

外光がある状況での照明を用いた 屋内位置推定手法の検討

津崎 隆広^{1,a)} 間 博人^{1,b)} 梅田 玲旺^{2,c)} 山下 大輔^{2,d)} 三木 光範^{1,e)}

概要：近年，屋内位置推定に注目が集まっている．また，スマートビルの増加による調光可能な照明の増加している．したがって，照明を用いた位置推定を行う．しかし，窓のある環境を想定する場合，外光照度を考慮しなければならない．本研究では，外光がある状況での屋内位置推定手法を提案する．場所ごとに照明の光度を段階的に変化するパターンを複数作成し，パターンごとに照明を点灯する．一つのパターンが点灯している間の照度変化を外光照度変化量とし，全てのパターンの外光照度変化量を用いて，各パターンの照度を補正する，補正する各パターンの照度差を用いて位置推定を行う．シミュレーションと実機による実験を行い，シミュレーションでは，位置推定精度 50 % 改善し，実機では位置推定精度を 26 % 改善した．

1. はじめに

近年，屋内位置推定に注目が集まっている．屋内位置推定には Wi-Fi や Beacon, RFID, 照明など様々なアプローチで研究されている．

また，近年，スマートビルの普及で個別に調光可能な照明を設置したビルが増えている．照明を制御するプロトコルには DALI や BACNET が存在する．DALI は双方向のデジタル通信を可能にする照明専用の制御規格である [1]．BACNET は，ビルの空調，照明，火気検出などを総合的に制御するための通信規格である [2]．これらを用いて，ビルの照明を制御して，省エネルギー化や快適な光環境の実現などが期待されている．

このような背景から本研究では調光可能な照明を用いた屋内位置推定手法を提案する．照明を用いた屋内位置推定手法では，照明の光度を位置に応じて，照明の光度を段階的に変化するパターンを複数作成する．作成するパターンと同様の光度を照明で再現する．その際の照度をパターンごとに計測し，パターンによる照度の差を用いて位置推定

を行う．しかし，窓などがある屋内環境を想定した場合，照度センサは照明による照度の影響のみでなく外光からの影響も受けるため外光の影響を考慮する必要がある．したがって，本研究では照明による位置推定の際に外光が及ぼす影響を検証する．外光の影響による影響が存在する場合における高精度の位置推定精度を実現する．本稿では，まず，第 2 章で関連研究について述べ，第 3 章では，照明を扱う際に必要な光の基本的性質について述べる．第 4 章では，照明を用いた屋内位置推定について述べる．第 5 章では，照明を用いた屋内位置推定を用いて，外光の影響に関する検証実験について述べる．第 6 章では，外光に対する補正手法について述べ，第 7 章では，外光に対する補正手法の評価を行う．最後に第 8 章で結論と今後の課題を述べる．

2. 関連研究

屋内位置推定には Wi-Fi [3][4][5] や Beacon [6], RFID [7][8] などを用いた手法が存在する．Wi-Fi を用いた位置推定手法では，アクセスポイントからの到達時間や電波強度を用いた手法がある．Wi-Fi による位置推定手法では，フィンガープリントが一般的である．フィンガープリントを用いた位置推定手法は，あらかじめ様々な位置において必要な情報を収集しておき，位置と共にデータベースに格納しておく．推定位置は，端末が観測する情報と，データベース内の情報を比較して，最も類似しているデータに紐付いている位置である．フィンガープリントによる位置推定は，アクセスポイントと受信端末のみで行えるが，事前に情報

¹ 同志社大学理工学部，京都府
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ,
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi Kyoto, 610-0394
Japan

² 同志社大学大学院，京都府
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ.

a) ttsuzaki@mikilab.doshisha.ac.jp

b) haida@mail.doshisha.ac.jp

c) rumeda@mikilab.doshisha.ac.jp

d) dyamashita@mikilab.doshisha.ac.jp

e) mmiki@mail.doshisha.ac.jp

を収集する必要がある。また、位置推定を行う対象環境ごとにフィンガープリントを作成する必要がある。さらに、アクセスポイントの移動や消失、周辺環境の変化によって位置推定精度が悪化するという課題もある。

RFID や Beacon などによる位置推定手法は、位置推定を行う対象環境にあらかじめ機器を設置する必要がある。RFID を用いた位置推定手法では、RFID タグの通信距離が数 m から数十 cm であることから、RFID タグを対象環境内に複数設置する必要がある。Beacon を用いた位置推定手法では、Beacon の電源に制約があること、Bluetooth による通信が発生するという問題がある。

外光がある状況での照明を用いた屋内位置推定手法では、調光可能な照明を備えている室内を対象としているため、追加の機器を対象環境に設置する必要がない。また、照度を取得するセンサが内蔵されたスマートフォンやウェアラブルデバイスをセンサとして利用することを想定しているため、特殊な受信機を用意する必要がない。近年、多種多様なセンサが搭載されているスマートデバイスや、調光可能な照明を備えるスマートビルや施設が増加している。したがって、本研究が提案する位置推定手法を容易に導入できる環境が増加している。

3. 光の基本的性質

外光がある状況での照明を用いた屋内位置推定手法では、照明と照度センサを用いるため、照明や光度、照度の基本的性質について説明する。光度は、照明の明るさを表し、照度は、照度センサから得られる値で、単位面積あたりの明るさを表す。一般的に照明の光度が照度センサに与える影響は、照度センサが照明の直下から離れるほど低下する。要因として以下が挙げられる。

- 距離の逆 2 乗則
- 照明の配光特性
- 照度センサの斜入射光特性

照明からの光の強さは距離が離れるほど弱くなり、距離の 2 乗に反比例する。照明は配光特性を持ち、照明からの鉛直方向の光は最も強く、斜め方向の光は弱いという性質を持つ。照度センサも同様に斜入射光特性があり、照度センサに入射光の入射角の余弦に比例して変化するという特性をもち、照明が水平に設置されている場合が鉛直方向の光から受ける影響が最も強く、斜め方向から受ける光の影響は弱い。したがって、照度センサが照明の直下から離れるほど光の影響は弱くなるため、照度センサの照度は照度センサに近い照明から多くの影響を受ける。例えば図 1 のように、照明 a の直下に照度センサ p があるとき照度センサ p の照度は照明 a から多くの影響を受け、照明 b, c の 2 灯間に照度センサ q があるときには照度センサ q の照度は照明 b, c から多くの影響を受ける。

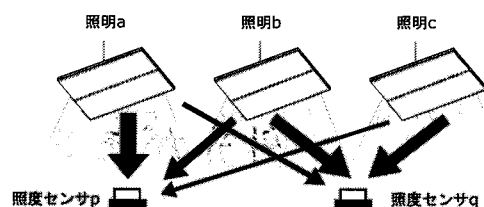


図 1 照明とセンサの影響度

4. 照明を用いた屋内位置推定手法

4.1 概要

照明の位置によって、段階的に異なる照明の光度を調光することにより、調光する室内に照度の高いエリアと低いエリアができる。照明の位置によって、段階的に異なる照明の光度を調光する際に利用するパターンを点灯グラデーションパターンとする。複数の異なる点灯グラデーションパターンを作成し、照明を調光することで、複数の点灯グラデーションごとに照度の高いエリア、照度の低いエリアができる。

位置推定を行うユーザは照度センサを持ち、照明を複数の点灯グラデーションパターンを用いて照明を調光することで、照度センサが点灯グラデーションパターンごとの照度を得る。照度センサが得た照度と、点灯グラデーションパターンによる照明の光度を比較することにより、位置推定を行う。

4.2 点灯グラデーションパターン

照明の点灯グラデーションパターンについて述べる。点灯グラデーションパターンを図 2 に示す。図 2 の色は、光度が高いほど白色に近づき、光度が低いほど黒色に近づく。点灯グラデーションパターン P_i のそれぞれのパターンを以下に示す。

- P_1 : 全灯を一律点灯
- P_2 : P_1 の光度を最低光度とし、X 方向に光度を高くするパターン
- P_3 : P_1 の光度を最高光度とし、X 方向に光度を高くするパターン
- P_4 : P_1 の光度を最低光度とし、Y 方向に光度を低くするパターン
- P_5 : P_1 の光度を最高光度とし、Y 方向に光度を低くするパターン

点灯グラデーションパターンの光度の最低を -1 、最高を 1 とすると、X 方向の大きさが w 、Y 方向の大きさが h である室内の任意の地点 (x, y) ($0 < x < w, 0 < y < h$) に存在する照明の点灯グラデーションパターン P_i における光度 C_i は、次の式 1 - 式 5 で示す。

$$C_1 = 0 \quad (1)$$

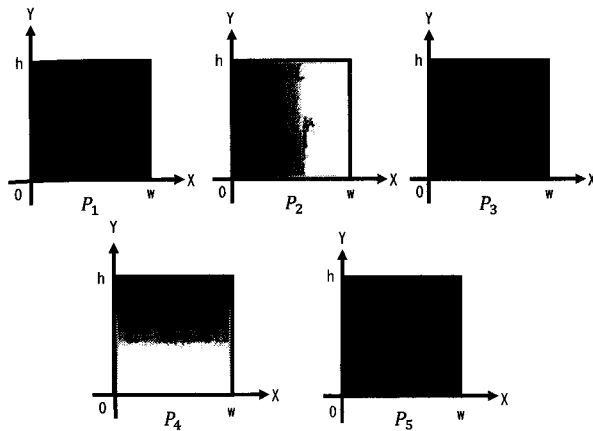


図 2 点灯グラデーションパターン

$$C_2 = \frac{x}{w} \quad (2)$$

$$C_3 = \frac{x}{w} - 1 \quad (3)$$

$$C_4 = \frac{y}{h} \quad (4)$$

$$C_5 = \frac{y}{h} - 1 \quad (5)$$

x : 照明の X 座標

y : 照明の Y 座標

w : 部屋の X 方向の大きさ

h : 部屋の Y 方向の大きさ

4.3 基本アルゴリズム

照明を用いた屋内位置推定手法では、照明は全ての点灯グラデーションパターンでそれぞれ調光を行う。点灯グラデーションパターンを P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 の順で照明を調光する。

点灯グラデーションパターン P_i による調光を行うとき、基本光度 β と重み α を用いる。基本光度 β は P_1 の光度を表し、重み α は点灯グラデーションパターンによる光度の変化度合いを表す。基本光度 β を大きくすると部屋全体が明るくなり、点灯グラデーション重み α を大きくすると点灯グラデーションパターンの変更の際に照明の光度が大きく変化する。 X 軸方向の大きさが w 、 Y 軸方向の大きさが h の長方形型の室内において、座標 $(x, y) (0 < x < w, 0 < y < h)$ にあるとき、 P_1 から P_5 の各点灯グラデーションパターンは式 6 を利用し光度 L_i を決定する。

$$L_i = \beta + \alpha C_i(x, y) \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (6)$$

L_i : P_i の座標 (x, y) での光度

β : P_1 での光度

α : 重み

$C_i(x, y)$: P_i の座標 (x, y) での調光度

照度センサは、式 7 のように、その場所の P_1 - P_5 の点灯

グラデーションパターンの照度 I_i の集合 S をもつ。

$$S = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\} \quad (7)$$

I_i : P_i での照度センサの照度

P_1 での照度と P_2 - P_5 の照度の差分 D_i を式 8 に示す。

$$D_i = I_i - I_1 \quad (i = 2, 3, 4, 5) \quad (8)$$

D_2 - D_5 の値は、それぞれの照度センサの位置により値が異なる。 D_2 - D_5 の値を評価することにより照度センサの位置の推定を行う。推定する際には、点灯グラデーションパターンごとの照度と点灯グラデーションパターンの生成光度の差を最小化する目的関数を利用する。目的関数を式 9 に示す。

$$F = \sum_{k=2}^5 \left| \frac{D_i(x, y)}{\sqrt{\sum_{l=2}^5 D_l(x, y)^2}} - \frac{C_i(x, y)}{\sqrt{\sum_{l=2}^5 C_l(x, y)^2}} \right| \quad (9)$$

F : 目的関数

$D_i(x, y)$: 座標 (x, y) での P_i と P_1 の差分照度値

$C_i(x, y)$: 座標 (x, y) での P_i の生成光度

式 9 の目的関数を最小化する座標 (x, y) が照度センサの推定位置となる。

5. 外光の影響に関する予備実験

5.1 実験概要

外光がある環境で、基本アルゴリズムを用いて位置推定を行う場合の外光が与える影響について実験する。外光がある環境と外光がない環境での位置推定結果を比較する。外光がない環境で、点灯グラデーションパターンそれぞれ 4 秒間点灯し、照明からの照度を取得する。

外光取得は晴れの日の 4 時 30 分から 19 時 30 分までの 15 時間行う。実験環境を以下の図 3 に示す。部屋の窓は南東に 3 ヶ所に存在し、ブラインドを外向き 45 度で設置する。使用する照度センサはセコニック社製のアナログ照度センサである。照度センサ PS_n ($n = 1, 2, \dots, 9$) は床上 70 cm の位置で 9 ヶ所に配置し、1 秒ごとに照度を取得する。

外光照度取得開始時を基準点として、4 秒間隔で 5 個のデータを選択し、1 つのデータセットを作成する。データセットの作成は外光照度取得終了まで基準点を 1 秒ずつずらして外光照度取得終了まで作成する。

外光がない環境で取得した照明からの照度に外光照度のデータセットを加えることで、晴れの日の 4 時 30 分から 19 時 30 分における外光の影響を考慮した環境を再現し、位置推定実験を行う。

5.2 実験結果

図 4 に外光がない環境と外光の影響が存在する環境にお

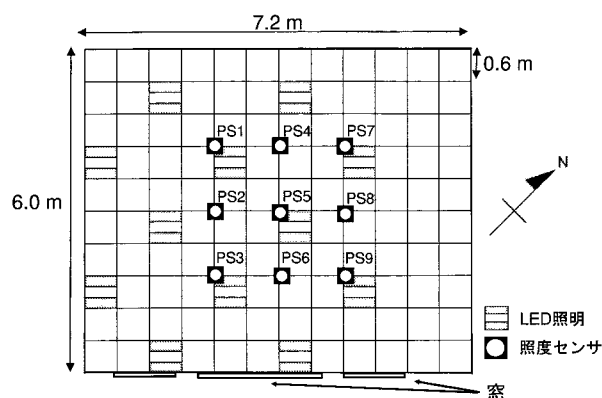


図3 外光取得実験のセンサ配置図

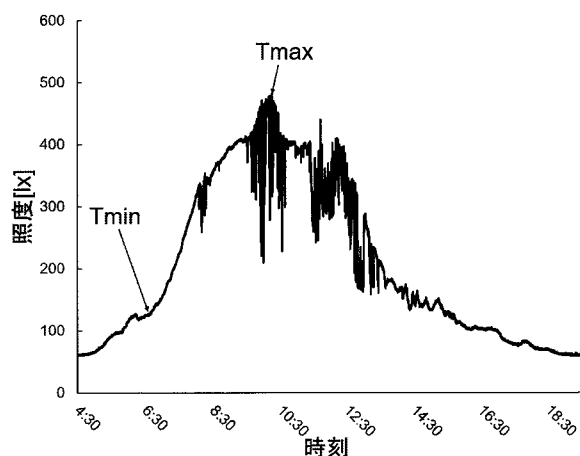


図5 PS9の外光照度履歴

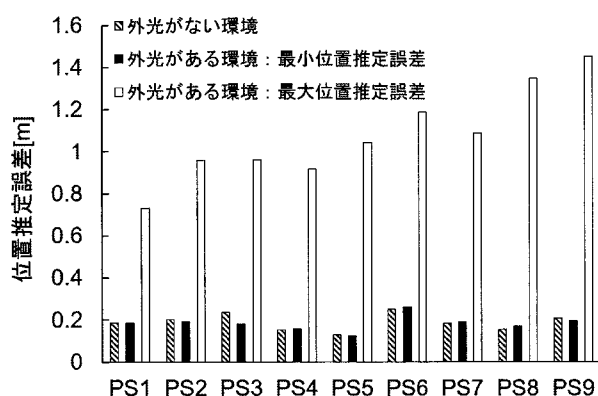


図4 予備実験の位置推定結果

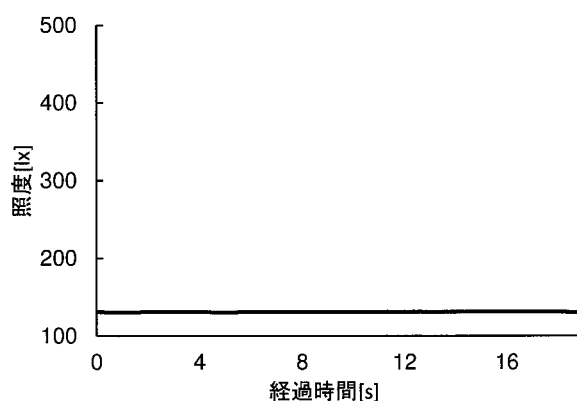


図6 Tminの外光照度履歴

ける位置推定実験を行った結果を示す。縦軸は推定位置と実際の照度センサの位置の誤差を表し、横軸は使用した照度センサを表している。外光がない環境での位置推定誤差および外光がある環境での最小位置推定誤差と最大位置推定誤差を示す。図4から、位置推定誤差は最大で1.2 m となった。

図5にPS9の外光照度履歴を示す。外光がある環境での最小位置推定誤差は、図5でTminに示す時点における結果である。図6にTminの外光照度履歴を示す。Tminでは、点灯グラデーションパターンが点灯している間、外光照度変化が1 lx と少ない。外光照度変化が少ないため、全てのパターンに同じ外光照度が加わっても、点灯グラデーションパターン P_1 と他の点灯グラデーションパターンとの照度に照度差が最大1 lx しか変わらない。したがって、位置推定精度に対する影響はない。

外光がある環境での最大位置推定誤差は、図5にTmaxに示す時点における結果である。図7にTmaxの外光照度履歴を示す。Tmaxでは、点灯グラデーションパターンを点灯している間に、20 lx 外光照度変化している。したがって、点灯グラデーションパターン P_1 と他の点灯グラデーションパターンとの照度差が変化するため、位置推定精度に影響を与える。

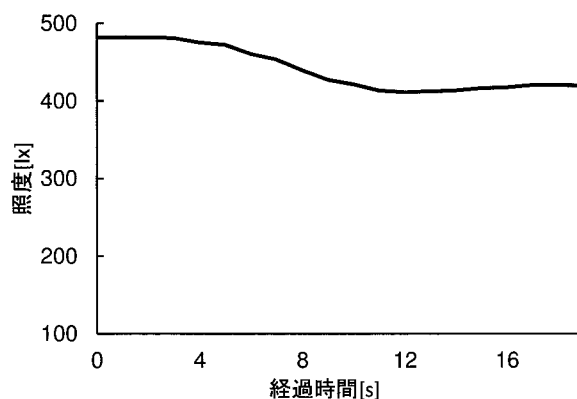


図7 Tmaxの外光照度履歴

6. 外光に対する補正手法

予備実験より、全ての外光が位置推定精度に影響を与えるのではなく、外光照度が点灯グラデーションパターン点灯中に大きく変化する外光が位置推定精度に影響を与える。したがって、外光照度の変化を軽減する外光に対する補正手法を提案する。予備実験より、外光照度が全ての点灯グラデーションパターン点灯中に変化が少ない場合、位置推定精度への影響はないことが分かっている。

照度センサの照度取得回数を増やす場合、それぞれの点灯グラデーションパターン点灯中に外光照度の変化を計測することが可能となる。外光照度の変化を補正值として、それぞれの点灯グラデーションパターン点灯時の照度から引くことで、それぞれの点灯グラデーションパターン点灯中に照度センサに入る外光照度の変化を軽減可能である。各点灯グラデーションパターンの照度補正式を次の式 10 と式 11 に示す。

$$I'_1 = I_{11}(i=1) \quad (10)$$

$$I'_i = I_{i1} - \sum_{k=1}^{i-1} I_{k-1j} - I_{k-11}(i=2,3,4,5) \quad (11)$$

j : 照度センサのそれぞれの点灯グラデーション

パターンにおける P_i 照度取得回数

I'_i : 補正後の点灯パターン P_i の照度

I_{ij} : 点灯パターン i における取得開始から j 回目の照度

P_1 での照度と P_2 - P_5 の照度の差分 D'_i を式 12 に示す。

$$D'_i = I'_i - I'_1 \quad (i=2,3,4,5) \quad (12)$$

D'_2 - D'_5 の値は、それぞれの照度センサの位置により値が異なる。 D'_2 - D'_5 の値を評価することにより照度センサの位置の推定を行う。推定するには点灯グラデーションパターンごとの照度と点灯グラデーションパターンの生成光度の差を最小化する目的関数を利用する。目的関数を式 13 に示す。

$$F' = \sum_{k=2}^5 \left| \frac{D'_k(x,y)}{\sqrt{\sum_{l=2}^5 D'_l(x,y)^2}} - \frac{C_k(x,y)}{\sqrt{\sum_{l=2}^5 C_l(x,y)^2}} \right| \quad (13)$$

F' : 目的関数

$D'_k(x,y)$: 座標 (x,y) での P_k と P_1 の差分照度値

$C_k(x,y)$: 座標 (x,y) での P_k の生成光度

式 13 の目的関数を最小化する座標 (x,y) が照度センサの推定位置となる。

7. 評価実験

7.1 実験概要

本章では外光に対する補正手法の評価を行う。評価はシミュレーションでの実験と実機での実験を行った。シミュレーションでの実験では、天気異なる 3 日分の外光照度履歴と照明からの照度を用いて、検証する。外光がある環境での基本アルゴリズムを用いる場合、外光に対する補正手法を用いる場合、外光がない環境で位置推定を行う場合で比較する。実験環境を図 8 に示す。使用する照度センサはセコニック社製のアナログ照度センサである。図 8 に示すとおり、照度センサ SSn ($n=1,2,\dots,9$) は床上 70 cm

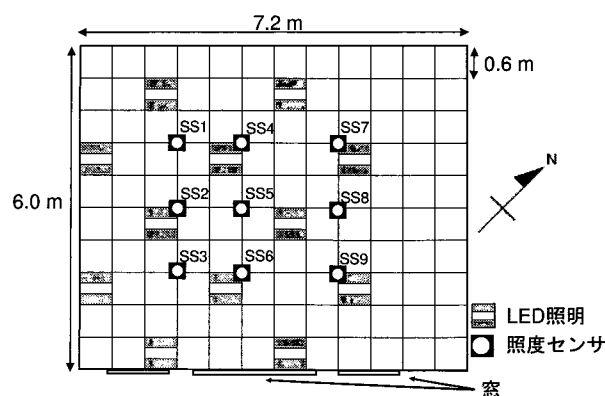


図 8 シミュレーションでの実験環境

の位置で 9 ケ所に配置し、外光がない環境で、点灯グラデーションパターンを点灯し、照明からの照度を取得し、外光がある環境で、1 秒ごとに外光照度を取得する。天気が、晴れ、曇り、雨の 3 日分の外光を取得する。

外光照度を線形補間を用いて 0.1 秒ごとの外光照度履歴を作成する。外光照度履歴の最初を基準点として、0.1 秒間隔で 50 回選択し、1 つのデータセットを作成する。データセットの作成は外光照度履歴の最後まで、基準点を 1 秒ずつずらしてデータセットを作成する。

外光がない環境での照明からの照度にデータセットを加えることで、晴れ、曇り、雨の日における、外光の影響を考慮する環境を再現し、位置推定を行う。

実機での実験では、実際に外光に対する補正手法が有効か実機を用いて検証する。実験環境は図 9 である。図 9 に示すとおり、照度センサ ESn ($n=1,2$) は外光の影響が大きい窓付近の位置に設置する。天気は晴れで、図 5 により、外光照度の変化がある時間が 10 時であるため、10 時に行う。外光がある環境では、NaPiCa 照度センサを Arduino に付けて行い、照度取得間隔は 0.1 秒として、照度を取得する。点灯グラデーションパターンを点灯し、位置推定を基本アルゴリズムを用いる場合と外光に対する補正手法を用いる場合で 8 回ずつ行う。また、外光がない環境でも点灯グラデーションパターンを点灯し、照明からの照度を取得し、位置推定を行う。

7.2 シミュレーションによる実験結果

それぞれの天気の日位置推定結果を図 10-12 に示す。縦軸が一日の推定位置と実際の照度センサの位置の誤差の平均を表し、横軸は照度センサ名を表す。評価には、外光を加えた場合と提案手法を用いた場合および外光を加えなかった場合の結果を用いて行う。

実験結果から晴れの日および、曇りの日に外光に対する補正手法は位置推定精度を最大 50 % 改善している。雨の日は、外光照度の変化が少ないため、雨の日の外光は、位

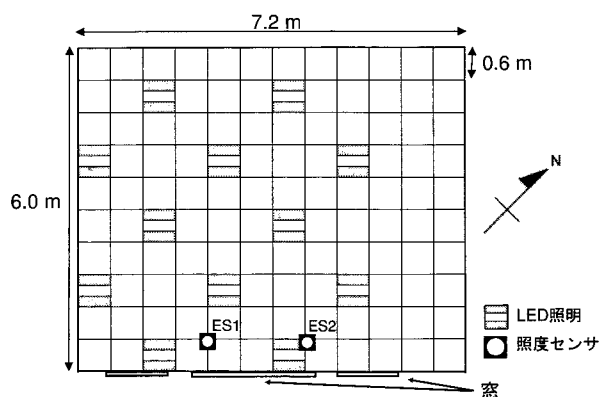


図 9 実機での実験環境

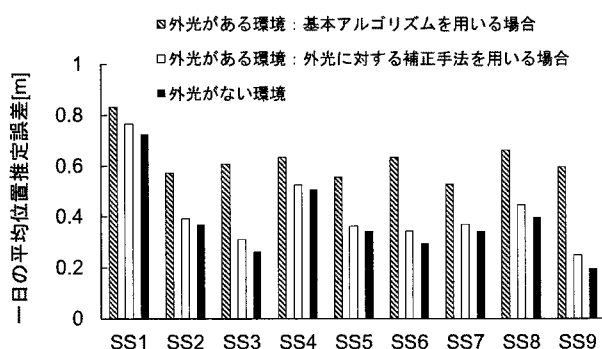


図 10 晴れの日の位置推定結果

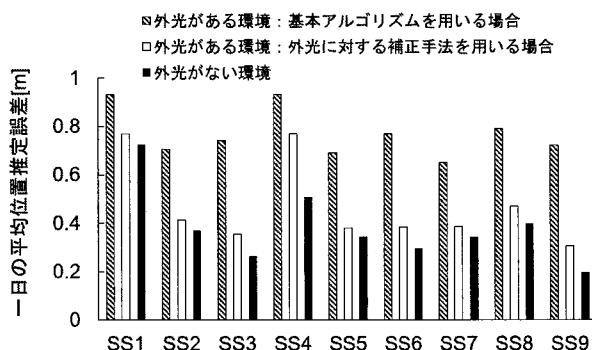


図 11 曇りの日の位置推定結果

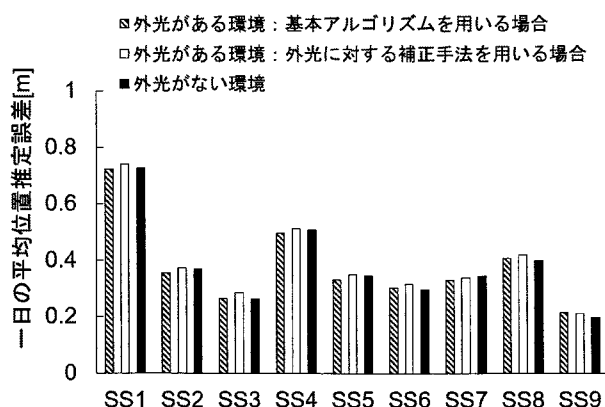


図 12 雨の日の位置推定結果

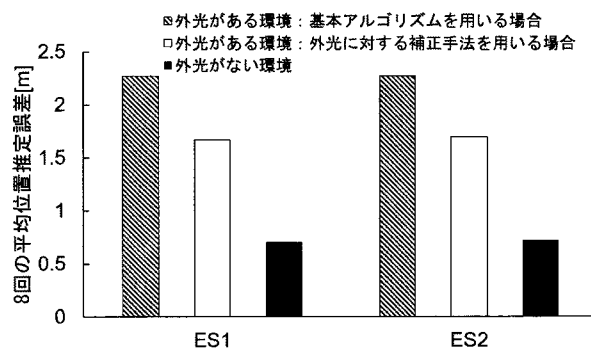


図 13 実機の位置推定結果

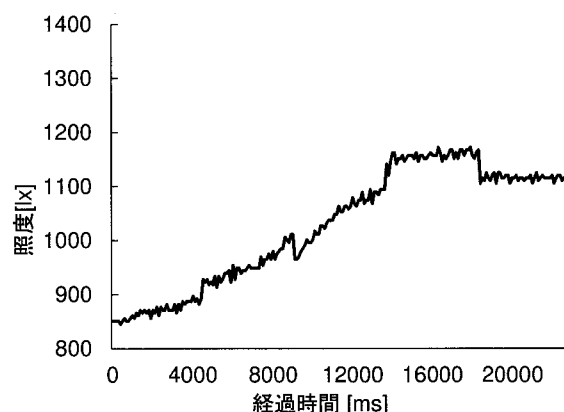


図 14 ES1 の照度取得履歴

位置推定精度に影響が少ない。

7.3 実機による実験結果

ES1 と ES2 の位置推定結果を図 13 に表す。縦軸が 8 回の推定位置と実際の照度センサの位置の平均誤差を表している。外光に対する補正手法は、26 %位置推定精度を改善している。シミュレーションによる実験結果に比べ、位置推定精度の改善率が少ない。

3 回目の ES1 と ES2 の照度取得履歴を図 14 と図 15 に示す。3 回目は ES1, ES2 において位置推定誤差を改善できていない場合である。図 14 と図 15 から 0.1 秒で最大で 15 lx ほどの低下があり、取得照度に乱れが生じている。外光に対する補正手法では、補正する各点灯グラデーションパターンに、各点灯グラデーションパターン点灯開始時の照度を利用している。しかし、各点灯グラデーションパターン点灯開始時の照度のみで補正する場合、取得照度の乱れにより、正確な外光変化量を得ることができない。したがって、シミュレーションでの実験結果に比べ、外光に対する補正手法が位置推定精度を改善していない。

8. 結論と今後の課題

本研究では、外光が存在する環境での照明を用いた屋内位置推定手法を提案した。照明を複数の点灯グラデーションパターンで点灯し、各点灯グラデーションパターンの照

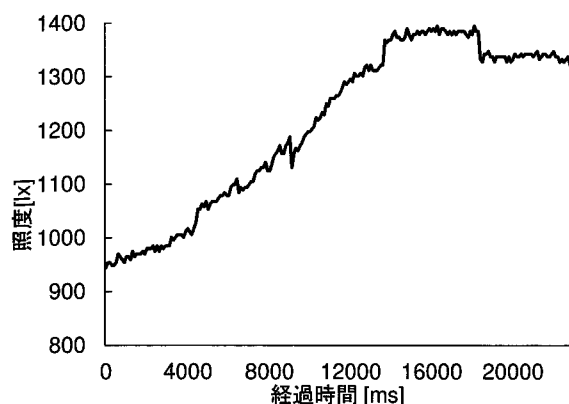


図 15 ES2 の照度取得履歴

度差を用いて、位置推定を行う。しかし、外光照度が点灯グラデーションパターン開始から終了までに変化すると、位置推定精度に影響を及ぼすことが明らかになった。したがって、外光に対する補正手法を提案した。外光に対する補正手法では、各点灯グラデーション点灯開始から終了までの照度差を補正值として、各点灯グラデーションパターン点灯時の照度に加え、位置推定を行う。外光に対する補正手法を天気が晴れと曇りと雨の外光照度履歴を用いたシミュレーションと晴れの日で実機で検証した。シミュレーションの場合、晴れと曇りの日で位置推定精度が最大 50 %改善することが明らかになった。実機の場合、位置推定精度を平均 26 %改善することが明らかになった。

今後の課題として、提案手法は、実験環境の他の位置でも同じような結果が出るかという問題や、他の実験環境においても同じような結果が出るのかということが挙げられる。これらの問題に対し、有効な実験を行い、検証していく必要がある。

参考文献

- [1] Contenti, C.: Digitally addressable DALI dimming ballast, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*, Vol. 2, IEEE, pp. 936–942 (2002).
- [2] BACnet Website: <http://www.bacnet.org>.
- [3] 岩田亮介, ザカント, 阪口啓, 荒木純道: 位置指紋法を用いた Wi-Fi 測位のための位置指紋収集管理システム (Poster session, 国際ワークショップ), 電子情報通信学会技術研究報告. SR, スマート無線, Vol. 114, No. 284, pp. 135–142 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009958746/>) (2014).
- [4] Hu, Y., Liao, X., Lu, Q., Xu, S. and Zhu, W.: A segment-based fusion algorithm of WiFi fingerprinting and pedestrian dead reckoning, *Communications in China (ICCC), 2016 IEEE/CIC International Conference on*, IEEE, pp. 1–6 (2016).
- [5] Ren, Y., Salim, F. D., Tomko, M., Bai, Y. B., Chan, J., Qin, K. K. and Sanderson, M.: D-Log: A WiFi Log-based differential scheme for enhanced indoor localization with single RSSI source and infrequent sampling rate, *Pervasive and Mobile Computing* (2016).
- [6] Zhuang, Y., Yang, J., Li, Y., Qi, L. and El-Sheimy, N.: Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons, *Sensors*, Vol. 16, No. 5, p. 596 (2016).
- [7] 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, Ieee, pp. 775–784 (2000).
- [8] Jin, G.-y., Lu, X.-y. and Park, M.-S.: An indoor localization mechanism using active RFID tag, *Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2006. IEEE International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 4–pp (2006).