

# 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

米澤 祐紀<sup>1</sup> 坂本 岳文<sup>1</sup> 土井 裕介<sup>1</sup>

概要：設備機器の分野において、機器の制御に用いる制御線自体のコストダウンを狙った制御の無線化が進んでいる。無線を用いた機器の個別制御のため、設置位置と機器との紐づけが必要となる。従来、設置位置と機器とを紐づけるために目視による確認が行われてきたが、この手段は、設置台数に比例してコストが増加する。これに対して我々は、設置位置と機器 ID とを紐づける技術として BluMatch を提案する。本論文では BluMatch の実現方法と一次元レイアウト・二次元レイアウトで動作させた推定結果を示す。

## 1. はじめに

大規模な商業施設やビルでは、同型機を大量に設置する。設備機器では、制御線のコスト削減のため制御線の無線化が進んでいる。無線による機器制御には、設置位置と機器とを紐づけが必要である。

従来、設置位置と機器との紐づけには目視での確認が行われてきた。この手段は、設備機器の台数に比例してコストが増加する。これを解決する手段として、計画時に機器 ID を指定することや設置時に機器 ID を控えるといった方法が考えられる。しかし同型機を大量に設置する設備機器において、誤りなく指定された機器 ID を設置することはコスト増加に繋がる。また設備機器は運用までに、設置計画、施工、初期設定というフェーズが存在し、それぞれで異なる企業が実施する。そのため密な情報連携にはコストを要する。

これに対し我々は、設置位置と機器 ID とを紐づける技術として BluMatch を提案する。BluMatch は設計図面から得られる機器の設置位置と機器間の受信電力とから、設置位置と機器 ID とを紐づける。ここでは、設計に基づいて設置した機器の設置位置と機器 ID との紐づけを配置推定と呼ぶ。

本論文の構成は、2 節に位置推定及び設備機器制御に関する既存研究を示す。そして 3 節に我々が提案する BluMatch の定式化を行う。そして 4 節に BluMatch の実現方法を示す。最後に 5 節にて、無線機を一次元・二次元レイアウトに設置した場合の測定結果に対する配置推定の結果を報告する。

## 2. 関連研究

ここでは BluMatch が利用する RSSI や設計図面を利用した位置推定技術と BluMatch が対象とする設備機器の制御システムを示す。

Honkavirta ら [1] は、FingerPrinting 方式の調査と各手法との評価を行っている。FingerPrinting 方式は、位置推定前の伝搬マップの作成と位置推定の二つのフェーズで構成する。伝搬マップの作成では、まずフロアを任意のセルに分割する。そして各セルに無線機を一時的に設置し、無線機と複数のアンカーノード間の RSSI を蓄積する。位置推定では、事前に作成した伝搬マップと推定対象の無線機とアンカーノード間との RSSI とのマッチングを行う。マッチングの手段には複数存在し、例えば Bahl ら [2] は、伝搬マップと推定対象の無線機とアンカーノード間の RSSI とからユークリッド距離を求めて位置を推定する。また Roos ら [3] は、事前の測定結果からカーネル密度関数を作成し、位置推定を確率で推定する手法を提案している。以上に述べたように、FingerPrinting 方式は事前の伝搬マップの作成を必要とする手法である。そのため、伝搬マップが用意できない作業困難な場所に設置した機器への適用は困難である。

我々が提案する BluMatch は、設計図面から得られる設置位置候補を利用する。設計図面を利用することにより、位置推定精度を高められる。例えば吉見ら [4] は、加速度や角速度センサなどを利用する位置推定手法である PDR(Pedestrian Dead Reckoning) に、建築構造情報を用いた補正の手法を提案している。PDR は位置推定の対象が動くことを想定しているが、我々が対象としている機器

<sup>1</sup> (社)東芝 研究開発センター  
Corporate R&D Center, TOSHIBA CORPORATION

は設備機器であるため動かない。よって我々のユースケースでは利用できない。

我々は機器制御に設置位置と機器 ID との紐づけを前提としている。一方で鈴木ら [5] は、その前提を必要としない照明システムを提案している。照明と照度センサで構成するこのシステムでは、照明の状態と照度センサから送られる照度データを元に影響度を学習することにより、設置位置と機器 ID との紐づけを不要にする。一方でこのシステムは全ての機器を用いて動作の最適化を行うため、我々が対象としている個別の機器制御には利用できない。

### 3. BluMatch について

ここでは、我々が提案している BluMatch の動作概要、配置推定に用いる不適合度の計算方法について示す。

#### 3.1 概要

BluMatch の動作概要を図 1 に示す。図に示すように、まず入力する設置位置から仮説を立てる。仮説とは、設置位置と機器 ID との仮の紐づけである。次に仮説と実際に測定した伝搬情報 (RSSI を利用) とを比較し、仮説と現実との不適合度を求める。不適合度とは、3 つの無線機における距離の比と RSSI の比とから求める。そして仮説の中で最も不適合度の小さい組合せを、推定結果とする。

#### 3.2 不適合度の計算方法

ここでは BluMatch の前提条件について述べ、その後で不適合度の計算方法を示す。

BluMatch は次の二つを前提条件とする。一つ目は、無線機間の設置位置候補 ( $P$ ) と無線機の数 ( $N$ ) との一致である ( $|P| = |N|$ )。ここでは無線機の位置候補を  $p \in P$ 、無線機を  $n \in N$  とする。全ての考えられる  $P$  と  $N$  との組合せの集合を  $H$  とし、 $h \in H$  とする。

二つ目は、全ての無線機間でメッセージ交換と蓄積である。無線機はメッセージ受信したら、メッセージの送信元の無線 ID とメッセージ受信時の RSSI とを蓄積する。全ての組合せに対する RSSI を測定し、二次元の RSSI の行列  $R$  を作成する。ここで  $r_{ij} \in R$  は、無線機  $n_i$  から  $n_j$  に対する RSSI の測定値を表す。配置推定は、以上に挙げた  $H$ ,  $P$ ,  $N$ ,  $R$  から、正解の仮説  $h$  を見つける。

我々は、正解の仮説  $h$  を見つけるために、不適合度を用いる。不適合度とは、ある仮説  $h$  における仮説距離と測定値とで求める。距離は  $P$  から把握でき、例えば距離  $d_{kl}$  は設置位置  $p_k$  と  $p_l$  間の距離を表す。よってある仮説  $h$  において、設置位置  $p_k$  と  $p_l$  とに設置した無線機  $n_i$  と  $n_j$  の仮説距離  $\hat{d}_{ij}$  の予想値は  $d_{kl}$  とする ( $\hat{d}_{ij} = d_{kl}$ )。

次に  $R$  が、仮説  $h$  によってもたらされたとして、 $\hat{d}_{ij}$  と  $r_{ij}$  とを比較する。一般的に、RSSI は距離に応じて減衰することが知られており、自由空間であれば二乗減衰である。

しかし実際には、マルチパスフェージングやシャドイングの影響により誤差が生じる。我々はこの影響を少なくするために、 $R$  を  $|N| \times (|N| - 1)$  という多くの点で測定する。比較には、二つの無線機のペアを用いて、以下の通りに計算を行う。不適合度  $c(h)$  は、ある仮説  $h$  上で、次のように定義する。

$$c(h) = \sum c_1(h, o, i, j) \text{ under } h \quad (1)$$

for  $o, i, j \in N (o \neq i, o \neq j, i \neq j)$

ただし  $c_1$  は、

$$c_1(o, i, j, h) = |y - x| \quad (2)$$

$$x = 10\eta \log_{10} \frac{\hat{d}_{oi}}{\hat{d}_{oj}} \text{ under } h$$

$$y = r_{oj} - r_{oi}$$

ここで示した  $c_1(h)$  は、仮説  $h$  における 3 台の無線機  $o, i, j$  のから得られる仮説上の距離の比と測定された RSSI の比との差である。

一般に無線機間の距離が短いほど、強い RSSI が得られる。例えば無線機  $n_o$  と  $n_i$  と  $n_j$  が存在するとき、もし  $n_i$  が  $n_j$  よりも  $n_o$  に近い距離に位置する場合、 $n_i$  の RSSI のほうが  $n_j$  よりも大きくなる。つまり、仮説距離は  $\hat{d}_{oi} < \hat{d}_{oj}$  となり、RSSI は  $r_{oi} > r_{oj}$  の関係になる。

ここで  $x$  と  $y$  とは、物理的な距離と RSSI の差を比較可能な要素として定義した。  $x$  は距離の比を表しており、 $y$  は RSSI の比を示している。  $y$  の単位は dB であるため、これと比較ができるよう  $x$  についても dB で表現した。理想的な環境において、我々は  $y = x$  が成り立つことを想定している。

## 4. 実装

ここでは BluMatch を実現するために、RSSI の収集機構と配置推定処理の二つの実装について述べる。RSSI 収集機構は、無線機間の RSSI の測定と収集とを行う。配置推定処理は、収集した RSSI と図面情報から配置推定処理を行うための具体的な実装方法について述べる。

### 4.1 RSSI の測定と収集

RSSI の測定と収集に関するシステム構成を図 2 に示す。システムは、RSSI 測定機能 (RSSI Measurements) と RSSI 収集機能 (Data Collection) とで構成する。

RSSI 測定機能で利用する無線機には、920MHz 帯を利用可能な市販品を用いた (表 1)。そして全ての無線機間の RSSI を測定するため、無線機間の通信プロトコルに RFC6206 の Trickle アルゴリズムを用いた [6]。Trickle アルゴリズムは、インターバルの期間とそのインターバル中

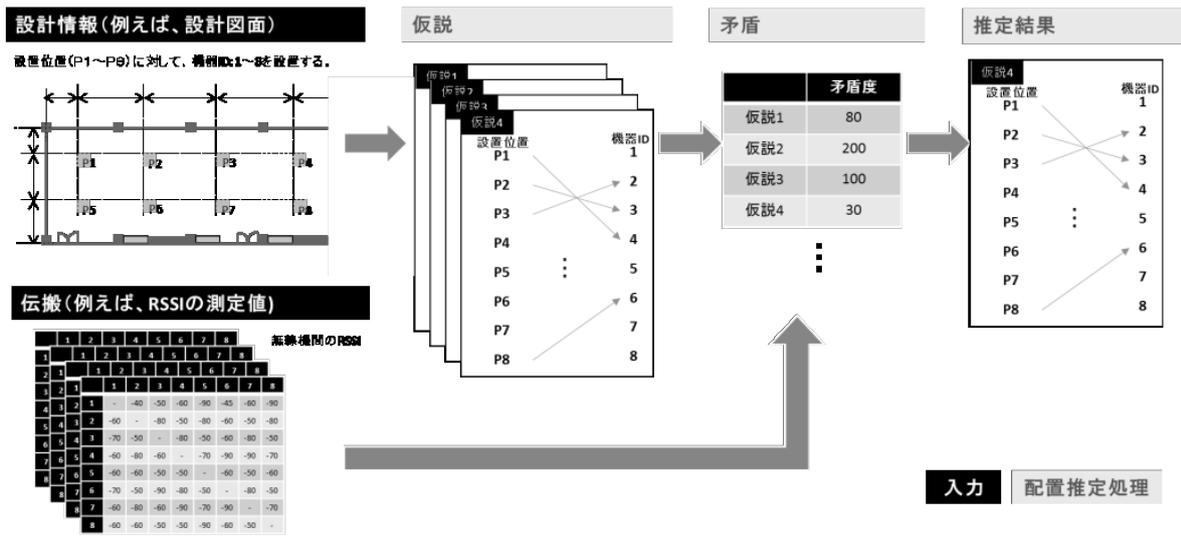


図 1 BluMatch の動作概要図

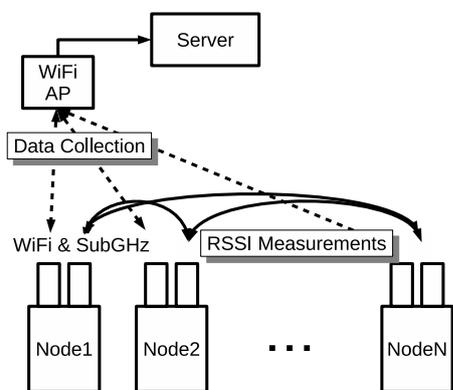


図 2 RSSI の測定と収集に関するシステム構成の概要図

表 1 デモシステムで利用した無線機の情報

無線機	RL7023-Stick L
出力	20mW
チャンネル	55ch

に流れる全体のパケット量を制御できる。

RSSI 収集機能には、Wi-Fi を利用した。これは測定結果を随時サーバに送信するために用意した。一般的な製品ならば、ここで示したように複数の無線機を利用するのではなく、一つの無線機上でこれを実現する必要があると考える。

#### 4.2 遺伝的アルゴリズムへのコード化

BluMatch は、測定した  $R$  と設計図面から得られる設置位置とから、不適合度の最も小さい組合せを算出する。

我々は配置推定の問題を、巡回サラリーマン問題の最適化問題の一つと考えた。巡回サラリーマン問題は、都市の集合と都市間の移動コストとが与えられ、全ての都市を一度回りに回る組合せのうち、移動コストの総数が最も小さい組合せを求める。この問題の解決方法の一つに遺伝的アルゴリズムがある。

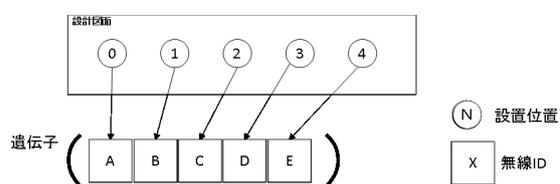


図 3 配置推定問題から遺伝的アルゴリズムへのコード化

巡回サラリーマン問題を遺伝的アルゴリズムで解く場合、都市をリストで持つ順列コーディングを遺伝子として管理する。順列コーディングは、都市の順番に意味を持ち、都市の順番を並べ変える。巡回サラリーマン問題では、この順列を都市を訪問する順番とし、移動コストを計算する。

これに対して配置推定の問題では、無線 ID または設置位置をリストで持つ順列コーディングとなる。ここでは無線 ID をリストで持つ順列コーディングを考える。具体例を図 3 に示す。図中では設置位置 0 から 4 に対して、無線 ID の A から D を設置した遺伝子を示している。つまり設置位置 0 から 4 が遺伝子の順列に対応し、値が無線 ID となる。そして配置推定問題では、この順列と測定した RSSI とから不適合度を求め、不適合度が最小となる順列を探索する。

遺伝的アルゴリズムは探索に、母集団の作成、親の選択、親同士の交叉、子の突然変異を繰り返す。探索能力を向上させるために、各ステップに対して様々な手法やパラメータの設定が提案されている。我々は、以下の手法に従った遺伝的アルゴリズムを試作した。

母集団の作成では、母集団の数と生成方法が問題となる。その中でも数は、計算量に影響する要素であるため特に重要である。これについては Gotshall ら [7] が検討した遺伝的アルゴリズムの最適な母集団で経験的に導かれた式に従った。生成方法は、ランダムな生成を行う手法をとつ

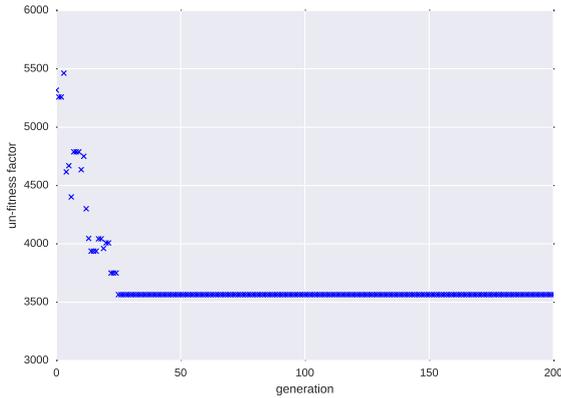


図 4 遺伝的アルゴリズムによる不適合度の収束の様子

た。選択手法については、Rezali ら [8] によって検討されていた巡回サラリーマン問題における最適な選択手法である Tournament アルゴリズムを利用した。交叉については、巡回サラリーマン問題に Partially Matched アルゴリズムを利用した。Partially Matched アルゴリズムは両親となる二つの遺伝子の共通インデックスを 3 つに分ける。3 つのうちの真ん中部分で、遺伝子の組合せテーブルを作成して、その組み換えテーブルに従って子を作成する。最後に突然変異には、ランダムな入れ替えを行うアルゴリズムを利用した。そして交叉の確率と突然変異の確率は、それぞれ 70% と 1% にした [9]。以上に述べた遺伝的アルゴリズムに従い、Python の DEAP[10] を用いて実装した。

次に、無線機 10 台を利用した場合における不適合度の収束の様子を図 4 に示す。図中に示すように、世代を追うごとに不適合度が小さくなり、25 世代から不適合度が収束している。

## 5. 測定・評価

ここでは一次元・二次元レイアウトに無線機を配置した場合の  $R$  を用いた推定結果について述べる。評価に利用した  $R$  は、測定したデータの統計値として最大値、最小値、平均値、最頻値を用いた。これは BluMatch に最も良い統計値が明らかでないためである。

### 5.1 一次元レイアウト

図 5 に一次元レイアウトの無線機の設置位置を示す。設置位置 0 から 9 に対して無線機 A から J を設置した。図中に示すように、設置位置 0 との隣にはコンクリート製の壁が存在し、設置位置 9 の隣には金属製のパーティションが存在する。

測定時間は約 25 分間実施し、無線機間は平均して約 142 回の測定した。ここでの評価では、この測定の範囲における最大値・最小値・平均値・最頻値を利用する。表 2 は最大値の  $R$  である。表 2 からわかるように、マルチパスフェー

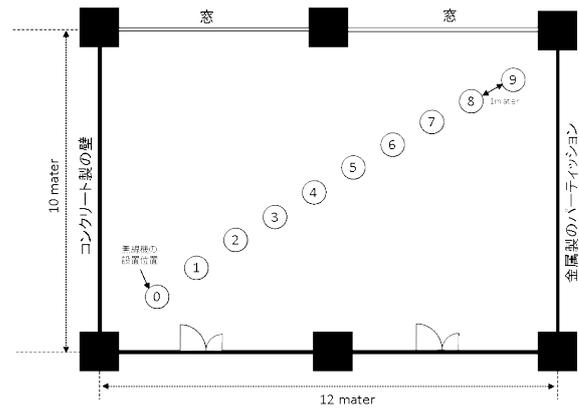


図 5 一次元レイアウトの設置位置

表 2 一次元レイアウトにおける最大値  $R$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	0	-38	-41	-48	-51	-48	-49	-56	-56	-58
B	-37	0	-28	-41	-42	-60	-43	-53	-54	-53
C	-44	-30	0	-33	-51	-42	-39	-61	-46	-63
D	-49	-43	-31	0	-40	-59	-43	-50	-53	-48
E	-49	-42	-47	-38	0	-35	-39	-47	-44	-44
F	-47	-61	-38	-58	-36	0	-33	-45	-53	-50
G	-50	-44	-36	-42	-40	-34	0	-31	-42	-35
H	-58	-55	-60	-51	-50	-47	-33	0	-38	-39
I	-57	-57	-44	-52	-46	-54	-42	-37	0	-33
J	-60	-57	-64	-49	-49	-53	-38	-40	-35	0

ジングの影響により距離に応じた減衰がみられない測定点が存在する。例えば AD 間と AE 間とで、距離が  $d_{ad} > d_{ae}$  にもかかわらず RSSI が  $r_{ad} > r_{ae}$  となっている。

表 3 に、 $R$  を最大値・最小値・平均値・最頻値のそれぞれを用いて推定した結果を示す。表中の推定結果で示した並びが、図 5 の設置位置に対応している。例えば、最大値の推定結果の並びである ABCDEFGHJI は、設置位置 0 に無線機 A、設置位置 1 に無線機 B を設置したことを示している。

ここで最大値・最小値・平均値・最頻値のそれぞれで得られた推定結果の違いについて述べる。表 3 に示すように、最大値・最小値と平均値・最頻値とで並びが逆になっている。これは反転可能なレイアウトであるために生じた結果である。よって、全てで共通して ABCDEFGHJI と推定している。これは実際の設置とは、I と J の位置が異なっている。これは J の隣にある金属製のパーティションの影響と考える。以上のことから、一次元レイアウトにおいては最大値・最小値・平均値・最頻値のいずれの統計値を利用しても推定結果は変わらないことがわかった。

### 5.2 二次元レイアウト

次に、二次元レイアウトでの実験結果を示す。設置位置を図 6 に示す。一次元レイアウトと同様に、設置位置 0 から順番に A から N までの無線機を設置した。利用した空

表 3 一次元レイアウトにおける推定結果と正解の不適合度

	推定 (不適合度)	正解の不適合度
最大値	ABCDEFGHIJ (3565)	3627
最小値	ABCDEFGHIJ (5405)	5445
平均値	IJHGFEDCBA (3886)	3960
最頻値	IJHGFEDCBA (4314)	4401

表 4 二次元レイアウトにおける推定結果と正解の不適合度

	推定結果 (不適合度)	正解の不適合度
最大値	OABCJEFDNIGHMKPL(13878)	15177
最小値	LHDCAOKGJBFPNIEM(23547)	24218
平均値	OBAHJFCDNIEGMLPK(16710)	18008
最頻値	CDHAGFENPBIJMLKO(16868)	17986

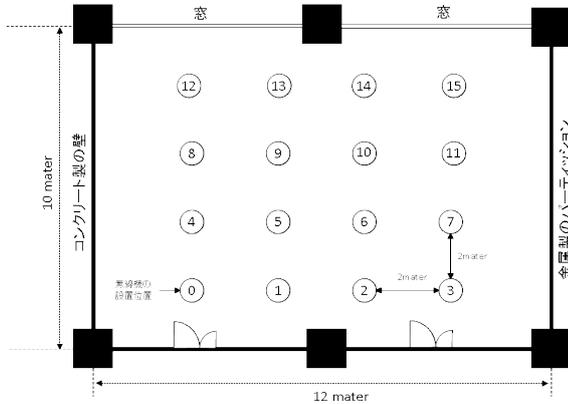


図 6 二次元レイアウトの設置位置

間は一次元レイアウトと同じく、設置位置 3, 7, 11, 15 (無線機は P, D, L, I を設置) の隣には金属製のパーティションが存在する。本実験環境は一次元レイアウトと同様に、マルチパスフェージングの影響があると予想される。

測定時間は約 25 分間行い、無線機間の測定回数は平均して約 130 回である。この測定時間・回数において  $R$  を最大値・最小値・平均値・最頻値のそれぞれの推定結果を表 4 に示す。推定結果に示す並びは設置位置に対応する。例えば最大値の推定結果である O は設置位置 0 に設置したと推定した無線機であり、A は設置位置 1 に設置した無線機であることを示す。表中に示すように、現状のアルゴリズムでは正解を導くことはできていない。レイアウトを回転させた場合を考慮した場合、最も良かったのは平均値であり 16 台中は 3 台である。

次に相対的な位置関係について分析する。ここでは相対的に部分一致している箇所を示す。例えば最大値を利用した推定結果では、設置位置 1 から 3 と 5, 6, 9 は、無線機 A, B, C, E, F, I の相対的な位置関係は正解と一致する。また最頻値では、設置位置 0, 4, 5, 6, 10 には無線機 C, G, F, E, I の相対的な位置関係が正解と一致する。相対的な位置関係で最も連続していたのは最大値の  $R$  で 6 台である。

以上のことから、最大値・最小値・平均値・最頻値のいづれを使ったとしても推定結果の正解数は変わらない。一方、相対的な部分一致に関しては最大値が最も良い結果であることがわかった。しかし実際の利用を考えた場合、必要なのは部分一致ではなく正解との完全一致であるため、今後改善が必要であると考えられる。

## 6. おわりに

本論文では設備機器の設置位置と機器 ID との紐づけを推定する BluMatch に関する動作概要、遺伝的アルゴリズムへのコード化、一次元・二次元レイアウトにおける推定結果を示した。現状のアルゴリズムでは、壁の反射・障害物等の影響を考慮していない。そのため今回の評価環境のように、金属製の壁による影響があると想定されるような環境では推定精度が十分ではないと考えられる。しかしながら相対的な位置関係においては、部分的な正解を導くことができている。今後はこのような壁の反射の影響・障害物等の対応を検討する予定である。

## 参考文献

- [1] Honkavirta, V., Perala, T., Ali-Loytty, S. and Piche, R.: A comparative survey of WLAN location fingerprinting methods, *Positioning, Navigation and Communication, 2009. WPNC 2009. 6th Workshop on*, pp. 243–251 (online), DOI: 10.1109/WPNC.2009.4907834 (2009).
- [2] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system, *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, Vol. 2, pp. 775–784 vol.2 (online), DOI: 10.1109/INFCOM.2000.832252 (2000).
- [3] Roos, T., Myllymaki, P., Tirri, H., Misikangas, P. and Sievanen, J.: A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation, *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 9, No. 3 (2002).
- [4] 吉見 駿, 金具浩平, 望月祐洋, 村尾和哉, 西尾信彦: 実環境における歩行空間制約を活用した PDR 軌跡推定, マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム, pp. 310–318 (2015).
- [5] 鈴木真理子, 三木光範, 田中慎吾, 吉見真聡, 中川明彦, 齋藤敦子, 福田麻衣子: オフィス内フレームを用いた知的照明システムの構築, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J95-D, No. 3, pp. 549–558 (2012).
- [6] Levis, P., Clausen, T. H., Hui, J., Gnawali, O. and Ko, J.: RFC 6206: The Trickle Algorithm, Technical report, Internet Engineering Task Force (2011).
- [7] GOTSHALL, S. and RYLANDER, B.: Optimal Population Size and the Genetic Algorithm, *WSEAS Transactions on Computers* (2002).
- [8] Razali, N. M. and Geraghty: Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP, *International Conference of Computational Intelligence and Intelligent Systems* (2011).
- [9] Jong, K. A. D., De, K. A., William, J. and M, W.: Using Genetic Algorithms to Solve NP-Complete Problems, *PROCEEDINGS OF THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC ALGO-*

*RITHMS* (1989).

- [10] Fortin, F.-A., De Rainville, F.-M., Gardner, M.-A., Parizeau, M. and Gagné, C.: DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy, *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 13, pp. 2171–2175 (2012).