

赤外線通信を用いた新しい知的照明システムの提案

- 照明システムの最適化 -

Intelligent Lighting System using Infrared Communication

学 朝山 絵美 (同志社大院)

正 三木 光範 (同志社大工) 正 廣安 知之 (同志社大工)

Emi ASAYAMA, Graduate School of Engineering, Doshisha University, asayama@mikilab.doshisha.ac.jp

Mitsunori MIKI, Doshisha University, mmiki@mwind.jp

Tomoyuki HIROYASU, Doshisha University, tomo@is.doshisha.ac.jp

Doshisha University, Tatara Miyakodani 1-3, Kyo-Tanabe, Kyoto

In recent years, various types of equipment have become more intelligent. In this research, we propose an intelligent lighting system using infrared communication technology for direct communication between lighting fixtures and illuminance sensors in order to provide the necessary illuminance to a desired location. We actually constructed an experiment simulator based on this concept and verified 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 in a very short time. We also confirmed that the system can respond adaptively to the movement of illuminance sensors.

Key word: Intelligent system, Intelligent lighting system, Autonomous distributed control, Stochastic Hill Climbing, Infrared communication

1 はじめに

近年、情報処理技術の発展に伴い、使用者や環境に合わせて自身のシステムの動作や管理を自律的に制御し、人間の負荷を軽減する知的なシステムの開発が行われている¹⁾。しかし、我々の生活に不可欠な照明システムにおいてはあまり知的化が進んでいない。

現在の一般的な照明システムは、点灯パターンが電源配線およびスイッチに依存し、使用者の望む点灯パターンを実現できない場合がある。また、照明に明るさを変化させる機能がないため、必要以上の明るさを提供しがちであり、使用電力量が非常に多い。オフィスビルなどでは、消費される電力量の30%以上が照明用電力で占められているのが現状である²⁾。しかしながら近年、照明システムにおいても、使用者の様々な要求に対応する点灯パターンの実現や、使用電力量の削減といった観点から知的化が進み始めている。例えばセルフコントロールシステムがその一つである³⁾。このシステムの特徴は、照明に併設される照度センサが、環境からの反射光や昼光をセンスし、これに応じて調光可能な照明器具の光放射量を制御するもので、センスするエリア内の机上照度を一定に保つ機能を有する。これにより設計時に意図した以上の光出力を抑え、省電力を図ることができる。また、このようなシステムを実際にオフィスビルに導入し、電力削減効果が得られたことも報告されている^{4) 5) 6)}。しかし、このようなシステムは、固定式の照度センサを用いて照明を区分ごとに制御する方法を用いており、任意の場所に任意の照度を提供することが困難である。また、照明システムを制御する集中制御機構を有しており、耐故障性に優れていないうえに、施工時の設定が非常に複雑となる。

一方で、このような問題を解決する新たな照明システムとして、著者らは知的照明システムと呼ばれる照明システムの研究開発を行っている⁷⁾。知的照明システムは、任意な場所に適切な照度を自律分散的な制御によって提供するものである。知的照明システムの制御アルゴ

リズムとして、相関係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Correlation Coefficient: ANA/CC) をすでに提案した⁸⁾。この制御アルゴリズムは、汎用最適化手法である確率的山登り法 (Stochastic Hill Climbing: SHC) をベースとしたアルゴリズムであり、これにより、ユーザが設定した目標照度を満たしかつ省電力な状態へと1分程度で収束できる。

本研究では、知的照明システムに新たに赤外線通信技術を導入し、照度センサの位置関係をダイレクトに取得し把握することで目標照度への収束性のさらなる改善を行う。また、システムを制御するアルゴリズムの開発および有効性の検証を行う。

2 知的照明システム

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⁷⁾。以下に知的照明システムの構成要素、特長、制御の流れについて述べる。

2.1 知的照明システムの構成要素

知的照明システムは、複数の知的照明機器と複数の移動可能な照度センサおよび電力計を1つのネットワークに接続することで構成される。知的照明機器とは、光度の調節 (調光) が可能な照明とその明るさを制御する装置 (照明制御装置) からなる。すなわち、各照明機器にそれぞれ制御装置が搭載されていることになり、そのため自律分散型のシステムとして動作することが可能である。図1に知的照明システムの構成を示す。

2.2 知的照明システムの特長

2.2.1 自律分散制御

知的照明システムは自律分散制御の概念に基づいて制御を行う。すなわち全体を統括して制御する要素が存在せず、個々の照明が共通のデータから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

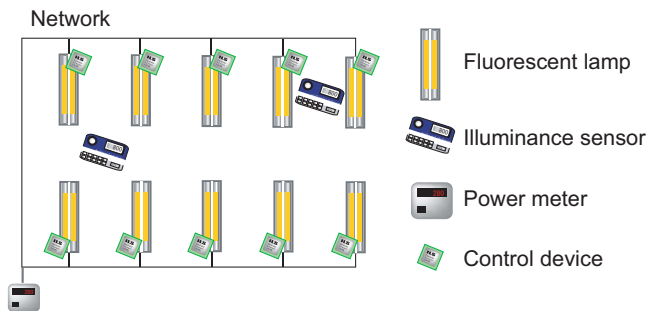


Fig. 1 知的照明システムの構成

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。

2.2.2 自律的な照度コントロール

現在の多く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、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、各照明器具を任意の光度で点灯することが可能である。また、照度センサを用い、ユーザが目標照度を設定するだけで、照明や照度センサの位置情報を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。ユーザの様々な要求に対応可能なうえ、 unnecessaryな照明を点灯させることなく、省電力を実現できる。図2に自律的な照度コントロールの概念図を示す。

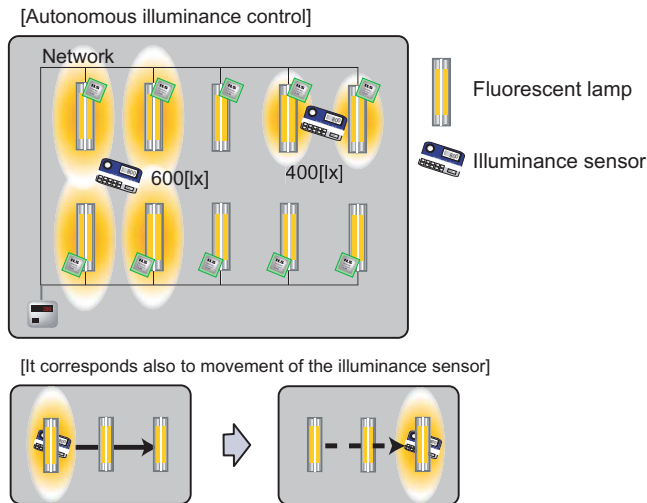


Fig. 2 自律的な照度コントロールの概念図

2.3 知的照明システムの制御アルゴリズム

知的照明システムでは自律分散制御アルゴリズムを用いてシステムの制御を行う。すなわち、集中管理機構なしに各知的照明が自律的に光度の調節を行う。ネットワークに流れる照度情報に基づき、各制御装置が最適化アルゴリズムを用い自律的に制御することによって最適な点灯パターンを実現している。

現在用いられている照明制御アルゴリズムは、相関係数

を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Correlation Coefficient: ANA/CC)⁸⁾ と呼ばれており、確率的山登り法 (Stochastic Hill Climbing: SHC) という汎用最適化手法をベースに照明制御用に相関係数に基づく近傍設計を組み込んでいる。

相関関係があるとは、2つ以上の現象がセットになって同時に変化することを指す。照明制御アルゴリズムにおいて、目標照度を満たしかつ省電力である良好な状態へと短時間で収束させるには、照明と照度センサの位置関係の把握が効果的である。その位置関係を自律的に学習する方法として有効なのが、照明と照度センサの相関係数である。図3の左に示す位置関係において、相関を計算しながらSHCで探索を行った場合、相関係数の履歴は右図のようになる。横軸は探索回数である。照明1は照度センサとの相関が高く、照明2および3は低くなる。この情報を次光度生成の近傍に利用する。

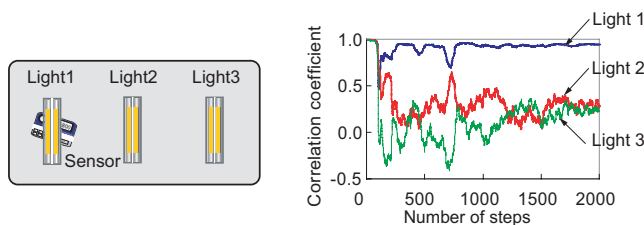


Fig. 3 照明と照度センサの相関

3 赤外線通信を用いた知的照明システム

3.1 赤外線通信

赤外線とは、波長が可視光線(0.4 μ mから0.7 μ m)よりも長く、マイクロ波(1mm以上)よりも短い0.7 μ mから1mmまでの電磁波の総称であり、温度をもつ全ての物体から温度に応じた波長が自然に放射されている。通信には赤外線の中でも可視光に近い電磁波である近赤外線(0.7 μ mから2.5 μ m)を用いる。そのため赤外線は目に見えず可視光に似た性質を持つため、照明環境に影響を与えることなく、照明光の到達範囲を特定することが可能であり、照明と照度センサの概略的な位置関係を把握するのに適している。

3.2 システム概要

現在の知的照明システムでは、ネットワークに接続された照明と移動可能な照度センサ、制御装置および電力計から構成されている。各制御装置には制御アルゴリズムが搭載されており、ネットワークに流れる照度情報に応じて自律的に照明を制御することで最適な点灯パターンを実現する。提案システムでは、新たに照度センサに赤外線送信器、照明に赤外線受信器を設置し、赤外線通信により照度センサから照明にセンサ情報(センサID、現在照度、および目標照度)を送信することで、照明と照度センサの概略的な位置情報を把握する。図4に提案システムの構成を示す。本システムでは、センサIDを通信が可能な範囲内のみ送信することで、各センサの概略的な位置情報を把握することができ、これにより照度センサの移動などに素早く対応でき、最適な点灯パターンへの高速な収束が期待できる。また相関係数が適切に算出しにく環境においても目標照度への収束が期待できる。

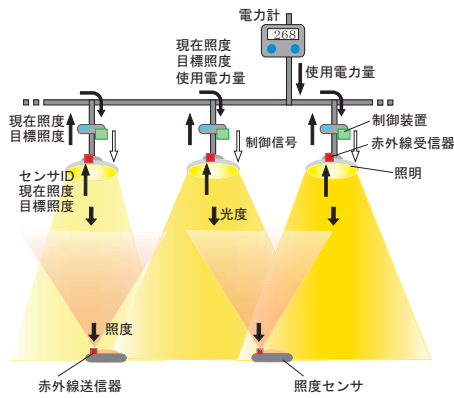


Fig. 4 赤外線通信を用いた知的照明システムの構成

3.3 照明制御アルゴリズム

知的照明システムでは、個々の照明機器に制御装置が組み込まれ、各照明は自律分散的に制御される。提案システムにおける照明制御アルゴリズムは、確率的山登り法をベースとして、赤外線通信による概略的な位置情報を利用したものである。本アルゴリズムを赤外線通信を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Infrared Communication: ANA/IRC) と呼ぶ。

以下に示すアルゴリズムは、全て照明の動作である。本アルゴリズムの流れを図5に示し、以下に説明する。

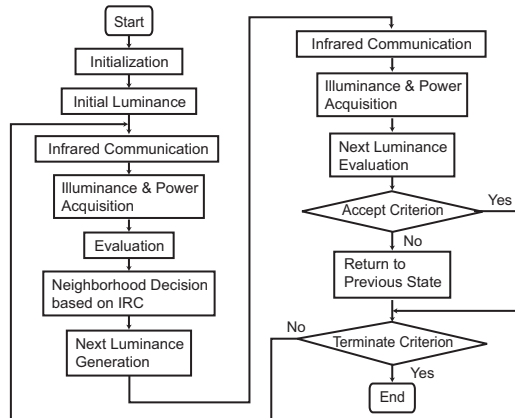


Fig. 5 ANA/IRC

1. 初期光度で点灯する。
2. 赤外線通信により照度情報 (センサID, 現在照度, および目標照度) を受信する。
3. ステップ2で取得した照度情報およびネットワークから得られる電力計の使用電力量より目的関数値を計算する。
4. 照度情報および相関情報より適切な近傍を決定する。なお近傍とは次光度の生成範囲を指す。
5. 設定された近傍内に次光度をランダムに生成し、その光度で点灯させる。
6. 再び照度情報および使用電力量を取得し、次光度の目的関数値および相関係数を計算する。
7. ステップ3よりも目的関数値が改善している場合、その光度を確定し、ステップ2へ戻る。
8. ステップ7で目的関数値が悪化した場合は、光度変化をキャンセルし、ステップ2へ戻る。

以上の動作を繰り返し実行することで、目標照度を満たしかつ省電力な状態へと収束する。なお、ステップ7および8においてステップ2に戻る理由は、外光などの環境の変化に対応させるためである。

3.4 近傍の選択

本アルゴリズムで照明のランダムな増減光には図6に示す3種類の近傍を用いて行う。ここでいう近傍とは、次光度の生成範囲をいう。それぞれ、Aは現在の光度から減光させることを重視した近傍であり、Bは光度の調節を行うために上下均等な幅で次光度を生成するための近傍である。また、CはAとは逆に現在の光度から増光させることを重視した近傍である。図6中の数値は各近傍の相対的な割合を示しており、これらは以前に実験的に求められた値である。

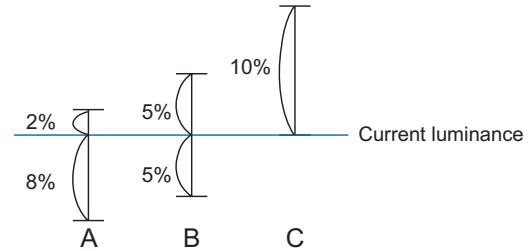


Fig. 6 3種類の近傍

照度情報および赤外線通信によるセンサIDの取得状況を基にルールに従って3種類の近傍の中から適切な近傍を選択する。これにより高速な収束が促進される。なお、照明が複数の照度センサの影響下に存在する場合、近傍の優先順位はC>B>Aである。

$$\begin{cases} A & \text{センサID未取得} \\ B & \text{センサID取得 and } Lt_i \leq Lc_i \\ C & \text{センサID取得 and } Lt_i > Lc_i \end{cases}$$

Lc : 現在照度, Lt : 目標照度, i : 照度センサの番号

3.5 目的関数

知的照明システムの自律的な照明コントロールにおける目的は、各照度センサの目標照度を満たし、かつ使用電力量を最小にすることである。

そのため使用する目的関数は、各照明自身の光度を設計変数とし、使用電力量からなる第1項と目標照度との照度差からなる第2項より構成され、この f の最小化を目的とする。本アルゴリズムで用いる目的関数を式(1)に示す。なお、この目的関数は各制御装置にそれぞれ与えられるものであり、各照明がこの目的関数の最小化を行うことで、システム全体の最適化が行われる。

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

$$P = \sum_{i=1}^m Cd_i$$

$$g_j = \begin{cases} R_j(Lc_j - Lt_j) & (Lc_j - Lt_j) \geq 50 \\ 0 & 0 \leq (Lc_j - Lt_j) < 50 \\ R_j(Lc_j - Lt_j)^2 & (Lc_j - Lt_j) < 0 \end{cases}$$

$$R_j = \begin{cases} 1 & \text{センサID取得} \\ 0 & \text{センサID未取得} \end{cases}$$

n : 照度センサの数, m : 照明の数, w : 重み

R : ID 取得状況, P : 使用電力量

L_c : 照度, L_t : 目標照度, C_d : 光度

f は現在の照度 L_c と目標照度 L_t の照度差を表す $g(i)$ と電力 P 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た場合、急速に増光することになる。電力 P には各照明の光度 C_d の和を用いる。これは光度と電力に線形関係がある蛍光灯ランプの電源電圧特性による。この P には重み w を乗算する。この w の値により、目標照度最適化を優先するか、電力の最小化を優先するかが決まる。なお、式(1)中の R を照明IDの取得の有無で判断しており、また現在照度が目標照度を大きく上回るのを防ぐために制約をかけている。

4 動作実験

4.1 動作実験システムの構成

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ランプ15灯、照明制御装置15台、複数の移動可能な赤外線照度センサ、赤外線受信器15台およびインタフェース用のPC1台から構成される。なお、本システムでは使用電力量を計測する電力計は含まない。使用電力量には各照明の光度の和を用いる。動作実験システムの構成を図7に示す。

蛍光灯ランプにはインバータ制御可能な蛍光灯ランプFSA42001F(松下電工)を、照度センサには3423ルクスハイテスタ(日置電機)を用いる。この蛍光灯ランプはデジタル信号のDuty比により光度が変化し、Duty比が光度と線形比例する。

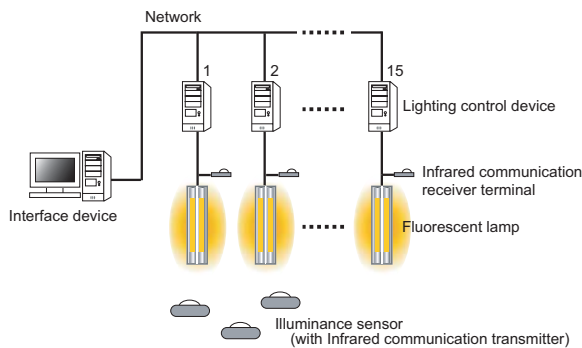


Fig. 7 動作実験システムの構成

4.2 赤外線照度センサの試作

提案システムの概念に基づき、赤外線照度センサおよび赤外線受信器を試作した。それぞれ図8、図9に示す。

赤外線照度センサは、照度センサを用いて常時照度を測定しており、またデジタルスイッチでセンサIDおよび目標照度を設定することができる。それら3つの値を照明機器側の赤外線受信器にリモコン通信で送信している。通信データフォーマットを図10に示す。

また、本システムにおいては、赤外線通信の可能範囲をどのように設定するかが重要となる。赤外線通信の可能範囲が狭い場合、センサ情報を受け取ることができず影響があると判断できる照明の数が少なくなってしまう、目標照度を満たせなくなる場合がある。赤外線通信の範囲設定は



Fig. 8 赤外線照度センサ



Fig. 9 赤外線受信器

| リーダーコード | カスタムコード | ID | 照度値 | 目標照度値 | SUM | ストップビット |
|---------|---------|--------|--------|-------|-------|---------|
| 16 bit | 8 bit | 12 bit | 12 bit | 8 bit | 8 bit | |

Fig. 10 通信データフォーマット

赤外線発光モジュールの取り付け方および発光の強さに依存するため、発光の強さを調節することで、照明4灯の真ん中に照度センサを置いたときに、4灯共にセンサからのデータを受信できる範囲とした。

4.3 動作実験による提案システムの有効性の検討

照明制御装置に搭載する制御アルゴリズムとして、ANA/IRCおよびANA/CCを実装し、以下に示す3つの実験環境においてANA/IRCによる数値実験を行う。また目標照度を満たしつつ省電力な状態が得られるか検証を行い、従来のアルゴリズムであるANA/CCとの性能比較をし、提案アルゴリズムの有効性の検証を行う。実験に用いたANA/IRCおよびANA/CCのパラメータは表1の通りである。

Table 1 実験パラメータ

| | ANA/CC | ANA/IRC |
|--------------------------------|-----------|---------|
| Number of fluorescent lamps | | 15 |
| Number of illuminance sensors | | 3 |
| Maximum luminous [%] | | 100 |
| Minimum luminous [%] | | 30 |
| Initial luminance [%] | | 100 |
| weight(w) | 1.0 | 0.5 |
| Number of data for CC | 50 | - |
| Threshold value of CC | 0.5 - 0.3 | - |
| Threshold value of illuminance | - | 50 |
| Infrared angle | - | 50 |

4.3.1 実験1 [環境に変化なし]

実験環境を図11に示す。設置する照度センサの目標照度はセンサ1を750[lx]、センサ2を650[lx]、およびセンサ3を550[lx]とする。

なお、図中の囲みは赤外線通信が可能な範囲である。

実験1の各センサにおける照度履歴を図12、図13に示す。グラフの縦軸は照度、横軸は探索回数であり、実験環境において探索回数100ステップは約3分に相当する。図12、図13中の3本の帯は各照度センサの目標照度収束状態を示している。人間の目には認識できない照度範囲は、目標照度の0.92~1.06倍と報告されている。よってこの範囲内の照度は目標照度収束状態とみなしている。

図12より、実験開始後、各照度センサ1, 2, および3はそれぞれ探索回数27, 17, および104回で目標照度に収束し

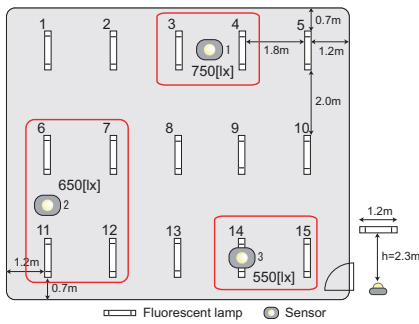


Fig. 11 実験環境 (実験 1)

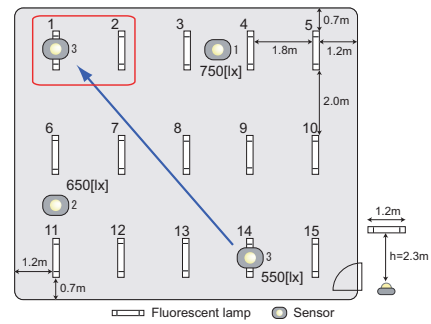


Fig. 14 実験環境 (実験 2)

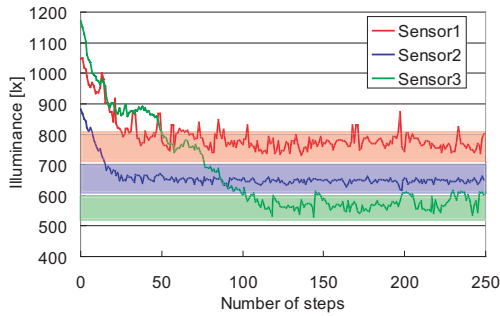


Fig. 12 ANA/IRC の照度履歴

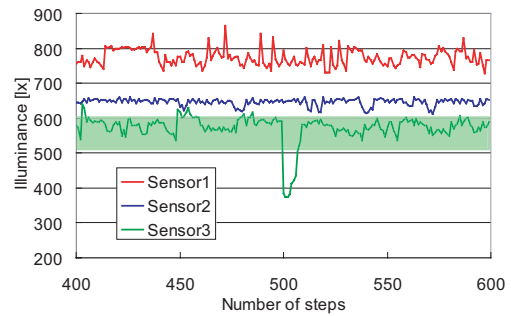


Fig. 15 ANA/IRC の照度履歴

ていることがわかる。目標照度状態に到達した後、各照度センサ共安定して目標照度を満たしている。

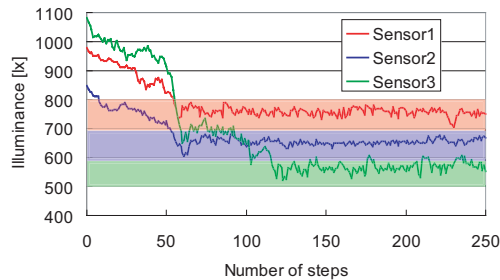


Fig. 13 ANA/CC の照度履歴

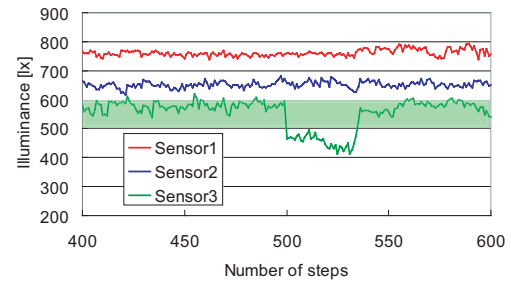


Fig. 16 ANA/CC の照度履歴

従来アルゴリズムANA/CCにおいては、図12より、実験開始後、各照度センサ1, 2, および3はそれぞれ探索回数56, 54, および104回で目標照度に収束していることがわかる。提案アルゴリズムANA/IRCとANA/CCを比較すると、2つの照度センサの収束が早く、システム全体の収束速度を見ても提案アルゴリズムとほぼ同等の結果が得られていることがわかる。

4.3.2 実験 2 [照度センサの移動]

図14のように、探索回数500ステップ目でセンサ1を移動させる。

実験2における照度履歴を図15, 図16に示す。グラフの縦軸は照度、横軸は探索回数であり、実験環境において探索回数100ステップは約3分に相当する。

図15より、センサ3の移動後、センサ3は探索回数9回で目標照度に収束していることがわかる。

また、ANA/CCとの比較では、図15より、探索回数35回

でセンサ3は目標照度に収束しているため、提案システムは約3倍収束が早いことがわかる。

続いて、実験2における使用電力量履歴を図17, 図18に示す。グラフの縦軸はすべての照明を最大点灯させたときの使用電力量を100%としたときの割合を示しており、横軸は探索回数であり、実験環境において探索回数100ステップは約3分に相当する。

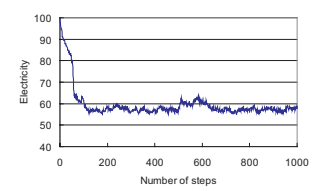
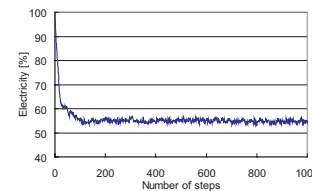


Fig. 17 ANA/IRC の使用電力量 Fig. 18 ANA/CC の使用電力量

図17, 図18より、提案アルゴリズムANA/IRCはANA/CC

とほぼ同等で電力最小化が行われている。

また、実験2におけるセンサ3移動直前とその後約2000回の探索で得られた照明の光度状態を図19および図20に示す。

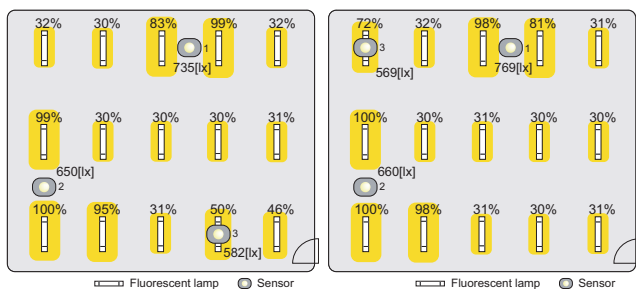


Fig. 19 センサ3移動前

Fig. 20 センサ3移動後

最終的な各照度センサの照度は735, 650, および582[lx]となり、ほぼ目標照度に収束している。図19と図20を比較すると、照度センサ3が移動した先にある照明1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。これらの実験結果より、照度センサの移動に対応できることがわかる。

4.3.3 実験3 [重複して情報を取得する環境]

図21のように赤外線通信により複数のセンサからの情報を得る位置に設置する。

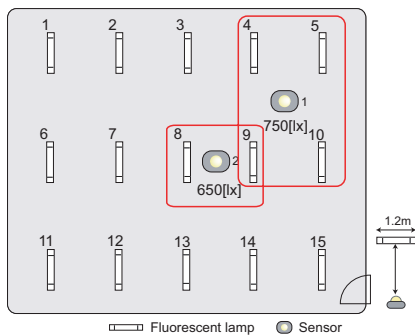


Fig. 21 実験環境 (実験3)

システム構成:赤外線受信器は一度に1つのセンサの情報しか受け取ることができない。よって、複数の照度センサからの情報を受け取ることのできる位置に受信器がある場合、それらのセンサ情報は交互に受信することになる。その場合、複数のセンサから情報を受け取ることのできる照明は影響のあるセンサが交互に変わると判断してしまう。したがって、それを防ぐために、複数のセンサから情報を受け取っていると判断した場合、それぞれのセンサ情報を常時メモリに格納し、未受信時に前の情報を利用することとする。

実験3におけるANA/IRCの照度履歴を図16、使用電力量履歴を図15に示す。

図22より、実験開始後、各照度センサ1, および2はそれぞれ探索回数33, および143回で目標照度に収束していることがわかる。目標照度状態に到達した後、各照度センサ共安定して目標照度を満たしている。

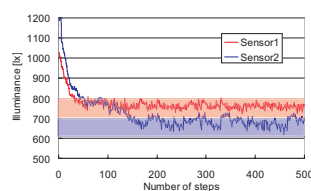


Fig. 22 照度履歴

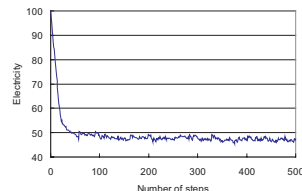


Fig. 23 使用電力量履歴

5 まとめ

従来の知的照明システムに搭載されている制御アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Correlation Coefficient: ANA/CC) は、各照明が自身の光度変化量と照度センサの照度変化量により相関係数を算出し、各照度センサとの相関の高い照明を強く、相関の低い照明を弱く点灯することで、目標照度を満たし、かつ省電力な点灯パターンへの収束を実現する。しかし、相関係数の算出に時間を要するため、照度センサの移動など環境が変化した場合、収束までに一定時間がかかってしまう。

そこで本研究では、赤外線通信を用いて照明と照度センサの概略的な位置情報を取得し、その照度センサの情報を基に照明の制御を行う「赤外線通信を用いた知的照明システム」を提案した。また、照明制御アルゴリズムとして、赤外線通信を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Infrared Communication: ANA/IRC) を提案し、数値実験により照明制御アルゴリズムの詳細な検討を行った。そして、赤外線照度センサを試作し、また動作実験システムにANA/IRCを実装し、実機での動作実験により、外光等の影響を受ける環境のもとANA/IRCの有効性の検討を行った。以下に本研究により得られた結論を示す。

- 赤外線通信により照明と照度センサの概略的な位置関係を把握し、その位置情報を近傍決定や評価に用いるANA/IRCは、照度センサの移動に対して、ANA/CCよりも高速に目標照度への収束を行うことが可能である。
- 図21のように赤外線照度センサからの情報が複数受け取る環境であっても、前のセンサ情報を用いることで各照度センサが目標照度に収束することを確認できた。
- ANA/IRCは、赤外線通信範囲内の照明の影響度に応じて適切な近傍を選択することができるため、高速に最適な点灯パターンへ収束することが可能である。

本研究で開発した赤外線通信を用いた知的照明システムは、移動などの環境変化に素早く対応し、目標照度を満たし、かつ省電力な点灯パターンへの収束を示しており、従来の知的照明システムの課題を克服している。今後はより大規模な環境で動作実験を行い、赤外線通信を用いた知的照明システムの有効性について検討を行いたい。

参考文献

- 1) T.Kawaoka M.Miki. Design of intelligent artifacts:a fundamental aspects. *Proc.JSME Inter-national Symposium on Optimization and Innova-tive Design(OPID97)*, 1997.
- 2) CHAN ALS LAM JC. Energy audits and surveys of air-conditioned buildings. *Proceeding of Australian and New Zealand Architectural Science of Association Conference, University of Canberra, Australia*, pp. 49-54, 1995.
- 3) 他鶴岡伸一. センサを応用した省エネ照明システムの開発. 電気設

備学会全国大会, pp. 37–38, 1997.

- 4) P.J.Littlefair. Predicting lighting energy use under daylight linked lighting controls. *Building Research and Information*, Vol. 26, No. 4, pp. 208–220.
- 5) TA.Heasman AI.Slater, WT.Bordass. People and lighting controls. *BRE information paper IP 6/96, Garston: CRC*.
- 6) JC.Lam LI.DHW. An investigation of daylighting performance and energy saving in a daylit corridor. *Energy and Buildings*.
- 7) Imazato K Miki M, Hiroyasu T. Proposal for an intelligent lighting system and verification of control method effectiveness. *Proc IEEE CIS*, pp. 520–525, 2004.
- 8) Imazato K Yonezawa M Miki M, Hiroyasu T. Intelligent lighting control using correlation coefficient between luminance and illuminance. *Proc IASTED Intelligent Systems and Control*, Vol. 497, No. 078, pp. 31–36, 2005.