

可視光通信によるスマートフォンのオフィス内位置推定手法の検討 および知的照明システムへの応用

Verification of position estimation method of smartphone in the office by visible light communication and Intelligent Lighting System applications

山口 浩平^{*1} 三木 光範^{*2} 桑島 奨^{*1} 松本 大樹^{*1} 間 博人^{*2}
Kohei Yamaguchi Mitsunori Miki Sho Kuwajima Taiki Matsumoto Hiroto Aida

^{*1}同志社大学大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

^{*2}同志社大学 理工学部

Department of Science and Engineering, Doshisha University

An Intelligent Lighting System controls lightings individually based on illuminance information obtained from the illuminance sensor with each office worker and provide favorite illuminance. In the prior studies, we realized Intelligent Lighting System using a built-in illuminance sensor of smartphone instead of an illuminance sensor. An Intelligent Lighting System realize optimal lighting pattern by estimating the position of the illuminance sensor. In this study, we propose the position estimation method and obtained the optimal lighting pattern in a short period of time than the previous method.

1. はじめに

我々は、各執務者が要求する個別の明るさ（照度）を最小の消費電力で実現する知的照明システムの研究・開発を行っている [1]。知的照明システムは、既にその有効性が認められ東京都内および福岡の実オフィスにおいて検証実験を行ってきた。

知的照明システムでは執務者は一人一台の照度センサを持ち、机上面の照度を測定する。測定された照度値をもとに、最適化手法により照明の明るさ（光度）を個別に制御する。著者らは先行研究において、この照度センサをスマートフォンで代用する手法について報告した [2]。

スマートフォンには画面の輝度調節のための照度センサが内蔵されており、このスマートフォンの内蔵照度センサを用いて照度を測定することが可能である。照度センサをスマートフォンで代用することでシステム導入時のコストの削減や保守性の向上などが実現できる。

知的照明システムでは、照明を個別制御する際、効率の良い点灯パターンを実現するために各照明が各照度センサに与える影響度合い（照度/光度影響度と称す）を求める必要がある。この照度/光度影響度を求める方法として、スマートフォンを用いた知的照明システムでは、各照明と各スマートフォンの位置関係を推定する。知的照明システムは推定された位置関係をもとに、増光の際はスマートフォンに近い照明、すなわち照度/光度影響度が大きい照明を優先的に増光し、減光の際にはスマートフォンから遠い照明、すなわち照度/光度影響度が小さい照明を優先的に減光する。このように照明制御を行うことで、消費電力を抑えた効率の良い点灯パターンを実現する。先行研究では、このスマートフォンの位置推定手法として、二分探索を用いた手法 [2] を報告した。しかしながら、二分探索手法は、探索するスマートフォンの数が増加するに従い、探索に必要な照明制御回数が増加する。従ってスマートフォンの多い環境では探索に大きな時間がかかってしまうと考えられる。そこで本研究では、探索回数がスマートフォンの数に依存しない

い手法として、可視光通信を用いた位置推定手法について提案し、本手法を導入した知的照明システムについて検証を行う。

現在、可視光通信の研究が多数報告されている。可視光通信とは、人の目に見える光（可視光線）を伝送媒体として用いた無線データ通信のことであり、通常データ通信手法としてだけではなく、GPS 等による位置推定が困難な室内における新たな位置推定手法としても注目されている。一方でスマートフォンには照度センサが内蔵されているため、スマートフォンを受信器として用いた可視光通信が可能であると考えられる。しかし、スマートフォンの機種により内蔵照度センサの性能が異なり、これらの性能によって可視光通信の通信速度や通信可能範囲に差が生じると考えられる。そこで本研究では、まずスマートフォンの内蔵照度センサの光度変化に対する反応性能と、通信可能範囲を機種ごとに検証する。その後、知的照明システムにおいて可視光通信による位置推定を行い、執務者の選好照度への収束が可能であることを示し、提案手法の有効性を示す。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムの構成を図 1 に示す。知的照明システムは、照度センサが設置された場所に要求された照度を最小限の消費電力で実現するシステムである [1]。図 1 に示すように、照明器具、制御装置、照度センサ、電力センサおよびそれらを繋ぐネットワークから構成されている。

各照明に設置された制御装置が照度情報および消費電力情報を基に最適化手法を用いて執務者に感知されない範囲で光度を変化させる。これを繰り返すことで、執務者の要求する照度を省電力で実現する。

知的照明システムでは、焼きなまし法を基盤としたアルゴリズムを用いて、設計変数を各照明の光度、制約条件を各照度センサの目標照度とし、目的関数を照度全体の消費電力とする最適化問題を各照明ごとに自律分散的に解く。すなわち、探索ごとに各照明の光度を執務者に感知されない範囲でランダムに変化させ最適な点灯パターンの探索を行う。各照明には、各照度センサとの位置関係に応じて照度/光度影響度が設定されて

連絡先: 山口 浩平, 同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻, 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3, 0774-65-6924, kyamaguchi@mikilab.doshisha.ac.jp

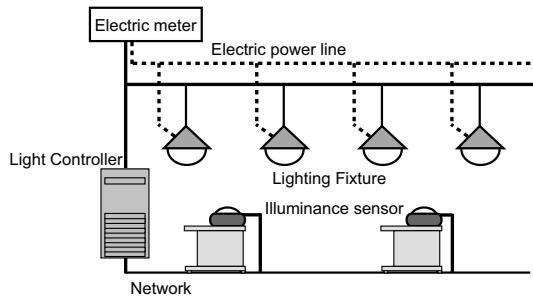


図 1: 知的照明システムのシステム構成

おり、その影響度合いに応じてランダムな光度変化に方向性を持たせる。以下に照明制御の流れを示す。

- (1) 各照度センサの目標照度を設定。
- (2) 各照明を初期光度で点灯。
- (3) 照度センサおよび電力計から計測値を取得。
- (4) 後述する目的関数に基づき、評価値を計算。
- (5) 照度/光度影響度に応じて次光度を生成し、次光度で点灯。
- (6) 照度センサおよび電力計から計測値を取得。
- (7) 項目 (5) における点灯状況の評価値を計算。
- (8) 目的関数の評価値が改良された場合は次光度を受け取り、そうでない場合は元の光度に戻す。
- (9) 項目 (3) に戻る。

上記の項目 (3) から項目 (9) までの制御を 1 ステップとし、1 ステップ 2 秒で繰り返し照明制御を行う。各関数の目的関数は式 (1) で表される。

$$f_i = P + \omega \times \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad (1)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & (I_{cj} - I_{tj}) \geq 0 \\ R_{ij} \times (I_{cj} - I_{tj})^2 & (I_{cj} - I_{tj}) < 0 \end{cases}$$

$$R_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & r_{ij} \geq T \\ 0 & r_{ij} < T \end{cases}$$

i : Number of lightings, j : Number of sensors

P : power consumption[W], ω : weight[W/lx]

I_{cj} : current illuminance[lx], I_{tj} : target illuminance[lx]

r : illuminance/luminance influence factor (regression coefficient), T : threshold value

式 (1) に示す目的関数は消費電力 P と照度制約 g_{ij} から構成され、各照明ごとに計算する。各照度センサの目標照度を制約条件としたペナルティ g_{ij} は照度/光度影響度により変化し、照度/光度影響度が大きい照明だけペナルティを重要視するように動作する。また、照度/光度影響度 r_{ij} に閾値 T を設けることで、ある照度センサに影響を与える照明を近くの照明に絞ることができる。これにより、照度センサから遠い照明は消費電力の最小化を目的として制御する。

2.2 スマートフォンを用いた知的照明システム

知的照明システムの照度センサに、近年広く普及しているスマートフォンを代用することが考えられる。スマートフォンを照度センサとして用いることで、専用の照度センサの導入にかかるコストの削減、汎用部品を用いることによる保守性の向上等といった利点がある。スマートフォンには、画面輝度調節のための照度センサが内蔵されており、これを用いて照度を取得することが可能である。先行研究ではスマートフォンの内蔵照度センサを用いて照度を取得することで、スマートフォンを照度センサとして用いた知的照明システムの有効性を報告した[2]。

3. スマートフォンの性能検証

3.1 内蔵照度センサの反応時間の測定

スマートフォンには画面輝度調節のための照度センサが内蔵されており、この内蔵照度センサはスマートフォンの機種によって性能が異なると考えられる。

スマートフォンを用いた可視光通信を行う際の、データ通信速度を決定するために、スマートフォンの内蔵照度センサの反応性能を検証した。スマートフォンは富士通社製の ARROWS Z, Motorola 社製の XOOM および RAZR, Samsung 社製の GALAXY を用いた。照明は 1000 段階で制御可能な Sharp 製の LED 照明を用いた。照明をあらかじめ一定の光度で点灯し、この時の照明直下の、床面から 70cm の高さである机上面照度をスマートフォンで計測した。その後、照明の点灯光度を一定値上昇した。そして、点灯光度が上昇した時点から、スマートフォンの照度値が一定値に収束するまでの時間を測定した。上昇前の点灯光度を最大点灯光度の 30%、上昇後の点灯光度を 90% とした。

表 1 に、計測の結果を示す。表 1 の Model の欄には検証した機種を示す。Time of sensor の欄には内蔵照度センサによる反応時間を示しており、この欄には各測定器につき 10 回の測定結果のうち、最も反応時間が長かった時間を示している。この時間を、可視光通信における 1 ビットあたりの送信時間とみなすことができる。なお、表 1 に示すスマートフォンの中で最も反応時間が短かった RAZR をスマートフォン 1 と、二番目に反応時間が短かった GALAXY をスマートフォン 2 と称す。

実際に照明の点灯光度を変化させることにより、情報ビット列 (照明 ID と称す) "0101" を送信し、照明直下に配置したスマートフォン 2 で照度値を取得したときの照度履歴を図 2 に示す。実線は照明の実際の照度変化を示している。このときの送信速度は表 1 の結果から、5bps 程度とした。また、照明 ID に対応する照明の点灯光度は、照明 ID が 1 のとき現在光度の 100%、照明 ID が 0 のとき現在光度の 90% とした。図 2 から、スマートフォン 2 は送信された信号値に対応した照度変化を取得できていることが分かる。

3.2 内蔵照度センサの通信可能範囲の測定

複数の照明から固有の照明 ID を送信するとき、照明間下付近では、照明 ID 同士が干渉する場合がある。そこで、複数の照明がそれぞれ異なる照明 ID を送信する場合において、照明 ID が受信可能な範囲の検証実験を行った。図 3 に示す、1.8m

表 1: 反応時間

Model	Time of sensor [sec]
ARROWS Z	0.64
XOOM	1.22
RAZR(Smartphone1)	0.15
GALAXY(Smartphone2)	0.19

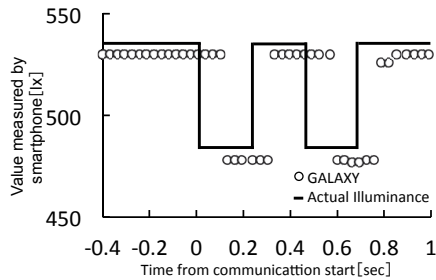


図 2: 信号値"0101"を送信時の照度履歴

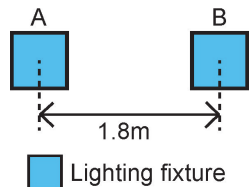


図 3: 受信可能範囲の検証実験環境

間隔で設置されている二灯の照明 A および B からそれぞれ異なる照明 ID を同時に送信した。照明 A から"1010", 照明 B から"0101"を送信した。照明 ID に対応する照明の点灯光度は、執務者が感知できない照度変化幅 [3] が 10% であることから、照明 ID が 1 のとき現在光度の 100%, 照明 ID が 0 のとき現在光度の 90% とした。照明 A の直下および照明 B の直下を結ぶ直線上の机上面にスマートフォンを設置し、照明 A の照明 ID "1010" を感知できる、照明 A 直下からの水平距離を測定した。各距離において、照明 ID の送信を 20 回行ったときの受信成功率を図 4 に示す。なお、機種はスマートフォン 2 を用い、送信速度は 5bps とした。図 4 の結果から、100% の確率で正しく照明 A の照明 ID が受信可能である距離は、照明 A および照明 B がともに最大点灯、最小点灯のとき 0.7m、照明 A が最小点灯かつ照明 B が最大点灯のとき 0.3m であることが分かった。したがって、スマートフォンに最も近い照明の点灯光度が最小であり、それ以外の照明の点灯光度が最大の場合においても、最も近い照明の直下から 0.3m の範囲内にスマートフォンを設置すれば正しい照明 ID を受信できることが分かった。なお、最小点灯光度は最大点灯光度の 30% とした。

4. 可視光通信によるスマートフォンの位置推定

4.1 可視光通信を用いた位置推定

可視光通信を用いた位置推定手法の概念図を図 5 に示す。図 5 において、各照明固有のパターンで照明を繰り返し光度変化させることにより、照明ごとに異なる 1 および 0 の照明 ID を送信する。スマートフォンの内蔵照度センサは照度変化を計測し、計測した照度値から照明 ID を解析することにより受信する。スマートフォンは受信した照明 ID を制御装置に送信する。制御装置は、この照明 ID を送信している照明の直下付近にそのスマートフォンがあると判定し、位置推定を完了する。

4.2 スマートフォンを用いた可視光通信手法の提案

スマートフォンを用いた可視光通信では、通信速度は 3.1 節の性能検証の結果から、スマートフォン 1 あるいはスマートフォン 2 を用いた場合、5bps 程度を実現できる。知的照明システムの照明制御アルゴリズムでは 2.1 節で述べたように、1

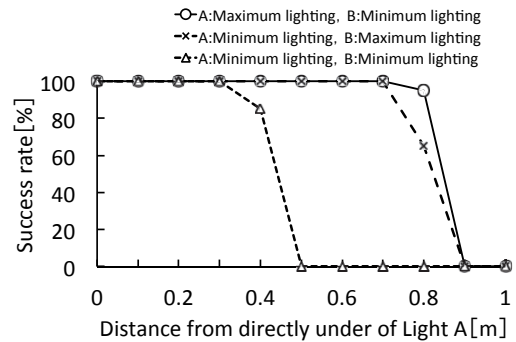


図 4: 信号値"1010"の受信成功率

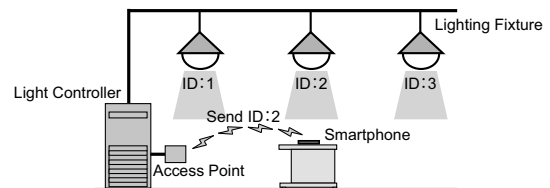


図 5: 可視光通信による位置推定手法の概念図

ステップ 2 秒で制御を繰り返している。したがって本研究では、1 ステップ 2 秒で位置推定を行うことを条件とした。照明台数が 100 灯程度の大規模なオフィス環境において、照明一灯一灯に個別の照明 ID を割り当てる場合、必要となる照明 ID の長さは 7 ビットである。以下に示すアルゴリズムを用いて可視光通信を行う場合、照明 ID のビット数に加えて制御のための信号が 2 ビットが必要になる。合計 9 ビットを 1 ステップ 2 秒で通信する際の通信速度は 4~5bps 程度となるため、5bps を実現可能なスマートフォン 1 およびスマートフォン 2 を用いることによって、1 ステップで位置推定を完了することができる。

以下に可視光通信による位置推定のアルゴリズムを述べる。

- (1) 目標照度への収束のための光度制御を停止する。
- (2) 現在光度におけるスマートフォンの照度値を基準値として保存する。
- (3) 全ての照明の点灯光度を、現在光度の 90% の光度で点灯し、そのときのスマートフォンの照度値を項目 (2) と同様に基準値として保存する。
- (4) 各照明に個別に設定された照明 ID に対応して、各照明を可視光通信開始時の 100% および 90% の点灯光度で点灯させる。照明 ID が 1 のとき 100% 点灯、照明 ID が 0 のとき 90% 点灯とする。同時にスマートフォンで照度変化を計測する。このとき、項目 (2) および (3) で取得した基準値の中央値を閾値として設定し、照度値が閾値よりも高ければ照明 ID "1" を、低ければ照明 ID "0" を受信する。この処理を照明 ID のビット数分繰り返す。
- (5) スマートフォンで受信した照明 ID に対応する照明の直下にスマートフォンが配置されていると判定し、位置推定を終了する。
- (6) 位置推定の結果をもとに、4.1 節で述べた方法で各照明の照度/光度影響度を決定する。
- (7) 位置推定終了後、目標照度への収束を再開する。

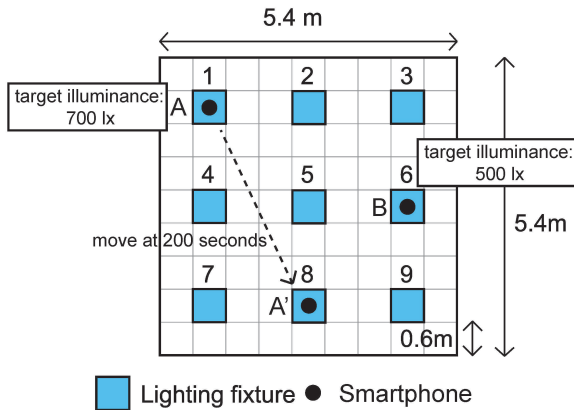


図 6: 提案手法の検証実験環境

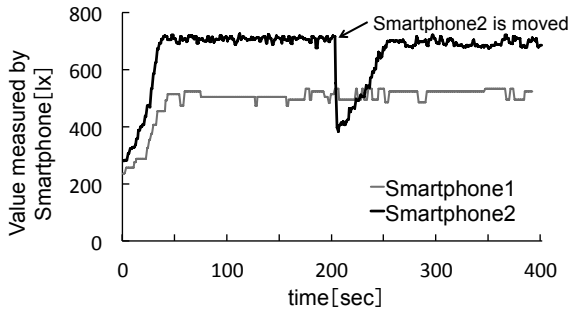


図 7: 照度収束実験の照度履歴

5. 提案手法を組み込んだ知的照明システムの検証実験

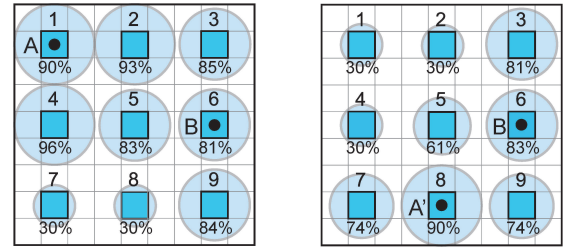
5.1 実験概要

提案手法を組み込んだ知的照明システムを実際に移動し本手法の有効性の検証実験を行った。表 1 の結果から今回の検証実験ではスマートフォン 1 およびスマートフォン 2 を一台ずつ用いた。

図 6 に示す実験環境において、地点 A および地点 B にそれぞれスマートフォン 2 およびスマートフォン 1 を設置し、スマートフォンの位置推定を行った。可視光通信時の信号通信速度は 5bps、通信ビット数は 9 ビットとした。3.2 節の図 4 の結果から、可視光通信可能範囲は照明直下から水平距離で 0.3m 以内とした。位置推定完了後、知的照明システムを動作させ、目標照度への照度収束を開始した。スマートフォンに設定した目標照度は地点 A のスマートフォン 2 が 700 lx、地点 B のスマートフォン 1 が 500 lx とした。照度制御の開始後 200 秒時点で、地点 A に設置したスマートフォン 2 を図 6 に示す地点 A' に移動させた。なお、移動は 10 秒かけて行った。移動後再度スマートフォンの位置推定を行い、位置推定完了後、目標照度への照度収束を再開した。

5.2 実験結果

スマートフォンの内蔵照度センサから得られた照度値の履歴を図 7 に示す。またグラフの横軸は経過時間を、縦軸はスマートフォンの照度値を示している。実験の結果、制御開始から 2 秒程度で地点 A のスマートフォンの位置推定が完了し、その後目標照度の実現に向けた処理に移った。図 7 から、制御開始から約 50 秒後には目標照度に収束していることが分かった。制御開始から 200 秒後にスマートフォンの移動を開始したため、計測値が急激に下がった。図 7 から、移動後の照度も目標照度の 700 lx および 500 lx に収束していることが確認できた。



(a) Luminance of point of 200 sec (b) Luminance of point of 400 sec

■ Lighting fixture ● Smartphone
○ Luminance

図 8: 点灯パターン

次に、図 7 の 200 秒時点および 400 秒時点における各照明の点灯状況を図 8 に示す。各照明の下に示す値は、最大値を 100% としたときの照明の点灯光度を表しており、各照明を中心とする円は点灯光度を可視化したものである。図 8 から、移動前および移動後のどちらもスマートフォン付近の照明が強く点灯し、離れている照明は最小点灯光度の 30% で点灯していることが確認できた。この点灯状況で目標照度への収束を実現したことから、各照明の制御にスマートフォンの位置推定が有効であったことが確認できた。

5.3 検証実験の結論

提案手法によって、スマートフォンの位置推定に成功した。加えて知的照明システムにおいては、提案手法によって推定された設置位置から照度/光度影響度を求め、近くの照明のみを強く点灯させることによって、スマートフォンを移動した場合においても最適な点灯パターンを実現することができた。また可視光通信では、照度変化に対する反応速度が速い機種を用いた場合、通信速度 5bps を実現し、照明台数が 100 灯の場合においても約 2 秒程度で位置推定が可能であることを示した。

6. まとめ

本研究では、スマートフォンの内蔵照度センサの反応性能を検証し、照度変化に対する反応時間が短い照度センサを内蔵するスマートフォンを用いることにより、通信速度 5bps で可視光通信を行うことができた。次に、知的照明システムの照度センサとしてスマートフォンを用いる場合において、可視光通信を用いたスマートフォンの位置推定手法について検証し、照明直下から 0.3m 以内の位置にスマートフォンを設置した場合に限り、知的照明システムで用いることができると示した。今後は、複数の照明間下でスマートフォンを配置した場合の位置推定手法について検討する必要がある。

参考文献

- [1] 三木 光範, "知的照明システムと知的オフィス環境コンソーシアム" 人工知能学会誌, vol.22, no.3, pp.399-410, 2007
- [2] 三木 光範, 桑島 奨, 池上 久典, 東 陽平, 中林 弘光, 町田 啓悟, 間 博人 "知的照明システムの照度センサに対するスマートフォンの利用可能性の検証" 同志社大学理工学研究報告, vol.55, no.1, pp.65-71, 2014
- [3] 鹿倉 智明, 森川 宏之, 中村 芳樹, "オフィスの照明環境における明るさの変動知覚に関する研究" 照明学会誌, vol.85, no.5, pp.346-351, 2001