

照度，色温度を用いた屋内エリア推定手法の検討

市川 燿^{1,a)} 間 博人^{2,b)} 奥西 亮賀^{1,c)} 三木 光範^{2,d)}

概要：近距離無線通信や可視光通信を利用したユーザーの屋内位置推定手法が現実味を帯び、屋内位置情報サービスの普及に期待が集まっている。これらの手法は、送受信に特殊な機器が必要な場合が多く、コストがかかる点が問題である。本研究では、既存の室内照明の照度および色温度を制御することで相対的な位置を推定する手法として、光度を用いた相対位置推定手法および色温度を用いた相対位置推定手法を提案する。光度・色温度を用いた相対位置推定手法は、天井照明の点灯パターンを複数用意して切り替えることで高速に相対的な位置を推定する手法である。場所により段階的に光度と色温度を調整することで、センシングした値の変化の度合いから位置の推定が可能である。この光度・色温度を用いた相対位置推定手法を実装し、オフィスを模した実空間上でセンサ間のユークリッド距離と実距離の関係を評価した。結果として、5ステップでセンサ間のユークリッド距離と実距離に相関があり、相対的な位置推定が可能であることを明らかにした。

1. はじめに

近年、屋内の位置に依存したサービスが注目をあびている [1][2][3]。照明を用いた屋内位置情報サービスとしてフィリップスは、スーパーマーケットなどの小売店を対象とし Philips connected retail lighting system を提案している [4]。このシステムは、LED による可視光通信を用い、利用者の周辺にあるお買い得情報を通知したり、購入したい商品への道案内が可能である。照明は、屋内に必ず存在しており、位置が固定なため屋内位置情報システムに有効な手段である。しかしながら、可視光通信では特殊な照明装置や受信側のセンサが必要となる。また屋内の照明装置による位置情報の推定手法として、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) に基づく位置推定手法が提案されている [5][6]。この手法は、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、位置推定時間が照明台数に比例して増加し、15 灯の照明で収束するまでに 1 分程度必要である。

そこで本研究では、照明を用い高速に屋内の位置を推定する手法として、光度を用いた相対位置推定手法と、色温

度を用いた相対位置推定手法を提案する。これら提案手法では、光度や色温度の調光が可能な天井照明と照度、色温度をセンシングする端末を用いる。センサの取得値は、センサの周辺にある天井照明の点灯パターンから大きく影響を受ける。点灯した瞬間の色温度と照度の点灯パターンとセンサからの取得値を比較し、相対的な位置関係を推定する。照明ごとに異なる光度や色温度で調光することにより、距離が離れるほど異なる光環境になるため、複数の端末の相対的な位置関係の検出が可能になる。また、照明の点灯パターンを変え、複数回変化させることにより精度の向上や、より広範囲のエリア検出を行うことができる。

光度を用いた相対位置推定手法および色温度を用いた相対位置推定手法は、天井照明の照度および色温度の調光制御により実現するため、LED でなく蛍光灯でも実現可能である。これに対し可視光通信は、知覚限界を超えて高速に点滅させ変調を行い通信を実現している。そのため、蛍光灯など光度が変化するまでの間隔が長い照明には利用が難しく、可視光通信を蛍光灯で実現すると、ちらつきが発生する恐れがある。本稿では、光度を用いた相対位置推定手法および色温度を用いた相対位置推定手法を実装し、実環境における検証を行うことで、相対的な位置関係の推定精度を評価し、提案システムの有効性を示した。

2. 光度を用いた相対位置推定手法

照度は、近くにある照明ほどに大きく影響をうける。照明を光度グラデーションで照度変化させることにより、照度が高いエリアと低いエリアができ、複数の異なる光度グ

¹ 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

² 同志社大学理工学部，京都府
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ.

a) hichikawa@mikilab.doshisha.ac.jp

b) haida@mail.doshisha.ac.jp

c) rokunishi@mikilab.doshisha.ac.jp

d) mmiki@mail.doshisha.ac.jp

ラデーションパターンをにより変化することで照度の増減のパターンが場所ごとにできる。その照度の増減パターンを比較することで位置推定を行うことができる。照明パターンを変更することは、有効であると考えられる。

複数の照明の光度グラデーションパターンを用意し、パターンの変化による照度センサにより照度の変化の計測を行い、また推定を行いたいエリアにもセンサを設置し、照度の変化パターンと比較することで、屋内エリアを推定する。

2.1 照明の光度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は、図 1 のように 5 パターンを用意した。

- P_1 : 全灯一律点灯
- P_2 : X 方向に光度を高くするパターン
- P_3 : Y 方向に光度を高くするパターン
- P_4 : X 方向について両端の光度が高く、中央付近の光度が低いパターン
- P_5 : Y 方向について両端の光度が高く、中央付近の光度が低いパターン

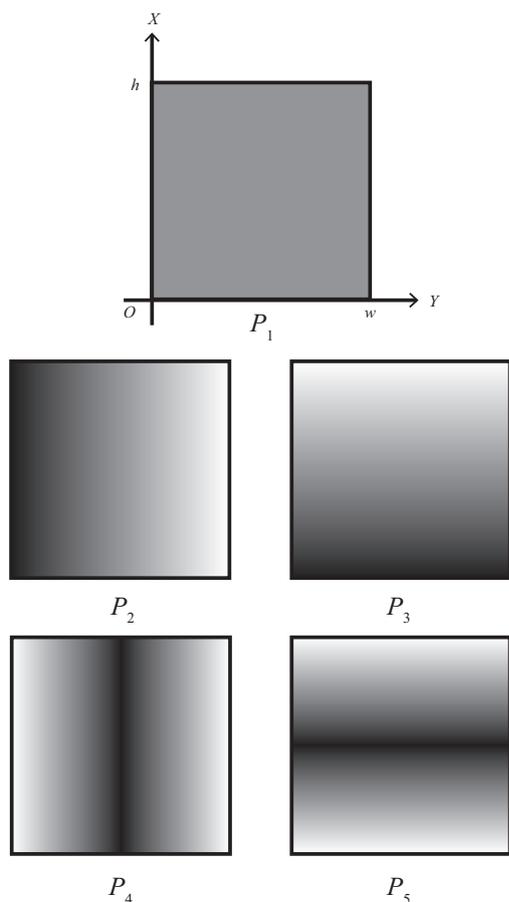


図 1 照明の光度グラデーションパターン

それぞれのパターンの光度が最低の部分を-1, 最高の部分を 1 とすると $P_1 \sim P_5$ のパターンの光度は、それぞれ関

係式 (1)~(5) で表すことができる。

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

$$C_2 = \frac{2x}{w} - 1 \quad (2)$$

$$C_3 = \frac{2y}{h} - 1 \quad (3)$$

$$C_4 = 2 \times \left| \frac{2x}{w} - 1 \right| - 1 \quad (4)$$

$$C_5 = 2 \times \left| \frac{2y}{h} - 1 \right| - 1 \quad (5)$$

x :照明の X 座標

y :照明の Y 座標

w :部屋の X 座標方向の大きさ

h :部屋の Y 座標方向の大きさ

2.2 照明の光度グラデーションパターンによる位置推定手法

P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 の順で照明を調光し、 P_1 と $P_2 \sim P_5$ の各差分で評価を行う。パターンは、関係式 (6) のように照明の光度の集合からなる。

$$P = \{L_1, L_2, L_3, \dots, L_n\} \quad (6)$$

n :照明台数

L_j :照明 j の光度

またそれぞれの光度は、関係式 (7) の式により、調光を行う。

$$L_{ji} = \beta + \alpha C_i \quad (7)$$

L_{ji} :照明 j の P_i の光度 β :基本光度 α :重み

C_i : P_i のパターンによる光度

一回の位置推定は、 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 を順に変化させ、照度を測定する。センサは、関係式 (8) のようにそれぞれのパターンでの点灯時の照度を計測し、保持する。

$$S = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\} \quad (8)$$

I_i : P_i の場合のセンサが受ける照度値

$P_2 \sim P_5$ によるパターンの違いによる差分照度 $D_2 \sim D_5$ は、 P_1 での照度の差分で求められるため、関係式 (9) で求めることができる。

$$D_i = I_i - I_1 \quad (9)$$

I_i : P_i の場合のセンサが受ける照度値

$D_2 \sim D_5$ の値は、それぞれのセンサの位置により値が異なる。センサごとにこれらの値を評価することにより、センサの位置を推定を行う。

センサが移動し、連続的に位置推定を行う必要がある場合には、パターンを P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 の後に再び P_1 のパターンに戻すことで、繰り返し、パターンの変更を行うことができる。

また、パターンを繰り返し変更する際に、時間による同期が必要である場合、 P_1 での点灯時間を他のパターンの点灯時間と異なる時間にすることや、 $P_1 \sim P_5$ のそれぞれの点灯時間を固有の時間にするにより、センサが点灯グラデーションパターンの区別をつけることができる。

3. 色温度を用いた相対位置推定手法

天井照明をいくつかのパターンにより変化させる。ユーザは、あらかじめ照度、色温度を計測できる機器を所持しておく。パターンやユーザの位置ごとに照度や、色温度は、異なる値を取得する。色温度と光度は、依存関係にあるため、色温度の値を連続的に変化させながら、光度の値を変化させず、調光を行うことは、容易ではない。そのため本手法では、あらかじめ決められたいくつかの色温度のみの調光を用い、位置推定を行う。

エリア位置の推定の際には、推定を行うエリアの色温度の変化パターンとセンサが取得した色温度の変化パターンとの比較を行い、エリアの位置推定を行うことが可能である。

3.1 照明の色温度グラデーションパターン

照明の色温度のグラデーションパターンは、図 2 のように 5 パターンを用意した。図は、5 段階の色温度の調光を行う場合の例である。

色温度の調光段階が m 段階であるとき、調光できる色温度の集合を、関係式 (10) に示す。

$$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_m\} \quad (10)$$

P_1 は、照明全灯一律の色温度で、調光を行う。色温度は、設定可能な色温度段階の中央の色温度で調光を行う。 P_1 での調光度は、 X 座標に w 、 Y 座標に h の室内の座標 (x, y) に設置されている照明の設定色温度 C_1 は、関係式 (11) により色温度を選択する。

$$C_1 = T_k (k = \lceil m/2 \rceil) \quad (11)$$

P_2 は、 X 軸方向に、色温度が高くなるパターンとする。 P_2 での調光度は、 X 座標に w 、 Y 座標に h の室内の座標 (x, y) に設置されている照明の設定色温度 C_2 は、関係式 (12) により色温度を選択する。

$$C_2 = T_k (k = \lceil wm/x \rceil) \quad (12)$$

P_3 は、 Y 軸方向に、色温度が高くなるパターンとする。 P_3 での調光度は、 Y 座標に w 、 Y 座標に h の室内の座標 (x, y) に設置されている照明の設定色温度 C_3 は、関係式

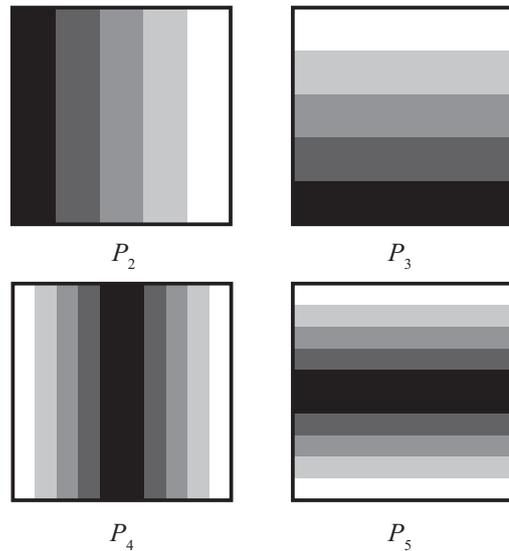
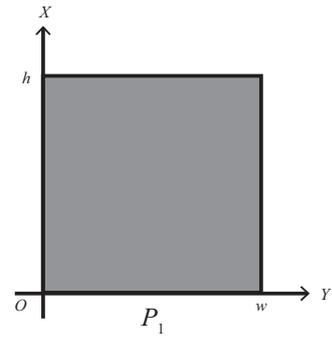


図 2 照明の色温度グラデーションパターン

(13) により色温度を選択する。

$$C_3 = T_k (i = \lceil hm/y \rceil) \quad (13)$$

P_4 は、 X 軸方向について、両端の色温度が高く、部屋の中央の色温度が低くなるパターンである。 P_4 での調光度は、 Y 座標に w 、 Y 座標に h の室内の座標 (x, y) に設置されている照明の設定色温度 C_4 は、関係式 (14) により色温度を選択する。

$$C_4 = T_k (k = \lceil \lceil \frac{2mx}{w} - m \rceil \rceil) \quad (14)$$

P_5 は、 Y 軸方向について、両端の色温度が高く、部屋の中央の色温度が低くなるパターンである。 P_5 での調光度は、 Y 座標に w 、 Y 座標に h の室内の座標 (x, y) に設置されている照明の設定色温度 C_5 は、関係式 (15) により色温度を選択する。

$$C_5 = T_k (k = \lceil \lceil \frac{2my}{h} - m \rceil \rceil) \quad (15)$$

3.2 固定色温度点灯パターンによる位置推定手法

P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 の順で照明のを調光し、色温度を変化させ位置推定を行う。調光を行う際に関係式 (16) を利用して、調光を行う。

$$L = C_i \quad (16)$$

$C_i:P_i$ のパターンによる照明の色温度 T_i の調光値 センサは、関係式 (17) のようにそれぞれのパターンによる照度値を持つ。

$$S = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5\} \quad (17)$$

$\tau_i:P_i$ の場合のセンサが受ける照度値

$P_2 \sim P_5$ によるパターンの違いによる色温度の差は、 P_1 での照度の差分で求められるため、関係式 (18) で求めることができる。

$$D_2 = \tau_2 - \tau_1 \quad (18)$$

$\tau_i:P_i$ の場合のセンサが受ける色温度

$D_2 \sim D_5$ の値は、それぞれのセンサの位置により値が異なる。センサごとにこれらの値を評価することにより、センサの位置を推定を行う。

センサが異動し、連続的に位置推定を行う必要がある場合には、 P_1 での点灯時間を他のパターンの点灯時間と異なる時間にすることや、 $P_1 \sim P_5$ のそれぞれの点灯時間を固有の時間にすることにより、センサが点灯グラデーションパターンの区別をつけることができる。

4. 評価

照明の光度パターンによる位置推定手法と照明の色温度パターンによる位置推定手法について、精度検証を行った。

4.1 実験環境

照明 15 灯、センサ 8 台が図 4 のように設置し、実験を行った。照明は、RGBY の 4 色による調光がそれぞれの色に対して、1000 段階の調光可能なフルカラー LED 照明を使用した。

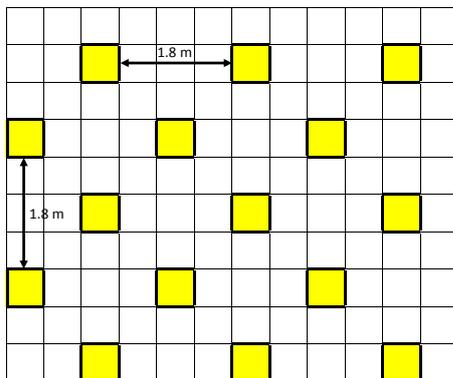


図 3 照明配置図

4.2 固定点灯パターンによる位置推定手法のユークリッド距離による評価

照明 15 灯、照度センサ 8 台をによる固定点灯パターン

による位置推定手法を行った。座標系、照明位置、およびセンサ位置は、図 4 の配置とした。

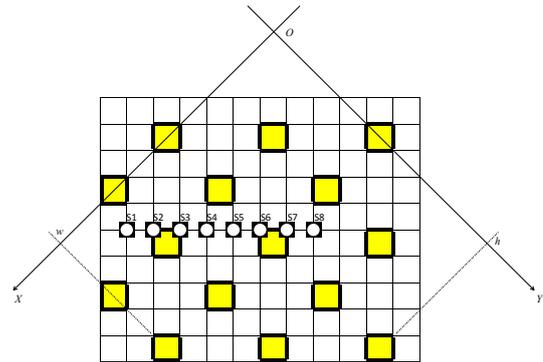


図 4 センサパターン

4.3 ユークリッド距離による性能検証

照明の光度パターンによる位置推定手法と照明の色温度パターンによる位置推定手法について、ユークリッド距離による評価を行う。 P_1 と $P_2 \sim P_5$ とのパターンとのそれぞれの照度差または、色温度差 $D_2 \sim D_5$ をユークリッド距離を求め、評価を行う。

センサ a とセンサ b ユークリッド距離は、関係式 (19) により求め、それぞれのセンサ間のユークリッド距離を比較する。

$$E_{ab} = \sqrt{\sum_{l=2}^5 (D_{al} - D_{bl})^2} \quad (19)$$

D_{ai} :センサ a の P_i と P_1 との照度差または、色温度差

D_{bi} :センサ b の P_i と P_1 との照度差または、色温度差

また、 $D_2 \sim D_5$ について、関係式 (20) を使い、 $D_{e2} \sim D_{e5}$ を算出し、これらについても関係式 (19) を使い、ユークリッド距離を求める。

$$D_{ei} = \frac{D_i}{\sqrt{\sum_{l=2}^5 D_l^2}} \quad (20)$$

D_i :センサの P_i と P_1 との照度差または、色温度差

$D_{e2} \sim D_{e5}$ を算出を行い、ユークリッド距離を求めることで、センサ個体ごとの照度誤差の影響を軽減することができる。

4.4 照明の光度パターンによる位置推定手法の評価

照明による光度パターンによる位置推定手法を行い、その結果をユークリッド距離により評価を行った。照明の光度の決定の際に、関係式 (7) を使い、基本調光度 β を 500

に固定し、重み α の値を 150, 50, 5 のそれぞれの値に変化させた。

図 5～図 10 は、それぞれのセンサ間のユークリッド距離、および正規化したユークリッド距離を求めた図である。

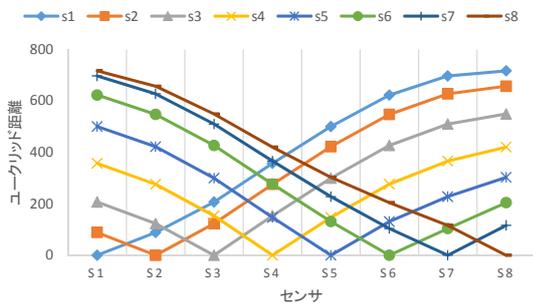


図 5 $\alpha = 150$ のユークリッド距離

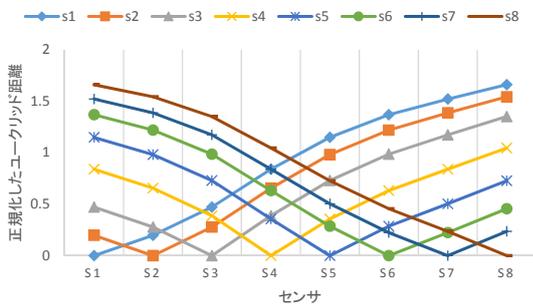


図 6 $\alpha = 150$ の正規化したユークリッド距離

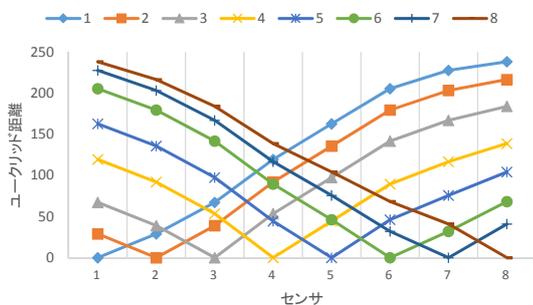


図 7 $\alpha = 50$ のユークリッド距離

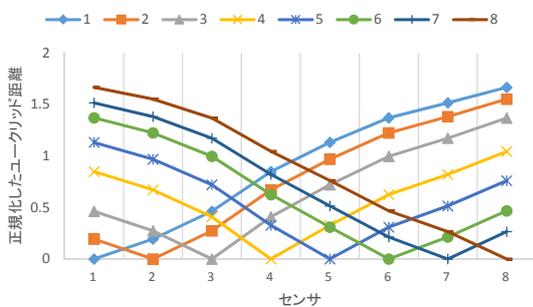


図 8 $\alpha = 50$ の正規化したユークリッド距離

図 5～図 10 は、いずれも図もセンサの距離が長くなるにつれ、ユークリッド距離の長さが長くなっており、セン

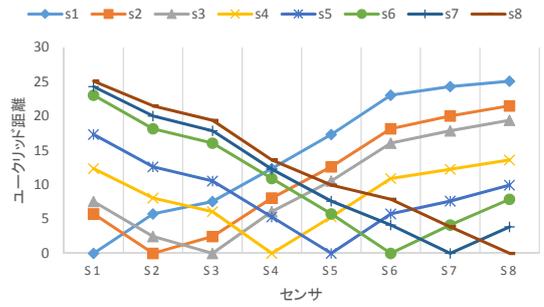


図 9 $\alpha = 5$ のユークリッド距離

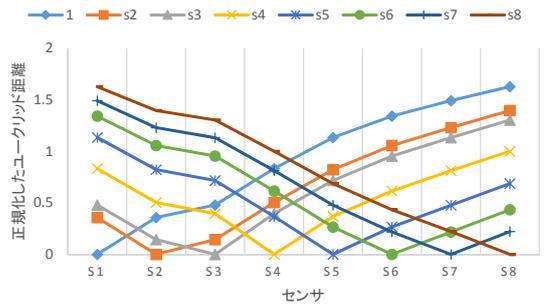


図 10 $\alpha = 5$ の正規化したユークリッド距離

サ間のユークリッド距離に相関がある。また、正規化したユークリッド距離で評価を行うことにより、正規化を行わない場合と比べ、相対的なユークリッド距離の間隔が広がった。図 6, 図 8, および図 10 より、正規化したユークリッド距離を用いた際の結果がほぼ同様の結果となった。

4.5 照明の色温度パターンによる位置推定手法の評価

照明の色温度による位置推定手法による位置推定手法を行い、その結果をユークリッド距離により評価を行った。照明の色温度は、2400K, 3000K, 4200K, 6500K, 9000K の 5 段階の色温度により調光を行なった。図 11, 図 12 は、それぞれのセンサ間のユークリッド距離、および正規化したユークリッド距離を求めた図である。

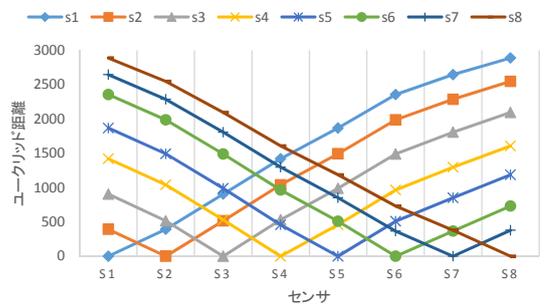


図 11 色温度パターンによる位置推定手法のユークリッド距離

図 11, 図 12 より、ユークリッド距離、正規化したユークリッド距離のいずれのセンサ間場合にもセンサの実距離とユークリッド距離に相関があり、位置推定が可能である。

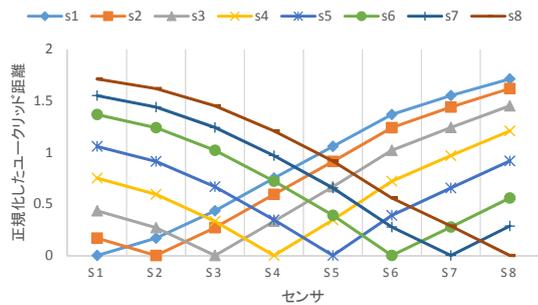


図 12 色温度パターンによる位置推定手法の正規化したユークリッド距離

5. 結論

本研究では、屋内による相対的な位置推定を高速化するため、照明の光度グラデーションパターンを用いた位置推定手法と照明の色温度グラデーションパターンを用いた位置推定手法を提案した。提案手法では、天井照明により光度、および色温度の複数の点灯グラデーションパターンで調光を行うことで、相対位置推定にかかる時間を短縮した。

光度と色温度を組み合わせたパターンを用いることで、パターンの数を減らし、更なる高速化が可能になると考えられる。また、パターンの変化の際に前のパターンを考慮したパターンを設計することで、位置推定の際にパターンの変化による光環境の変化を軽減できると考えられる。

参考文献

- [1] Santanu Guha, Kurt Plarre, Daniel Lissner, Somnath Mitra, Bhagavathy Krishna, Prabal Dutta, and Santosh Kumar. Autowitness: Locating and tracking stolen property while tolerating gps and radio outages. 2010.
- [2] Emiliano Miluzzo, Nicholas D. Lane, Kristf Fodor, Ronald Peterson, Hong Lu, Mirco Musolesi, Shane B. Eisenman, Xiao Zheng, and Andrew T. Campbell. Sensing meets mobile social networks: The design, implementation and evaluation of the cenceme application. pp. 337–350, 2008.
- [3] Zengbin Zhang, David Chu, Xiaomeng Chen, and Thomas Moscibroda. Swordfight: Enabling a new class of phone-to-phone action games on commodity phones. pp. 1–14, 2012.
- [4] Philip, philips' connected retail lighting system. <http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2014/20140217-intelligent-in-store-led-lighting-communicates-with-your-smartphone.wpd>.
- [5] 西原尚宏, 間博人, 谷口総一朗, 三木光範. 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. 情報処理学会研究報告. UBI, [ユビキタスコンピューティングシステム], Vol. 2014, No. 33, pp. 1–7, mar 2014.
- [6] M. Miki, K. Yoshida, Y. Hirano, and H. Ikegami. Estimation of illuminance sensor positions and improvement of energy efficiency in the distributed control lighting system. pp. 137–142, May 2013.