

Construction of the Distributed Controlled Intelligent Lighting System using the Control Device which can be Equipped in a Lighting Fixture

Yoshihiro KASAHARA^{*}, Mitsunori MIKI^{**}, Keiko ONO^{***} and Takuro YOSHII^{*}

(Received January 12, 2012)

In our laboratory, Intelligent Lighting System is proposed as lighting control system targeting office environment. Currently, a verification experiments of Intelligent Lighting System is conducted in an actual office. Intelligent Lighting System has been studied as a distributed controlled system equipped with an individual lighting control device, but the systems that used in the verification experiments are centralized controlled systems that controls all lighting fixtures with one centralized control device. Because of the high development cost of the control device which can be equipped in a lighting fixture. However, these system configurations have the different features, respectively. Therefore, appropriate system configuration is different by the office which introduces Intelligent Lighting System. In this study, we develop control devices which can be equipped in a lighting fixture. Additionally, distributed controlled Intelligent Lighting System is constructed by using the proposed control devices.

Key words : optimization, lighting control, office environment, energy saving

キーワード : 最適化, 照明制御, オフィス環境, 省エネルギー

照明器具に搭載可能な制御装置を用いた分散制御型知的照明システムの構築

笠原 佳浩, 三木 光範, 小野 景子, 吉井 拓郎

1. まえがき

近年, オフィスワークの知的生産性, 創造性, および快適性の向上に注目が集まっている^{1, 2)}. そして, Boyce らの研究により, 執務に最適な明るさ(照度)を個人ごとに提供することは, 照明環境改善の観点か

ら有効であると明らかにされている³⁾. このような背景から, 著者らは個々のオフィスワークの要求に応じた照度を提供する知的照明システムの研究を行っている^{4, 5, 6)}. 現在, 著者らは, 知的照明システムを複数のオフィスビルに導入し, 実用化に向けた実証実験を

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

Telephone:+81-774-65-6924 E-mail:ykasahara,tyoshii@mikilab.doshisha.ac.jp

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

Telephone:+81-774-65-6930,6780,Fax:+81-774-65-6716 E-mail:mmiki,myoshimi@mail.doshisha.ac.jp

^{***} Department of Electronics and Informatics, Ryukoku University, Kyoto

Telephone:+81-077-543-7495 E-mail:kono@rins.ryukoku.ac.jp

行っている^{7, 8)}。

実証実験で用いられている知的照明システムは、1 台の制御装置ですべての照明を制御する集中制御型のシステムである^{7, 8)}。知的照明システムは自律分散型のアルゴリズムを用いているため、システム構成として、各照明器具に搭載された制御装置がそれぞれの照明を制御する分散制御型のシステムであるが、1 台の制御装置の中に複数のスレッドを立ち上げて制御を行うことで集中制御型のシステムとすることも可能である。これらのシステム構成は、異なった特徴を有しているため、知的照明システム導入オフィスによって適切な構成は異なる。しかしながら、照明器具に搭載可能な制御装置の開発コストが大きいことから、分散制御型知的照明システムはこれまで構築してこなかった。

そこで、本研究では分散制御型知的照明システムを実現するため、照明器具に搭載可能な制御装置の試作を行うとともに、試作した制御装置を用いて分散制御型知的照明システムを構築する。

2. 知的照明システム

2.1 システム概要

知的照明システムは、制御装置、照明器具、照度センサ、および電力センサをネットワークで接続することにより構成されている。制御装置は、照度センサからの照度情報、および電力センサからの消費電力情報に基づいて、焼きなまし法を照明制御用に改良した適応的近傍アルゴリズムに従い照明を制御する^{5, 6)}。

2.2 システム導入事例

現在、著者らは知的照明システムのプロトタイプシステムを複数のオフィスビルに導入し、実用化に向けた実証実験を行っている^{7, 8)}。主な導入オフィスは以下の通りである。

- 三菱地所株式会社 都市計画事業室
- 三菱地所株式会社 ビル管理企画部
- 三菱地所株式会社 エコツツェリア
- 森ビル株式会社 本社オフィス
- 三菱電機株式会社 本社オフィス

三菱地所株式会社が保有する大手町ビルディング（東京都千代田区大手町）内の都市計画事業室では、16 m × 15 m のフロアに 22 名のオフィスワーカーが執務を行っている。都市計画事業室導入システムのシステム構成を Fig. 1 に示す。

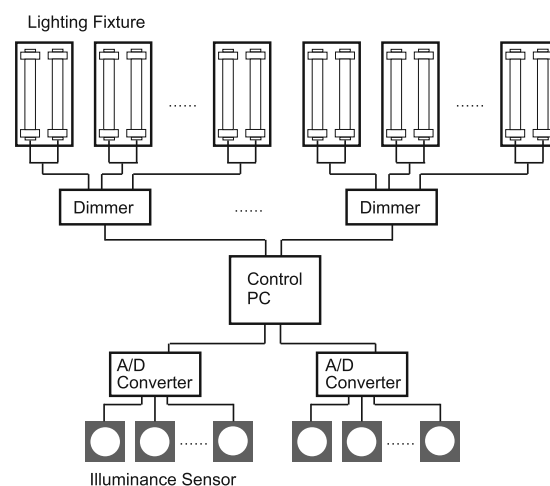


Fig. 1. System configuration of the introduced system.

Fig. 1 に示した通り、都市計画事業室導入システムは、システム制御用コンピュータ 1 台、照明器具（昼白色蛍光灯 2 管・電球色蛍光灯 1 管）26 台、調光インタフェース（各 10 チャンネル実装）6 台、照度センサ 22 台、および A/D 変換器（各 16 チャンネル実装）2 台より構成される。調光インタフェースとは、Pulse Width Modulation (PWM) 方式に基づいてパルス波の Duty 比を変化させることで、照明器具の光度を制御することが可能な装置である。前に述べたが、知的照明システムの制御には、各照度センサの照度情報および電力センサの電力情報が必要となる。照度情報に関して、照度センサからの照度情報はアナログ信号で出力される。そのため、システム制御用 PC は、A/D 変換器を介してデジタル信号に変換した後に、照度情報の取得を行っている。また、電力情報に関しては、電力量と各照明の光度の和が比例関係にあることから、システム制御用 PC が管理している各照明の光度情報を基に推定している。

都市計画事業室における、代表的な照度センサの照度履歴を Fig. 2 に示す。

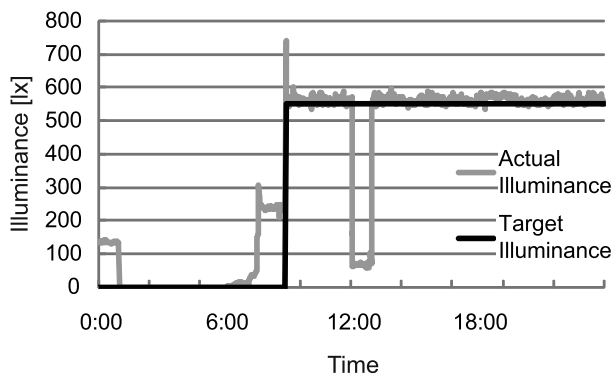


Fig. 2. History of illuminance of a typical illuminance sensor.

Fig. 2 より、実現照度はユーザが設定した目標照度にはほぼ一致していることが確認できる。なお、12時から13時までの時間帯の照度値が低いのは、この時間帯が昼休みであり、オフィス全体の照明を消灯しているためである。また、目標照度が設定された時刻の少し前から実現照度が増加しているのは、窓からの外光および先に出勤したオフィスワーク付近の照明器具からの影響を受けているためである。以上のような結果より、我々は、知的照明システムがユーザの目標照度を満たし、高い省エネルギー性を実現できることを確認している。

2.3 実オフィスにおけるシステム構成上の課題

2.2 節で述べた通り、我々は、実オフィスにおいても知的照明システムの有効性を確認している^{7, 8)}。しかしながら、照明器具に搭載可能な制御装置の開発コストが大きいことから、分散制御型知的照明システムはこれまで構築してこなかった。実証実験で用いられている知的照明システムは、1 台の制御装置ですべての照明を制御する集中制御型のシステムである。知的照明システムは自律分散型のアルゴリズムを用いているため、システム構成として、各照明器具に搭載された制御装置がそれぞれの照明器具を制御する分散制御型システムであるが、1 台の制御装置の中に複数のスレッドを立ち上げ制御を行うことで集中制御型システムとすることも可能である。これらのシステム構成は、それぞれ異なった特徴を有しているため、知的照明システム導入オフィスによって適切な構成は異なる。

そこで、本研究では分散制御型知的照明システムを実現するため、照明器具に搭載可能な制御装置の試作を行うとともに、試作した制御装置を用いて分散制御型知的照明システムを構築する。

3. 分散制御型知的照明システム

3.1 分散制御型知的照明システムの概要

現在、実証実験を行っている知的照明システムの構成は 2.2 節で述べた通りである。実証実験で用いられている知的照明システムは、1 台の制御装置ですべての照明を制御する集中制御型のシステムである。一方、本研究で構築する知的照明システムは、各照明器具に搭載された制御装置がそれぞれの照明器具を制御する分散制御型のシステムである。分散制御型知的照明システムのシステム構成を Fig. 3 に示す。

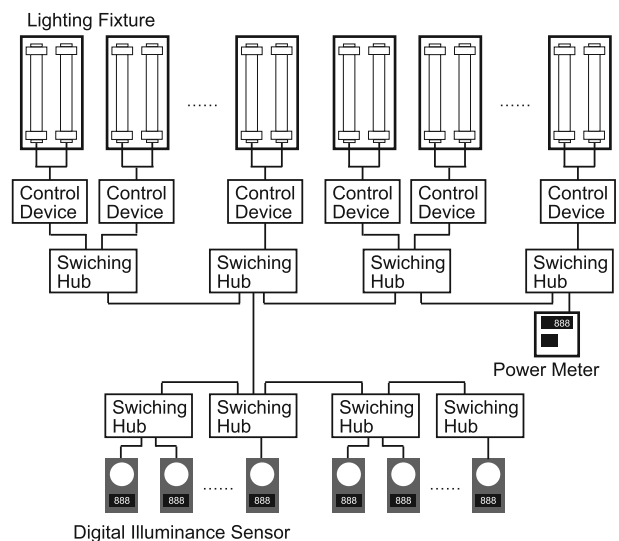


Fig. 3. Configuration of the digital distributed controlled system.

Fig. 3 に示した通り、分散制御型知的照明システムのシステム構成は、制御装置が搭載された照明器具、電力センサ、照度センサ、およびスイッチングハブである。各機器はイーサネットにより接続されており、各制御装置は照度センサから照度情報、電力センサから消費電力情報を得ることができる。本研究で構築する分散制御型知的照明システムでは、通信にイーサネットを用いることで、TCP/IP 通信に代表されるように、

宛先を指定してデータを送信することが可能である。また、通信経路に冗長性を持たせることも可能である。分散制御型知的照明システムは、各照明器具に搭載された制御装置が、照度情報および消費電力量情報を基に、自律分散型の制御アルゴリズム（ANA/RC）に従って各照明の光度を決定することで、ワークが要求する照度を満たしかつ高い省エネルギー性を実現する。

3.2 システム構成の比較

集中制御型知的照明システム、および分散制御型知的照明システムは、それぞれ異なった特徴を持つ。次に、知的照明システムの実用化を進めるにあたり、重要な項目（費用、保守性、導入容易性、拡張性、信頼性）について比較を行う。

- 費用

集中制御型知的照明システムでは、制御装置にPCを用いることが可能である。一方、分散制御型知的照明システムは、照明器具に搭載可能な制御装置を開発しなければならない。

- 保守性

集中制御型知的照明システムは、制御装置が1台であるため、容易にソフトウェアおよびハードウェアの変更が行える。一方、分散制御型知的照明システムは、制御装置が複数台であること、および制御装置が照明器具に搭載されていることから、ハードウェアの変更は容易ではない。また、すべての制御装置のソフトウェアを変更することは容易ではない。

- 導入容易性

集中制御型知的照明システムは、集中制御器を設置する必要がある。一方、分散制御型知的照明システムは、制御装置が照明器具に搭載されているため制御機器を設置する必要がある。

- 拡張性

知的照明システムにおける拡張性とは、照明器具もしくは照度センサ数の増減に柔軟に対応可能なことである。拡張性に関して、制御方式による違いはない。

- 信頼性

集中制御型知的照明システムは、制御装置が1台であることから耐故障性に優れない。一方、分散制御型知的照明システムは、制御装置が複数に分散していることおよび各制御装置が自律分散制御アルゴリズムで動作していることから、1台の制御装置が故障した場合でも、他の制御装置は動作を続けることができる。

以上のことより、実用化するにあたって、小規模オフィスでは費用、保守性に優る集中制御型知的照明システムを導入するメリットは大きい。しかし、大規模オフィスにおいては導入容易性や信頼性の観点から分散制御型システムを実現する必要がある。しかしながら、照明器具に搭載可能な制御装置の開発コストが大きいことから、分散制御型知的照明システムはこれまで構築してこなかった。

4. 分散制御型知的照明システムの構築

4.1 構築システムの構成

本研究により構築する、分散制御型知的照明システムのハードウェア構成をFig. 4に示す。

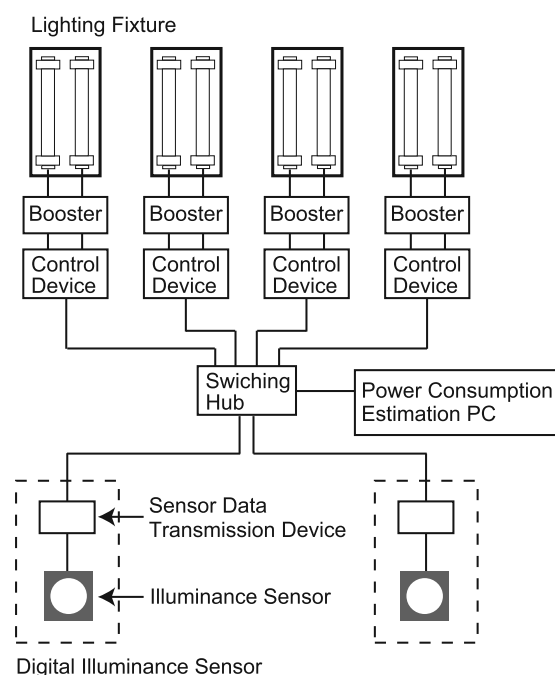


Fig. 4. Hardware configuration of the system constructed in this study.

Fig. 4 に示した通り、構築システムのハードウェア構成は、パナソニック社製蛍光灯照明器具（昼白色蛍光灯 2 管）が 4 台、デルタオーム社製照度センサが 2 台、制御装置が 4 台、センサデータ通信装置が 2 台、および消費電力推定用 PC が 1 台である。構築システムでは、照明器具としてパナソニック社製蛍光灯（FHP32EN）を使用する。

制御装置は、センサデータ通信装置からの照度情報および消費電力推定用 PC からの電力情報を基に、自律分散型の制御アルゴリズム（ANA/RC）に従い照明の光度を制御する。また、消費電力量推定のため、消費電力推定用 PC へ現在の光度情報を送信する。センサデータ通信装置は、照度センサで計測された照度値を A/D 変換し、すべての制御装置へ照度情報、目標照度情報を送信する。

消費電力推定用 PC は、制御装置から受信した照明の光度の合計値を基に消費電力量を推定し、すべての制御装置へ送信している。なお、照明の光度の合計値と消費電力量の関係が、1 次式で近似できる関係にあることは予備実験により確認した。

構築システムでは、制御装置およびセンサデータ通信装置としてルネサスエレクトロニクス社製 16bit マイクロプロセッサ（H8/3069F）を使用する。また、H8/3069F を使用するにあたり、株式会社日昇テクノロジー Kane BeBe H8/3069F ボード（以下、H8/3069F ボード）を用いた⁹⁾。H8/3069F ボードは、IEEE 準拠 10BASE-T 対応の Ethernet コントローラ（RTL8019AS）を搭載しているため、TCP/IP を用いた通信が可能である。これは、すべての機器をネットワークで接続する知的照明システムにおいて、データの通信に関して高い信頼性が確保されるという利点を持っている。また、照明の光度は PWM 方式に基づいて制御するが、H8/3069F ボードの出力電圧が 5 V であるに対し、照明の入力電圧が 10 V であったため、昇圧回路を介して照明を調光する。

4.2 動作実験

構築システムの動作を検証するため、Fig. 5 に示す実験環境において動作実験を行った。実験には照明を

4 台、および照度センサを 2 台用いる。照明は 1 列に配置されており、照度センサ A を照明 1 および 2 から等距離な場所に設置した。また、照度センサ B を照明 3 の直下に設置した。なお、照明の設置間隔 1.8 m は、一般的な日本のオフィスにおける照明の設置間隔である。

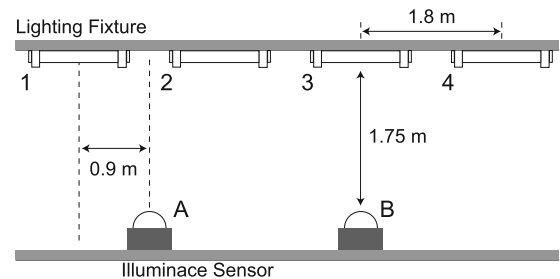


Fig. 5. Experimental environment.

本実験では、照度センサ A、B の目標照度をそれぞれ 450, 550 lx と設定した。また、約 360 秒後に照度センサ A の目標照度を 700 lx に変更した。これらの目標照度は、実オフィスにて行った実証実験を参考に決定した⁸⁾。実験により得られた照度の履歴を Fig. 6 に、光度の履歴を Fig. 7 にそれぞれ示す。

Fig. 6 より、制御開始から約 100 秒後における各照度センサの実現照度は、目標照度である 450 lx および 550 lx から ± 50 lx 以内となっている。オフィス環境において、人間が認知できる照度差は 50 lx 程度であること¹⁰⁾ から、各照度センサに関して目標照度が満たされていると考えられる。また、制御開始から約 360 秒後に照度センサ A の目標照度を 700 lx 変化した際にも、20 秒程度で照度センサ A の実現照度が目標照度へ収束している。一方、照度センサ B の実現照度は目標照度である 550 lx から ± 50 lx 以内で安定している。このことより、分散制御型知的照明システムにおいても、各照度センサに個別の照度が実現できている。

Fig. 7 より、各照明の光度に関して、制御開始から約 100 秒で必要な光度へと変化している。知的照明システムでは、各照明が各照度センサに及ぼす影響を学習することで、効率的な制御をおこなっている。制御開始から約 50 秒後から急激に光度が変化しているのは、この影響度学習が正しく行われたためである。約

100 秒から照度センサ A の目標照度を変更する約 360 秒までの間に、照明 2 および 3 の光度が照明 1 および 4 の光度と比較して、高くなっている。照明 3 は、最も照度センサ B に距離が近いので、光度が高くなったと考えられる。また、照明 2 は、照明 1 と比較して照度センサ A からの距離では等距離であるが、照度センサ B から距離が近いので、光度が高くなったと考えられる。照度センサ A の目標照度を変更した約 360 秒から 500 秒までの間に、照明 1 および 2 の光度が高くなることで、変更された照度センサ A の照度を満たしている。その中でも、照明 2 の光度が高いのは、照度センサ B の照度も同時に満たすことができるためである。このことより、分散制御型知的照明システムにおいても、各照明が照度センサへ及ぼす影響を正しく学習して制御が行われた。

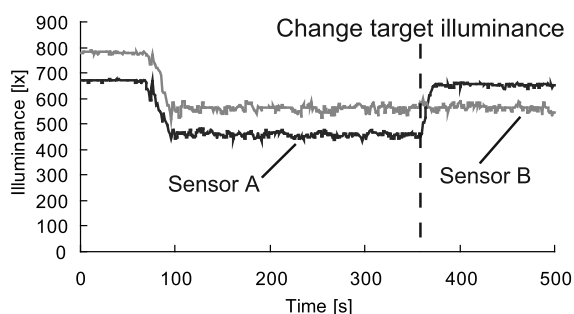


Fig. 6. History of illuminance.

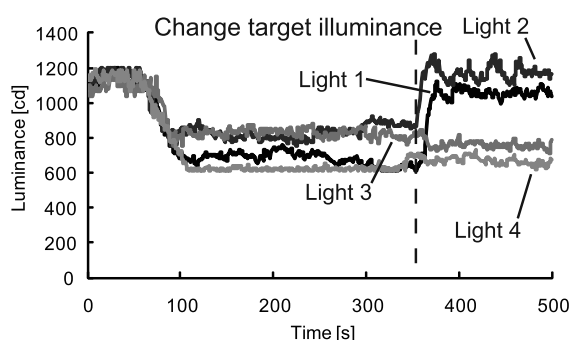


Fig. 7. History of luminance.

5. むすび

本研究では、分散制御型知的照明システムを実現するため、照明器具に搭載可能な制御装置の試作を行ったとともに、試作した制御装置を用いて分散制御型知

的照明システムを構築した。構築システムを用いて動作実験を行った結果、照度センサに設定された目標照度を満たし、かつ最適な点灯パターンであることを確認した。以上より、分散制御型知的照明システムの構築が可能となり、知的照明システム導入オフィスの規模に応じて適切なシステム構成を取ることが可能となった。

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) O. Seppanen, and W. J. Fisk, A Model to Estimate the Cost-Effectiveness of Improving Office Work through Indoor Environmental Control, Proceedings of ASHRAE, 2005
- 2) M. J. Mendell, and G. A. Heath, Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature, Indoor Air, Vol.15, No.1, pp.27-52, 2005
- 3) P. R. Boyce, N. H. Eklund, and S. N. Simpson, Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, and Illuminance, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, Winter 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, Vol.22, No.3, pp.399-410, 2007
- 5) S. Tanaka, M. Miki, T. Hiroyasu, M. Yoshikata, An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces, Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern, Vol.2, pp.941-947, 2009
- 6) 小野景子, 三木光範, 米澤基, 知的照明システムのための自律分散最適化アルゴリズム, 電気学会論文誌, Vol.130, No.5, pp.750-757, 2010
- 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-D, pp.637-645, 2011
- 8) 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, Vol.131, No.5, pp.321-327, 2011
- 9) 株式会社日新テクニカ: 多機能マイコンボード Kane Be Be H8/3069F
- 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, Vol.85 No.5, pp.346-351, 2001