

照明制御を用いた屋内位置推定高速化手法の基本的検討

西原 尚宏^{1,a)} 間 博人^{1,b)} 谷口 総 1 朗^{2,c)} 三木 光範^{1,d)}

概要: ユーザの位置情報を利用したシステムやアプリケーションを提供するにあたって、屋内でも正確に利用者の位置を把握することが必要である。屋内での位置推定手法には無線の電波強度を用いる手法の他に、加速度、赤外線、超音波などを用いる手法が存在する。しかしながら、室内において受信信号強度 (RSSI) を位置推定に用いる場合、電波の干渉などで位置推定の誤差が生じる問題がある。また、他手法においても特殊なデバイスが必要であったり、位置推定の精度の面で問題がある。本研究では、オフィス空間などを対象とし分散照明制御を用いたセンサノードの位置推定手法を提案する。室内において、制御可能な照明と照度センサの位置関係を回帰分析による学習を行うことで、照明が照度センサに及ぼす明るさの影響度合いを把握する。この影響度合いから照明と照度センサの距離を推定することで、照度センサの位置を得ることが出来る。一方で、照明台数に比例して位置推定までの時間が増加してしまうという課題が存在する。位置推定時間の増加は、位置情報を用いるシステムやアプリケーションにとって問題である。この問題を解決するために、無線の電波強度と分散照明制御を併用した SPE/RL (Sensor Position Estimation Scheme using RSSI and Lighting Control) を提案する。本研究では、照度制御可能な天井照明 15 灯が設置された実空間で提案手法の位置推定精度および推定時間を評価すると共に、大規模オフィス環境を想定したシミュレーションによる評価を行い、提案手法の有用性を検証した。

1. はじめに

複数のセンサ付き無線ノードを配置し情報を収集する無線センサネットワークは様々な場面での活用が期待されている。無線センサネットワークの応用範囲は広く、屋外の環境や建造物のモニタリングや気象観測など多岐にわたる [1]。近年では Facebook や Google+ など様々なアプリケーションの普及により、室内における利用者の位置情報の需要が高まっている [2][3][4]。屋内での位置推定手法には、電波強度を用いる手法の他に加速度、赤外線、超音波などを用いる手法が存在する。[5] しかしながら、室内において電波強度を位置推定に用いる場合、電波の干渉が位置推定の誤差に大きく影響する問題がある。また、他手法においては特殊なデバイスが必要であったり、位置推定の精度の面で問題がある。我々はオフィスにおいて照明設備により照度センサの位置を推定可能な手法を提案している [6]。

この手法では、照明の光度が照度センサノードの照度に及ぼす明るさ具合 (照度/光度影響度) に基づく位置推定を行っている。一方、照度/光度影響度を回帰分析による学習を行うことで求めるため、位置推定時間は照明台数に比例して増加する。そのため、照明台数の多い環境下では無線照度センサノード位置の推定に要する時間が増大する。

このような大規模な照明環境下において照度センサの位置推定に要する時間を高速化するため、本論文では、受信した電波の強度を示す指標の RSSI を用いた無線センサノード位置推定手法と分散照明制御による照度センサ位置推定を併用する SPE/RL (Sensor Position Estimation Scheme using RSSI and Lighting Control) を提案する。

2. RSSI を用いた無線センサノード位置推定手法

無線センサノードはパケット受信時に RSSI が取得される。取得した RSSI から距離を推定し、推定距離から無線センサノードの位置を推定することができる。RSSI を用いた無線センサノード位置推定手法には最尤法や MinMax 法などがある [7]。これらの位置推定にはアンカーノードが必要となる。アンカーノードとは、位置推定の際に基準となる無線センサノードのことである。位置推定対象の無線センサノードをアンノーンノードとすると、アンカーノード

¹ 同志社大学理工学部, 京都府
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ.
² 同志社大学大学院理工学研究科, 京都府
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ, 1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi Kyoto, 610-0394 Japan
a) tnishihara@mikilab.doshisha.ac.jp
b) haida@mail.doshisha.ac.jp
c) staniguchi@mikilab.doshisha.ac.jp
d) mmiki@mail.doshisha.ac.jp

ドを利用してアンノーンノードの位置を推定する。

本論文では、オフィス環境でのユーザ位置情報の利用を想定している。そのためコスト削減、執務環境における景観や利便性などの側面から、設置するアンカーノードの数はできるだけ少なくする。そこで、RSSI による位置推定の内、少数のアンカーノードを用いた場合に最も精度が高いとされている MinMax 法を用いる [8]。

MinMax 法の基礎概念は、各アンカーノードの位置座標と RSSI からの推定距離より図 1 のような矩形を生成することである。図のアンノーンノードは位置を推定する対象にある無線センサノードを表す。MinMax 法では、生成された矩形の全てが交差する部分の中心点を推定位置とする。この中心点の座標は式 (1) によって一意に計算することができる [7]。

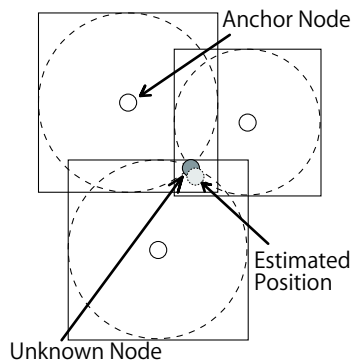


図 1 MinMax 法による無線センサノード位置推定方法

$$\begin{aligned} x &= (\min(x_i - d_i) - \max(x_i - d_i))/2 \\ y &= (\min(y_i - d_i) - \max(y_i - d_i))/2 \end{aligned} \quad (1)$$

x, y : 推定位置座標 [cm], i : アンカーノード数,
 d_i : アンカーノードとアンノーンノード間の推定
距離 [cm], x_i, y_i : アンカーノード座標 [cm]

3. 分散照明制御による位置推定手法

3.1 概要

分散照明制御による位置推定手法は、照明の光度を分散制御することで照度センサの位置座標を推定する。各照明の光度変化が照度センサの照度に及ぼす明るさ具合（照度/光度影響度）を求めることで照度センサの位置を把握できる。

照度/光度影響度とは、照明の光度が照度センサの照度に及ぼす影響度を表す係数で、関係式 (2) で表すことができる。

$$E = RI \quad (2)$$

E : 照度 [cd], R : 照度/光度影響度係数 [cd/lx],
 I : 照度 [lx]

また、照明環境が変化しない限り R は定数とみなすことができる。以後、この定数 R を照度/光度影響度係数と呼ぶ。各照明の光度変化量と各照度センサで計測される照度変化量に関する回帰分析により照度/光度影響度係数 R を求める。照度/光度影響度係数を求める方法は 2 種類存在する。まず、回帰分析を用いる方法である。各照明の光度をランダムに人間が光の変化を感じ取れない範囲内で変更させ、光度変化量と照度変化量から回帰分析を行うことで照度/光度影響度を算出できる。一方、照明を 1 灯ずつ点滅させて、その際の各照明の光度変化量と照度変化量から照度/光度影響度係数を計測する方法がある。この方法では、他の照明の光度変化の影響を受けない照度/光度影響度係数を求めることができる。実際のオフィスでの利用を想定し、短時間で照度/光度影響度係数を取得可能な前者を用いる。

各照明と各照度センサ間の距離は、回帰分析により求められた照度/光度影響度に基づき関係式 (3) より算出される。

$$L = \sqrt[2]{\cos \theta / R} \quad (3)$$

L : 照明と照度センサ間の距離 [cm],
 R : 影響度係数 [cd/lx]

しかしながら、照明と照度センサの直線距離が大きい場合、推定された照度/光度影響度係数に誤差が生じるため、関係式 (3) にて算出される推定距離の誤差が大きくなる。そのため、遠い位置関係にある照明と照度センサ間の照度/光度影響度に基づいて位置推定を行った場合、推定誤差は大きくなる。そこで、照明と照度センサがそれぞれ近い位置関係にある照度/光度影響度値に基づいて算出した距離を測位に用いる。

照度/光度影響度を用いた屋内測位には、関係式 (3) より算出された推定距離を使用し、関係式 (4) に示す目的関数を用いて照度センサの位置座標最適化を行うことで照度センサ位置の推定を行う。

$$f_k = \sum_{i=0}^n (w\{(s_x - l_{xi})^2 + (s_y - l_{yi})^2 - L_i^2\}^2) \quad (4)$$

n : 照明台数, k : 照度センサ台数, w_i : 重み,
 l_{xi} : 照明の x 座標, l_{yi} : 照明の y 座標
 s_x : 照度センサの x 座標, s_y : 照度センサの y 座標,
 L_i : 照明と照度センサの距離 [m]

照明の分散制御による位置推定手法の手順を以下にまとめる。

- (1) 照明の光度を人間の感知しない範囲内で変化させる。
- (2) 回帰分析により関係式 (2) で表される照明と照度センサ間の照度/光度影響度を求める。
- (3) 関係式 (3) にて各照度/光度影響度を基に照明と照度センサ間の距離を推定する。

- (4) 距離の近い照明 n 灯を選択する.
- (5) 選択された照明と照度センサ間の距離を利用し関係式 (4) を用いて目的関数を計算し, 改善されていれば採択する.

以上の手順を繰り返すことで照度センサ位置座標の最適化を行う.

3.2 課題点

照明台数分の説明変数に基づいた回帰分析を行うには, 少なくとも照明台数分の照度および光度データ組が必要となる. 即ち, 知的照明システム運用の場合, ステップ毎に光度変化量と照度変化量のデータ組を取得するため, 照度/光度影響度係数の推定には式 (5) の時間を要する.

$$t = s \times n \quad (5)$$

t : 位置推定開始時間 [sec],

s : 1 ステップに要する時間 [sec]

n : 照度センサ台数

1 ステップ 2 秒として照明 15 台のオフィス環境において回帰分析を用いて位置推定を開始するには, 式 (5) より算出した 30 秒を要する. そこで, 本研究では大規模な照明環境下における照度センサ位置推定に要する時間を高速化するアルゴリズムを提案する.

4. SPE/RL (Sensor Position Estimation Scheme using RSSI and Lighting Control)

4.1 システム構成概要

分散照明制御による照度センサ位置推定手法での課題点を解消するため, MinMax 法による無線センサノードの位置推定と分散照明制御による照度センサ推定手法を段階的に併用した SPE/RL (Sensor Position Estimation using RSSI and Lighting Control) を提案する.

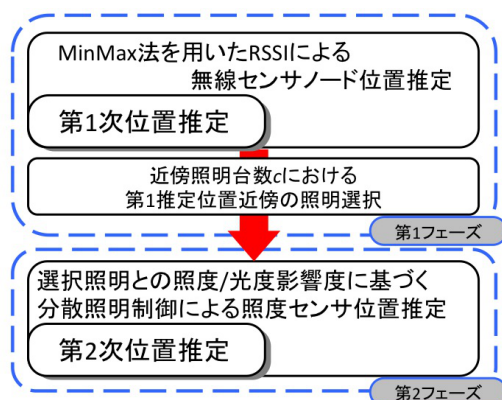


図 2 SPE/RL 概念図

SPE/RL の概念図を図 2 に示す. SPE/RL は, 無線照度センサノード位置の推定を 2 回行うため, 大きく 2 フェー

ズに分けられる. フェーズ 1 では, MinMax 法による無線照度センサノードの位置推定を行い, 大まかな位置を推定する. フェーズ 2 では, フェーズ 1 の推定位置に基づき分散照明制御による無線照度センサノードの位置推定を行う.

4.2 SPE/RL 第 1 フェーズ

第 1 フェーズでは, MinMax 法を用いて大まかな無線照度センサノードの位置を推定し把握する. これを第 1 次位置推定とし, 第 1 次位置推定によって得られた位置および座標をそれぞれ第 1 推定位置, 第 1 位置座標とする. 第 1 フェーズの目的は, 第 1 推定位置から近い位置関係にある照明を把握することである.

第 1 推定位置から近い位置にある照明の台数を近傍照明台数 c とし, 第 1 次位置推定の後, 第 1 推定位置から距離の近い照明を順番に近傍照明台数 c 分選択する. なお, 近傍照明台数 c が全照明台数と等しいとき, SPE/RL は分散照明制御による照度センサの位置推定と同義となる. また, 近傍照明台数を 7, 10 台としたとき, それぞれ $c7$, $c10$ と表記する.

4.3 SPE/RL 第 2 フェーズ

第 2 フェーズでは, 分散照明制御による無線照度センサノードの位置推定を行うこれを第 2 次位置推定とし, 第 2 次位置推定によって得られる推定位置を第 2 推定位置とする. このとき, 第 2 推定位置を最終的な無線照度センサ推定位置とする.

まず, 第 1 推定位置の近傍近傍照明台数 c 照明の光度変化と照度センサの照度を基に回帰分析を行う. これにより, 回帰分析における説明変数の数は近傍照明台数 c となる. つまり, 近傍照明台数 c により無線照度センサノードの位置推定開始時間を調節することができる.

次に, 第 1 推定位置の近傍近傍照明台数 c 照明と各無線照度センサノード間の照度/光度影響度を求める. また, 第 1 推定位置の近傍近傍照明台数 c 照明以外の照明は, 各照明と照度センサ間の照度/光度影響度を 0 とする. 以上より求められた照度/光度影響度から無線照度センサノードと照明間の距離を式 (3) より求める. 最後に, 推定された距離に基づき式 (4) を計算し, 無線照度センサノードの位置座標最適化を行う.

4.4 アルゴリズム

以下に SPE/RL のアルゴリズムを示す.

- (1) MinMax 法を用いた位置推定を行う.
(第 1 フェーズ)
- (2) 第 1 推定位置の近傍照明台数 c の照明を抽出し, 選択する.
- (3) (2) にて選択した照明の光度を人間の感知しない範囲内で変化させる.

- (4) 回帰分析により照明と無線照度センサノード間において式 (2) で表される照度/光度影響度を求める。
 - (5) 式 (3) にて各照度/光度影響度を基に照明と無線照度センサノード間の距離を推定する。
 - (6) 推定距離の近い照明 n 灯を選択する。
 - (7) 選択された照明と無線照度センサノード間の距離を利用し式 (4) を計算し、改善されていれば採択する。
- (第2フェーズ)

(1)~(7) を繰り返すことで、無線照度センサノードの位置推定を行う。SPE/RL では、近傍照明台数 c をできるだけ小さくすることで、照度センサの位置推定に要する時間の高速化を行う。

5. 評価

本論文では、実空間における SPE/RL による位置推定開始時間高速化の検証を目的とした実空間検証の評価と、大規模照明環境における SPE/RL による位置推定開始時間高速化の検証を目的とした大規模照明環境検証の評価を行った。また、両検証において近傍照明台数 c が位置推定誤差および位置推定開始時間に及ぼす影響についての検証も行った。

実空間における SPE/RL の有効性の検証は、知的オフィス環境創造システム実験室にて行った。一方、実空間では大規模照明台数を想定した検証を容易に行うことが出来ない。そこで、大規模照明環境検証として照明 50 台が設置されたオフィス環境を想定したシミュレーションによる検証を行った。それぞれの検証において、MinMax 法を用いた無線照度センサノードの位置推定は 2 秒間の測定後に行った。また、分散照明制御は 1 ステップ 2 秒とした。

5.1 実空間検証

照明 15 台、無線照度センサノード A, B, C, アンカーノード 7 台をそれぞれ図 3 のように配置した。照明のと無線照度センサノード位置関係による誤差を検証するため、無線照度センサノードの配置はそれぞれ照明 1 灯の直下、2 灯の間、3 灯の間としている。RSSI 取得は、各アンカーノードおよび無線照度センサノード間でパケットを 0.5 秒毎に送受信することで行った。また、 c_4 , c_7 , c_{10} , c_{15} の場合についてそれぞれ検証を行った。

5.2 実空間検証の結果

A, B, C の第 1 推定位置を図 4 の A', B', C' に示す。無線照度センサノード A, B, C の第 1 次位置推定の誤差はそれぞれ 79 cm, 66 cm, 213 cm となった。このように、MinMax 法は状況によっては大きな誤差を生じることがある。

また、 c_7 の場合の第 1 推定位置 A' および C' 近傍の照明選択の例を図 5 に示す。図 5 において、照明の上に記載

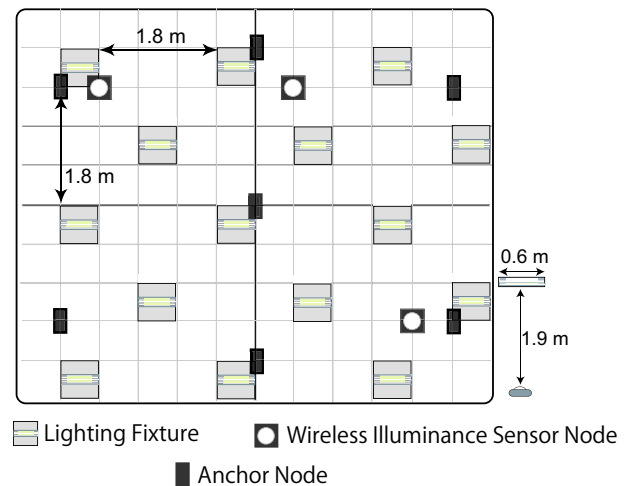


図 3 実空間環境とアンカーノードの配置

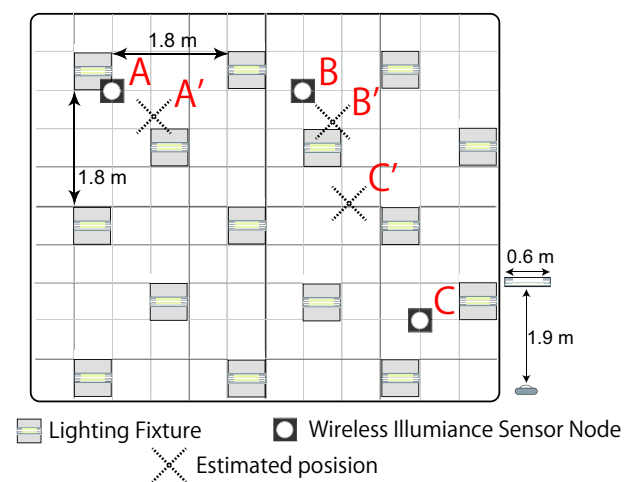


図 4 MinMax 法による無線照度センサノードの推定位置

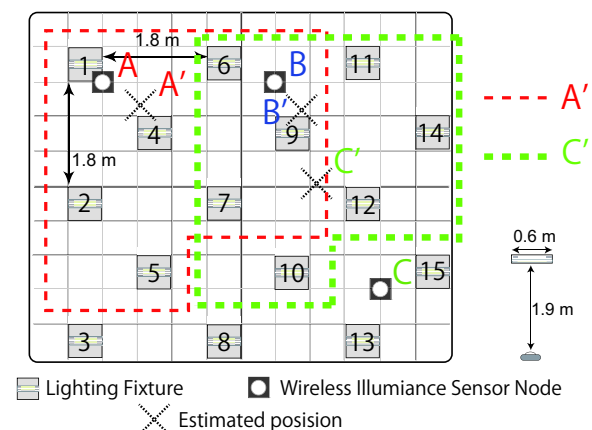


図 5 第 1 推定位置 A' 近傍の照明の選択状態 (近傍照明台数 $c=7$)

した番号を各照明を特定する照明番号とする。第 1 次位置推定の誤差が小さい第 1 推定位置 A' の近傍照明は、実際の無線照度センサノード A の近傍照明を把握できている。第 1 次位置推定の誤差が小さい第 1 推定位置 C' の近傍照明については、照明番号 13, 15 が選択されていない。そのため、実際の無線照度センサノード C の近傍照明を完全に

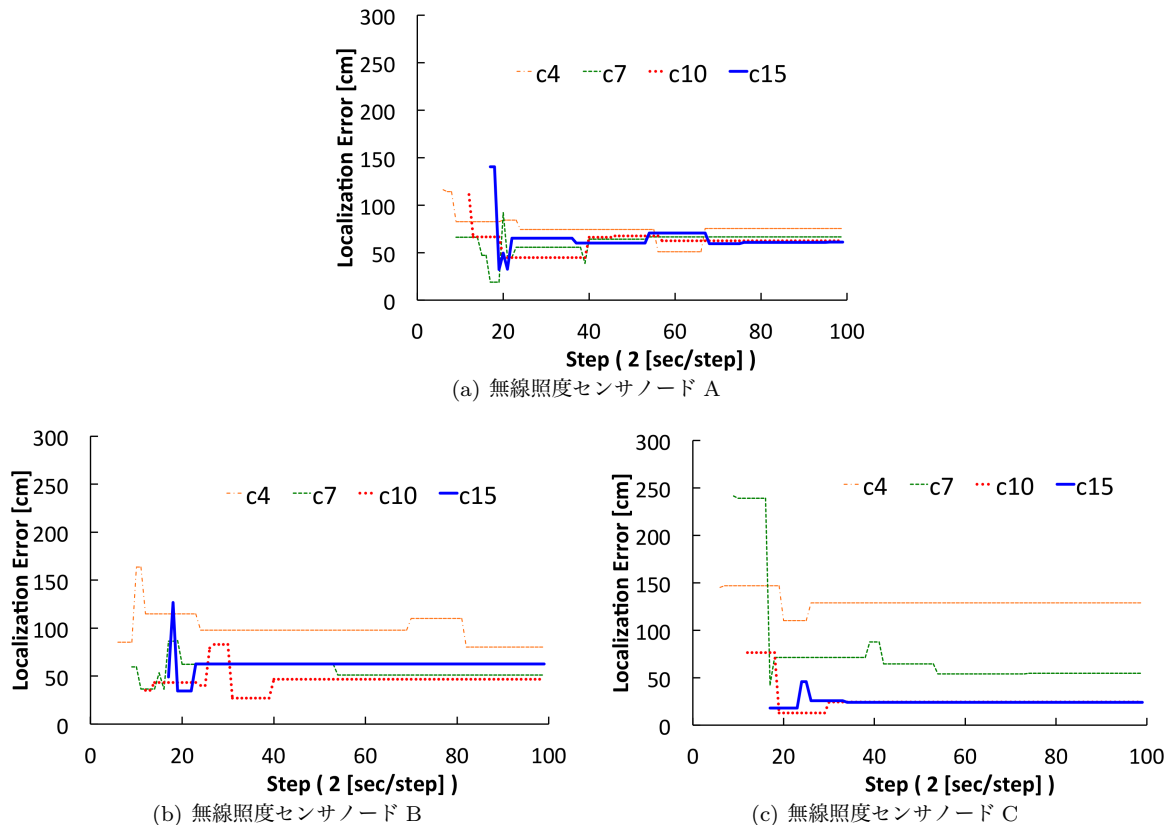


図 6 実空間検証における位置推開始時間及び推定誤差の比較

把握出来ているとは言えない。しかし、照明番号 10 や 14 が選択されているため、ある程度の近傍照明の把握ができている。

次に、それぞれの無線照度センサノードにおいて選択照明の光度変化と照度変化を基に回帰分析を行い、照度/光度影響度を求めた。求められた照度/光度影響度に基づいた位置推定推定を行った結果を、近傍照明台数 c 別に系列分類したグラフを図 6 に示す。なお、 $c15$ は分散照明制御による位置推定手法と同義である。

無線照度センサノード A, B, C についてそれぞれ、各系列について近傍照明台数 c ステップ目から位置推定を開始している。

無線照度センサノード A で、 $c4$, $c7$, $c10$, $c15$ それぞれの位置推定開始時における位置推定の誤差は、それぞれ 116 cm, 66 cm, 110 cm, 140 cm である。また、100 ステップにおける位置推定の誤差は、それぞれ 98 cm, 62 cm, 61 cm, 61 cm である。

無線照度センサノード B で、 $c4$, $c7$, $c10$, $c15$ それぞれの位置推定開始時における位置推定の誤差は、それぞれ 85 cm, 59 cm, 35 cm, 49 cm である。また、100 ステップにおける位置推定の誤差は、それぞれ 80 cm, 51 cm, 46 cm, 62 cm である。

無線照度センサノード C で、 $c4$, $c7$, $c10$, $c15$ それぞれの位置推定開始時における位置推定の誤差は、それぞれ 145 cm, 241 cm, 76 cm, 18 cm である。また、100 ステッ

プにおける位置推定の誤差は、それぞれ 128 cm, 54 cm, 23 cm, 23 cm である。

以上より無線照度センサノード A, B, C について、近傍照明台数 c が著しく小さい場合、大きな位置推定の誤差が生じる。一方で、近傍照明台数 c を小さくすると位置推定開始時間が早くなる。

近傍照明台数 $c10$ のとき、100 ステップ目において SPE/RL による位置推定は分散照明制御による照度センサ位置推定手法と同等かそれよりも小さい推定誤差となることが分かる。また、実際に提案手法が位置推定高速化手法として利用可能であることが分かった。図 5 のように、実際の無線照度センサノード位置座標近傍の照明が十分選択されていない場合、近傍照明台数 c が位置推定誤差に及ぼす影響が大きいことが分かる。

5.3 大規模空間検証

50 台の照明、無線照度センサノード 3 台 A, B, C を図 7 のように配置した環境を想定する。照明の位置関係による誤差を検証するため、無線照度センサノードの配置はそれぞれ照明 1 灯の直下、2 灯の間、4 灯の間としている。MinMax 法を用いた位置推定の直線誤差は 2m 以内のランダムで決定し、それぞれ 20 回の実験を行った。また、 $c7$, $c10$, $c15$, $c50$ の場合についてそれぞれ検証を行った。

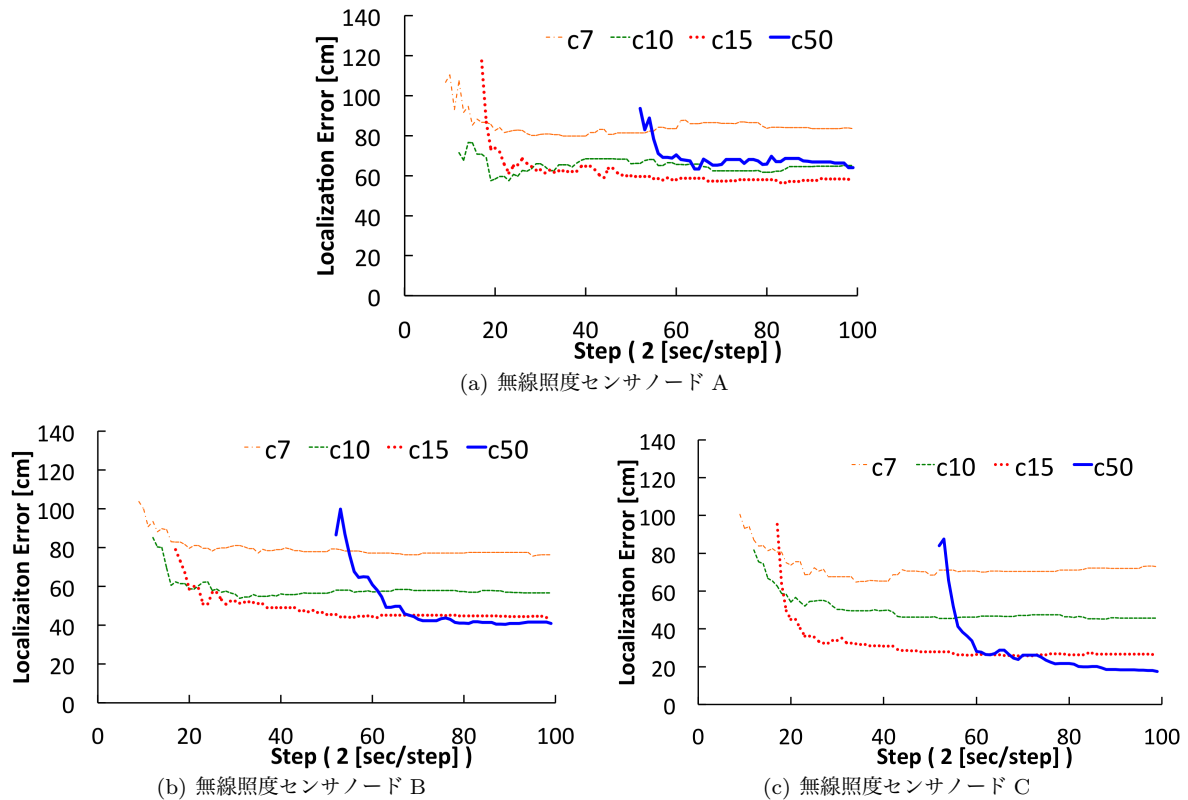


図 8 大規模照明環境検証における位置推開始時間及び推定誤差の比較

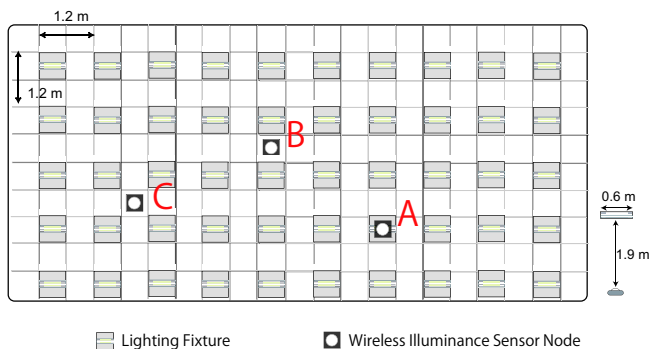


図 7 大規模照明オフィス環境 (照明 50 台)

5.4 大規模環境検証の結果

SPE/RL により位置推定を行った結果を図 8 に示す。結果はそれぞれ 20 回の実験における平均値を示している。図 8 では近傍照明台数 c 別に系列を分類している。

無線照度センサノード A, B, C についてそれぞれ、各系列について近傍照明台数 c ステップ目から位置推定を開始している。

無線照度センサノード A で、 $c7$, $c10$, $c15$, $c50$ それぞれの位置推定開始時における位置推定の誤差は、それぞれ 106 cm, 71 cm, 117 cm, 93 cm である。また、100 ステップにおける位置推定の誤差は、それぞれ 83 cm, 65 cm, 55 cm, 64 cm である。

無線照度センサノード B で、 $c7$, $c10$, $c15$, $c50$ それぞれの位置推定開始時における位置推定の誤差は、それぞれ

103 cm, 85 cm, 79 cm, 87 cm である。また、100 ステップにおける位置推定の誤差は、それぞれ 76 cm, 57 cm, 44 cm, 41 cm である。

無線照度センサノード C で、 $c7$, $c10$, $c15$, $c50$ それぞれの位置推定開始時における位置推定の誤差は、それぞれ 100 cm, 81 cm, 95 cm, 83 cm である。また、100 ステップにおける位置推定の誤差は、それぞれ 73 cm, 46 cm, 26 cm, 17 cm である。

実環境検証における結果と同様に、無線照度センサノード A, B, C について、近傍照明台数 c が小さい場合、大きな位置推定の誤差が生じる傾向にある。また、近傍照明台数 c を小さくすると位置推定開始時間が早くなる。

近傍照明台数 $c15$ のとき、100 ステップ目において SPE/RL による位置推定は分散照明制御による照度センサ位置推定手法と同等かそれよりも小さい推定誤差となることが分かる。一方で、近傍照明台数 c を大きくすると位置推定開始時間が遅くなる。

また、 $c15$ の場合、 $c50$ と比べ 70 秒高速化しているように、大規模照明環境において SPE/RL が非常に有効であると言える。

6. 結論と今後の展望

本研究では、分散照明制御による照度センサ位置推定に要する時間を高速化するため、MinMax 法による無線照度センサノード位置推定手法と分散照明制御による照度セン

サ位置推定手法を併用した SPE/RL を提案した。提案手法では、第 1 フェーズにおいて MinMax 法を用いて位置推定を行うことで、回帰分析の説明変数を削減した。これにより、第 2 フェーズにおいて分散照明処理による無線照度センサノード位置推定の高速化を実現した。

近傍照明台数 c を 10~15 に設定することで、推定精度を保ちながら高速な位置推定を実現できると考えられる。また、近傍照明台数 c の大きさと精度は反比例の関係にある傾向がある。

SPE/RL の第 1 フェーズにおける照明抽出手法の照明制御への応用が考えられる。今後の課題として、アンカーノード数の検証や、SPE/RL による無線照度センサノード推定位置の誤差検証、照明 100 台といった更に大きな照明台数規模下での検証などが挙げられる。

参考文献

- [1] 安藤 繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南 正輝: センサネットワーク技術 - ユビキタス情報環境の構築に向けて, 東京電気大学出版社 (2005).
- [2] Guha, S., Plarre, K., Lissner, D., Mitra, S., Krishna, B., Dutta, P. and Kumar, S.: AutoWitness: Locating and Tracking Stolen Property While Tolerating GPS and Radio Outages (2010).
- [3] Miluzzo, E., Lane, N. D., Fodor, K., Peterson, R., Lu, H., Musolesi, M., Eisenman, S. B., Zheng, X. and Campbell, A. T.: Sensing meets mobile social networks: The design, implementation and evaluation of the CenceMe application, pp. 337–350 (2008).
- [4] Zhang, Z., Chu, D., Chen, X. and Moscibroda, T.: Sword-Fight: Enabling a New Class of Phone-to-phone Action Games on Commodity Phones, pp. 1–14 (2012).
- [5] Priyantha, N. B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket Location-support System, pp. 32–43 (2000).
- [6] Miki, M., Yoshida, K., Hirano, Y. and Ikegami, H.: Estimation of illuminance sensor positions and improvement of energy efficiency in the distributed control lighting system, pp. 137–142 (2013).
- [7] Langendoen, K. and Reijers, N.: Distributed Localization in Wireless Sensor Networks: A Quantitative Comparison, *Comput. Netw.*, Vol. 43, No. 4, pp. 499–518 (2003).
- [8] Zanca, G., Zorzi, F., Zanella, A. and Zorzi, M.: Experimental Comparison of RSSI-based Localization Algorithms for Indoor Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the Workshop on Real-world Wireless Sensor Networks*, REALWSN '08, pp. 1–5 (2008).

正誤表

「照明制御を用いた屋内位置推定高速化手法の基本的検討」に以下の通り誤りがありましたので、お詫びして訂正いたします.

(2014 年 2 月 20 日)

ページ番号	該当箇所	誤	正
p.1	著者欄	谷口 総 1 郎	谷口 総一郎