Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

照明点灯パターンの切り替えによる高精度な屋内位置推定法とその評価

坂本一樹[†1] 安本慶一[†1] 孫為華[†1]
柴田直樹[†2] 伊藤実[†1]

本稿では，屋内空間における明るさの違いに着目した照度センサを使った屋内位置推定手法を提案する．対象空間において類似の照度を持つエリアが複数存在するという問題に対し，提案手法では，照明点灯パターンを切り替え各地点の照度を変化させる．また，各照明点灯パターンでの各地点の照度を予め計測しておく労力を軽減するため，各照明点灯パターンに対して各地点の照度を算出するモデルを実測値に基づき構築し，各地点の明るさの分布（照度マップ）を求める．提案アルゴリズムでは，センサにより取得した照度を照度マップと比較し，エリアを絞り込む．そして，存在可能エリアを最も絞り込めるような照明点灯パターンを選択し切り替える．これを目標の精度が得られるまで繰り返すことで，最小切替回数で，ユーザの位置を推定する．4つの照明を取り付けたテストベッドでの実験により，照明点灯パターンを平均約 2 回に切り替えるだけで，平均 0.4m の誤差の位置推定ができることを確認した．

Accurate Indoor Localization with Light Intensity Sensor by Switching Lighting Patterns and its Evaluation

Kazuki Sakamoto,[†1] Keichi Yasumoto,[†1]
Weihua Sun,[†1] Naoki Shibata[†2] and Minoru Ito [†1]

In this paper, we propose an indoor localization method based on the difference of light intensity in indoor space. To tackle a challenge that indoor space has multiple areas with similar light intensity, the proposed method enforces change of light intensity at each point of the target space by switching lighting pattern. Then to reduce the labor for measuring the intensity over the target indoor space for each lighting pattern, we build a model which calculates the light intensity at each point of the target space for each lighting pattern from a small number of actual measurements so that light intensity distribution over the space (called light intensity map) is instantly obtained. In the proposed algorithm, a value obtained by the light intensity sensor is searched in the corresponding light intensity map and estimation area is narrowed. The algorithm selects the lighting pattern so that the resulting estimation area is the minimum among all patterns. By repeating the above process, we estimate the user's location within the specified error by the minimum switching times. We applied the proposed method to a testbed with four illumination devices, and confirmed that our method estimates location with about 0.4m error by about twice lighting pattern switching.

1. まえがき

近年，情報通信技術を用いたユーザ行動支援サービスが多数提案，実装されている．中でも，ユーザやモノの位置情報の取得と利用を前提とするサービスが注目を集めている．主な例として，屋内ナビゲーション[1)] や拡張現実感[2)] を用いた情報推薦，局所的な空調・照明による省エネ家電制御[3)] が挙げられる．

屋内で位置情報を取得する方法が多数提案されている[4)]．複数の Wi-Fi 基地局からの電波強度をもとに位置推定を行う方式[5)] は，追加のセンサやデバイスが必要ないという点で低コストであるが位置推定精度が 5-6m 程度にとどまる．一方，超音波センサを多数設置する方式[6)] では，位置推定精度が数 cm 程度と高いものの，導入コストが高い．そのため，上記で述べたサービス（AR や家電スポット制御など）に必要なある程度高精度な屋内位置推定を低コストに実現する方法が必要である．

本稿では，1m 以内程度の比較的高精度な位置情報を利用する屋内向けサービスの実現を目指し，対象屋内空間の各地点の明るさの分布に基づく，高精度な屋内位置推定手法を提案する．提案手法では，安価な照度センサと予め対象空間に設置されている照明装置をそのまま利用するため，低コストで実現できるというメリットがある．提案手法では，対象空間には複数の照明装置があり，点灯状況（**照明点灯パターン**と呼ぶ）の取得および各照明装置の ON・OFF が遠隔から行えるものとする．各照明点灯パターンに対し，対象空間の各地点の照度を記録したものを**照度マップ**として作成する．位置推定を行う際，ユーザの照度センサが計測した照度を現在の照明点灯パターンの照度マップと照合し，最も照度が近い位置

†1 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology
†2 滋賀大学
National University Corporation Shiga University

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

を推定位置として出力する．

しかし，照明装置の設置位置の規則性により部屋の中で類似の照度を持つエリアが大きいまたは複数存在する場合がある．そこで，照明点灯パターンを短い時間間隔で変化させることで，照度の変化を生じさせ，変化後の照度から位置を推定できるようにする．その際，ユーザに不快感を与えないように，ユーザの位置推定までにかかる照明点灯パターン変更回数が最も少なくなるようなアルゴリズムを提案する．

また，各照明点灯パターンに対する照度マップを作成する手間を軽減するため，照明装置の位置，種類，照度から，各照明点灯パターンに対する各地点の照度を算出するモデル（**照度モデル**と呼ぶ）を実測値に基づき構築する．このモデルに照明点灯パターンと各地点を入力することで，その地点の照度を算出し，オンデマンドで照度マップを作成する．提案アルゴリズムでは，センサにより取得した照度を照度マップと比較し，エリアを絞り込む．その際，エリアを最も絞り込めるような照明点灯パターンを選択し切り替える．これを指定した精度が得られるまで繰り返すことで，最小回数の照明点灯パターンの切り替えで，ユーザの位置を推定する．

評価実験として，照明装置が 4 箇所に設置された部屋で実験を行い，位置推定精度および切替回数の評価を行った．その結果，照明点灯パターンを平均約 2 回に切り替えるだけで，平均約 0.4m の誤差で，ユーザの位置を推定することができた．

2. 関 連 研 究

2.1 測距および三辺測量法を用いた手法

近年では，基準点となる幾つかの無線局（アンカーノード）との無線通信状況（受信電波強度）を基に測位を行う方法（レンジベース位置推定法）が多数提案されている[7][8][9]．身近な無線通信デバイスである A-GPS（Assisted Global Positioning System）[10]，3G，Wi-Fi，RFID などを使った位置推定では，実現のコストがあまりかからないメリットがあるが，電波の反射・回折のため推定精度は 5–10m にとどまり，本稿が目指す位置推定精度には不十分である．また，電波の反射・回折に強い，UWB（Ultra Wideband）を使った屋内位置推定[11] がある．UWB では，遅延して到達する到来波を時間軸上で個々に識別でき，到来波の時間軸分解能が高いことと障害物への電波の貫通性が高いことから，無線 LAN と比較して，推定誤差を小さくすることができる．しかし，位置推定精度は約 1–10m と Wi-Fi ベースの手法や A-GPS より改善されているものの，本稿が目指す精度には不十分である．

Active Bat は，天井に設置された複数の超音波センサとユーザが持つ受信機を使って位置推定を行うシステム[6] であり，回折や減衰が起こりにくい超音波通信デバイスを多数利用し，TOA（Time Of Arrival）および三辺測量を用いて高精度な位置推定を実現している．このシステムでは，95%の確率で 0.03m 以内の誤差での位置推定ができる．しかし，超音波センサのデバイスおよび設置コストが高いという問題がある．

2.2 フィンガープリンティングを用いた手法

フィンガープリンティングとは，対象空間の様々な地点で特徴量（センサ値）を事前に計測しデータベース化しておき，位置推定したい地点で取得した特徴とデータベースを比較し，最も近いところを推定位置にする手法である．様々なセンサとフィンガープリンティングを組み合わせた位置推定手法がいくつか提案されている[4]．

Azizyan らは，照度・色・音・Wi-Fi・加速度センサといった安価なセンサを組み合わせ，ユーザの位置推定を行なった[12]．このシステムでは，複数ある部屋の中のどの部屋にユーザがいるのかを 87%の正解率で推定できる．N.Ravi らは，安価なセンサである照度センサだけを使って位置推定を行なった[13]．このシステムでは，部屋に設置されている照明装置の照度を用いて，複数ある部屋の中のどの部屋にユーザがいるのかを 90%の正解率で推定できる．これらの既存研究は，新たにインフラ側にデバイスを設置する必要がないという利点を持つが，部屋内の位置を推定するような精度の高い推定は難しい．

梶らは，インフラ側に設置された無線 LAN の計測信号情報を GMM（Gaussian Mixture Model）としてモデル化し，位置推定を行う屋内位置情報基盤 indoor.Locky を開発した[5]．このシステムでは，50m 四方程度のフロアに対して最低 10 個程度の基地局が必要であり，$100m^2$ につき 5 箇所程度で計測すると，作業コストと位置推定精度のバランスが最も高くなり，推定精度が 6m 程度になることが報告されている．Matic らは，インフラにある Wi-Fi と新たに設置した FM 信号を組み合わせた位置推定手法を提案している[14]．この手法では，$50m^2$ の空間において，平均 0.93m の推定誤差（Wi-Fi ＋ FM）で位置を推定することができるが，FM トランスミッタをインフラ側に設置しないといけないことや本稿で目指す推定精度を満たしていない．

2.3 提案手法の新規性

既に述べたように，既存研究のほとんどは推定精度が低く，屋内でのあらゆる位置依存サービスの実現に利用するのは難しいと考えられる．また，Active Bat のように推定精度が高いものもあるが，高価かつ特殊なデバイスを新たに設置する必要がある．本稿では，安価な照度センサと既設の照明装置を利用し，照度の違いを利用した比較的精度の高い位置推定を実現する点，フィンガープリンティングで問題となる事前計測のコストを減らす方法を

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

提案している点で既存研究と異なっている．

3. 照度に基づいた屋内位置推定問題と解決の基本方針

本章では，想定環境と位置推定のための前提条件を示し，解決すべき課題を明らかにするとともに解決のための基本方針を述べる．

3.1 想定環境と前提条件

対象空間，対象エリア，照明装置，ユーザ，照度センサに対して，以下のような前提条件を設定する．

3.1.1 対 象 空 間

複数の照明装置が設置されている一般的な部屋を**対象空間**とする．対象空間内で，位置推定を行うエリア（対象空間の部分エリア）を**対象エリア**と呼ぶ．対象空間に対して，以下の前提条件が成り立つものとする．

- 部屋の形状が既知
- 照明装置は全て同一のものを使用
- 照明装置の種類・位置が既知
- 各照明装置には，点灯 (ON) と消灯 (OFF) の 2 状態が存在
- 照明装置の状態の変更と状態の取得が可能

3.1.2 ユーザと照度センサ

ユーザは照度センサを携行しており，対象エリア内を移動する．照度センサについての前提条件を以下に示す．

- 照度センサはユーザの影や付ける位置の影響を受けない
- ユーザの位置を照度センサの位置とする

3.2 位置推定問題

対象空間および対象エリアをそれぞれ，A，$A' \subseteq A$ とする．A に設置された照明装置の個数を n とし，照明装置の集合を $L = \{l_1, ..., l_n\}$ と表記する．L の照明点灯パターンを n ビットの 2 進数で表す（1 の場合点灯，0 の場合消灯）．照明点灯パターンの集合を P とする．各照明点灯パターン $p \in P$ について，A' 内の各地点の照度が予め計測されているとする．それを p の**照度フィンガープリント**と呼び，$FP(p)$ と表記する．

本稿が対象とする問題は，対象空間 A，対象空間の部分エリア A'，各照明点灯パターン $p \in P$ に対する照度フィンガープリント $FP(p)$ が与えられた時，A' 内にいる照度センサを携えたユーザ u の位置を推定することである．

3.3 解決すべき課題

対象問題を解く上での課題は次の 2 点である．

(1) 対象エリア内には類似した照度のエリアが複数存在すること
(2) 全ての照明点灯パターンに対する照度フィンガープリントを事前に作成するコストが大きいこと

3.3.1 類似した照度のエリアが複数存在する課題

図 1 に示すように，照度は，光源からの距離に応じて低くなっていく．また，図 2 に示すように，点灯している照明装置が複数ある場合，各地点の明るさは，各照明装置が単体で各地点を照らす明るさの合計で表される．しかし，一般的な部屋では，照明装置が規則的に設置されていることが多く，類似した照度（図では，300Lux と 400Lux）を有するエリアが複数存在する可能性が高い．そのため，ある 1 つの照明点灯パターンでの照度の計測だけではユーザがどこにいるのかを正確に推定することができない．

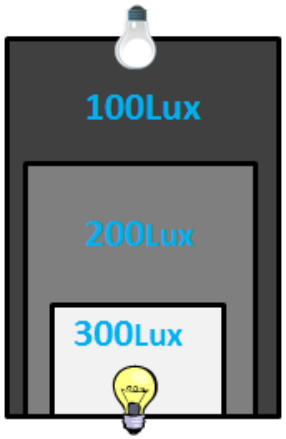


図 1 照明点灯時の照度の分布

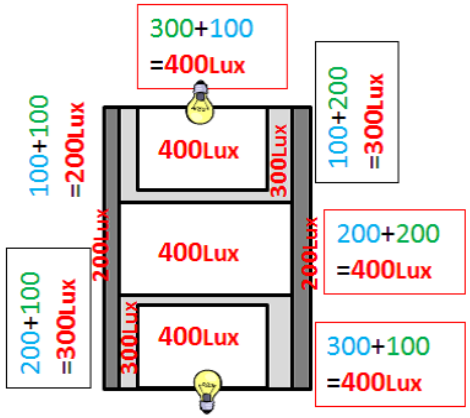


図 2 複数照明点灯時の照度の分布

3.3.2 照度フィンガープリント作成コストが大きい課題

全ての照明点灯パターンに対する照度フィンガープリントを事前に作成することができれば，推定精度が良くなる反面，手間がかかってしまう．一方，照度フィンガープリントが十分でなければ，推定精度が悪くなってしまう問題が挙げられる．

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

一般的に，部屋の中に設置された照明装置が n 個あるとすると，照明点灯パターンは 2^n-1 パターン存在する（すべて消灯のパターンは除く）．対象空間の対象エリアが k 個の点の集合で表す場合，$k \times (2^n-1)$ 回の計測が必要となり，計測のコストは大きい．

4. 照度に基づいた屋内位置推定アルゴリズム

本章では，3 章で述べた問題に対して，解決の基本方針を示し，照明装置の切り替えに基づいた屋内位置推定のアルゴリズムを設計する．

4.1 基 本 方 針

提案手法では，ユーザの位置を推定するとき，まず，ユーザの持つセンサから取得される現在地点の照度 lx，照明装置の切り替えパターン pt を取得する．そして，$FP(pt)$ から，lx の照度を持つエリアを取得する．しかしながら，先に述べたように，一般的に，対象空間内には類似した照度を持つ地点が複数存在しているため，一意に地点を決定することは困難である．

そこで，本稿では，対象空間内にある照明点灯パターンを切り替えることで，照度を変化させるというアプローチをとる．この変化を利用すれば，類似した照度をとる場所であっても，ユーザの位置を絞り込める可能性が高くなる．その際，照明装置の切り替えによるユーザの不快度を抑制するため，最小回数の照明装置の切り替えでユーザの位置を推定するようなアルゴリズムを 4.3 節で考案する．

上記のアプローチを実現するには，n 個の照明装置の 2^n-1 通りの照明点灯パターンのそれぞれに対し，照度フィンガープリントが必要になる．照明装置の個数が増えたり，対象エリアが大きくなると，急激に計測のためのコストが大きくなるという問題がある．そこで，任意の照明点灯パターンに対し，部屋の任意の地点の照度を算出可能なモデルを，幾つかの照明点灯パターンにおける幾つかの地点での照度の実測により構築する方法を 4.2 節で考案する．

4.2 照度フィンガープリント作成コストの削減

各照明点灯パターンに対する照度フィンガープリントの作成コストを抑制するため，照明装置と照度センサの距離を与えるだけで任意の位置での照度を導くことができる照度モデルを構築する．照度の実測値を基に，現在点灯している照明装置 $l \in L$ と指定した位置との距離を入力値 x として，その位置での予測照度を出力する関数 $lux_l(x)$ を定義する．なお，l が消灯しているときの照度は 0 とする．今回，一つの照明装置 l を点灯させているときに，異なる距離の地点を何地点か選択して照度を計測し，距離と照度の曲線回帰により照度モデル $lux_l(x)$ を構築する．

対象空間内に複数の照明装置が設置されている場合，ある地点の照度は各照明装置が単独で示す照度の和になる．よって，複数の照明装置 L に対する地点 p の照度 $Lux_L(p)$ は式（1）で定義される．ここで，$on(l)$ は，照明装置 l が ON のとき 1，OFF のとき 0 を返す関数，$dist(p,l)$ は地点 p と照明装置 l の間の距離である．

$$Lux_L(p) = \sum_{l \in L} lux_l(dist(p,l)) \cdot on(l) \quad (1)$$

式（1）を利用することで，照明点灯パターンがどれであっても，対象空間内のどの地点の照度でも瞬時に算出することができる．本稿では，照度モデルを作成するために 1 つの光源から異なる距離の K 箇所（適切な K の値は予備実験などにより経験的に決めることを想定している）での照度の計測だけを行う．よって，本来 $k \times (2^n-1)$ 回必要な計測を，K 回の計測に削減している．ここで，$K << k \times (2^n-1)$ である（ここで，k は対象エリア内の全ての地点数であり，$K < k$ である）．

このモデルを用いて，人工的に照度フィンガープリントを作成する．ただし，照度モデルが算出する照度は誤差を含むと考えられる．この誤差を吸収するため，事前に設定した照度幅（例えば 20Lux）による照度区間（20-40Lux など）で対象エリアを区切った照度分布（**照度マップ**と呼ぶ）を作成する．照度マップの例を図 3 に示す．

照度マップから，計測照度を含む照度区間を持つエリアと現在までに絞り込まれたエリアの共通部分を計算することでユーザが存在する可能性があるエリアを絞り込む．この際，照度マップにおける各照度区間の照度幅をいくらに設定するかは重要な問題である．照度幅を大きく取れば，対象エリアを絞り込むのが難しくなり，小さく取れば，照度モデル自身の誤差により**位置推定誤差** (error)（誤差と呼ぶ）が大きくなってしまう．本稿では，5.2.2 項で述べる予備実験により，最適な照度幅を求める．

4.3 最小回数の照明点灯パターン切り替えによる位置推定アルゴリズム

提案手法において，対象エリアから絞り込んだ推定位置の範囲を**存在可能エリア**と呼ぶ．提案手法では，ユーザの存在可能エリアを絞り込むために，部屋に設置された照明装置の照明点灯パターンを切り替える．目標は，照明点灯パターンを必要最小回数に切り替えて，目標の誤差以内でユーザの位置を推定することである．アルゴリズムを Algorithm1 に示す．

本アルゴリズムでは，はじめに，これまでに絞り込んだ存在可能エリア $Area$，照明点灯パターンの集合 PT，照明点灯パターンの切替回数 cnt を初期化する（1–3 行目）．ここで，$TargetArea$ は対象エリアであり，$MaxSwitch$ は照明点灯パターンを切り替えることので

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

きる最大回数である．次に，現在の照明点灯パターン pt を取得し，ユーザの携帯する照度センサで照度 lux を計測する（4–5 行目）．新しい存在可能エリアは $Area$ と pt と lux から計算され，更新された存在可能エリアの中心を推定位置とする（6–7 行目）．

位置推定精度 (precision)（精度と呼ぶ）は存在可能エリアの中心とエリア内の最遠地点との距離として計算され，予め設定した閾値 $Threshold$ 以下もしくは，未使用の照明点灯パターンがなくなるまで上記の処理を繰り返す（8，15 行目）．ループ内では，存在可能エリアをさらに絞り込むために，現在の存在可能エリア $Area$ を最も細かく分割できるような照明点灯パターンを探索する（9 行目，$findBestLightingPattern$）．ここでは，PT の各パターンに対し，$Area$ の各地点の照度を照度モデルから計算し，$Area$ 内の照度の最大値，最小値，中央値を求める．そして，中央値と最大値または最小値の差が最も大きくなる（すなわち，照度マップにおける照度幅による分割数が最も多くなると予想される）照明点灯パターン pt を選択する．次に，実際に照明点灯パターンを pt に切り替え（10 行目），照度を取得し（11 行目），存在可能エリアを絞り込む（12 行目）．そして，cnt を 1 減らし，使用した照明点灯パターン pt を PT から除外する（13–14 行目）．最終的に，絞り込まれた存在可能エリアの中心を推定位置とする（16 行目）．

Algorithm 1 照明装置切り替えによる位置推定アルゴリズム

```
1:  Area ← TargetArea
2:  PT ← {1, ..., N}
3:  cnt ← MaxSwitch
4:  pt ← getLightingPattern()
5:  lux ← getLux()
6:  Area ← findArea(Area, FPDB(pt), lux)
7:  loc ← Center(Area)
8:  while (Error(loc, Area) > Threshold) ∧ (cnt > 0) do
9:      pt ← findBestLightingPattern(Area, PT)
10:     changeLightingPattern(ls)
11:     lux ← getLux()
12:     Area ← findArea(Area, FPDB(pt), lux)
13:     cnt ← cnt − 1
14:     PT ← PT − {pt}
15: end while
16: loc ← Center(Area)
```

4.3.1 Algorithm1 の動作例

4 つの照明装置が設置された部屋において，図 4 に示すような 4 つの照明点灯パターン（パターン 1–4）および照度マップを用いて，提案アルゴリズムの動作を詳細に説明する．なお，最初に切り替える照明点灯パターン（**初期点灯パターン**と呼ぶ）はパターン 1 とし，最小回数の照明装置の切り替えで，ユーザの位置を推定する．

図 5 に示すように，存在可能エリアを絞り込むために，現在の照度と照明点灯パターンを取得し，照度マップと比較することで，その照度を含む照度区間に対応するエリア（図 3 参照）を存在可能エリアとする（1–6 行目）．次に，その存在可能エリアの中心（星印）を暫定的な推定位置として求める．図中の矢印は存在可能エリア内の中心と最も離れた地点の最大半径を表している（7 行目）．存在可能エリアの最大半径が目標精度以下になれば，現在の存在可能エリアの中心を最終的な推定位置として出力する（8，15 行目）．

目標精度以内を達成していなければ，図 6 に示すように，未使用の各照明点灯パターンの照度マップを現存可能エリアに重ね合わせた後の分割状況を見て，どのパターンに切り替えれば，最も存在可能エリアを絞り込めるかを決定する（例えば，パターン 2，3 は 3 つ，パターン 4 は 4 つの領域に分割される）（9 行目）．今回の動作例では，パターン 4 が次に切り替える照明点灯パターンとなる（10–14 行目）．同様の操作を繰り返し，パターン 3，パターン 2 が順番に適用され，最終的に目標誤差が達成されると推定位置を出力し，アルゴリズムは終了する．

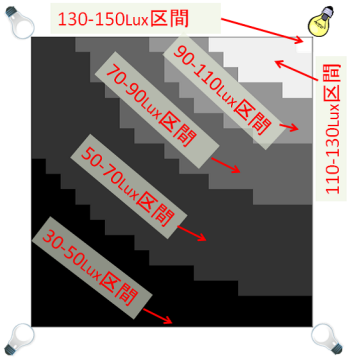


図 3 照度の分布（照度マップ，20Lux 幅）

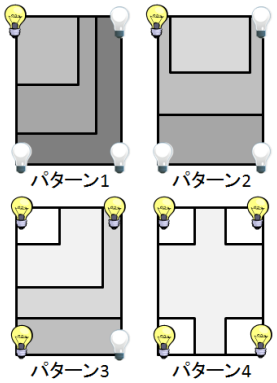


図 4 照明点灯パターンと対応する照度マップ

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

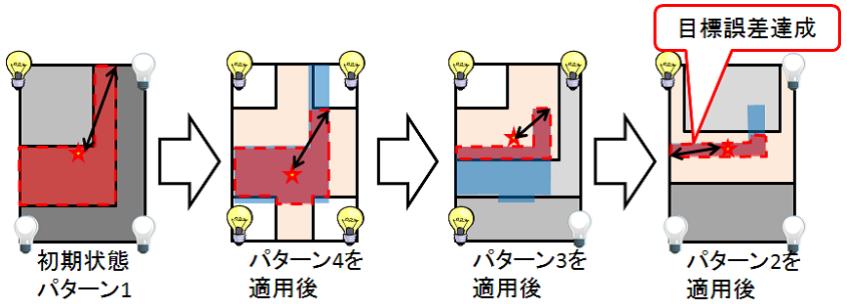


図 5 存在可能エリアの絞り込みの様子

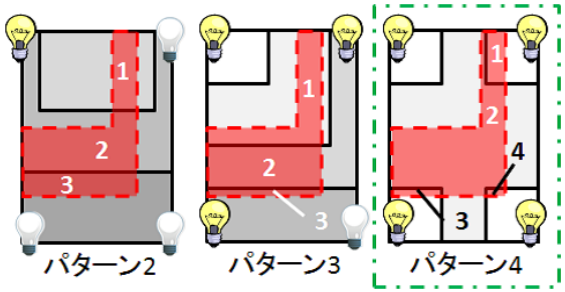


図 6 照明点灯パターンの選択方法

5. テストベッドの構築と予備実験

本章では，評価実験を行うためのテストベッドと照度モデルの誤差や照度マップ作成時の最適な照度幅を調べる予備実験について述べる．

5.1 テストベッドの詳細

図 7 に示すような部屋をテストベッドに用いた．部屋の大きさは，3.0×4.4×2.8m（横 × 縦 × 高さ）である．その部屋の中から，対象空間と推定エリアを設定した．対象空間の大きさは，2.0×3.5m，推定エリアの大きさは 1.8×1.8m の大きさである．今回，使用した照明装置のフロアライトは部屋に 4 つ設置されており，電球には，Panasonic 製のシリカ電球 (60 形 100 ボルト) を使用した．

また，実験には，照度センサ自体に照度指向性が存在しているため，図 8 に示すような照度センサ（パナソニック電工製の NaPiCa リードタイプ[15]）にピンポン玉をカットしたものを被せた小型デバイス（Arduino[16]）を用いた．

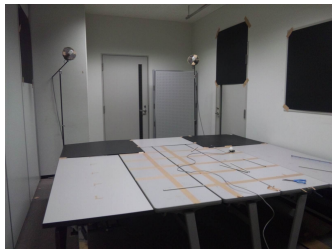


図 7 テストベッドに用いた部屋



図 8 Arduino と照度センサ（センサの指向性を抑制するためピンポン玉を装着）

今回用いた照明装置は，自動で点灯・消灯を制御できない．そこで，各照明装置を遠隔で操作できるように，赤外線の受信機[17] を 4 つ取り付けた．また，対となる赤外線の送信機クロッサム 2+USB（現在製造中止）は，パソコンにハブを介して 4 つ取り付けた．

5.2 予 備 実 験

5.2.1 照度モデルの誤差

照度モデルの精度を調べるため，幾つかの照明点灯パターンに対し，照明装置からの距離が異なる幾つかの地点での照度を測定し，照度の実測値と推定値の誤差を求めた．今回は，図 4 に示すパターン 1 のような 1 つの照明装置を ON にしているときに，対象エリアから任意に選択した 10 地点（地点数は対象エリアの大きさおよび距離による照度の変化度合いから経験的に決定）から式（2）に示す照度モデルを求めた．

$$lux_l(x) = 197.32 \times x^{-1.49} \quad (2)$$

次に，この照度モデルが算出する照度の誤差を計測した．今回，図 4 の 2 つの照明点灯パターン（パターン 3，4）に対し，10 地点における実際の照度を計測し，モデルにより算出した照度と比較した．結果を表 1 と図 9，10 に示す．

これらの結果から，実際の照度と照度モデルから計算した照度の誤差平均は 4.0Lux，最大誤差は 11.8Lux，最小誤差は 0.2Lux であった．点灯している照明装置の数が多いほど誤差が大きくなっていることがわかる．

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

表 1 照度モデルと実測照度の比較

	照明点灯パターン 3			照明点灯パターン 4		
位置	実際の照度（Lux）	モデルの照度（Lux）	誤差（Lux）	実際の照度（Lux）	モデルの照度（Lux）	差（Lux）
P_1	160.3	162.2	1.9	227.5	229.6	2.1
P_2	144.4	144.5	0.2	232.6	228.7	3.9
P_3	159.6	157.0	2.6	227.9	222.7	5.3
P_4	143.4	142.0	1.4	224.4	217.2	7.2
P_5	174.2	167.8	6.4	229.8	219.8	10.0
P_6	158.2	158.0	0.2	223.0	218.4	4.6
P_7	181.2	173.8	7.4	234.5	222.7	11.8
P_8	172.1	169.5	2.6	227.7	221.1	6.6
P_9	198.8	189.5	9.3	240.4	229.6	10.8
P_{10}	180.5	179.6	0.9	227.9	225.3	2.6

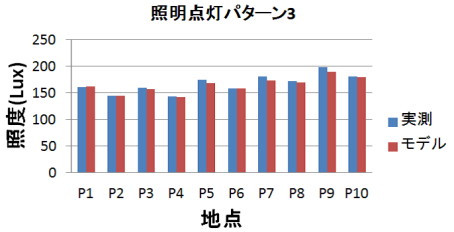


図 9 照度モデルによる予測照度と実測照度の比較（照明点灯パターン 3）

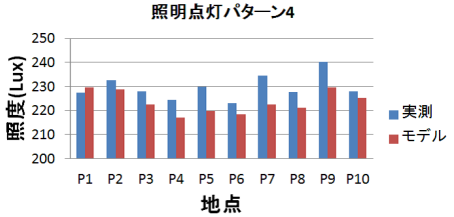


図 10 照度モデルによる予測照度と実測照度の比較（照明点灯パターン 4）

5.2.2 照度マップ作成時の最適な照度幅の調査

本稿では，候補地点を絞り込むため，各照明点灯パターンに対する照度マップを作成するが，照度マップには，照度の違いによりエリアを複数のサブエリアに分割するための照度の幅を設定している．この照度幅は照度モデルの誤差の影響を受けないように設定しなければならない．本稿における，誤差とは，図 11 に示すような実際の位置と存在可能エリアの中心（推定位置）との差を表すものとする．また，精度とは，最終的に絞り込まれた存在可能エリアの最大半径（中心と最遠地点との距離）とする．適切な照度幅を見つけるため，任意の 2 地点において，照度幅を変化させ，そのときの精度（m），誤差（m），照明装置の切替回数（回）を計測した．その結果，照度幅が 30Lux のときに誤差を小さくかつ切替回数を少なくできることがわかったので，6 章の評価実験では，照度幅を 30 に固定して実験を行う（例えば，取得された照度が 40Lux なら，存在可能エリアを絞り込む照度区間を 25–55Lux とする）．

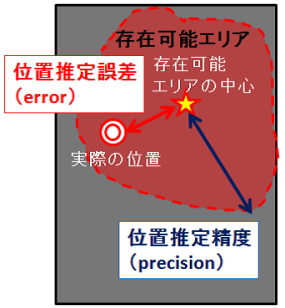


図 11 位置推定誤差（error）と位置推定精度（precision）

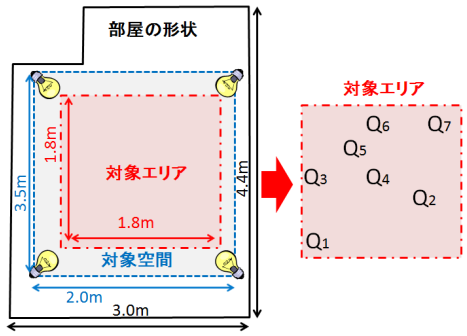


図 12 計測を行った対象エリア内の 9 地点

6. 評　　価

本章では，提案手法による位置推定の誤差および精度を 5 章のテストベッドを用いて，ユーザ位置推定の精度，誤差，切替回数・時間評価した．

6.1 位置推定の誤差，精度，切替回数・時間の計測結果

提案手法により，位置推定までにかかった照明装置の切替回数・時間と推定位置の精度・誤差を求める．初期点灯パターンは図 4 の 4 パターンとし，目標精度は 0.5m で実験を行った．図 12 に示す推定エリアから任意の 7 地点を選択し，4 パターンの初期点灯パターンごとの各地点における精度，誤差，切替回数・時間を 4 回ずつ計測した．各地点における実験結果の最大・平均・最小を表 2，図 13 に示す．さらに，初期点灯パターンごとの実験結果の最大・平均・最小を図 14 に示す．

表 2 各地点（Q_1–Q_7）における計測結果の最大・平均・最小

	精度（m）			誤差（m）			切替回数（回）			時間（秒）		
地点	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小
Q_1	0.45	0.35	0.10	0.58	0.36	0.19	3	1.8	1	9.32	6.48	4.55
Q_2	0.49	0.36	0.25	0.76	0.45	0.10	3	2.2	1	9.95	7.19	4.32
Q_3	0.49	0.37	0.26	0.63	0.49	0.34	2	1.6	1	7.35	5.95	4.24
Q_4	0.49	0.37	0.19	0.73	0.46	0.28	4	1.9	1	11.96	6.75	4.56
Q_5	0.49	0.41	0.28	0.49	0.37	0.30	2	1.3	1	7.23	5.04	4.29
Q_6	0.49	0.41	0.27	0.32	0.25	0.18	1	1	1	4.96	4.51	4.21
Q_7	0.42	0.31	0.15	0.53	0.40	0.23	1	1	1	5.43	4.44	4.25

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-MBL-61 No.26
Vol.2012-UBI-33 No.26
2012/3/13

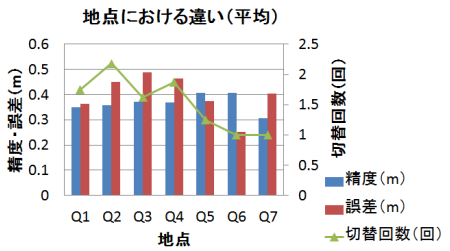


図 13 地点の違いによる実験結果

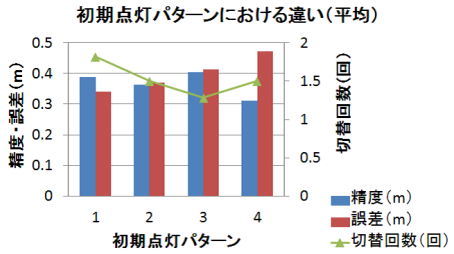


図 14 初期点灯パターンの違いによる実験結果

以上の結果から，目標精度 0.5m のとき，精度は全ての地点において 0.5m 以下にすることができた．そして，平均で切替回数約 2 回（5.76 秒），精度 0.37m，誤差 0.4m で位置推定することができた．また，最悪の場合でも，目標精度を達成することができ，切替回数が 4 回（11.96 秒）で，精度 0.49m，誤差 0.76m で位置推定することができた．

7. ま と め

本稿では，屋内での照度の違いに着目した高精度な屋内位置推定手法を提案した．提案手法では，照明点灯パターンを短い時間間隔で変化させることで，照度の変化を生じさせ，変化後の照度から位置を推定できるようにした．その際，各照明点灯パターンでの各地点の照度を予め計測しておく労力を軽減するため，各照明点灯パターンに対して各地点の照度を算出するモデルを実測値に基づき構築し，照度マップを求めた．また，ユーザに不快感を与えないように，ユーザの位置推定までにかかる照明点灯パターン変更回数が最も少なくなるように存在可能エリアを絞り込み，位置を推定した．その結果，照明点灯パターンを平均約 2 回に切り替えるだけで，平均約 0.4m の誤差で，ユーザの位置を推定することができ，目標推定誤差 0.5m 以内を達成できた．

今後の課題として，対象空間内に窓がある場合のモデルやユーザの立ち位置による影の影響を考慮したモデルを構築することや照度センサを部屋に埋め込むことで，照度推定モデルの構築なしに位置推定を行う方法を考案することが挙げられる

参 考 文 献

1) 高梨郁子, 石渡要介, 斎藤謙一, 久永聡, 田中聡, 山路晃徳, 秋間文和．“屋内ナビゲーションシステムに関する一考察”．情報処理学会　高度交通システム研究会報告, Vol. 2006-ITS-24, No.1, pp. 87–92, 2006.
2) 頓智ドット株式会社．“sekai camera”．http://support.sekaicamera.com/ja/service.
3) パナソニック株式会社．“エコナビ”．http://panasonic.jp/aircon/point/econavi/.
4) Y.Gu, A.Lo, and INiemegeers. “a survey of indoor positioning systems for wireless personal networks”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.11, No.1, pp. 13–32, 2009.
5) 梶克彦, 河口信夫．“gmm に基づく無線 lan 位置推定精度と電波観測情報の関連評価”．マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO）シンポジウム, No.1, pp. 449–455, 2011.
6) A.Ward, A.Jones, and A.Hopper. “a new location technique for the active office”. *IEEE Personal Communications*, Vol.4, No.5, pp. 42–47, 1997.
7) P.Bahl and V.Padmanabhan. “radar: An in-building rfbased user location and tracking system”. In Proceedings of the International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Vol.2, pp. 775 – 784, 3 2000.
8) N.Priyantha, A.Chakraborty, and H.Balakrishnan. “the cricket location-support system”. *Proceedings of ACM MobiCom*, pp. 32–43, 8 2000.
9) D.Niculescu and B.Nath. “ad hoc positioning system (aps)”. *In IEEE GLOBECOM*, Vol.5, pp. 2926 – 2931, 2001.
10) G.M. Djuknic and R.E. Richton. “geolocation and assisted gps”. *IEEE Computer*, Vol.2, pp. 123–125, 2001.
11) Chong Chia-Chin, Guvenc Ismail, 渡辺富士雄, 稲村浩．“屋内位置情報サービスを実現する uwb を用いた測距・測位技術”．NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol.17, No.1, pp. 40–46, 4 2009.
12) M.Azizyan, I.Constandache, and R.Roy Choudhury. “surroundsense: mobile phone localization via ambience fingerprinting”. *In MobiCom*, pp. 261–272, 2009.
13) N.Ravi and L.Iftode. “fiatlux: Fingerprinting rooms using light intensity”. *In Pervasive*, 2007.
14) A.Matic, A.Papliatseyeu, V.Osmani, and O.Mayora-Ibarra. “tuning to your position: Fm radio based indoor localization with spontaneous recalibration”. *In Proc. of IEEE PerCom*, pp. 153–164, 2010.
15) 株式会社パナソニック電工．“照度センサ napica”．http://panasonic-denko.co.jp/ac/download/control/sensor/illuminance/catalog/bltn_jpn_ams.pdf?via=ok.
16) ARDUINO．“arduino uno”．http://www.arduino.cc/.
17) 株式会社ディジタルプラン．“リモコンセント vi（シックス）”．http://www.digitalplan.co.jp/oh1236240596.html.

© 2012 Information Processing Society of Japan