

知的照明システムにおける各照度センサに対応した照明制御範囲の決定手法(オフィスの配置図を用いる手法)

Determination Method of Lighting Control Range Corresponding Each Illuminance Sensor in an Intelligent Lighting System (Using layout of office)

町田 啓悟 *¹ 三木 光範*² 松下 昌平 *¹ 山口 浩平 *¹ 間 博人*²
 Shohei Matsushita Mitsunori Miki Risa Kawashima Ryohei Jonan 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

In the Intelligent Lighting System, the system controls the each lighting's lumiance by classifying the brightness influence levels of the each illuminance sensor. In this classification, the influence levels needs to evaluate by the illuminance value, which system light the lightings one by one. In this study, we propose an algorithm to classify the lighting by using layout of the office, which is a simple method compare to the conventional algorithm. Moreover, the propose method classifies the lightings by the target illuminance convergence condition of the controlled illuminance sensor variably. The simplified proposed method realize the equivalent performance compared to the conventional method.

1. はじめに

近年、電力コストの低減や環境への配慮といった観点から消費エネルギーを削減する取り組みが行われており、オフィスにおいても省エネルギー性の向上が広く検討されている。オフィスにおける照明の消費電力は全体のおよそ 40 % 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ルギーに貢献することができる [2]。また、オフィス環境が執務者に及ぼす影響に関する研究が広く行われており、オフィス環境を改善することにより、知的生産性が向上することが報告されている [2]。中でも、オフィスの照明環境に注目した研究では、執務に最適な明るさ(照度)を提供することが執務者の知的生産性の向上につながる事が報告されている [3]。

このような背景より、我々は、執務に最適な照度を個別に提供することが可能な知的照明システムを提案している [4]。既にその有効性が認められ東京都内および福岡の複数の実オフィスにおいて検証実験が行われている [5, 6, 7, 8]。実オフィスにおいて必要な場所に必要照度を提供することに成功し、かつ高い省エネルギー性を実現した [8]。

知的照明システムでは、照明と照度センサの遠近関係(照度/光度影響度)を算出し、その値をもとに全ての照度センサに関し、照明に影響の大きさ(近い、やや近い、遠い)によって分類する。この分類と目標照度への収束状況によって、ランダムに変更する照明光度の変化の割合を決定していく。

これまで知的照明システムを導入した実オフィスでは、導入前にオフィスに立ち入り、照明を 1 灯ずつ点灯・消灯することで、照度/光度影響度を測定していた。しかし、導入するたびにオフィスに立ち入り照度/光度影響度を計測することは、手間がかかるため知的照明システムの普及に対する障害となる。

そこで本稿では、照度/光度影響度を用いずに適切な照明制御範囲を決定する手法を提案する。提案手法では、オフィスの配置図と照明の最大点灯光度をもとに従来手法よりも簡便に照

度センサに対する照明の制御範囲を決定する。提案する簡易な手法を用いて、従来手法と同等の性能を発揮することができるか検証実験を行った。

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。図 1 に示すように、照明器具、照度センサ、電力センサおよびそれらをつなぐネットワークから構成されている。照明には 1 台ごとに制御プロセッサが搭載されており、各照明は自律的に動作する。各照明は照度センサおよび電力センサから取得できる情報から、最適化手法を用いて執務者に感知されない範囲 [10] 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。

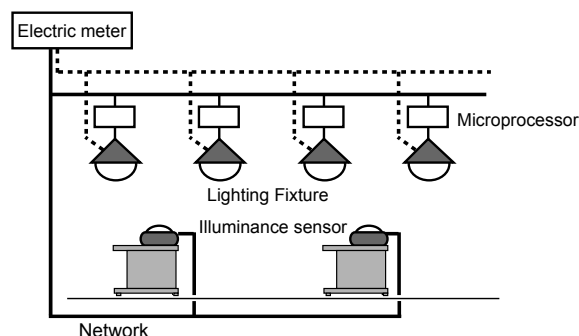


図 1: 知的照明システムの構成

2.2 照度制御アルゴリズム

知的照明システムの制御には、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/RC[9]) を用いる。適応的近傍アルゴリズム (ANA/RC) では、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

連絡先: 町田 啓悟, 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, kmachida@mikilab.doshisha.ac.jp

明ごとに自律分散的に解いている。各照明の目的関数は式 (1) で表される。

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

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

i : 照明番号, j : センサ番号, ω : 重み [W/lx^2]

P : 消費電力 [W], I_{cj} : 現在の照度 [lx]

I_{tj} : 目標照度 [lx], L : 光度 [cd],

r_{ij} : 照明 i の光度と照度センサ j の照度の回帰係数 式 (1) に

示す目的関数は、部屋全体の消費電力 P と照度制約 g_{ij} から構成され、各照明毎に計算する。知的照明システムでは、制約条件である各照度センサの目標照度に関するペナルティ g_{ij} と消費電力の和を最小化するように動作する。知的照明システムの制御フローチャートを図 2 に示す。

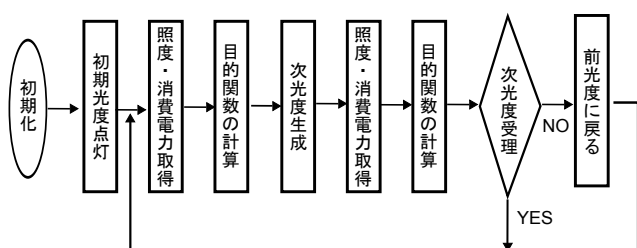


図 2: 知的照明システムの制御フローチャート

2.3 照明と照度センサの関係

照度センサから得られる照度値と照明の光度の関係は式 (3) で表すことができる。式 (3) における R は、各照明が照度センサに及ぼす影響度合いを説明する指標であり、照明環境およびオフィス内のレイアウトが変化しない限り、 R は定数とみなすことができる。知的照明システムでは、照度センサと照明の関係性を示した定数 R を照度/光度影響度係数と呼んでいる。

$$E = RI \quad (3)$$

E : 光度 [cd], I : 照度 [lx]

R : 照度/光度影響度係数 [lx/cd]

照度/光度影響度の算出方法は、オフィスの形態によって 2 つに分類される。対向島型のオフィスなど基本的に席の変更がないオフィスにおいては、事前に照明を 1 灯 1 灯点灯させ、そのとき得られた照度値から算出する。しかし、机を自由に動かせる環境や共同机など、席が固定されておらず、照度センサが移動する可能性があるオフィス環境では、照度/光度影響度を動的に導出する必要がある。このような場合、知的照明システムは常に照明の明るさを人の目では感知できない範囲で動かし続けるため、その光度の変化量と照度の変化量から回帰分析により動的に照度/光度影響度を推定する [9]。

2.4 照明と照度センサの遠近関係の決定に照度/光度影響度を用いる手法

知的照明システムでは、照明の光度と照度センサで計測された照度の影響度合いである照度/光度影響度に 2 種類の閾値を設けることで、1 台の照度センサに対しすべての照明を 3 種類 (近い, やや近い, 遠い) に分類する。閾値によって決まる、照明と照度センサの遠近関係のことを照明の制御範囲と呼ぶ。この照明の制御範囲を決定は、照明の配置間隔、配向曲線、特

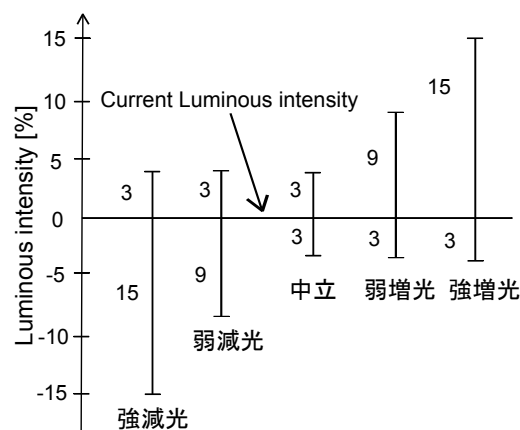


図 3: 次光度生成に用いる光度の変化幅

性により環境に合わせ変更する必要がある。この照明の制御範囲をもとに各照明は図 3 に示す光度変化幅のいずれかを選択する。各照明は選択した変化の範囲内において、ランダムに値を決定し、その割合によって自身の光度を増減する。

しかしながら、照度/光度影響度の測定は、事前にオフィスに立ち入り照明を 1 灯ずつ点灯・消灯する必要があるため、手間がかかっていた。また、正確な照度/光度影響度を用いなければ、照度収束速度ならびに消費電力が変わってくる。このため、オフィスの配置替えがあった場合、新しい配置での照度/光度影響度を測定しなおす必要があり、手間がかかるため、知的照明システムの普及に対する障害となる。

そこで本稿では、照明と照度センサの遠近関係 (照明の制御範囲) の決定に関し、照度/光度影響度を用いず、オフィスの配置図と照明の最大点灯光度から決定する手法を提案する。これによって、照度/光度影響度の測定を必要としなくなるため、導入用意性の向上に寄与すると考えられる。

3. 照明と照度センサの遠近関係の決定に配置図を用いる手法

3.1 概要

従来の知的照明システムでは、照明の制御範囲の決定には照度/光度影響度を用いていた。しかしながら、照度/光度影響度の測定には時間と手間がかかり、また、オフィスのレイアウト変更のたびに再測定を行うことは困難である。そこで本稿では、照明の制御範囲の決定に関し、オフィスの配置図と照明の最大点灯光度ならびに照度センサの目標照度から制御範囲を自動で算出し続けるアルゴリズムを提案する。また、予備実験によって、照明の遠近関係の分類に関し 3 分類 (近い, やや近い, 遠い) と 2 分類 (近い, 遠い) で照度収束速度、消費電力ともに差がなかったため、本稿では近い, 遠いの 2 分類による制御を行う。

3.2 配置図から照明制御範囲を算出するアルゴリズム

2.3 節で説明した従来のシステムにおける制御範囲は、照度/光度影響度に閾値を決定し、照明の遠近を決定、近いと判定した照度センサを対象としていた。新たに提案するアルゴリズムでは、制御範囲をオフィスの配置図と照明の最大点灯光度から算出する。また、制御範囲は照度センサの目標照度とその収束状況によって可変にする。図 4 に提案する知的照明システムのフローを示す。

また、以下の表 1 に制御範囲決定方法を示す。表 1 における影響のある照明とは、照明を最大点灯光度で点灯したとき 50

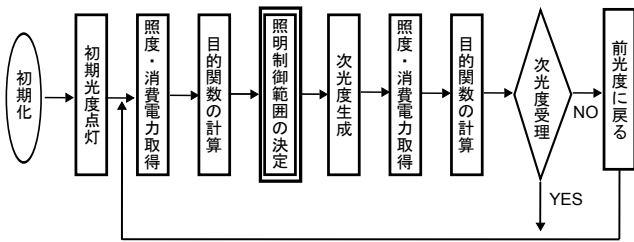


図 4: 提案する知的照明システムの制御フローチャート

lx 以上の照度が得られる照明とする。

表 1: 1 つの照度センサに対する照明の制御範囲

収束状況	制御範囲
目標照度以下	その照度センサに影響のあるすべての照明
目標照度以上	目標照度を満たすのに最低限必要な照明

また、表 1 における目標照度を満たすのに最低限必要な照明の算出方法を以下に示す。このとき照度センサと照明の位置関係が記された配置図を用いる。

1. 配置図における照度センサから半径 r (初期値 0.0 m) の円を描く
2. 半径 r の円の内側に入った照明を最大点灯光度で点灯したときの照度値をシミュレーションによって算出する。
3. (2) で得られた照度値の合計がその照度センサの目標照度を上回っていた場合終了する。下回っていた場合は半径 r の値を増やし (1) に戻る。

また、照度算出のシミュレーションには逐点法を用いた。逐点法の計算式を式 4 に示す。

$$I = \frac{L}{A \times \cos \theta} \oint_{S_e} \frac{dS_e \cos \theta \cos \delta}{p^2} \quad (4)$$

I : 照度 [lx], L : 光度 [cd], S_e : 光源面, A : 光源面の面積 [m^2]
 p : 光源との距離 [m], θ : 光源面と受照点との仰角 [rad], δ :
 光源と被照面との仰角 [rad]

本アルゴリズムを用いた例を図 5 に示す。図 5-(a) のような環境において、表 2 に示す状況変化が起こったとき、5-(b)~5-(d) の点線で囲まれた照明は中央の照度センサに対し制御を行う。また、5-(b)~5-(d) における照明の上の数字は、その照明を最大点灯光度で点灯したとき、中央の照度センサに与える照度を逐点法によって計算した値である。状況 1 は動作開始時である。状況 2 は状況 1 の状態から現在照度が目標照度を満たした状態、状況 3 は状況 2 から目標照度を 700 lx から 300 lx に変更したときの状態である。

表 2: 状況の変化

状況	目標照度	現在照度	制御範囲
1	700 lx	211 lx	図 5-(b)
2	700 lx	723 lx	図 5-(c)
3	300 lx	723 lx	図 5-(d)

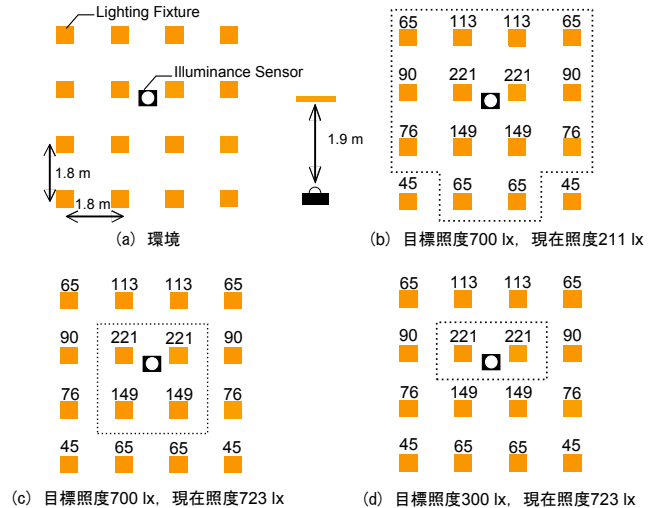


図 5: 提案手法を用いた制御範囲

4. 提案手法における照度収束実験

4.1 実験概要および環境

提案する照明の制御範囲の決定に配置図を用いる手法と従来の照度/光度影響度を使って照明の制御範囲を決定する手法の動作比較実験を行う。動作比較実験にあたり、調光度 20 % から 100 % まで調光可能な LED 照明 (最大点灯光度 1400 cd) を模擬したシミュレーション環境 (照明配置は縦 7 台 × 横 7 台) を準備した。照明器具の配置は一般的なオフィスで採用されている 1.8 m 間隔とした。また、このシミュレーション環境に照度センサを 3 台配置した。実験環境を図 6 に示す。

このときの照度センサに設定する目標照度を表 3 に示す。また、実験における初期点灯光度は最小点灯光度である 20 % から始めるものとする。

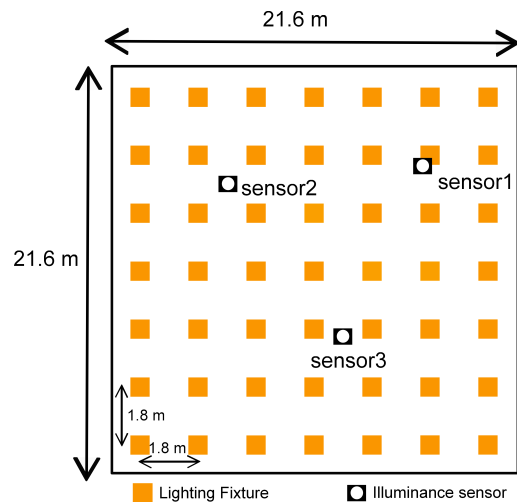


図 6: 実験環境

表 3: 照度収束実験の目標照度

照度センサ	目標照度
1	300 lx
2	500 lx
3	700 lx

4.2 実験結果

目標照度への収束に関する実験結果を図 7 に示す。図 7 の結果より、従来手法である影響度を計測し、閾値を決めることで制御範囲を決定する手法の方が目標収束域への到達が若干速いことが分かる。提案手法では照度センサの照度が目標よりも低い場合、照度センサに対し影響のある照明すべてが制御範囲となる。これにより、比較的必要のない離れた照明が強く点灯し、近い照明が減光したとき、その減光幅より増光幅が大きかった場合、その状況が受理される。このため、従来手法より目標収束域への到達が若干遅くなったと考えられる。しかし、実オフィスへの運用に際しては、目標収束域への到達が 10 ～ 20 秒遅い程度ならば許容範囲内だと考えられる。

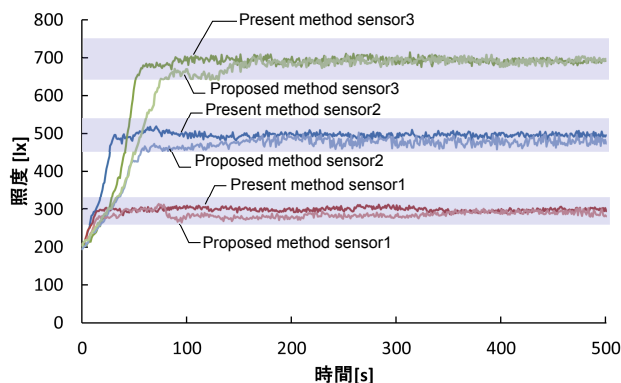


図 7: 照度収束に関する実験結果

次に本実験における消費電力の推移を図 8 に示す。図 8 より、提案手法ではまず一度大きく消費電力が上がり徐々にある値に収束していくのに対し、従来手法はゆっくりと消費電力が上がって行きある値に収束していることがわかる。

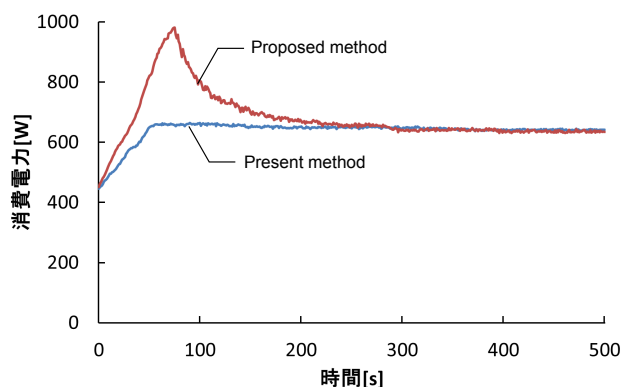


図 8: 消費電力に関する実験結果

提案手法では、照度センサの照度が目標よりも低い場合、照度センサに対し影響のある照明すべてが制御範囲となり、それらの照明が一斉に光度を上げる。このため、消費電力が一度大きく上がり、目標照度を満たしたのちに徐々に最適な点灯パターンを探索するためこのような動作になる。従来手法は、照度/光度影響度を用いることによって、はじめから照度センサに近い照明をしぼり最適化をおこなっていくため、ゆっくりと消費電力が上がっていく。消費電力に関し、従来手法の方が速く一定値に収束しているが、提案手法ならびに従来手法共に 250 秒以内にはほぼ一定の値に収束していることがわかる。しかし、実オフィスにおける知的照明システムはこののち、数

時間以上用いるため、初期の収束までの数 100 秒、消費電力が高い程度は誤差の範囲内と言える。

以上の結果より、提案する照明制御範囲の決定に配置図を用い、また照度センサの目標照度への収束状況によってその範囲を変更し続ける手法は、従来手法とほぼ同等の性能を発揮していることがわかる。これにより、照度/光度影響度の測定を必要としない照明の制御範囲の決定をしたため、知的照明システムの導入容易性が向上すると考えられる。

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
- [2] 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, “オフィスワークの生産性向上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”, ヒューマンインタフェースシンポジウム, 1(1322), pp.151-156(2006).
- [3] P. Boyce, N. Eklund, N. Simpson, “individual Lighting Control Task Performance, Mood, and Illuminance”, J. of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142(2000).
- [4] 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, 22(3), pp.399-410(2007).
- [5] 鈴木真理子, 三木光範, 田中慎吾, 吉見真聡, 中川明彦, 齋藤敦子, 福田麻衣子, “オフィス内フレームを用いた知的照明システムの構築 (オフィスインフォメーションシステム, e-ビジネスモデリング, 特集学生論文)”, 電子情報通信学会論文誌. D 情報・システム, 95(3), pp. 549-558(2012).
- [6] 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, 基礎・材料・共通部門誌= The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. A, A publication of Fundamentals and Materials Society, 131(5), pp.321-327(2011).
- [7] 三木光範, 加来史也, 廣安知之, 吉見真聡, 田中慎吾, 谷澤淳一, 西本龍生, “実オフィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システムの構築 (情報・システム基礎)”, 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, 94(4), pp. 637-645(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ルギー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, 4 月平成 23 年.
- [9] 後藤和宏, “知的照明システムのための回帰係数を用いた自立分散最適化アルゴリズム”, 照明学会 全国大会講演論文集, 40, pp.123-124(2007).
- [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変動知覚に関する研究”, J.Illum.Engng.Inst.Jpn, 85(5), pp.346-351(2001).