

The Development of a Wireless Sensor Network-Driven Intelligent Lighting System

Motoi OKADA** , Hiroto AIDA* , Ryoga OKUNISHI** , Yo MOTOYA** and Mitsunori MIKI*

(Received April 18, 2014)

A wireless sensor network is a technology that connects many computers, sensing function to network by wireless communication, collecting real world information, and expected its practical realization. On the other hand, we have done the research and development about lighting control system called Intelligent Lighting System which provides illuminance for individual workers with lower power consumption. The system we already introduced, is controlled by the control PC, but it has problem of concentrating of load, and having single point of failure solving these problems. Therefore we propose Wireless Sensor Network-driven Intelligent Lighting System that is in which each wireless sensor node performs a lighting control in a distributed manner in the wireless sensor network. In Wireless Sensor Network-driven Intelligent Lighting System, since every wireless sensor node in the network performs illumination control autonomously, it can prevent a concentration load and the occurrence single point of failure. In this article, verifying the number of lighting that satisfy the illuminance required by workers, we did the comparison with previous system to verify the usefulness.

Key words : lighting control, wireless sensor network, distributed control system, optimization, energy saving

キーワード : 照明制御, 無線センサネットワーク, 分散制御システム, 最適化, 省エネルギー

無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの開発

岡田 基, 間 博人, 奥西 亮賀, 本谷 陽, 三木 光範

1. まえがき

オフィスの照明に対する省エネルギー化を目的とし, 我々は知的照明システムの研究開発に取り組んでいる^{1,2)}. 知的照明システムは, 照明の明るさである光度を変化させながら, 執務者に個別の明るさを提供すると同時に, 不必要な照明の光度を抑え消費電力量を削減することが可能である. 一方, Philips hue³⁾をはじめとし, 無線を用いて個々の照明を直接調光でき

る環境が整いつつある. そこで本研究では, 無線センサノードを置くだけで, ネットワークを構築し無線センサノードが自律的分散的に各照明を直接制御する無線センサネットワーク駆動型知的照明システムを提案する.

無線センサネットワークは, 防災, 防犯, 農業, 医療・福祉, ビル・工場, 交通モニタリング, 環境モニタリング, 物流マーケティングなど様々な分野での活躍

* Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

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

** Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6924,E-mail:smatsushita,hikegami,hnakabayashi,ttaniguchi@mikilab.doshisha.ac.jp

が期待されている。照明制御を無線センサネットワークで実現する研究もエンターテイメントを目的としたものや、離席時の省電力を目的としたものが、いくつも行われている^{4,7)}。しかしながらこれらは、センサノードから照度データを集め、サーバで照明制御を行う。これに対し本研究では、センサネットワーク内でセンサノード間が自律的協調的に各照明の光度を決定することで、集中型における負荷の集中や単一故障点といった問題に対応することが可能である。

2. 知的照明システム

知的照明システムは、照明の光度を変化させ、各執務者の要求する照度を実現する。この執務者の要求する照度を目標照度とする。また、不必要な照明の光度を抑えることで消費電力量の削減が可能である。

知的照明システムでは、照度センサを各執務者の作業スペースに配置し、執務者の作業領域の明るさを計測する。照度センサが計測した照度値と、目標照度を基に最適化手法を用いて照明の光度を制御することによって執務者が要求する明るさを実現しつつ、消費電力量の削減を実現する。

知的照明システムの目的である、各執務者の要求する照度を実現し、かつ消費電力を最小にする、という2点の条件を満たすために、目標照度という制約条件の下、消費電力を最小化する最適化問題として捉える。そのための目的関数を式(1)のように設定する。

$$f = P + w \sum_{i=1}^n g_i \quad (1)$$

$$g_i = \begin{cases} (It_i - Ic_i)^2 & 0 \leq |It_i - Ic_i| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

P : 消費電力, w : 重み, n : 照度センサの数

Ic : 現在照度, It : 目標照度

目的関数 f は、消費電力 P と制約条件 g_i からなる。制約条件 g_i は、現在の照度と目標照度との差を用いて

おり、目標照度が満たされない場合のみ増加する。これにより、現在の照度が目標照度を下回るほど、目標関数値が大きく増加する。また、制約条件 g_j には重み w を乗算しており、重み w の設定によって目標照度の実現を優先するか、消費電力の削減を優先するかが定まる。

3. 知的照明システムの分類

3.1 知的照明システムの構成

知的照明システムは、調光可能な照明器具、照度値を取得するための照度センサ、照明の光度を計算する制御機能からなる。

知的照明システムの構成は、制御機能をシステム内の1箇所にのみ配置する集中制御型と、分散して配置する分散制御型に分類できる。さらに分散制御システムは、制御機能を照明に搭載する照明駆動型、有線照度センサに制御機能を搭載する有線センサ駆動型、および、無線センサネットワーク内で光度を決定する無線センサネットワーク駆動型に分類することができる。各知的照明システムの構成とデータの流れを Fig. 1 に示す。

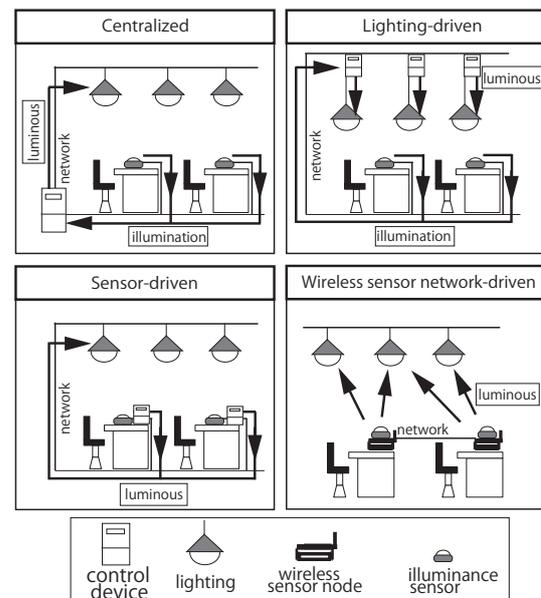


Fig. 1. A constitution of Intelligent Lighting System.

集中制御型では、PCを制御機能とする。システム内の1箇所のみ配置した制御機能が有線のネットワークを介してセンサの照度値、照明の光度値を集約し、その値を基に全照明に光度を変化させ、最適化する。

照明駆動型では、照明に備えつけられたマイクロプロセッサを制御機能とする。各制御機能が有線のネットワークを介して照度値、光度値を取得する。その値を基に、備えつけられた個々の照明の光度を変化させ、最適化する。

有線センサ駆動型では、有線照度センサに備えつけられたマイクロプロセッサが制御機能として、予め有線照度センサと照明の位置情報を把握する。そして有線のネットワークを介して照度値、光度値を取得する。取得した値と、位置情報を基に、近くにある照明の光度のみを変化させ、最適化する。

無線センサネットワーク駆動型では、制御機能を持つ無線センサノードが直接影響のある照明のみを制御する。光度情報をネットワークから取得することができないため、前回制御時に照明に送信した光度値を光度情報として、その光度情報と、照度値を基に影響のある照明にのみ光度変化を与え、最適化する。

3.2 知的照明システムにおける構成の評価

知的照明システムでは構成によって、それぞれ異なった特徴を持つ。知的照明システムの構築、実用化の際に、必要となる指標（保守性、信頼性、拡張性、導入容易性、費用）についての定性的評価を Table 1 に示す。

知的照明システムにおける保守性は、ソフトウェアおよびハードウェアの管理が容易であることである。保守性は制御機能が1箇所のみ存在する集中制御型が優れている。また、有線センサ駆動型、無線センサネットワーク駆動型は、制御機能が執務者の近くに備えつけられているため、天井の照明に制御機能が備えつけられている照明駆動型よりも優れている。

次に、信頼性は、システム内の機器の故障、トラブルによって、システムの稼働、運用が中断しないことである。分散制御型は、1箇所の制御機能が故障した

Table 1. A qualitative evaluation about a system constitution.

	centralized	distributed		
		lighting driven	sensor driven	wireless sensor network-driven
maintenance	○	×	△	△
reliability	×	○	○	○
scalability	×	×	△	○
introducing	△	×	×	○

場合でも、他の制御機能が動作を続けることができるため、信頼性において優れている。

拡張性は、照度センサの増減、オフィス内のレイアウトの変更柔軟に対応できることである。各照度センサがそれぞれ制御機能を有している有線センサ駆動型と無線センサネットワーク駆動型は拡張性について優れている。特に、無線センサネットワーク駆動型は、無線センサノードを用いるため、配線を用意する必要がなく有線センサ駆動型よりも優れていると言える。

導入容易性は、導入するにあたり、必要な機器の準備、配置にかかる手間が少ないことである。ネットワークのための配線や制御機能の調達が必要でない無線ネットワーク駆動型のみが優れている。また1箇所のみ制御機能を必要とする集中制御型は、照明駆動型、有線センサ駆動型よりも優れている。

以上のことより、無線センサネットワーク駆動型は、特徴として、無線であり配線を必要としない点、各無線センサノード内が処理機能を持っている点などがあり、他の構成の知的照明システムと比較すると、信頼性、拡張性、導入容易性について優れていると言える。

4. 無線センサネットワーク駆動型知的照明システム

4.1 無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの概要

無線ネットワーク駆動型知的照明システムは、照度センサを持つ無線センサノードが自律分散的に照明制御を行うことによって、各執務者の要求する照度を実現し、消費電力を最小にする各照明の最適な光度を求める。また無線センサネットワーク内で制御を行うため、照明の光度情報を取得することができない。

一方、照明の光度と電力量には、正比例関係があることがわかっている。そのため照明の光度の総和を減少させることによって電力量の削減を図ることができる。無線センサネットワーク駆動型では評価値の算出に用いられる電力情報は、無線センサノード内にある、前回制御時に照明に送信した光度値の総和を照明の電力情報として利用する。

そのため、無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの目的関数は式 (3) となる。

$$f = \sum_{i=1}^m cd_i + w \sum_{i=1}^n g_i \quad (3)$$

$$g_i = \begin{cases} (It_i - Ic_i)^2 & 0 \leq |It_i - Ic_i| \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

cd : 照明の光度, w : 重み, n : 照度センサの数

Ic : 現在照度, m : 制御を行う照明の数, It : 目標照度

4.2 無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの制御アルゴリズム

我々は、知的照明システムの制御アルゴリズムとして ANA/RC (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient) を提案している⁸⁾。ANA/RC では、設計変数を照明の光度とし、目的関数に現在の

照度と目標照度との差、および消費電力を用いることで、目標照度を満たし、かつ省エネルギー性が考慮された光度を導出できる。また各照明に対する影響度を計測し、照明の影響度に応じて光度を変化させる。

影響度は、1 灯の照明が照度センサに及ぼす影響の度合いを表すものである、これにより照明が無線センサノードに与える影響の強さに応じた光度変化を当てることで、より迅速に最適な光度へ変化させることができる。影響度を求めるには、照明を 1 灯だけ点灯させ、照度を計測し、計測された照度を照明の光度値で割ることで算出できる。順に点灯させる照明を変更し、全照明について同様に照度を計測することで、全ての照明の影響度を求めることができる。

無線センサネットワーク駆動型では、自ノードに対し、影響度を降順に並べた際の、上位 n 灯の照明にのみ制御を行う。ここで n は、目標照度を満たすために光度変化を行う必要のある照明台数を示す。

次に処理の手順について述べる。

- (1) 各照明を初期点灯光度で点灯
- (2) 各無線センサノードが制御する照明を選択
- (3) 各照明の光度が更新され、安定するまで待機
- (4) 各無線センサノードが照度を取得
- (5) 各無線センサノードが目的関数値と呼ばれる評価値を算出
- (6) 各無線センサノードが対応する照明の次回光度を決定
- (7) 各照明の光度を (6) で決めた光度に変更
- (8) 各照明の光度が更新され、安定するまで待機
- (9) 無線センサノードが照度を取得
- (10) 更新された状態での目的関数値を算出し、評価値が改善している場合、新しい光度を採用して (3) へ
- (11) 評価値が悪化した場合は前光度へ戻し、(3) へ

上記の項目 (2) から項目 (10) を探索の 1 試行とし 1 ステップと呼ぶ。繰り返し行うことで各照明は自律的に光度を変化させ、各執務者の目標照度を満たしつつ、消費電力を最小化されるような点灯パターンを実現する。

(2) の制御する照明を選択する手法については次節で述べる。

またこのアルゴリズムでは、(5) の処理の際に次の光度の変化幅を決定するための範囲を定める。この範囲を近傍と呼び、この近傍の範囲内からランダムに次の光度を決定する。具体的に、用いる近傍は Fig. 2 の 3 種類である。

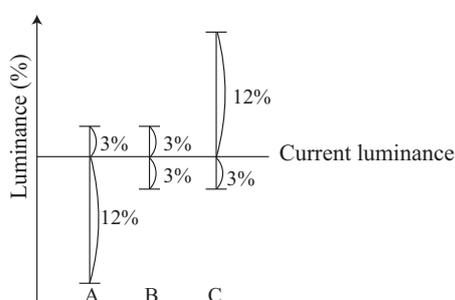


Fig. 2. 3 types of light change range.

どの照度センサにも大きく影響のない照明は、光度が必要ないと判断し制御を行わず、初期点灯光度を保つ。現在照度が目標照度を大きく下回る際には、照明の次の光度が増加しやすい増光近傍 C を設定する。現在照度が目標照度を大きく上回る際には、減光近傍 A を設定する。現在照度と目標照度の差が大きい場合には、調整のための中立近傍 B を設定することで、各照明の光度をより迅速に最適な光度へ変化させることができる。

4.3 影響度を用いた制御照明選択手法

影響度を用いた制御照明選択手法は、照明に対する、影響度を比較し最も高い影響度を持つ無線センサノードのみが制御を行うことで、制御を行う照明を自律的に選択する手法である。無線センサネットワーク駆動型では、各無線センサノードが照明に自律制御を行うため、照明の近くに複数台の無線センサノードがある

と、複数の無線センサノードが 1 灯の照明に異なる光度値を送信する。各無線センサノードは、他の無線センサノードが照明に行う制御の内容を把握しないため、同一の照明に異なる複数の制御が行われると、照明の光度が頻繁に変更され、正しく照明の光度を最適化できなくなる。

同一の照明に対し、複数台の無線センサノードが異なる光度を送信する際に、無線センサノードが協調して、片方の制御を中止し、もう片方の制御のみを採用する手法を提案する。本手法では、制御を採用する無線センサノードを決定するために、影響度を用いる。

無線センサノードの各照明に対する影響度を無線センサネットワーク内で共有することで、各無線センサノードから見た各照明の影響度を互いに把握することができる。各無線センサノードが互いの影響度を把握し、制御が重なっている照明に対し、他ノードのほうが高い影響度を持っている場合は、制御を中止し、自ノードが最も高い影響度を持っている場合のみ制御を行う。これにより、1 台の照明に複数の制御が集中することなく、照明を分散制御できる。

5. 提案システムの検証実験

5.1 光度変化が必要な照明台数の検証実験

無線センサネットワーク駆動型知的照明システムでは、無線センサノードが制御を行う必要のある照明台数を確認する必要がある。この照明台数の検討のために 1 台の無線センサノードを用いて 4, 5, 6 灯の照明を制御した際の照度の推移について検証実験を行う。

その後、確認できた照明台数に制御を行う無線センサネットワーク駆動型知的照明システムについて、目標照度の実現性、および省エネルギー性についての検証実験を行う。本実験では、無線センサネットワーク駆動型知的照明システムにおいて、無線センサノードが目標照度を満たすために、制御を行う必要のある照明台数について検証を行う。

本実験は同志社大学香知館の知的システム創造環境実験室にて行う。実験環境を Fig. 3 に、実験環境を実験風景を Fig. 4 に示す。実験では、白色蛍光灯 15

灯と無線センサノード1台を用いる。照明の最大光度を950cdとし、最低光度を300cdとする。無線センサノードとしてCrossbow社のIRIS Moteを使用した⁹⁾。IRIS Moteに汎用外部センサ基盤であるMDA088を設置し、リードタイプのNapica照度センサ¹⁰⁾を組み込むことで、照度値を取得可能とする。無線センサノードの目標照度は、オフィスで適切であるとされる照度の最高値である750 lxに設定する。なお、オフィス環境において、人間が認知できる照度差は、50 lx程度であることから¹¹⁾、現在照度と目標照度の差が50 lx以内に収まっているとき、目標照度を実現しているとする。1ステップを3秒とする。

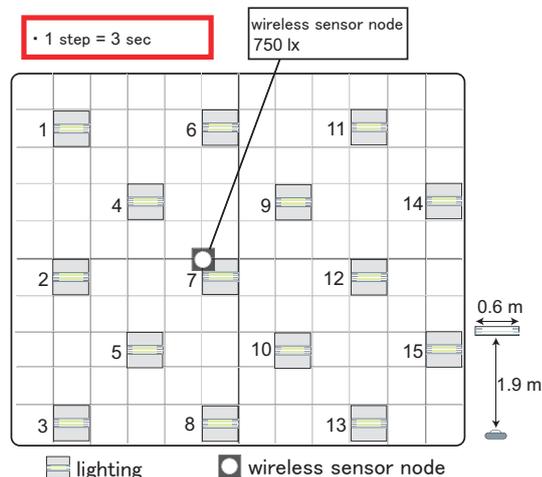


Fig. 3. An environment of the experiment about a number of lighting that is required.

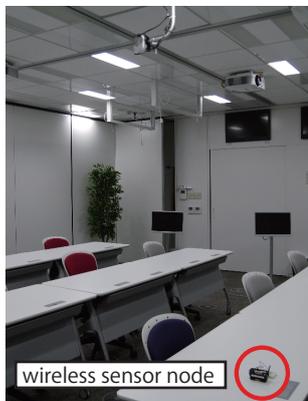


Fig. 4. An experiment room.

5.2 光度変化が必要な照明台数の検討

無線センサノードから、影響度降順の上位4, 5, 6灯の照明を制御した際の、照度値の推移をFig. 5に示す。Fig. 5から照明4灯を制御した際は目標照度を

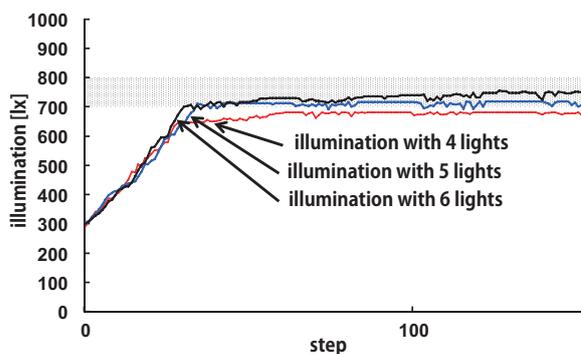


Fig. 5. An history of illuminance in that uses 4, 5, 6 lights.

実現できず、照明5灯、6灯を制御すると目標照度を実現できた。また6灯を制御した結果と5灯を制御した結果を比較すると、どちらも目標照度の収束範囲に入っており、影響度上位5灯の照明制御で十分であることがわかる。

この結果からFig. 3に示した実験環境下では、5灯の照明制御で無線センサネットワーク駆動型知的照明システムを動作させるのが望ましいといえる。

5.3 影響度を用いた制御照明選択手法を使った無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの検証実験

本実験では、影響度を用いた制御照明選択手法を用いた、センサネットワーク駆動型知的照明システムの目標照度の実現性と、その省エネルギー性についての検証実験を行う。比較のため従来の集中制御型知的照明システムでも同じ環境で検証実験を行う。

本実験は同志社大学香知館の知的システム創造環境実験室にて行う。実験では、白色蛍光灯15灯と無線センサノード3個を用いる。実験環境をFig. 6に示す。目標照度は無線センサノードAを300 lx、無線センサノードBを600 lx、無線センサノードCを750

lx とする。300 ステップ経過後、無線センサノード A の目標照度を 500 lx に、無線センサノード C の目標照度を 400 lx に変更する。

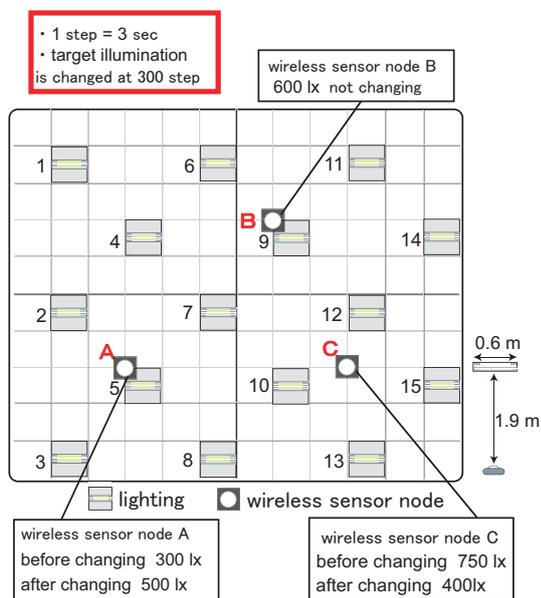


Fig. 6. An environment of an experiment about an evaluation of wireless sensor network-driven Intelligent Lighting System.

5.4 影響度を用いた制御照明選択手法を使った無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの評価

集中制御型知的照明システムの照度値の推移を Fig. 7 に示す。無線センサネットワーク駆動型知的照明システムについて、影響度降順の上位 5 灯の照明を制御した際の無線センサノードの照度値の推移を、Fig. 8 に示す。なお、図では、目標照度を実現していると言える範囲内を帯で示す。

Fig. 7 と Fig. 8 から、無線センサネットワーク駆動型知的照明システムは、従来の集中制御型知的照明システムと同様に個別の目標照度を実現できることが確認できた。

また、300 ステップ経過時における、集中制御型知的照明システムおよび無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの実験室の各照明の光度を円の大ききで表した光度の分布図を Fig. 9, Fig. 10 に示す。

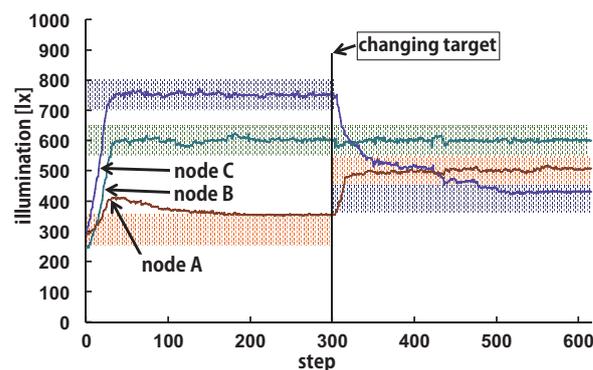


Fig. 7. A history of illuminance about a centralized Intelligent Lighting System.

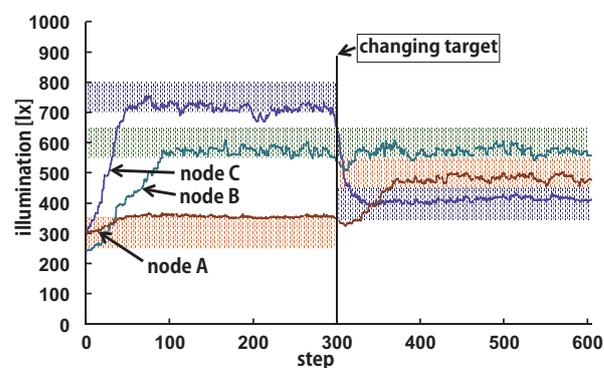


Fig. 8. A history of illuminance about a wireless sensor network-driven Intelligent Lighting System.

また無線センサネットワーク駆動型知的照明システムについて、各無線センサノードが制御を行った照明を示したものを Fig. 11 に示す。自ノードの影響度が他ノードの影響度よりも低く、中止した制御を図中の×で示す。

Fig. 10 と Fig. 11 から各照明が、制御を行っている無線センサノードの目標照度を満たすために、光度を適切に変化している。また Fig. 10 と Fig. 9 の光度を見るとどちらも同じ照明が同程度の強さで点灯していることがわかる。次に消費電力の省エネルギー性について評価する。知的照明システムを導入しない際は、照明は最大光度で点灯する。その際の消費電力は 800 W である。集中制御型知的照明システムと、無線センサネットワーク駆動型知的照明システムについて

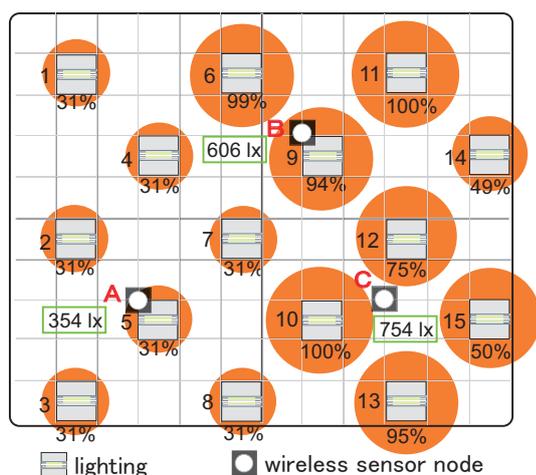


Fig. 9. A distribution of luminosity in centralized-type after 300 step.

照度が収束した 300 ステップ時、600 ステップ時の、消費電力を示したものを Fig. 12 に示す。

Fig. 12 より、無線センサネットワーク駆動型知的照明システムでも、集中制御型と同様の省エネルギー性が確認できた。以上のことより無線センサネットワーク駆動型知的照明システムについて、従来の集中制御型知的照明システムと同様に、個別の目標照度の実現とおおよそ 60%の消費電力の削減が確認できた。

6. まとめ

本研究では、影響度を用いた制御照明選択手法についての検証を行った。はじめに、知的照明システムを分類し、無線センサネットワーク駆動型の優位性を定性的評価で示した。無線センサネットワーク駆動型知的照明システムと、すでに開発を行っている従来の知的照明システムについて、構成の違いについて検討し、実用化の上で必要となる指標について定性的な評価を行った。

その後、無線センサネットワーク駆動型知的照明システムを構築する上で照明への制御の集中が問題となる。これを解消するために、影響度を用いた制御照明選択手法を提案し、その手法を用いた無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの精度検証を行った。無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの検

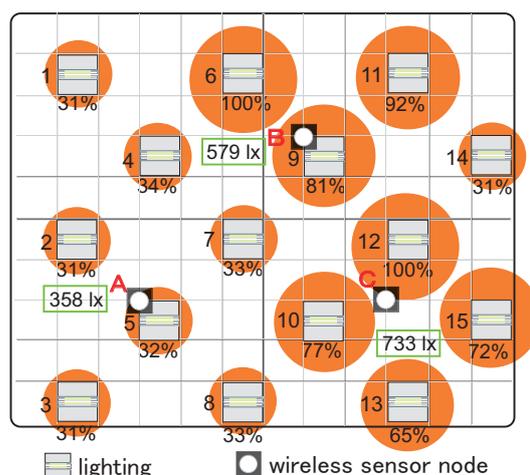


Fig. 10. A distribution of luminosity in wireless sensor network-type after 300 step.

証実験を行い、集中制御型と同様に個別の目標照度に収束可能であることを確認した。また、消費電力の比較においても、集中型制御型と同様におおよそ 60%の消費電力の削減を確認した。この検証実験により、無線センサネットワーク駆動型知的照明システムの有効性を示した。

今後の展望として、無線センサネットワーク内で、影響度だけでなく、各無線センサノードの取得照度値や、目標照度も共有することによって、他ノードの状態を確認しながら、より高度な照明制御を行うことが必要となる。

本研究の一部は同志社大学理工学部研究所研究助成金の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) M.Miki, T.Hiroyasu, K.Imazato, "Proposal for an Intelligent Lighting System and Verification of Control Method Effectiveness", Proc. Cybernetics and Intelligent Systems IEEE,1,520-525(2004).
- 2) 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", 同志社大学理工学研究報告, 48[4], 94-100(2008).
- 3) Philips hue : available from<<http://www.meethue.com/>>(accessed 2014-2-12).

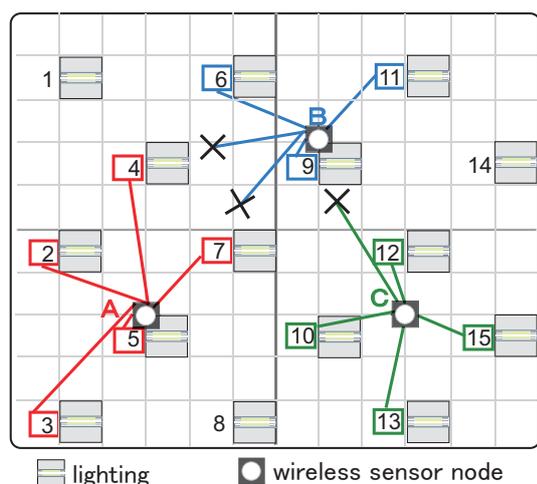


Fig. 11. A connection of node and lighting on wireless sensor network-driven Intelligent Lighting System.

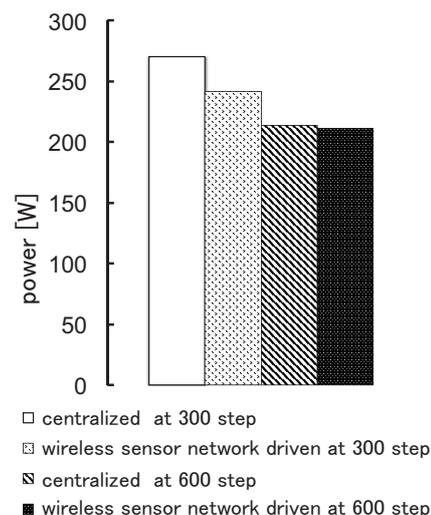


Fig. 12. A consumption of power of when illuminance converged.

- 4) V.Singhvi, et al., "Intelligent Light Control Using Sensor Networks", Proc. the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, 218-229, ACM (2005).
- 5) D.T.Delaney, O'Hare.MP.Gregory, G.A.Ruzzelli, "Evaluation of Energy-Efficiency in Lighting Systems Using Sensor Networks", Proc. the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, 61-66, ACM (2009).
- 6) H.Park, B.M.Srivastava, "Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Intelligent Light Control", Proc. the 6th international conference on Information processing in sensor networks(IPS'07), ACM Press, 370-379 (2007).
- 7) S.J.Sandhu, "Wireless Sensor Networks for Commercial Lighting Control: Decision Making with Multi-Agent Systems", Proc. AAAI Workshop on Sensor Networks, 10, 131-140 (2004).
- 8) S.Tanaka, et al., "An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces", Proc. International Conference on Systems, Man, and Cybernetics(SMC 2009), 941-947, IEEE (2009).
- 9) MEMSIC:IRIS wireless module, available from <<http://www.memsic.com>>(accessed 2013-11-02).
- 10) Panasonic:NaPiCa, available from <<http://www3.panasonic.biz/ac/j/control/sensor/illuminance/napica/>>(accessed 2013-11-02).
- 11) 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).