

知的照明システムの提案および制御方式の有効性の検証

Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness

正 三木 光範 (同志社大工) 正 廣安 知之 (同志社大工)
非 今里 和弘 (同志社大院) 非 池田 聡 (同志社大)

Mitsunori MIKI, Doshisha University, Kyo-Tanabe, Kyoto
Tomoyuki HIROYASU, Doshisha University
Kazuhiro IMAZATO, Graduate School of Engineering, Doshisha University
Satoshi IKEDA, Doshisha University

In recent years, various types of equipment have become more intelligent. In this research, we propose an intelligent lighting system for providing the necessary illuminance to a desired location; actually construct a fundamental experiment system based on that concept; and verify the effectiveness of the newly developed control method. Verification tests were conducted using an optimization algorithm specialized for lighting control, and the results showed that the various illuminance sensors converged to the preset target illuminance. We also confirmed that the system can respond adaptively to the movement of illuminance sensors and contingencies like lighting malfunctions.

Key word: intelligent, lighting systems, autonomous distributed control, energy saving

1 はじめに

近年、電化製品、自動車、飛行機など様々なシステムにおいて、使用者や環境に合わせて自身のシステムの動作を自律的に制御し、人間の負荷を軽減する知的化が行われている¹⁾。

このように、世の中の様々なシステムについて知的化が行われている中、人間が生活する上で必要不可欠である照明システムについては知的化が遅れている。例えば、照明の点灯パターンが設計時の電気配線に依存したパターンしか実現できない、または局所的に適切な照度を自動的に実現することができできない。最近では、照明をネットワーク接続することにより個別に各照明の光度を制御する技術が開発され、高度なヒューマンインターフェースを備えたシステムなどが登場しているが^{2) 3) 4)}、未だ多くの問題が残されている。例えば、任意の場所に適切な照度を自動的に与えたり、照明装置の破損に対応して他の照明が照度を補うことはできない。また、照明や照度センサの追加や部屋の間仕切りの変化などに柔軟な対応ができないことなどが挙げられる。

本研究では、このような問題点を解決し、照明を制御しながら適切な場所に適切な照度を満たし、かつ省エネルギーを実現する新たな知的照明システムの提案を行う。また、その概念に基く基本動作実験システムを実際に構築し、新たに開発した制御方式の有効性の検証を行う。

2 知的照明システムとは

2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムとは、複数の照明器具をネットワークに接続し、それぞれの照明器具の協調動作によってユーザの要求を満たすシステムである。以下に知的照明システムの特長を述べる。

2.1.1 自律分散制御

知的照明システムは全体を統括して制御する要素が存在せず、個々の照明がそれぞれ自律的に学習動作を行う

ことによって、各場所の照度制御を行う。集中管理機構を持たないため、システムの耐故障性が高く大規模なビルにおいてもシステムの高い信頼性が得られる。また、照明器具および照度センサの追加が容易であり、さらにはビル照明の設計、および施工時に各照明器具や各照度センサに識別番号や配置情報などの設定が不要になるという優れた特長を有している。

2.1.2 配線に依存しない点灯パターンを実現

現在の照明システムでは、配線により決められた点灯パターンしか実現できない。しかし、ここで提案する知的照明システムでは、照明の配線に依存しない任意の点灯パターンを実現するのみならず、各照明装置を任意の光度で点灯することが可能である。そのため、 unnecessary 照明を点灯させることなく、省エネルギーを実現する。

2.1.3 自律的な照明コントロールを実現

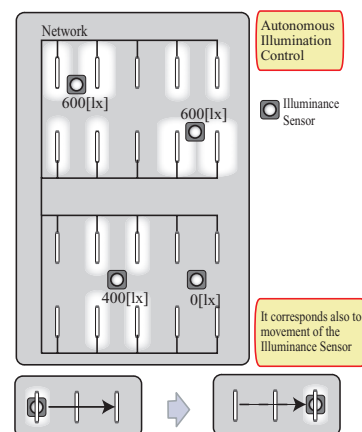


Fig. 1 Autonomous lighting control

この知的照明システムは、ユーザが照度センサに目標照度を設定するだけで、使用者に照明の位置を意識させることなく、自動的に必要となる照明を判断し、適切な場所に適切な照度を提供することができる。Fig1 に自律

2.2 知的照明システムの構成

知的照明システムは、複数の知的照明器具と複数の移動可能な照度センサおよび電力計をネットワークに接続することで構成される。知的照明器具とは学習判断ユニットと呼ばれる制御装置を備えた照明である。これにより、個々の照明を自律的に動作することが可能となる。Fig2に知的照明システムの構成を示す。

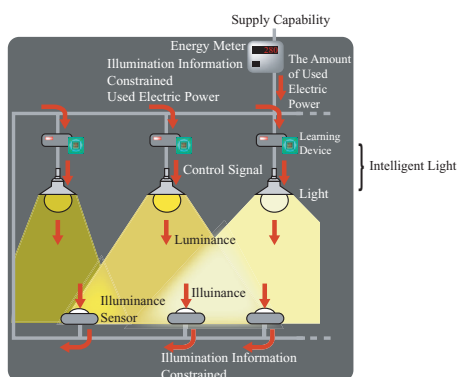


Fig. 2 Configuration of the intelligent lighting system

2.3 知的照明システムの制御

知的照明システムは自律分散制御方式を用いて制御を行う。各知的照明器具は自律的に光度の調節を行うことによって照度の制御を行う。以下に制御の流れについて説明する。

1. 知的照明システムの初期設定を行い、「使用電力量を最小化する」という目的を学習判断ユニットに与え、「各照度センサの照度をある値以上にする」という制約条件を照度センサに与える。
2. 各照度センサが現在の照度を感知する。
3. 各照度センサが目標照度と現在の照度をネットワークに流す。
4. ネットワークに接続された各知的照明器具は、使用電力量と各照度センサの目標照度、および現在の照度を取り込む。
5. 各知的照明器具の学習判断ユニットは取り込んだ電力量、各照度センサの現在の照度、および目標照度から本研究で提案する照明制御アルゴリズムに基づき、光度を制御する。
6. 手順 2~5 を繰り返すことで、常に環境情報を感知し、目的や制約条件を満たすように制御を行う。

以上の流れにより、各知的照明器具は他の知的照明器具の情報を得ることなく、自らの動作に対する有効性を学習していき、目的および照度の制約条件を満たすように自律的に照度制御を行う。また、常に環境情報を感知することで、照明の追加、故障、および照度センサの追加や移動に対応できる。

3 基本動作実験システム

基本動作実験システムとは、知的照明システムの問題に基づき実際に構築したシステムである。以下に基本動作実験システムの構成について説明する。

3.1 ハードウェア構成

基本動作実験システムのハードウェア構成は、インバータ制御可能な蛍光灯 15 灯、複数の移動可能な照度センサ、および各照明に対する制御装置から構成されている。インバータ制御とは、デジタル波形の Duty 比を任意に変化させることで光度を調節する技術である。

3.2 照明の制御アルゴリズムプログラム

本研究では照明の制御アルゴリズムとして確率的山登り法をベースとし、新たに開発した自律分散最適化アルゴリズムを用いた。このアルゴリズムの詳細を次に示す。本システムでは、個々の照明がそれぞれ確率的山登り法で探索を行い、評価計算時に同期をとる Fig3 のモデルを用いる。

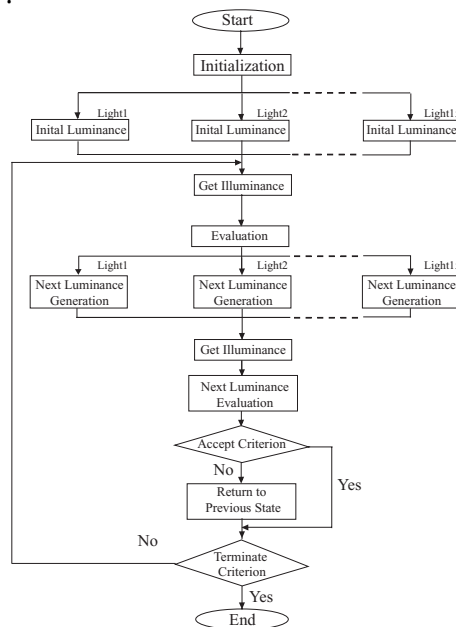


Fig. 3 Application to the intelligent lighting system

1. 初期設定を行う。全ての蛍光灯を初期光度で点灯させ、目標照度を設定する。
2. 各照度センサの現在の照度と目標照度の差から目的関数値を計算する。
3. 光度の変化量を計算し、新しい光度で各照明器具を点灯させる。
4. 変化した照度と目標照度の差から目的関数値を計算する。目的関数値が良好になっている場合、その光度を確定しステップ 2 へ戻る。
5. 手順 4 で目的関数値が悪化した場合、与えた光度変化量をキャンセルし、手順 2 へ戻る。

以上の動作を行う事で、目標照度に収束すると考えられる。なお、手順 4 で光度変化を確定した場合、手順 3 に戻らない理由は、手順 4 の動作時間内に外光が射しこむなどの環境変化に対応させる為である。

知的照明システムの目的は、照度を各照度センサの目標照度に近づけることと、電力の最小化である。すなわちこれらをうまく目的関数に定式化しなければならない。本アルゴリズムに用いる目的関数を Eq1 に示す。

$$f = \sum_{i=1}^n g(i) + w \sum_{j=1}^m Br(j) \quad (1)$$

$$g(i) = \begin{cases} 0 & (Lc_i - Lt_i) \geq 0 \\ (Lc_i - Lt_i)^2 & 0 > (Lc_i - Lt_i) \end{cases}$$

本アルゴリズムでは Eq1 の f の最小化を目的とする． f は現在の照度と目標照度の照度差を表す $g(i)$ と照明の光度 $Br(j)$ の和からなる． $g(i)$ は照度差が負であった場合にのみ加算される．すなわち現在の照度が目標照度を下回っていた場合、急速に増光する．光度 $Br(j)$ は蛍光灯の消費エネルギーと線形関係があり、ここでは各照明の使用電力として考える．この $Br(j)$ には重み w をかける．この w の値により、目標照度最適化を優先するか、電力を最小化を優先するかが決まる．

4 実証実験の設定

Fig4 に実験環境を示す．以下に示すの 3 つのパターンで実験を行い、基本動作実験システムが自律的な照度コントロールを実現できることを検証する．

1. 実験 1：環境を固定した場合
設置する照度センサの目標照度はセンサ A を 400 [lx]、センサ B を 500 [lx]、センサ C を 550 [lx] とする．照度センサの配置を Fig4 に示す．
2. 実験 2：照度センサを移動させた場合
実験 1 の状態から照度センサ C を Light 4, 5, 9, および 10 の中心へ移動させる．
3. 実験 3：知的照明器具が故障した場合
実験 2 の状態から照明 7 を故障させる．

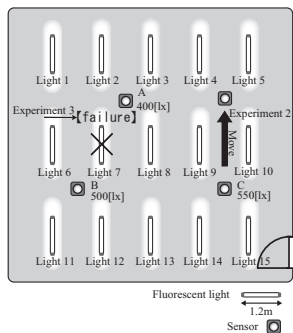


Fig. 4 Experiment environment

実験に用いたパラメータを Table1 に示す．本実験では、光度の変化量は 2%刻みで行った．

Table 1 Experiment parameters

蛍光灯の数 [灯]	15
照度センサの数 [個]	3
目標照度 [lx]	400, 500, 550
増減光の分布 [%]	± 8, ± 6, ± 4, ± 2, 0
初期光度 [cd]	全て 1050
重み (w)	1.7

5.1 環境を固定した場合

環境を固定した場合の実験結果について述べる．Fig5, Fig6, および Fig7 に各照度センサの照度, 各照明の光度, および目的関数値の履歴を示す．各図の横軸は探索回数である．

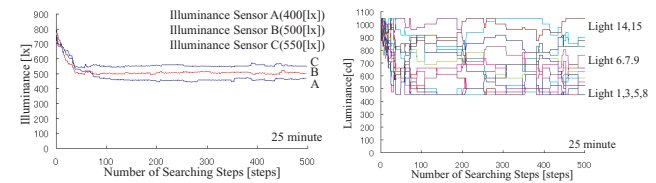


Fig. 5 Illuminance history Fig. 6 Luminance history

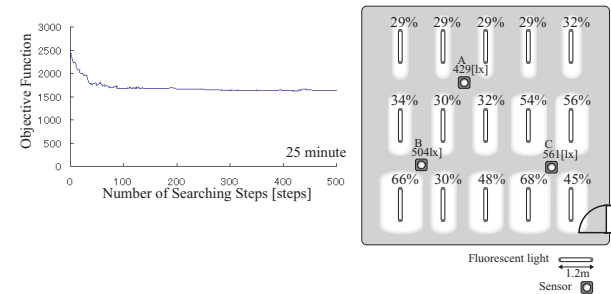


Fig. 7 Objective function Fig. 8 Luminance of each light in the steady state

Fig5 より、実験開始後、初期の照度が減少し、探索回数約 100 回 (300 秒) で各照度センサ A, B, および C の照度は 460, 500, 555 [lx] となり、目標照度にほぼ近い照度に収束していることがわかる．また、Fig7 より探索が進むにつれて目的関数値が減少することにより電力の最小化が行われていることがわかる．また、定常状態における電力は初期状態と比べて約 47%減少した．Fig8 に各照明の光度 [%：最大点灯光度を 100%としたときの光度の割合 (以下同じ)] を示す．

5.2 照度センサを移動させた場合

照度センサを移動させた場合の実験結果について述べる．Fig9, および Fig10 に各照度センサの照度, および目的関数値の履歴を示す．各図の横軸は探索回数である．

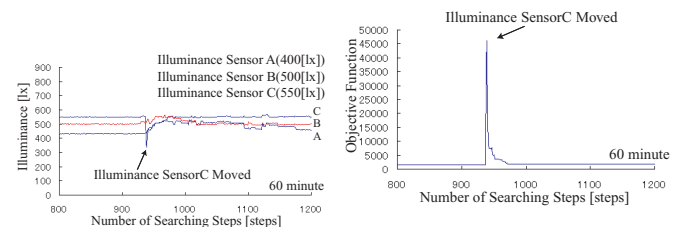


Fig. 9 Illuminance history Fig. 10 Objective function value history

Fig9 より、照度センサ C を移動した時 (探索回数約 950 回) 照度センサの値が目標照度を大きく下回る．Fig10 より、その時の目的関数値が高い値に変化したことから環境が変化したことが確認できる．照度センサ C を移動させる直前の各照度センサの照度はそれぞれ 438, 500, お

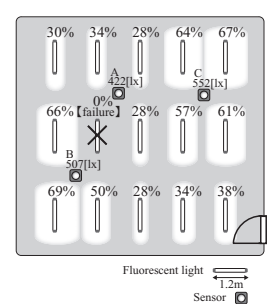
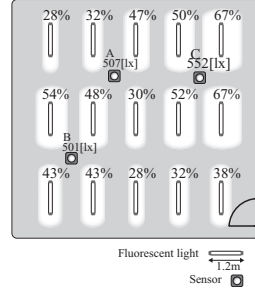
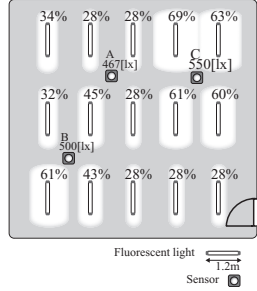
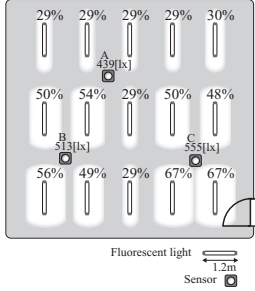


Fig. 11 Before moving

Fig. 12 Steady state

Fig. 16 Before light malfunction

Fig. 17 Steady state

および 557 [lx] である。Fig11 に移動直前の各照明の光度 [%] を示す。また、Fig9 より、照度センサ C を移動させてから探索回数約 50 回、すなわち 150 秒には目標照度を下回っていた照度センサ C の照度が目標照度に達することがわかる。

定常状態における、各照度センサの照度は 467, 500, および 550 [lx] となり、目標照度にほぼ収束している。照度センサ A の照度が目標照度より高くなっているのは、照度センサ C が移動したことによって照度センサ A に影響のある照明 4, および 9 の光度が高くなったためである。

定常状態における各照明の光度 [%] を Fig12 に示す。Fig11 と Fig12 を比べると、照度センサ C が移動した先にある照明 4, 5, 9, および 10 が光度を上げ、照明 14, および 15 は、どの照度センサにも影響がなくなったため光度が下がる。これにより、本システムが照度センサの移動に対して対応できることが分かる。

5.3 知的照明器具が故障した場合

知的照明器具 (蛍光灯) が故障した場合、の実験結果について述べる。Fig13, Fig14, および Fig15 に各照度センサの照度、各照明の光度、および目的関数値の履歴を示す。各図の横軸は探索回数である。

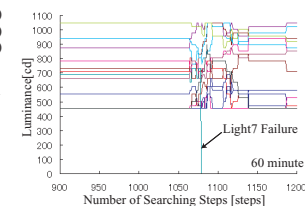
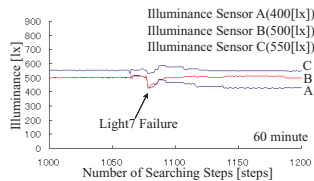


Fig. 13 Illuminance history

Fig. 14 Luminance history

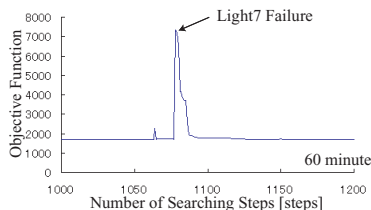


Fig. 15 Objective function value history

Fig14 より、照明 7 が故障した時点 (探索回数約 1080 回) に光度が 0 [cd] になることがわかる。そのため、Fig13 よりわかるように照度センサ B の照度が目標照度を下回る。また、Fig15 より、この故障が生じた時点で目的関数値が高い値に変化していることから環境が変化したこと

が確認できる。照明 7 が故障する前の各照度センサの照度は 507, 501, および 552 [lx] である。Fig16 に故障直前の各照明の光度 [%] を示す。また、Fig13 より照明 7 が故障してから探索回数 30 回、すなわち約 90 秒後に照度センサ B の照度が目標照度に達していることがわかる。

定常状態における各照度センサの照度は 422, 507, および 552 [lx] となり、目標照度にほぼ収束していることがわかる。定常状態における各照明の光度 [%] を Fig17 に示す。Fig16 と Fig17 を比べると、故障した照明 7 の明るさを補うために、照明 6, 11, 12 の光度が増加している。これにより、本システムは照明の故障に対応できることが分かる。

6 おわりに

本研究では、移動可能な照度センサの情報に基づき、任意の場所に任意の照度を与えることができ、かつ省エネルギーに貢献する知的照明システムの提案を行った。また、蛍光灯を用いた基本動作実験システムを構築し、提案した自律分散制御アルゴリズムを用いて実験を行ったところ、適切な動作を行うことを確認した。これらのことから、本研究で提案した知的照明システムはこれまでに開発された高度な照明システムをはるかにしのぐ有効性を持つ確信的な照明システムであることが考えられる。

参考文献

- 1) KAWAOKA T MIKI M. Design of intelligent arti-facts:a fundamental aspects. *Proc.JSME International Symposium on Optimization and Innovative Design*, 1997.
- 2) RUBINSTEIN F. 50 percent energy savings with automatic lighting controls. *Strateg Plann Energy Environ*, Vol. 11, No.2, pp. 17-31, 1991.
- 3) Lighting controls. *Int Light Rev*, Vol. 49, No.981, pp. 48-49, 1998.
- 4) DEL COZ J J CALLEJA A J LOPEZ E RICO-SECADES M ALONSO J M, RIBAS J. Intelligent control system for fluorescent lighting based on lon-works technology. *Proc IEEE IECON*, Vol. 1998, No.1, pp. 92-97, 1998.