

# 無線センサネットワークを用いた 知的照明システムの基本的検討

奥西 亮賀<sup>1,a)</sup> 間 博人<sup>2,b)</sup> 三木 光範<sup>2,c)</sup> 本谷 陽<sup>1,d)</sup> 谷口 総一郎<sup>1,e)</sup>

**概要：**無線装置を内蔵した多数のセンサが相互に連携することで、照度、気温、湿度、加速度などのセンサデータを収集することを可能とする無線センサネットワークは、様々な分野での利用が期待されている。一方、我々の研究室で研究・開発を行っている知的照明システムは照度センサの値を基に、ユーザの要求に応じた照度をできる限り少ない電力消費量で提供する照明制御システムである。照度センサを無線センサネットワークとして構築することで、照度センサの敷設の容易性を向上させると共に、オフィス内のレイアウトの変更や照度センサの追加などに柔軟に対応できる。しかしながら、無線センサネットワークの利用には、パケットロス、故障、バッテリー切れなど様々な原因で切断のおそれがある。また、オフィスにおいて、センサノードのバッテリー交換のコストは大きく、省電力プロトコルによる改善が望まれる。本研究では、無線センサネットワークを用い、ユーザが要求する明るさを提供しつつ消費電力量を最小化する照明制御の実現を検証した。また、無線センサネットワークにおいて省電力プロトコルを実装することで、パケット送信回数の削減について検証を行った。

**キーワード：**無線センサネットワーク、知的照明システム、省電力プロトコル、パケットロス、オフィス

## 1. はじめに

近年、東日本大震災などの影響により、エネルギー使用量を削減することに注目が集まっている。特に、オフィスビルの消費エネルギーは年々増加傾向にあり、オフィスビルにおける省エネルギー化が望まれている。オフィスビルでは、照明による電力コストがビル全体の約40%を占めており[13]、照明に対する省エネルギー化は重要な課題である。この課題を解決する照明制御システムとして、筆者らは知的照明システムの研究開発に取り組んでいる[7]、[14]。知的照明システムは、マイクロプロセッサが組み込まれた複数の調光可能な照明器具、複数の照度センサおよび電力計を同一ネットワークに接続し構成される。各照明はネットワークに流れる照度情報および電力量に関する情報を基に自律的に最適な点灯パターンを実現し、任意の場所に

任意の明るさを提供することができる。知的照明システムでは、個人ごとに異なる照度を実現でき、結果として実現される照度の平均値は減少し、それに伴い消費電力が減少する。

一方、無線センサネットワークは、無線装置を内蔵した多数のセンサが相互に連携することで、実空間の情報の収集を可能とする技術である。従来の知的照明システムでは、照度センサとして有線の照度センサや一定間隔でパケットを送信する無線照度センサを用いて実証実験を行ってきた[6]。そこで、無線センサネットワークを用い、オフィス空間における照度を収集することで、照度センサの敷設の容易性を向上させると共に、オフィス内のレイアウトの変更や照度センサの追加などに柔軟に対応することができる。しかしながら、無線センサネットワークの利用には、パケットロス、故障、バッテリー切れなど、様々な原因による切断のおそれがある。また、オフィスにおける無線センサノードのバッテリー交換のコストは大きく、省電力プロトコルによる改善が望まれる。

本研究では、無線センサネットワークを用い、ユーザが要求する明るさを提供し、かつ消費電力を最小化する知的照明システムの構築を行い、提案システムの精度検証を行った。また、提案システムにおいて省電力プロトコルを実装することで、パケット送信回数の削減について検証した。

<sup>1</sup> 同志社大学理工学研究科、京都府  
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ, 1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi Kyoto, 610-0394 Japan

<sup>2</sup> 同志社大学理工学部、京都府  
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ.

a) rokunishi@mikilab.doshisha.ac.jp

b) haida@mail.doshisha.ac.jp

c) mmiki@mail.doshisha.ac.jp

d) ymotoya@mikilab.doshisha.ac.jp

e) staniguchi@mikilab.doshisha.ac.jp

## 2. 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムとは、各照明が自律的に照明の明るさである光度を変化させることで、各執務者が要求する照度（目標照度）を効率の良い点灯パターンで実現する照明制御システムである。

知的照明システムは、複数の調光可能な照明機器、複数の無線照度センサ、制御PCおよび電力計から構成される。知的照明システムの構成図を図1に示す。

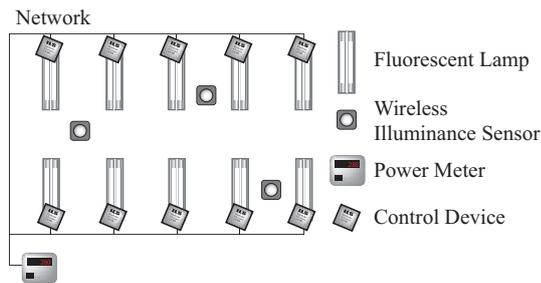


図1 知的照明システムの構成図

Fig. 1 Configuration of the Intelligent Lighting System

知的照明システムでは、ユーザごとに照度センサを所持しユーザの手元の明るさを計測する。また、ユーザは知的照明システムのユーザインタフェースを通して目標照度を入力する。各照明機器に搭載された制御装置が各照度センサからの照度情報、および電力計から消費電力情報を取得することで、これらの情報を基に、最適化手法を用いて制御装置が照明の明るさを制御し、ユーザが要求する明るさを実現しかつ、消費電力量の削減を図る。

### 2.2 無線センサネットワークを用いた照度取得

無線センサノードの持つ照度センサから照度値を取得し、その照度値を制御PCへと送信する。無線センサネットワークを用いて照度取得をすることで、照度センサの敷設の容易性を向上させるとともに、オフィス内のレイアウトの変更や照度センサの追加などに柔軟に対応できる。知的照明システムでは、執務者が照明の変化を感じない程度に照明の光度を変化させ、目標照度へと収束を行う。そのため、照度センサを持つ無線センサノードと制御PC間は常時通信を行う必要があり、無線センサノードのバッテリー持続時間を考慮する必要がある。

無線センサノードは電源に繋ぐことなく、バッテリーによって稼働するため、バッテリー切れによる知的照明システムの停止やバッテリーコストおよびバッテリー交換の手間などの問題が挙げられる。無線センサノードにおける主な電力消費のひとつとして、無線通信によるパケット送信が挙げられる。このパケット送信回数を削減する手法として、照度変化量を考慮する手法と目標照度を考慮する手法

の2つが考えられる。この2つの省電力手法については、3章で記述する。

### 2.3 知的照明システムの制御

知的照明システムは、照度センサの位置の照度を目標照度以上にし、かつ、消費電力量の最小化を目的とする。これら2点の条件を満たすために、知的照明システムの問題を最適化問題として定式化する。この問題を定式化すると、式1のようになる。

$$f_i = P + \Gamma \sum_{j=1}^n g_j \quad (1)$$

$$g_j = \begin{cases} 0 & (Ic_j - It_j) \geq 0 \\ R_{ij}(Ic_j - It_j)^2 & (Ic_j - It_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & r_{ij} \geq T_{ij} \\ 0 & r_{ij} < T_{ij} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$P$ :電力,  $\Gamma$ :重み,  $i$  照明番号

$n$ :照度センサの数,  $Ic$ :現在照度,  $It$ :目標照度

$r$ :影響の度合い,  $T$ :閾値

知的照明システムは式(1)の目的関数の最小化を目的とする。目的関数は消費電力量と照度に関するペナルティ項に重みを乗算したものの和からなる。重みが小さい場合は、目的関数において消費電力量の影響が大きくなるため、省電力性を重視した目的関数となる。一方、重みが大きい場合は目標照度の実現を重視した目的関数となる。照度に関するペナルティは、現在照度が目標照度を上回る場合は、目標照度を満たしていると判断し、0を加算する。また、現在照度が目標照度を下回る場合は、照度差の2乗をペナルティとして加算する。

次に制御アルゴリズムについて述べる。知的照明システムは、ユーザが照度センサに照度を設定するだけで、照明や照度センサの位置情報必要とすることなく、自動的に有効な照明を判断し、適切な場所に適切な照度を提供することができる。知的照明システムは、山登り法を照明制御用に改良したアルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient:ANA/RC) [11] を用いる。山登り法は、現在の解を基に次ステップの解を生成し、その際の目的関数値の変化に応じて、その解を受理し遷移する処理を繰り返すことで最適解を導くアルゴリズムである。そこで設計変数を光度、目標照度との差と消費電力量の和を目的関数とし制御を行う。さらに、ANA/RCでは、照明が照度センサに及ぼす明るさの大小を回帰分析により学習し、その度合いや各照度センサの目標照度への収束状況よりに応じて解の生成範囲(近傍)を適切に選択する。これにより、迅速に解を導出することができる。

- (1) 各センサの目標照度を設定し、各照明が初期点灯光度で点灯
- (2) 照度情報、および電力量を取得
- (3) 目的関数を算出
- (4) 回帰係数に基づき適切な光度生成範囲を決定
- (5) (4) の近傍内から次光度をランダムに生成
- (6) オフィス空間の照度を収集することで、各照明を生成した光度で点灯させる
- (7) 照度情報、および電力量を取得
- (8) 照明の変化量および照度センサの変化量を基に回帰分析を行う
- (9) 次光度状態での目的関数を算出し、評価値が改善している場合、次光度を採用して (2) へ
- (10) 評価値が悪化した場合は前光度へ戻し、(2) へ

上記の動作 1 ステップとし、繰り返し行うことで各照明は自律的に照度を変化させ、各ワークの目標照度を満足しつつ、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。また、照明の光度変化が無線センサノードの値に反映され、安定するまでに約 2 秒かかるため、1 ステップは 2 秒とした。

## 2.4 近傍設計

知的照明システムのアルゴリズムでは、**図 2** に示す 7 種類の近傍を次光度生成に用いる。ある照明の光度を増加させる必要がある場合は、増光傾向の近傍を用い、減光させる必要があるときには減光傾向の近傍を用いる。図 2 に示すように、A, B, C は減光傾向、D は中立および D, E, F は増光傾向の 7 種類の近傍を用いる。この 7 種類の近傍は、相関係数と各照度センサの照度値より適応的に選択する。図 2 に示す数値は、照明の最大点灯光度を 100% とした際の光度変化を行う割合である。例えば、最大点灯光度が 1000 cd であれば、A の近傍の場合、現在光度から 100 cd 減光する。

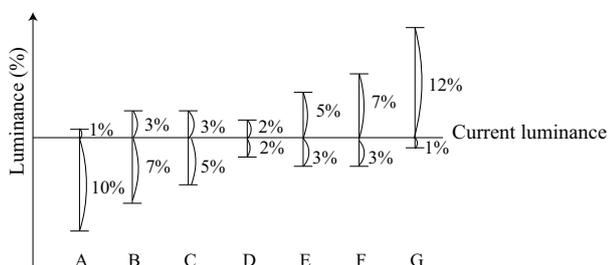


図 2 7 種類の光度変化範囲  
Fig. 2 Seven neighborhoods

## 3. 省電力プロトコル

### 3.1 照度変化量を考慮した通信回数削減手法

無線センサノードにおけるパケット送信を削減するため

の手法として、無線センサノード自身が計測した照度値を制御 PC に送信するかどうかの判定を行うことで、無線通信の回数を削減し、バッテリー持続時間を増加させることができる。

無線センサノードが取得した照度値が、前回送信した照度値と比べた場合、その差が閾値以下であれば、1 ステップにおける照明変化は無線センサノードに影響が少なかったと考え、照度値は変化していないものとする。これにより、無線センサノードの通信回数の削減を行う。

### 3.2 目標照度を考慮した通信回数削減手法

オフィス空間における光環境は、太陽光および障害物などの外的要因により常に変化する。このため、目標照度を満たした場合でも、照明と照度センサにおける影響度を正確に把握するために、常に照度値を得る必要がある。しかし、これらの時間的変化や外的要因については毎秒起こるものではない。そのため、目標照度に収束した後、環境の変化がなければ、照度を送信する必要がないと言える。そこで、照度センサが照度を取得し、目標照度との差が少ない場合、照度情報を送信しないよう照度センサ自身が判断することで、通信回数を削減することができると考えられる。また、外的要因により光環境が大きく変化した場合、照度センサの値が目標照度値から大きく変化するため、再度照度を送信することで、従来の知的照明システムと同様に、環境の変化にも対応できることが考えられる。

### 3.3 省電力制御アルゴリズム

3.1 節および 3.2 節の通信回数削減手法を無線センサネットワーク内のアルゴリズムに導入する。知的照明システムでは照明と照度センサの位置情報を光度変化量と照度変化量を基にした影響度から把握する。そのため、初期点灯時の 100 ステップおよび照度センサが移動した場合は、影響度を取得するため、全照度通信を行う。また、目標照度を考慮した通信回数削減手法では、目標照度を物理的に満たせない場合、常に照度を送信し続けることになる。そこで、照度変化量を考慮した通信回数削減手法を併用することで、この問題を解決することができる。

## 4. 提案システムの評価

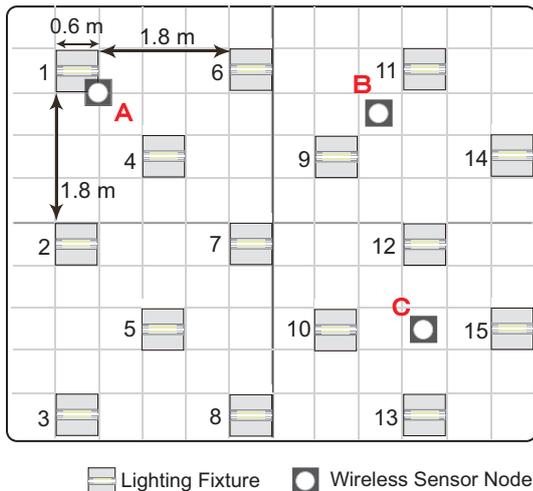
### 4.1 実験概要

本実験では、提案システムの有効性を検証するために、無線センサネットワークにおける照明制御アルゴリズムにおいて、照度収束が可能であるかの検証を行う。次に、各無線センサノードに省電力プロトコルを導入することで、提案システムにおける省電力プロトコル導入前と導入後で、通信回数を比較し、通信回数の削減について検証を行う。最後に、無線センサノードから制御 PC に照度値を送

信する際に、パケットロスが発生した場合の提案システムの挙動を調査する。

#### 4.2 実験環境

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。無線センサノードは、照明 1 灯の直下、照明 2 灯の間、照明 4 灯の間の 3 点の場所に配置する。実験環境の見取り図を図 3 に示す。また、実験風景を図 4 に示す。



■ Lighting Fixture    ● Wireless Sensor Node

図 3 実験環境

Fig. 3 Experimental Environment



図 4 実験風景

Fig. 4 Experimental Situation

図 3 には、蛍光灯および無線センサノードの位置関係を示しており、図中の蛍光灯横の番号は蛍光灯番号を、無線照度センサ横のアルファベットはセンサの識別名を表す。また、照明と無線センサノードの距離は照明の垂直直下に無線センサノードを置いた場合、1.9 m である。

目標照度の設定は、センサノード A を 450 lx、センサノード B を 500 lx、センサノード C を 600 lx とする。ま

た、350 ステップ後にセンサノード C の目標照度を 800 lx に変更し、照度収束実験を行う。なお、目標照度の  $\pm 50$  lx 以内に 50step 以上収束した場合、目標照度収束完了とする。

従来の知的照明システムでは、照度値が高精度で取得可能な ANA-F11 などの照度センサを利用し、環境構築を行っていた。本実験では、無線センサノードとして Crossbow 社の MOTE MICAz を使用した [1]。MOTE MICAz 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 [8] を組み込むことで、照度値を取得可能とする。その際の MDA088 と Napica センサの間における抵抗は  $430 \Omega$  とする。Napica センサまた、各 Napica センサ毎に照度値を補正し実験を行う。

#### 4.3 無線センサネットワークにおける照明制御アルゴリズムの評価

提案システムにおける照度収束の精度について検証を行った。本実験では、初期 100 ステップを各照明と各無線センサノードとの影響度計測のため、山登り法を用いた。100 ステップ後に、ANA/RC を用いて照度収束実験を行った。4.2 節で記述した環境下における提案システムの照度収束結果を図 5 に、照度収束時の点灯状態の図を図 6 に示す。

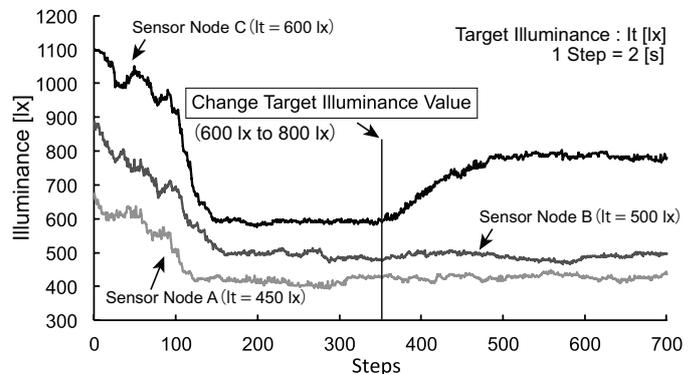


図 5 提案システムの照度収束履歴

Fig. 5 History of the illuminance data (Proposed method)

図 5 の実験結果より、初期設定で指定した目標照度には約 150 ステップ (約 2 分半) で 3 つの無線センサノードに対して、目標照度に収束していることがわかる。また、350 ステップ時において、無線センサノード C を 600 lx から 800 lx へと変更した場合でも、約 150 ステップ (約 2 分半) で目標照度に収束していることがわかる。また、図 6 の照明における光度分布を見ると、各無線センサノードの付近にある照明が強く点灯しており、無線センサノードからの距離が遠い 2,3,5,7,8 および 14 番の照明では照明が弱く点灯していることがわかる。これらの結果から、照明が各目標照度に対して無駄の少ない点灯パターンで点灯して

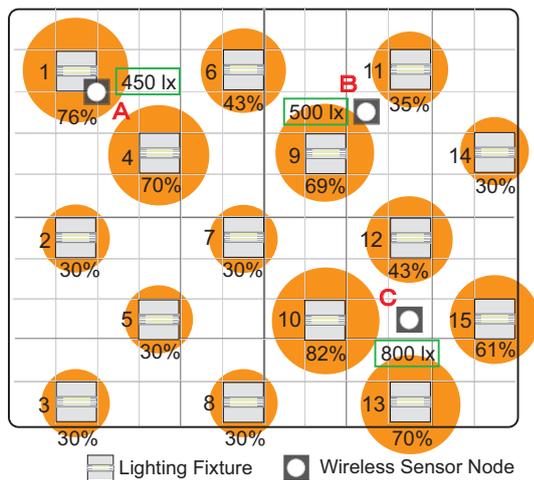


図 6 提案システムにおける照度取束時の光度分布  
Fig. 6 Status of lightings (Proposed method)

おり、提案システムが有用であることが確認できた。

#### 4.4 省電力プロトコルの評価

提案システムにおいて、省電力プロトコルを導入した際の送信回数の削減について検証を行った。本実験で用いた省電力プロトコルは、3章で述べたプロトコルを使用し、照度変化幅および目標照度との差の閾値をどちらも±2%、±4%および±6%とした3種類のパラメータを設定し、その3種類のパラメータに対して検証実験を行った。また、提案システムにおける影響度計測のために、初期100ステップは省電力プロトコルは稼働しないものとした。

省電力プロトコル導入後の照度取束結果を図7、図8および図9に示す。縦軸は実際の照度値ではなく、各ステップ時における制御PC側の保持している照度値である。図7は閾値を±2%、図8は±4%、図9は±6%とした。また、照度取束時の光度分布をそれぞれ図10、図11および図12に示す。図10は閾値を±2%、図11は±4%、図12は±6%とした。省電力プロトコル導入前の送信回数および省電力プロトコル導入後の閾値±2%、±4%および±6%の3種類における送信回数について、比較したグラフを図13に示す。

図7および図8より、閾値を±2%および±4%に設定した場合には、目標照度変更前および目標照度変更後ともに照度取束範囲内に収束していることが確認できた。しかし、図9の無線センサノードCを見ると、目標照度取束範囲内に収束していないことがわかる。これは、目標照度が800 lxのように高い値に設定した場合、照度取束範囲である±50 lxと同等程度の照度値の更新がない限り、照度値の送信が行われない。そのため、照度取束範囲外を上下する照度変化となっていると考えられる。

また、図13より、無線センサノードからの送信回数では、省電力プロトコル導入前と比較し、送信回数を削減することができた。省電力プロトコルを導入することで、送

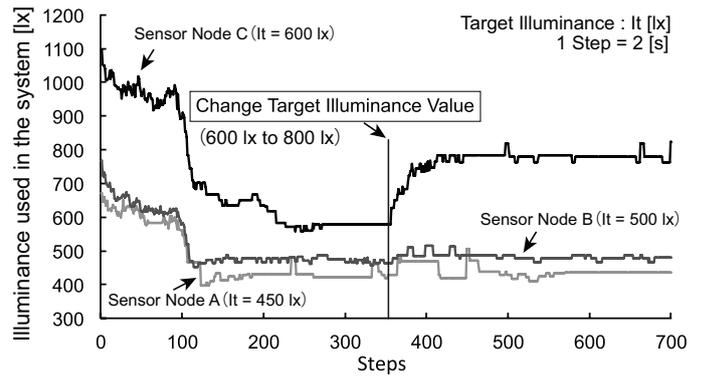


図 7 ± 2%の閾値における省電力プロトコル導入後の照度取束履歴  
Fig. 7 History of the illuminance data (Threshold:± 2%)

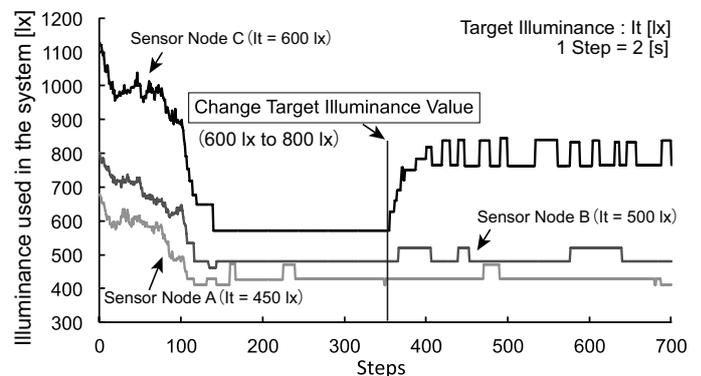


図 8 ± 4%の閾値における省電力プロトコル導入時の照度取束履歴  
Fig. 8 History of the illuminance data (Threshold:± 4%)

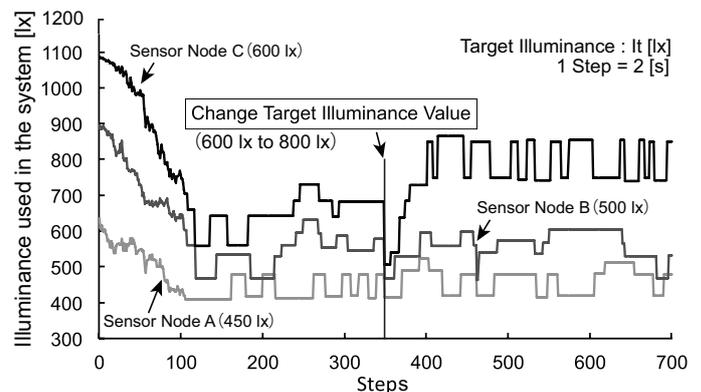


図 9 ± 6%の閾値における省電力プロトコル導入後の照度取束履歴  
Fig. 9 History of the illuminance data (Threshold:± 6%)

信回数を約95%削減できた。特に、送信回数を最も削減できた閾値±4%の場合では、送信回数が約98%削減できた。そのため、提案システムの省電力プロトコルは有効であると言える。しかし、図10、図11および図12を見ると、取束時における点灯パターンが図5と比較した場合、2,3,5,7および8番の照明のような無線センサノードが近くにない照明が強く点灯しており、点灯パターンが悪化している。これは、送信回数を削減することで、影響度計測

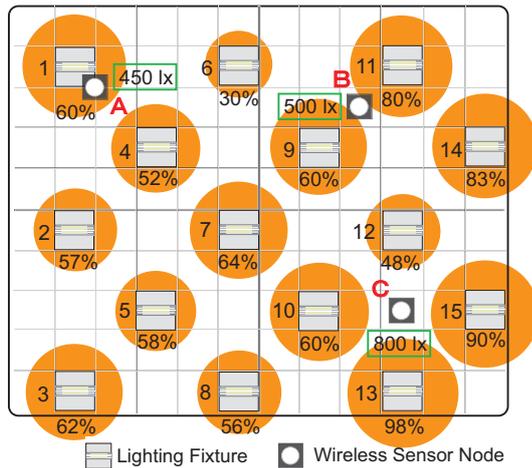


図 10 ± 2%の閾値における省電力プロトコル導入後の照度収束時の光度分布  
Fig. 10 Status of lightings (Threshold:± 2%)

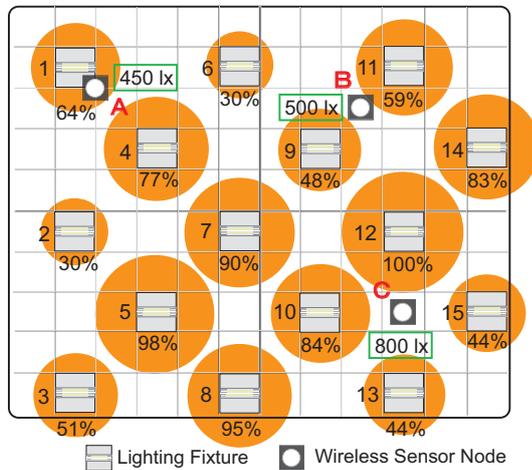


図 11 ± 4%の閾値における省電力プロトコル導入時の照度収束時の光度分布  
Fig. 11 Status of lightings (Threshold:± 4%)

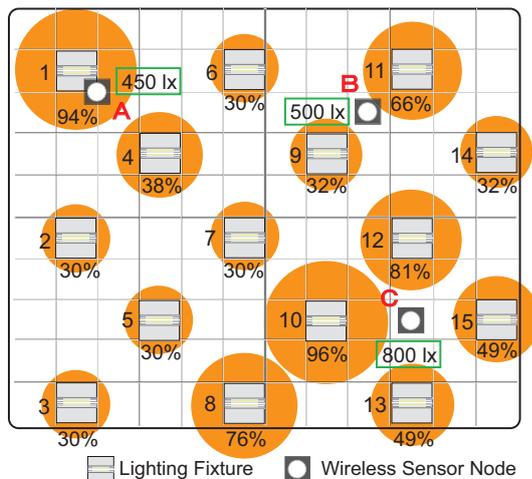


図 12 ± 6%の閾値における省電力プロトコル導入時の照度収束時の光度分布  
Fig. 12 Status of lightings (Threshold:± 6%)

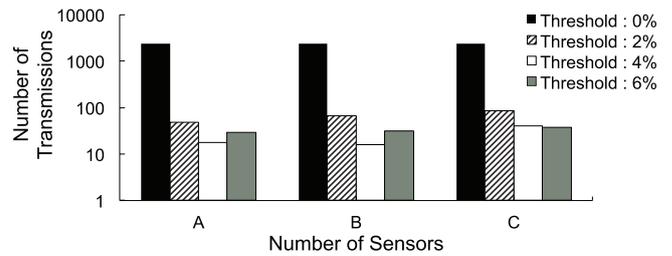


図 13 パケット送信回数比較  
Fig. 13 Comparison of the number of transmissions

のためのサンプル数が減少し、影響度計測に誤りが発生しやすくなっていることが考えられる。これは、提案システムの環境変数を変更することで、点灯パターンを向上させることも考えられるが、より最適な制御を行うために、照明制御アルゴリズムを考慮した省電力プロトコルを考える必要がある。本実験で用いた提案システムでは、閾値内に入った場合、送信しない制御としている。これを送信を全くしない制御ではなく、送信は行うが送信回数を通常より削減するプロトコルに変更することで、影響度計測の精度が向上できると考えられる。

#### 4.5 パケットロス発生時における提案システムの挙動

無線センサノードを用いた場合、無線センサノードと制御 PC 間において、パケットロスが発生することが考えられる。そのため、実際にパケットロスが起きた際に、提案システムの制御にどのような挙動が発生するかについて検証を行った。提案システムでは、パケットロスが発生した際に前回取得した照度値を利用し、その照度値を無線センサノードに対する各照明の影響度推定に用いている。

本実験では、パケットロス発生率が10%および40%に対して、検証を行った。これは、実環境における3mおよび12mの距離に無線センサノードを配置し、予備実験を行った際に発生する可能性のあるパケットロス発生率である。

本実験では、各照度センサに10%および40%の確率でランダムにパケットロスを発生させ、提案システムの挙動を検証した。パケットロスを10%および40%の確率で発生させた際における提案システムの照度収束実験の結果を図14、図15に示す。また、照度収束時における光度分布をそれぞれ図16、図17に示す。

図14より、各センサノードが目標照度に対して、収束していることがわかる。このことから、10%のパケットロスが発生した場合でも、提案システムが照度収束することがわかった。しかし、350ステップ目の目標照度変更後、照度収束に約200ステップかかっている。これは、初期設定の目標照度にはきちんと収束していることからパケットロスによって、影響度計測に悪影響が起こっていることが考えられる。その結果、照度収束に時間がかかっていることが考えられる。

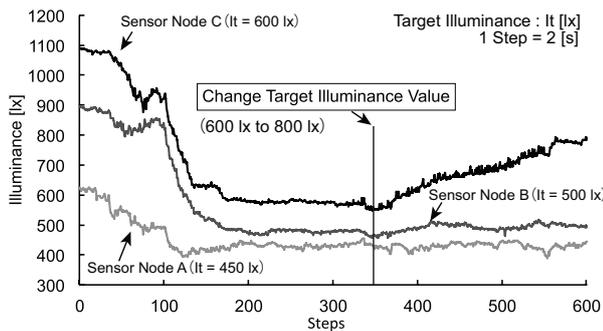


図 14 パケットロス 10%時の照度収束履歴

Fig. 14 History of the illuminance data (Packet loss rate:10%)

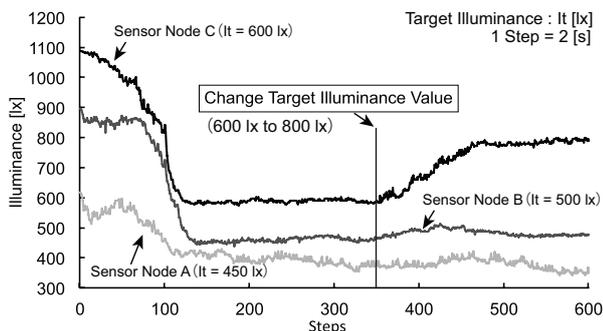


図 15 パケットロス 40%時の照度収束履歴

Fig. 15 Single column figure with caption

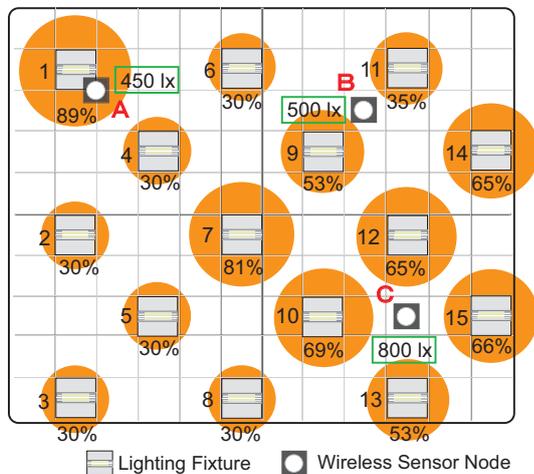


図 16 パケットロス 10%時における照度収束時の光度分布

Fig. 16 History of the illuminance data (Packet loss rate:40%)

また、図 15 のセンサノード C を見ると、目標照度に収束していないことがわかる。これは、パケットロスが 40%発生するような環境では、影響度計測に誤りが多く発生しており、各照明と各センサノードにおける影響度の関係性が悪化していると考えられる。また、図 16 を見ると、照明 7 番が強く点灯しており、影響度計測に悪影響が発生しており、図 17 でも、照明 8 番が強く点灯していることがわかる。これらの結果からも、照明と無線センサノードにおける影響度の関係性に不具合が生じていることがわか

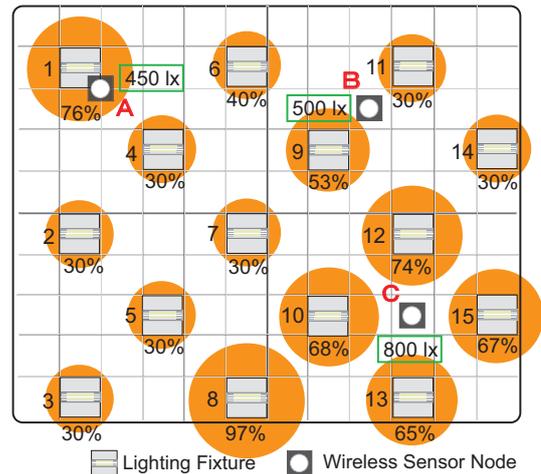


図 17 パケットロス 40%時における照度収束時の光度分布

Fig. 17 Single column figure with caption

る。従って、無線センサノードと制御 PC 間にパケットロスが発生した場合、影響度推定の精度が悪化することがわかった。

提案システムでは、パケットロス発生時には前回の値を参照し影響度推定を行っている。この制御をパケットロスが発生したと考えられる場合には、影響度計測を行わない制御などに変更することによって、影響度推定に悪影響を及ぼさない影響度推定手法を考える必要がある。

## 5. 関連研究

センサネットワークを用いて、オフィスや家のモニタリングを行う研究は数多く行われている [2], [5], [12]. これらの研究は、センシングデータのモニタリングを主眼としているのに対し、本研究ではセンサネットワークを用いセンシングデータを収集し、照明制御に用いることを目的としている。

センサネットワークを用いた照明制御手法もいくつか提案されている [4], [9], [10]. UCLA の Park ら [9] は、エンターテインメントやメディア作成時の照明制御が目的である。照度が要求されるパターンを分類し、それらを提供するシステムを提案しているが、電力消費に関する検討がない。これに対し、本研究では、最適化問題の目的関数に消費電力量のペナルティ項をいれることで照明の消費電力を抑えると共に、センサネットワークにおける省電力プロトコルの提案を行なっている。

Berkeley の Sandhu ら [10] や Delaney ら [4] の研究は、人感センサを用いて在離席を判断し、必要のない箇所の照明を消灯することが目的である。本研究では、ユーザーの要求照度を満たしつつ、消費電力量を低減することが目的である。在離席センサをシステムに組み込むことで、より効果的な消費電力量の削減が予測できる。

CMU の Singhvi ら [3] は、照明のエネルギー消費量とユーザーセントリックの考えにはトレードオフがあるとし、

両方を満たすパラメータを探索するアルゴリズムを提案している。しかしながら実験は反射笠のあるランプ数台で行われており、実際のオフィスの照明とは大きく異なっている。また、パケットロスへの対応に関する実験は行われていない。これに対し、本研究では、実際のオフィスでも用いられている白色蛍光灯 15 灯を用いて実験を行なっている他、パケットロス発生時の挙動に関する考察を行なっている。

## 6. 結論と今後の展望

本研究では、無線センサネットワーク MOTE MICAz を用いた知的照明システムの提案を行った。はじめに、提案システムの精度検証を行った。提案システムではユーザの要求する目標照度に対して、省電力で収束することが確認できた。そのため、提案システムは有用であることが確認できた。

また、オフィスにおける無線センサノード利用を考えた際には、バッテリー交換のコストが大きいこと、バッテリーの稼働時間を増加させる必要がある。無線センサノードにおける通信プロトコルを制御することで、パケット送信の回数を削減することが可能である。そこで、無線センサノードに対して省電力プロトコルを提案・実装し、その有効性を検証した。検証の結果、パケット送信回数が省電力プロトコルを用いない場合よりも、約 95%削減することができた。本研究で提案した省電力プロトコルは有効性が確認できた。

最後に、提案システムにおけるパケットロス発生時の挙動を検証した。パケットロスが 10%で発生した場合では、影響度計測に及ぼす悪影響は少なかったことに対して、40%で発生した場合は、影響度計測に悪影響を及ぼし、点灯パターンが悪化することがわかった。

今後の課題として、省電力プロトコルの改善およびパケットロス発生時に影響度推定に悪影響を与えない照明制御アルゴリズムを考える。本実験で用いた省電力プロトコルでは、閾値内に入った場合、照度値を送信しない制御となっている。これを閾値内に入った場合でも全く送信しない制御ではなく、送信は行うが送信回数を通常より削減するプロトコルに変更することで、改善が見込まれる。また、パケットロス発生時には、前回の値を参照し、影響度推定を行っている。この制御をパケットロスが発生したと考えられる場合には、光度変化量から次照度を推定し、影響度計測を行う制御に変更することによって、影響度推定に悪影響を及ぼさない影響度推定手法を考える必要がある。

## 参考文献

- [1] Crossbow mote - wireless sensor networks mtsmda sensor board users manual. <http://www.xbow.jp/mtsmadaj.pdf>.
- [2] Matteo Ceriotti, Luca Mottola, Gian Pietro Picco,

- Amy L. Murphy, Stefan Gun, Michele Corra, Matteo Pozzi, Daniele Zonta, and Paolo Zanon. Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The torre aquila deployment. In *In Proc. of the 8th ACM/IEEE Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Best Paper Award*, 2009.
- [3] Vipul Singhvi Civil, Vipul Singhvi, Civil Engineering Dept, and James H. Garrett. Intelligent light control using sensor networks. In *In Proc. 3rd Intl. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 218–229. ACM, 2005.
- [4] Declan T. Delaney, Gregory M. P. O'Hare, and Antonio G. Ruzzelli. Evaluation of energy-efficiency in lighting systems using sensor networks. In *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, BuildSys '09, pp. 61–66, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [5] Omprakash Gnawali, Ki-Young Jang, Jeongyeup Paek, Marcos Vieira, Ramesh Govindan, Ben Greenstein, August Joki, Deborah Estrin, and Eddie Kohler. The tenet architecture for tiered sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '06, pp. 153–166, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [6] S. Inoue and Mitsubishi Estate Company Ltd. towards the of city of the future, March 2012. <http://www.jetro.org/documents/green.innov/Shigeru.Inoue.Presentation.pdf>.
- [7] M.Miki and T.Hiroyasu and K.Imazato. Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. *Proc IEEE CIS*, pp. 520–525, 2004.
- [8] Panasonic. 照度センサ napica. [http://www3.panasonic.biz/ac/download/control/sensor/illuminance/catalog/bltn\\_jpn\\_ams.pdf](http://www3.panasonic.biz/ac/download/control/sensor/illuminance/catalog/bltn_jpn_ams.pdf).
- [9] Heemin Park and Mani B. Srivastava. Design and implementation of a wireless sensor network for intelligent light control. In *IPSN '07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, pp. 370–379. ACM Press, 2007.
- [10] Jaspal S. Sandhu. Wireless sensor networks for commercial lighting control: Decision making with multi-agent systems. In *In AAAI Workshop on Sensor Networks*, pp. 131–140, 2004.
- [11] S. Tanaka, M. Miki, T.Hiroyasu, and M.Yoshikata. An evolutionary optimization algorithm to provide individual illuminance in workplaces. *Proc IEEE SMC*, pp. 941–947, 2009.
- [12] Ning Xu, Sumit Rangwala, Krishna Kant Chintalapudi, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. A wireless sensor network for structural monitoring. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '04, pp. 13–24, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [13] 財団法人省エネルギーセンター. <http://www.eccj.or.jp/office.bldg/01.html>.
- [14] 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, Vol. 22, No. 3, pp. 399–410, May 2007.