical Specification, 2015.
- [4] Paramvir Bahl and Venkata N Padmanabhan. Radar: An in-building rf-based user location and tracking system. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, Vol. 2, pp. 775-784. Ieee, 2000.
- [5] Alan J Coulson, Allan G Williamson, and Rodney G Vaughan. A statistical basis for lognormal shadowing effects in multipath fading channels. *Communications*,

- IEEE Transactions on*, Vol. 46, No. 4, pp. 494–502, 1998.
- [6] Tong Guan, Wen Dong, Dimitrios Koutsonikolas, Geoffrey Challen, and Chunming Qiao. Robust, cost-effective and scalable localization in large indoor areas. In *In Proceedings of Globecom 2015, IEEE Global Communication Conference*. IEEE, 2015.
 - [7] Guangjie Han, Huihui Xu, Trung Q Duong, Jinfang Jiang, and Takahiro Hara. Localization algorithms of wireless sensor networks: a survey. *Telecommunication Systems*, Vol. 52, No. 4, pp. 2419–2436, 2013.
 - [8] Philip Levis, Neil Patel, David Culler, and Scott Shenker. Trickle: A self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st Conference on Symposium on Networked Systems Design and Implementation - Volume 1*, NSDI'04, pp. 2–2, Berkeley, CA, USA, 2004. USENIX Association.
 - [9] M. Magno, T. Polonelli, L. Benini, and E. Popovici. A Low Cost, Highly Scalable Wireless Sensor Network Solution to Achieve Smart LED Light Control for Green Buildings. *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 15, No. 5, pp. 2963–2973, May 2015.
 - [10] Scott Y Seidel and Theodore S Rappaport. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Vol. 40, No. 2, pp. 207–217, 1992.
 - [11] Duong Tran and Yen Kheng Tan. Sensorless Illumination Control of a Networked LED-Lighting System Using Feedforward Neural Network. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 61, No. 4, pp. 2113–2121, April 2014.
 - [12] Jing Wang, Ratan K Ghosh, and Sajal K Das. A survey on sensor localization. *Journal of Control Theory and Applications*, Vol. 8, No. 1, pp. 2–11, 2010.
 - [13] 米澤祐紀, 坂本岳文, 土井裕介. Blumatch: アンカーノードを用いない無線設備機器の自己配置推定. DICOMO2016 予稿集 (to appear). 情報処理学会, 2016.