

Verification of the Smartphone's Availability for Illuminance Sensor in an Intelligent Lighting System

Mitsunori MIKI^{*}, Sho KUWAJIMA^{**}, Hisanori IKEGAMI^{**}, Yohei AZUMA^{**}, Hiromitsu NAKABAYASHI^{**},
Keigo MACHIDA^{**} and Hiroto AIDA^{*}

(Received January 20, 2014)

We research and develop an Intelligent Lighting System to offer different illuminance to individual office worker in the lowest power consumption. In an Intelligent Lighting System, each person holds an illuminance sensor to control lightings individually. Instead of using the illuminance sensor, a smartphone's built-in illuminance sensor is usable. By using this, it is expected to reduce costs and improve maintenance during the system installation. Therefore, in this study, we examined an Intelligent Lighting System using the smartphone's built-in illuminance sensor. By the performance verification experiment of smartphone's built-in illuminance sensor, the built-in sensor's resolution is low, and there is a difference between the actual value of the illuminance. However, we confirmed that there is a terminal that has linear relation with the actual illuminance. In the experiments, verify the validity of the proposed method, we also confirmed that target illuminance which was set internally for each terminal has converged and the illuminance maintains in constant illumination after the illuminance convergence.

Key words : lighting control, illuminance, optimization, smartphone, energy conservation

キーワード : 照明制御, 照度, 最適化, スマートフォン, 省エネルギー

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

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

1. まえがき

近年, 省エネルギー性の向上が広く検討されており,
オフィスビルにおいても省エネルギーを目指す取り組み

みが推進されている。オフィスビルにおける照明の消費電力はビル全体のおよそ 20%を占めており¹⁾, 照明環境を改善することで消費電力を大きく削減し省エネ

^{*} Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6930, Fax: +81-774-65-6716, E-mail: mmiki@mail.doshisha.ac.jp,

^{**} Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6924, E-mail: skuwajima, yazuma, hikegami, hnakabayashi, kmachida@mikilab.doshisha.ac.jp

ルギーに貢献することができる^{2,3)}。一方、オフィス照明が執務者に及ぼす影響に関する研究も広く行われている。照明環境の評価指標としては照度、輝度、色温度などがあり、これらを改善することで生産性を向上できる^{2,4)}。中でも、執務に最適な明るさ（照度）を個人ごとに実現することはオフィス環境の改善に有効であると報告されている⁵⁾。

このような背景から、著者らは照明環境に着目し、個々の執務者の要求に応じた照度を省電力で実現する知的照明システムを提案した⁶⁾。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が行われてきた^{7,8)}。これらの検証実験では、一般的なオフィスの机上面照度である 750 lx よりも低い照度を選好する執務者が多く、それらの照度を満たした結果として消費電力の削減が確認できた⁷⁾。

知的照明システムでは、各執務者の机上面に照度センサを 1 台ずつ設置し、それらから計測された照度値をもとに最適化手法によりオフィス照明の明るさ（光度）を制御する。この照度センサとして現在は高価な受注生産品を用いているが、これに近年普及しているスマートフォンを用いることが考えられる。これにより、知的照明システムの導入時におけるコスト削減や保守性の向上が期待できる。そこで、本研究ではスマートフォンを照度センサとして用いる知的照明システムについて検討を行う。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの構成

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⁶⁾。Fig. 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。

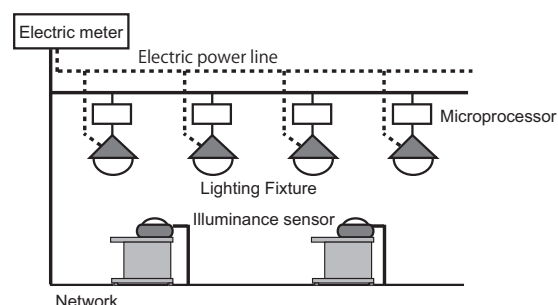


Fig. 1. The construction of an intelligent lighting system.

2.2 照度制御アルゴリズム

知的照明システムでは、Simulated Annealing (SA) を基盤とした適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC⁹⁾) 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、目的関数を照明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、探索毎に各照明の光度を執務者に感知されない範囲¹⁰⁾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。適応的近傍アルゴリズム (ANA/RC) では各照度センサに対する各照明の影響度合い（照度/光度影響度と称す）を解探索中の照度変化と光度変化に関する回帰分析により推定し、その照度/光度影響度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 ANA/RC の制御の流れを示す。

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. 各照明の光度変化量および各照度センサの照度変化量から回帰分析を行い照度/光度影響度を推定

9. 目的関数の評価値が改良された場合は次光度を受
理し、そうでない場合は元の光度に戻す

10. 項目 (3) に戻る

各照明の目的関数は式 (1) で表される.

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

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

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

i :照明番号, j :センサ番号, P :消費電力 [W]

ω :重み [W/lx], I_c :現在照度 [lx], I_t :目標照度 [lx]

r :照度/光度影響度 (回帰係数), T :閾値

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, 各照明毎に計算する. 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 r_{ij} 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のみを目的として制御する.

2.3 知的照明システムにおける照度センサ

知的照明システムで用いている照度センサは大きく分けて有線方式と無線方式がある. 有線照度センサはケーブル経由による電源供給が可能であるが, オフィスではケーブルを床下に敷設する必要がある. このため, 照度センサの位置が変化する環境では実用的ではない. 一方, 無線照度センサは電池の交換や充電などの配慮が必要となるがケーブルが不要で, レイアウト変更などで照度センサの移動が頻繁に起こり得るオフィスにおいて有用な照度センサである.

また, 現在, 知的照明システムで用いている照度センサは受注生産品のため高価であり, これが知的照明システムの普及を遅らせている.

一方で, 近年ではスマートフォンやタブレット端末 (以下, スマートフォン) が普及しており, スマートフォンに内蔵された照度センサを知的照明システムの照度センサとして用いることが考えられる. そこで, 本研究では照度センサとしてスマートフォンを用いた個別照度制御方法を提案する.

3. スマートフォンの内蔵照度センサ

3.1 スマートフォンを用いることによる利点

近年, 高機能・多機能な携帯電話として Android OS 搭載端末や iPhone といったスマートフォンが普及している. スマートフォンには画面輝度の調節を主目的とした照度センサが内蔵されているため, スマートフォンは知的照明システムの照度センサとして利用できる可能性がある. また, 照度センサとしての役割だけでなく, 執務者の所有するスマートフォンを用いることで導入コストの削減やタッチパネルを用いたユーザインタフェースの提供などの利点が挙げられる.

しかし, スマートフォンに内蔵された照度センサは画面輝度の調節を主目的としているため, 知的照明システムでの動作に関して性能検証が必要となる.

3.2 内蔵照度センサの性能検証実験

スマートフォンに内蔵された照度センサ (以下, 内蔵照度センサと称す) の性能を調べるため照度計の計測照度値との比較実験を行った. この比較実験では Fig. 2 の地点 A の天井に照明を 1 灯だけ点灯し, 照度計とスマートフォン (タブレット含む) を Fig. 2 の地点 A~E の床面から 70 cm の高さの机上面に設置した. また, 用いた照明器具は 256 段階で調光可能であり, この各段階において内蔵照度センサおよび照度計を用いて各地点の明るさを後述の機種ごとに計測した. 計測には, 照度計として ANA-F11 (東京光電製: JIS C 1609-2 に準拠) を用い, 3 機種のスマートフォンを用いて実験を行った. なお, 内蔵照度センサの出力値は, 各スマートフォンに対して筆者らが作成したアプリケーションで取得した.

3 機種の内蔵照度センサから得られた値と照度計での計測値との比較を Fig. 3 に示す. Fig. 3 は, 地点

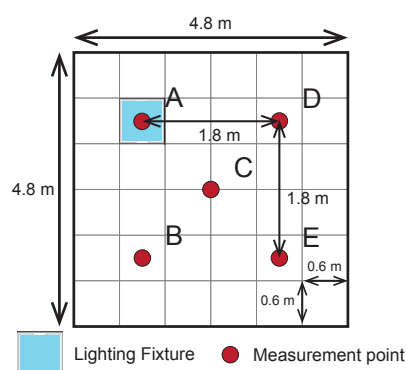


Fig. 2. Experimental environment for performance verification (top view).

Aにおけるスマートフォンの内蔵照度センサから得られる値と実際の照度の関係性を表したグラフである。Fig. 3の横軸は照度計の計測値、縦軸は各内蔵照度センサから得られた値を示しており、見やすさのため256のデータのうち100点を示した。また、その他の地点でも、取得値は減少するものの同様の結果が得られたため省略した。

Fig. 3から、スマートフォンの内蔵照度センサは従来の照度センサと比べて総じて分解能が低いことがわかった。しかし、スマートフォンの中には、比較的分解能が高く照度計の計測値との間の線形性がある端末も存在することが確認できた。

以上のように内蔵照度センサから得られる値は照度計の計測値と大きく異なるため、これらが内蔵照度センサを用いた知的照明システムの制御に及ぼす影響について検討する。

3.3 内蔵照度センサの性能に関する検討

最初に、内蔵照度センサの分解能について考察する。実験に用いたいずれのスマートフォンの内蔵照度センサも照度計と比較して分解能が低いことが分かった。一方、2.2節で述べたように、知的照明システムでは照明の光度変化量とそれに伴う照度センサの照度変化量の回帰分析から照度センサに対する各照明の照度/光度影響度を推定し、その値を照度制御アルゴリズムで用いる。このとき、照明の光度は執務者に感知されない程度で変化させるため、分解能の低い照度センサを用いると微小な光度変化に対して取得照度値が変化

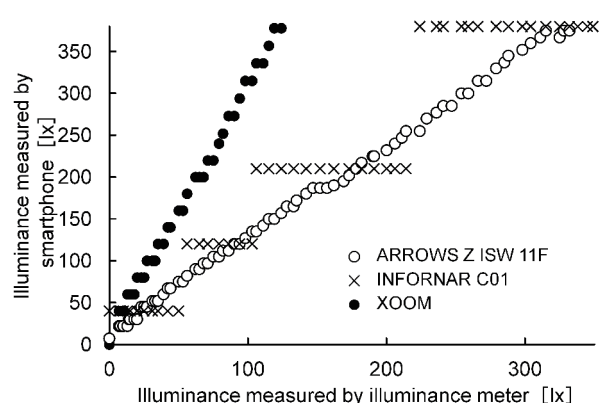


Fig. 3. The values from the illuminance sensor built in the smartphone.

しない場合がある。このような場合は照度/光度影響度を正しく推定できないため、最適な点灯パターンへの収束が遅くなる。

次に、内蔵照度センサから得られる値と実際の照度との相違について考察する。知的照明システムでは、各照度センサに対して各執務者の要求する明るさを、例えば 700 lx などのように、目標照度値として設定し、それらの目標照度値を満たすよう各照明の光度を制御する。しかしながら、内蔵照度センサを用いる場合、執務者が内蔵照度センサに設定する目標照度値は実際の照度とは相違がある。

以上が知的照明システムにスマートフォンの内蔵照度センサを用いる場合の課題と考えられる。本研究では検証を行ったもののうち、分解能が比較的高いものを対象として、知的照明システムへの導入について検討を行った。

4. 検証実験

4.1 実験概要および環境について

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について検証実験を行った。構築したシステムでは、照度センサの代わりにスマートフォンを用い、スマートフォンからの情報送信には Wi-Fi を用いた。

実験では、外光の入らない室内においてスマートフォン3台および照明器具9台をFig. 4のように設置した。スマートフォンには、3.3節で検証を行ったも

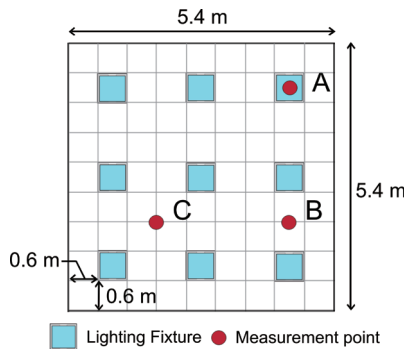


Fig. 4. Experimental environment(top view).

ののうち分解能が高い機種を用いた。また、照明器具には調光可能な Panasonic 社製白色 LED(最大点灯光度: 1040 cd) を用いた。ここでは、照明器具の設置間隔を一般的なオフィスで用いられる 1.8 m とした。

この実験環境において、同一の機種 3 台を用いて実験を行った。実験では、スマートフォンの横に照度計を設置し、Table 1 に示す目標照度をスマートフォンに設定し、実験を行った。また、各照明の初期点灯光度は 100 % に設定した。なお、3.3 節で述べたように、スマートフォンに内蔵される照度センサは低分解能であるため、照明の光度を微小に変化させる場合において、照度/光度影響度を正しく推定できない。そこで、スマートフォンの設置位置における各照明の照度/光度影響度を求める予備実験を行う。その測定結果をデータベース化することで、スマートフォンの設置位置に応じた照度/光度影響度を各照明に与える。これにより、各スマートフォンに影響のある照明を絞り込み、2.2 節で述べたアルゴリズムにより制御できる。この条件下で、照度制御を行い照度収束実験を行った。

4.2 実験結果

Fig. 5 および Table 2 に実験結果を示す。Fig. 5 は ARROWS Z を用いたときの各端末のから得られる値の履歴である。また、Table 2 は、照度収束後 600 秒

Table 1. Setup of the target illuminance values.

model	A [lx]	B [lx]	C [lx]
ARROWS Z	250	550	400

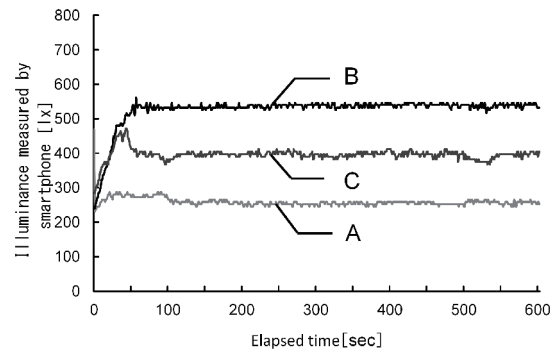


Fig. 5. The history of illuminance data (ARROWS Z ISW 11F).

時点における各端末の取得値、各端末設置地点における実際の照度値、および各端末の取得値と実際の照度値の差を示している。Fig. 5 より、ARROWS Z を用いた場合でも、各端末から得られる値は設定した目標照度に収束し、収束後の値も安定していることが確認できた。しかし、Table 2 より、3.3 節で述べたようにスマートフォンの内蔵照度センサは分解能が低いため、各端末から得られる値と実際の照度値には相違があることが確認できた。

Fig. 6 は、照度収束後における各照明の点灯状況を表している。Fig. 6 の (a) は、照度計を用いたときの照明の点灯状況、(b) は ARROWS Z を用いたときの照明の点灯状況である。Fig. 6 の (b) より、各端末に影響のある照明が強く点灯し、その他の照明は明るさを抑えていることがわかる。また、Fig. 6 の (b) に示すスマートフォンを用いた場合と (a) の照度計を用いた場合を比較しても、同等の照明制御を実現できることが確認できた。

これらの結果から、スマートフォンを知的照明システムの照度センサとして用いた場合でも、各端末の取得値は目標照度に収束し、収束後も一定値に維持することが可能であることがわかった。また、照明の点灯状況は照度計を用いた場合と同等であり、知的照明システムにスマートフォンを用いた場合でも適切な照明制御が可能である。このことから、従来の知的照明システムで利用している照度センサをスマートフォンの内蔵照度センサで代用することができる。

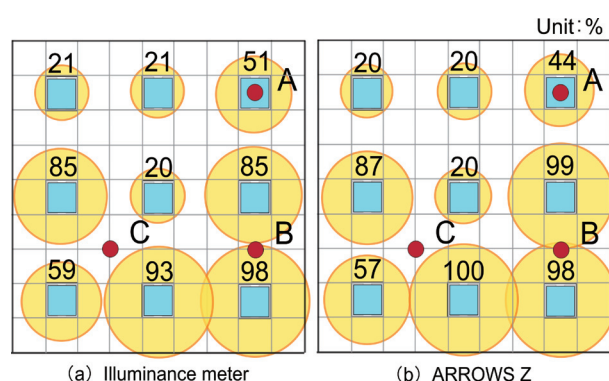


Fig. 6. The status of lightings.

4.3 検証実験のまとめ・考察

検証実験の結果から、スマートフォンの内蔵照度センサは内部的に設定している目標照度を実現でき、照度を一定に維持することが可能であることを確認した。また、省エネルギーを考慮した照明の点灯が可能であることが確認できた。しかし、内蔵照度センサから得られた値と実際の照度値には相違があることも確認した。

これまでの知的照明システムでは、目標照度を数値として執務者が設定していたが、スマートフォンで計測される照度値の誤差を補う必要がある。そこで、数値的な照度情報を不可視にし、Fig. 7に示すような現在の照度より低くするかあるいは高くするかのどちらかを執務者に選択させるといった相対的な照度設定を行うGUIを作成する。これにより、スマートフォンを用いた場合でも、従来と同等の制御が可能となる。

従って、単一の機種のみを用いた場合は、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ことが可能であるといえる。

本研究では、各照明の照度センサに対する照度/光度

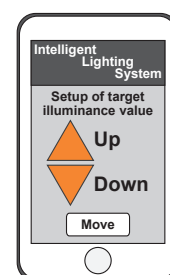


Fig. 7. The concept of operation screen for smartphones.

影響度の推定に関して、予備実験での計測結果をデータベース化することで、解決を図った。しかし、この手法はスマートフォンの位置が固定であることを想定しており、端末の移動には対応できない。このため、スマートフォンの移動に対応できる低分解能の照度センサを考慮した照度/光度影響度の推定手法の確立が必要となる。また、本研究はスマートフォンの内蔵照度センサを用いた知的照明システムの基本的な検証として、単一機種での制御を想定している。そのため、複数機種のスマートフォンが混在する状況下での影響を検証し、これを考慮することが今後の課題である。

5. むすび

本研究では、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の基本的な検証として、市販されているスマートフォンの性能について検証し、性能が高いものは単一の機種である場合に限り、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、低分解能の照度センサを考慮した新たな照度/光度影響度の推定手法および異機種混在下での個別照度制御などについて研究を進めていく。

本研究の一部は、同志社大学理工学研究所研究助成金の助成を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) 財団法人省エネルギーセンター, “オフィスビルにおける照明の消費エネルギー比率”, http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html

Table 2. Result of a measurement.

	A [lx]	B [lx]	C [lx]
Target illuminance	250	550	400
Measured value	266	547	382
Actual illuminance	314	553	452
Difference	48	6	70

- 2) 森本 康司, 太田 正明, “オフィスにおける照明設備の省エネ制御”, 東芝レビュー, **59**(10), 22-26(2004).
- 3) 下田 宏, 大林士 明, “オフィスビルの省エネルギーとプロダクティビティ照明”, 電気学会論文誌 C, **128**(1), 2-5(2008).
- 4) 大林 史明, 富田 和宏, 服部 瑤子, 河内 美佐, 下田 宏, 石井 裕剛, 寺野 真明, 吉川 榮和, “オフィスワークのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究 – 照明制御法の開発と実験的評価”, ヒューマンインターフェースシンポジウム 2006, **1**(1322), 151-156(2006).
- 5) P. R. Boyce, N. H. Eklund and S. N. Simpson, “Individual Lighting Control: Task Performance”, Mood and Illuminance JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, 131-142(2000).
- 6) 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”, 人工知能誌, **22**(3), 399-410(2007).
- 7) 小野 景子, 三木 光範, 吉見 真聡, 西本 龍生, 近江 哲也, 足立 宏, 秋田 雅俊, 笠原 佳浩, “LED 照明を用いた知的照明システムの実オフィスへの導入”, 電気学会論文誌 A, **131**(5), 321-327(2011).
- 8) 大学法人同志社大学, 株式会社三井物産戦略研究所, “平成 20 年度～平成 22 年度成果報告書エネルギー使用合理化技術戦略の開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/自律分散最適化アルゴリズムを用いた省エネ型照明システムの研究開発”, Technical Report 20110000000875, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2011).
- 9) M. Miki, T. Hiroyasu and K. Imazato, “Proposal for an intelligent lighting system and verification of control method effectiveness”, Proc IEEE CIS, 520-525(2004).
- 10) 鹿倉 智明, 森川 宏之, 中村 芳樹, “オフィス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, **85**(5), 346-351(2001).