

個別照度を提供する照明制御システムにおける可視光通信技術の導入と照度収束の改善

伊藤 博高[†] 三木 光範^{††} 吉見 真聡^{††}

Improvement in Convergence of Illuminance in Intelligent Lighting System through the Introduction of Visible Light Communication Technology

Hirotaka ITO[†], Mitsunori MIKI^{††}, and Masato YOSHIMI^{††}

あらまし 筆者らが開発した、個別照度を提供する照明制御システム（知的照明システム）では、照明の光度変化量と照度センサの照度変化量を用いて照明と照度センサの位置関係を推測しており、現在の知的照明システムでは目標照度への収束時間は約2分である。この収束時間は一般には問題のない時間であるが、照度の低い場所を即座に明るくしたい時には収束時間の短縮が必要な場合も存在する。そのため、照明と照度センサが直接通信を行う可視光通信技術を導入した知的照明システムを提案する。照明と照度センサの位置関係が直接把握できることから、目標照度への収束時間を改善することが可能となり、短時間で要求を満たすことができるほか、照度センサの移動にも素早く対応することができる。実験においてこれらを検証した。

キーワード 照明制御、最適化、オフィス環境、照度、可視光通信

1. ま え が き

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ためにシステムの知的化が行われている [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知的化があまり進んでいない。

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、近年オフィスでは液晶ディスプレイを見ながら仕事をすることが多く、この場合には必要以上の明るさとなり、使用電力量が多くなる。オフィスビルなどでは、消費される電気量の20%以上が照明用電力で占められているのが現状であり、この改善が必要である [2]。

このような背景から、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自律制御システムの開発が行われてきている。たとえばセルフコントロールシステム [3] がその一つである。このシステムの特徴は、照明に内蔵された照度センサが、照明や外光の反射光をセンスし、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面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。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グループ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。

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名付けた照明システムの研究開発を行っている [4]。知的照明システムは、任意の場所に任意の照度を自律分散的な制御によって提供するものである。著者らは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）をすでに提案している [5]。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

[†] 同志社大学大学院 工学研究科, 京都府

Graduate School of Engineering, Doshisha University, 1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi Kyoto, 610-0394 Japan

^{††} 同志社大学理工学部, 京都府

Department of Science and Engineering, Doshisha University

Climbing : SHC) をベースとしたアルゴリズムであり、照度に関する複数の制約条件のもとで、全体の消費電力を最小にする各照明の光度を求め、ユーザが要求する照度を満たす。この最適化を効率的に行うために、照明と照度センサの位置関係を照明の光度変化量と照度センサの照度変化量の相関を用いて把握し、制御を行っている。

知的照明システムは実験室における検証実験において、照明 15 灯の環境下において異なる 3ヶ所にユーザが要求する照度を満たし、かつ全体の消費電力を最小にする各照明の光度を実現する点灯パターンへと 2 分程度で収束することを確認している。また東京都内の実執務空間における大規模な実験（照明 26 灯、照度センサ 22 台）においても約 2 分程度で収束することを確認している [6]。しかしながら、知的照明システムではこの相関係数を計算しながら位置関係の学習を行っているため、照度センサを照度が低い場所に移動した際にその場所を明るくする場合にも、2 分程度の時間を要する。オフィスにおいて収束までのこの時間が少し長くても、照度が 300[lx] 以上ある場所なら特に問題はないと思われるが、照度がそれ以下の場所では、照度が 300[lx] を超えるまでの時間は JIS の照度基準を満足しないため、1 分程度は執務に支障をきたす可能性もある。

そこで、このための改善策として照明と照度センサの位置関係を直接把握し、照度が低い場所に設置された照度センサに近い照明が素早く光度を増加させることを考える。一般的に物体の位置推定手法に関しては、GPS、無線 LAN、超音波、および赤外線などを利用した手法が多く用いられている。また、近年では LED の普及に伴い可視光通信 [7] [8] による位置推定手法に関する研究も行われている [9]。知的照明システムにおいてこれらの手法を利用する場合、GPS は屋内での利用は困難であり、無線 LAN を用いた位置推定では測定精度が 1, 2[m] 程度の精度であり、10[cm] 程度の精度で位置推定が必要な知的照明システムでは利用することができない。一方、超音波、赤外線、および可視光通信はいずれも室内において高精度であり利用可能である。その中でも、可視光通信は、LED には容易に組み込むことが可能であるため、照明の LED 化が進みつつあることから将来的には天井に設置された LED 照明をそのまま送信機として利用可能であり、最もコストが低くなると考えられる。そのため、著者らは知的照明システムにおいて、照明の光の中に照

明器具の識別番号を入れ、照度センサと可視光通信を行うことで、照度センサが照明の真下から半径 1[m] 以内に設置された場合、その照明を直接認識できるようにすることを考えた。

そこで、本研究では、知的照明システムに新たに可視光通信技術を導入したアルゴリズムを開発し、目標照度への収束時間のさらなる改善を行う。

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、それぞれの照明器具の協調動作によってユーザの要求する照度を満たすシステムである。複数の照明器具と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。

照明器具には学習判断を行う制御装置を備え、各照明器具が自律的に動作を行う。従来の照明システムでは、配線によって決められた点灯パターンしか実現できないが、知的照明システムでは、配線に依存しない任意の点灯が実現できる。

2.2 目的関数

知的照明システムは照度センサの目標とする照度（目標照度）を満たし、かつ電力量が最小となるよう照明の光度を自律的に求める。すなわち、これら为目的関数に定式化する必要がある。照明 i の目的関数を式 (1) に示す。

$$f_i = P + w \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & (I_{c_j} - I_{t_j}) \geq 0 \\ R_{ij}(I_{c_j} - I_{t_j})^2 & (I_{c_j} - I_{t_j}) < 0 \end{cases}$$

$$R_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & r_{ij} \geq T \\ 0 & r_{ij} < T \end{cases}$$

n : 照度センサの数, m : 照明の数, w : 重み

P : 消費電力, I_c : 現在の照度, I_t : 目標照度, T : 閾値

r : 照明 i に対する照度センサ j に関する相関係数

照明の光度を設計変数とし、式 (1) の関数 f_i を最小化することを目的とする。 f_i は現在の照度 I_c と目標照度 I_t の照度差を表す g_j と消費電力量 P から成る。 g_j は照度差が負であった場合、すなわち現在の照度が目標照度を下回っていた場合、かつ、相関係数 r

がある程度大きい（閾値 T 以上）場合に加算される。これにより、相関係数が低い照度センサが目標照度を下回っていた場合には目的関数値は加算されない。ゆえに、相関係数の高い、すなわちその照明が与える影響の強い照度センサにのみ最適化の対象を絞ることができる。なお、相関係数の閾値には 0.5 を用いる。これは予備実験により定めた値である。消費電力量 P は電力計から取得する。また、 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への収束を優先するか、消費電力の最小化を優先するかを設定することができる。なお、重み w には 1.0 を用いる。この値より大きくすると実現照度と目標照度の差は少なくなるが、消費電力は増加する。一方、この値より小さくすると消費電力はより最小化されるが、実現照度と目標照度の差は大きくなる。ここでは、予備実験により実現照度と目標照度の差を 50[lx] にする基準で求めた値がこの値である。

目的関数は照明が各々持ち、個別に最適化問題を自律的に解く。照明間では情報交換を行わないため、各照明が目的関数の最小化のためにどのように動作しているかという情報は持っていない。外光などの要因により現在の照度が変化した場合においても、各照明が式 (1) の関数 f_i を最小化するように働くため、リアルタイムな環境変化にも対応することが出来る。

2.3 照明制御アルゴリズム

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照明の光度を自律的に調節する。照明制御アルゴリズムにより、目標照度への収束速度や精度は大きく異なるため、照明制御アルゴリズムは非常に重要である。照明制御アルゴリズムには、確率的山登り法 (Stochastic Hill Climbing : SHC) という最適化手法をベースに改良したものを採用している。SHC は現在の解の近傍にランダムに次の解を生成し、目的関数値が改良した場合にその解を受理し、遷移する。これを繰り返すことで最適解または局所解を得るアルゴリズムである。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) [5] と呼ばれており、光度を変化させた時の光度変化量と照度変化量の多数のサンプルを相関分析することにより、照明と各照度センサの相関係数を求める。照明制御アルゴリズムにおいて、目標照度を満たし、かつ照明全体の消費電力量を最小にする各照明の光度を実現する点灯パ

ターンへ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。相関係数は、式 (2) を用いることで算出できる。なお、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ はそれぞれ x_i 、 y_i の相加重平均である。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

x : 光度変化量, y : 照度変化量

図 1 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。

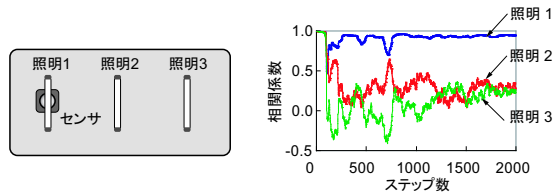


図 1 照明の光度と照度センサの照度の相関

Fig. 1 Correlation of the luminance of the lightings and the illuminance measured by the illuminance sensors.

また、正確な相関係数を得るためには、光度変化量と照度変化量のサンプル数が十分に必要であることが図 1 より分かる。ここでは、照度センサの移動時の相関係数の更新を素早く行うことができるように、予備実験により光度変化量と照度変化量のサンプル数を 50 とし、それ以降は古いサンプルを逐次新しいサンプルに更新し、相関係数を算出する。

このときの相関係数に基づいて、光度の変化幅の設計を減光重視にするか増光重視にするかということを適応的に決定し、その範囲内においてランダムに次光度の生成を行っている。これにより最適な点灯パターンを速やかに実現しており、実験室における照明 15 灯および照度センサ 3 台の環境、また東京都内の実執務空間における照明 26 灯および照度センサ 22 台の環境において収束時間は約 2 分である。この収束時間は 1 分以下に縮めることも 5 分に延ばすことも可能である。しかしながら、この収束時間を短くしすぎると窓

から入る太陽光などの外光や影による照度の変化に対し敏感に反応しすぎて照明環境が大きく変化するのでユーザは不快に感じる。一方、この収束時間を長くすると急激な照明の変化は少なくなるが、環境への対応が遅くなる。予備実験を行ったところ、2分程度で収束させることが最も照明環境の変化が少なく、かつ環境の変化にも追従できる値であった。ただし、この値については状況に応じてより長い時間に設定する方が照明環境の変化が少なく快適な場合もある。

しかしながら、照度が低い場所を急速に明るくしたいときなど、必要に応じて短時間での照度収束が望まれる場合もある。この時、知的照明システムでは、ユーザが照度の低い場所へ移動することにより、相関係数を新たに求める必要があるため、制御中に位置推定を行うのは多少の時間を要することになる。そのため、照明制御アルゴリズムを改善するために、直接的に位置情報を推定する機能が必要となる。

2.4 照度センサの位置推定手法の検討

知的照明システムにおける照度センサの位置推定では、有効範囲が広域である必要性は少ないが、屋内において利用可能であり、照明と照度センサの概略的な位置推定を行える必要がある。現在、物体の位置情報を推定する手法にはGPS、無線LAN、超音波、赤外線、および可視光通信を利用した手法が用いられている。しかしながら、屋内でのGPSの利用は困難であり、また、無線LANを用いた位置推定では測定精度が1, 2[m]程度の精度であり、10[cm]程度の精度で位置推定が必要な知的照明システムでは利用することができない。一方、超音波、赤外線、および可視光通信を利用した手法では、照度センサの高精度な位置推定を行うことが可能である。その中でも、可視光通信は、LEDには容易に組み込むことが可能であるため、照明のLED化が進みつつあることから将来的には天井に設置されたLED照明をそのまま送信機として利用可能であり、最もコストが低くなると考えられる。そこで、本研究では可視光通信を用いた物体の位置推定手法の知的照明システムへの導入を検討する。

知的照明システムにおいて可視光通信を用いた場合、照明の光を用いて通信を行い、照明の真下から半径1[m]程度において照度センサはその識別番号を受信することができるため、識別番号を受信した場合には照度センサとその照明は近い位置関係にあると考えることができる。そのため、本研究では、知的照明システムに可視光通信技術を用いて位置推定を行うこと

により、照明制御アルゴリズムの改善を行う。

3. 知的照明システムへの可視光通信技術の導入

3.1 可視光通信メカニズムを組み込んだ知的照明システムの概要

近年、LED技術の発展に伴い、人間の目に見える光である可視光を利用した可視光通信技術が注目を浴びている。可視光通信は、目に感知できない速度で光源を高速点滅させることにより通信を実現している。この可視光通信技術を知的照明システムに導入することにより、照明の光の中に照明器具の識別番号を入れることで、照度センサが近くの照明を直接認識できるようにする。

現在の知的照明システムにおける制御アルゴリズムでは、照明の光度をランダムに変化させた際の光度の変化量およびその際に照度センサが観測した照度の変化量の相関分析を行うことにより、各照明と照度センサの位置関係を推測している。一方、可視光通信技術を知的照明システムに導入した場合には、こうした相関分析を行うことなく直接的に位置関係の把握が可能となる。図2に本システムの概念図を示す。なお、これは知的照明システムに可視光通信を完全に組み込んだ時の概念図であり、本研究で用いた実験システムは図5に示す。本システムの原理は以下のようなもの

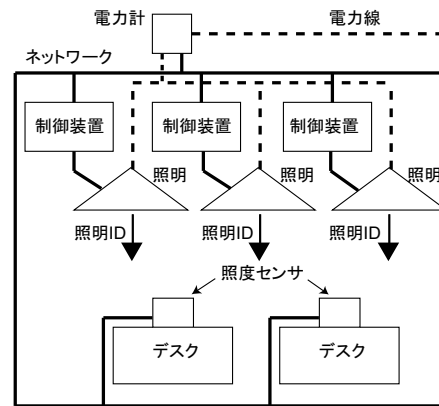


図2 可視光通信を用いた知的照明システムの構成
Fig.2 Configuration of the intelligent lighting system using visible light communication.

である。各照明には識別のためのIDを付与し、発光と同時に照明IDを可視光に載せて一定間隔で送信する。照度センサは照明IDを受信するメカニズムを組み込むことにより、照明からの光を受け、その中に含

まれる可視光通信による照明 ID を常に受信している。これにより、照明と照度センサが直接通信を行うことが可能となる。これまで知的照明システムでは、照度センサはセンサ ID、目標照度、および現在照度をネットワークを介して全照明に送信している。本システムでは、この情報に各照度センサが取得した照明 ID を追加して送信する。

照度センサが取得した照明 ID は、その照度センサの近くにある照明であり、その ID を隣接照明 ID と呼ぶ。この隣接照明 ID が目標照度や現在照度などと共にネットワークに送信されるため、各照明は表 1 のような情報を受け取る。そして各照明は、取得した照

表 1 照明が受け取る照度センサ情報
Table 1 Data of the illuminance sensors.

センサ ID	目標照度 [lx]	現在の照度 [lx]	隣接照明 ID	
1	800	450	1	4
2	600	400	1	
...				
N	450	500	10	13

度センサ情報から、隣接照明 ID と自身の持つ照明 ID を照合する。照明 ID が一致すれば、その照明とその照度センサは近い位置関係にあると判断することが可能となる。

そのため、可視光通信および各照明と各照度センサの相関係数を用いることにより推測した位置情報をもとに、制御装置は最適化を行い、目標照度を満たし、かつ全体の照明の消費電力量が最小となる各照明の光度で点灯させる。

3.2 急速増光手法の提案

可視光通信を導入した知的照明システムにおける制御アルゴリズムは、2.3 節で説明した相関係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (ANA/CC) を基に、可視光通信メカニズムを組み込んだものである。本システムは表 1 に示した照度センサからの情報を基に制御を行う。本システムにおける照明制御アルゴリズムのフローチャートを図 3 に示し、以下に詳細を述べる。

可視光通信を導入した際の制御アルゴリズムは、現在の制御アルゴリズムに図 3 のグレーの部分で示す処理を追加した構成となる。新たに追加した処理は照明 ID の照合判定、相関係数の更新、急速増光照度判定、および急速増光である。以下にそれぞれの処理に関して述べる。

- 照明 ID の照合判定

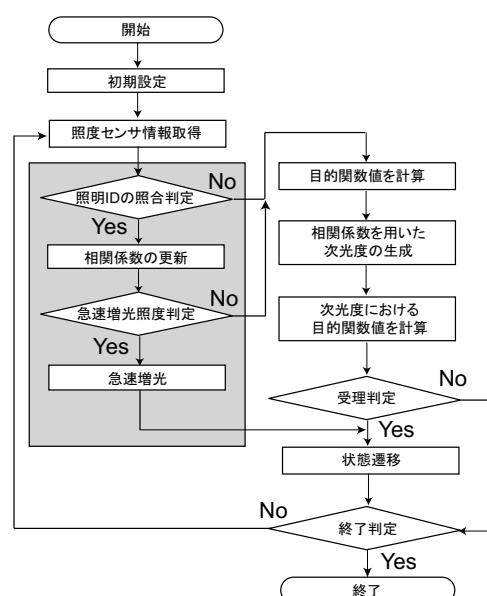


図 3 制御アルゴリズム
Fig. 3 Control algorithm.

照明がネットワークを介して照度センサからの情報を取得した際に、自身の照明 ID と隣接照明 ID が一致する照度センサが存在するかどうかを調べる。照明からの光の中には照明 ID が連続的に送信されているため、照度センサを移動させた際には、移動中に制御に必要な照明 ID を受信することがある。その移動中に受信した照明 ID は最終的に設置された場所で受信する照明 ID とは異なるため、移動中に受信した照明 ID は制御に使うことができず、その不必要な照明 ID を取り除く必要がある。そのため、照明は取得した隣接照明 ID が変化した場合に、その変化が確定的なものか移動中のものかを判別するため、一定時間（数秒程度）間隔後に再度隣接照明 ID を確認する。この時、隣接照明 ID が同じ値であった場合には、それを有効な隣接照明 ID とする。なお、この一定時間には、照度センサとある照明が可視光通信を行うことのできる範囲を、ユーザが照度センサを移動させる際に通過する最大の時間を設定する。これにより照度センサの移動時に、可視光通信で受信する照明の ID は無意味なものとして認識することができる。

照明は、自身の照明 ID と隣接照明 ID が一致しない場合、その照明の周りに影響の大きい照度

センサは存在しないため、従来同様の処理を行う。

- 相関係数の更新

自身の照明 ID と同じ隣接照明 ID を持つ照度センサ（隣接照度センサと呼ぶ）が存在する場合、その照度センサはその照明に極めて近い位置にあり、その照度センサに対する照明の影響は大きい。このため、現在のアルゴリズムで位置関係の情報として用いている照明と照度センサの相関係数を 0.9 と見なして処理を行う。なお、この相関係数は、2.3 節の図 1 にあるように影響度の高い照明では 0.5～1.0 の値を取り、この値を大きくすることで目標照度への収束が速くなり、また小さな値を取ることで目標照度への収束が遅くなるため、実験的に決める必要がある。ここでは照度センサが可視光通信により識別番号を得られるのは照明の直下から半径 1[m] 以内であり、照度センサは照明のほぼ真下にあると考えられるため、図 1 より相関係数を 0.9 とした。

- 急速増光照度判定

照明は隣接照度センサの中で、最も目標照度の低い照度センサにおいて現在の照度が目標照度に対して一定値（ここでは 50 [lx]）以上下回っているかということを判断する。この判断は、その場所の照度が目標照度に比べて著しく低い状態であり、隣接する照明の急速な増光が必要な状態である。このため、この判定を急速増光照度判定と呼ぶ。この条件を満たさない場合に関しては、従来と同様の処理を行う。

たとえば、照明が照度センサからの情報を取得した後に、照明 1 の ID を取得している照度センサからの情報を表 2 に示すようなものとする。

表 2 照度センサ情報
Table 2 Data of the illuminance sensors.

センサ ID	目標照度 [lx]	現在の照度 [lx]	隣接照明 ID		
1	800	450	1	4	
2	600	400	1		

この時、照度センサ 1 および照度センサ 2 の隣接照明 ID が自身の照明 ID と同じであり、これらの照度センサは照明 1 の隣接照度センサとなる。これらの隣接照度センサの中で、目標照度の最も低い照度センサ 2 の目標照度と現在の照度から判

断を行う。ここでは、照度センサ 2 の 600 [lx] が隣接照度センサの中で最も低い目標照度であり、その現在照度は 400 [lx] であるため、目標照度を 200 [lx] 下回っており、条件を満たしている。この場合、次に述べる可視光通信を用いた急速増光を行う。すなわち、隣接する照明の急速な増光を行う。

- 急速増光

目標照度に対して、現在の照度が著しく低い場合、隣接照明を急速に増光させる。急速増光が必要な照明は、最小の目標照度を持つ隣接照度センサの目標照度値まで照度を増加させるために、次の 2 つのステップの処理を行う。

Step 1. 照明と照度センサ間の影響度の計測

速やかに光度増加させるための光度増加量を決定するため、照明の光度増加量と隣接照度センサの照度増加量の変化、すなわち影響度を計測する必要がある。そのため、最初に急速増光が必要な照明は、現在の光度に最大点灯光度の一定割合（たとえば 20 %）を加算し、点灯させることによりこれを計測する。影響度は式 (3) により求める。

$$R = \frac{\Delta I}{\Delta L} \quad (3)$$

ΔI : 照度の変化量, ΔL : 光度の変化量

また、この時に目標照度を満たした場合には処理を終了する。

Step 2. 急速増光処理

照明は Step1 で求めた影響度を用いて、隣接照度センサの中で、最も目標照度の低い照度センサの要求を満たすために急速増光を行う。このとき、照明が目標照度を実現するために必要な光度を式 (4) により求める。これにより目標照度を速やかに満たす。

$$L_t = L_c + \frac{I_t - I_c}{R} \quad (4)$$

L_t : 目標照度を実現する光度, L_c : 現在の光度
 I_t : 目標照度, I_c : 現在の照度, R : 影響度

4. 動作実験

4.1 可視光通信装置の試作

知的照明システムの照明器具として、LED 照明を用いた場合にはその照明光を用いて可視光通信を行うことは容易である。しかしながら、本研究において実験に用いた知的照明システムでは、可視光通信が可能な LED 照明の入手が困難であったため、照明器具として蛍光灯を用いたが、可視光通信を蛍光灯の光の中に組み込むことは容易ではない。そこで、照明用の光源とは別に、LED を用いた可視光通信装置を試作し、送信機を蛍光灯照明器具に組み込むことにより、可視光通信を模擬する。可視光通信における受信機においても、本来は、照度センサが照度を測定すると同時に可視光通信の受信機として働く。しかし、ここでは有効性を検証する実験であることから、可視光通信の受信機を試作し、照度センサに隣接して設置した。

試作した可視光通信装置における送信機は PIC マイコンおよび LED を用いて作成した。PIC マイコンを用いて LED の点滅制御を行い、1[ms] の速度で点滅させることによりデータを送信する。データの符号化方式としては反転 4 値パルス位置変調 (I-4PPM) を用いる。点滅を 1[ms] で制御しているため、人間の目では点灯し続けているように見え、照明との併用に有効な方式である [10]。また、表 3 に送信機の仕様を示す。

表 3 試作した送信機の仕様
Table 3 Specifications of a prototype transmitter.

項目	値
中心光度 [cd]	600
配光角 [°]	15
電源 [V]	5
送信 ID データ [bit]	14
通信速度 [bps]	500

試作した受信機にはフォトダイオードである NaPiCa 照度センサ (Panasonic 電工製) および AD 変換ボード (タートル工業製 TUSB-K02AD) を用いた。NaPiCa 照度センサは照度に応じて電流が流れ、それにより電圧値の取得が可能である。この照度センサを用いて LED の点滅に対して信号値 1, 0 を受信し、この信号を復調することにより ID の取得を行う。

試作した可視光通信装置における送信機および受信機を図 4(a) および図 4(b) に示す。

図 4(a) に示すように、蛍光灯に送信機を付随して設置し、照明を識別するための ID を与え、



図 4 試作した可視光通信装置

Fig. 4 Prototype of a visible light communication device.

また、図 4(b) に示すように照度センサに試作した受信機を併設して使用する。これにより、照明と照度センサが通信を直接行う状況を擬似的に再現する。

これらの試作機を用いて実験システムの構築を行い、提案システムの有効性の検証を行う。

4.2 実験システムの構成

知的照明システムは、システムの制御形態として分散制御方式と集中制御方式の双方を用いることができる。実験システムでは、リアルタイムに消費電力量を計測できる機器が入手困難であったことから、集中制御方式を採用し、1 台のシステム制御 PC ですべての照明器具を制御することにより、各照明の光度から消費電力量の算出を行う。そのため、実験システムのハードウェア構成は第 3 章の図 2 とは異なり、システム制御 PC、照明器具 (パナソニック製 FHP45EN)、調光インタフェース (東洋電子工業製 LC-3155)、照度センサ (東京光電製 ANA-F11)、A/D 変換器 (タートル工業製 TUSB-1612ADSM-S)、および試作した可視光通信装置となる。以上の機器の接続を図 5 に示す。図 5 に示すように、照明器具の光度を制御するために、各照明器具を調光インタフェースに接続した。調光インタフェースは、Pulse Width Modulation (PWM) 方式に基づいて、パルス波の Duty 比を 256 段階の信号に応じて変化させて、各照明器具へ送信する機器である。Duty 比が高いパルス波を送信すると照明は明るく点灯し、Duty 比が低いパルス波を送信すると照明が暗く点灯する。そのため、システム制御 PC と調光インタフェースを接続することで、システム制御 PC から各照明器具の光度を制御することが可能となる。なお、調光インタフェースはチャンネルごとに独立して Duty 比を変化させることができるため、各照明器具を個別に制御することが可能である。

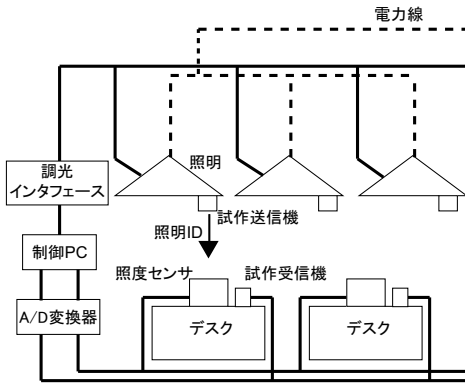


図 5 実験システムの構成

Fig. 5 Configuration of the experimental system.

また、第 2 章で述べたように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照明器具全体の消費電力情報が必要となる。照度情報の取得のために、各照度センサをシステム制御 PC に接続する。ただし、使用した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ため、A/D 変換器を介してデジタル信号に変換した後に、システム制御 PC で取得する。

一方、消費電力情報の取得は、各照明器具へ送信した信号値を基に推定している。照明に送信した 256 段階の信号における消費電力量の関係を図 6 に示す。縦軸は消費電力量 [W]、横軸は照明に送信した信号値を示す。この対応関係により消費電力を求める。

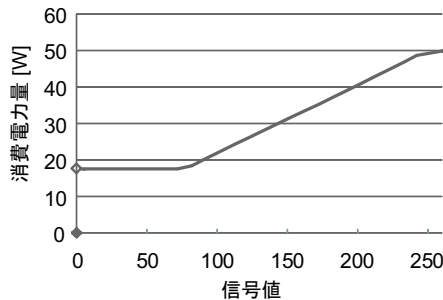


図 6 信号値と電力の関係

Fig. 6 Relation between signal and electric energy.

試作受信機は電圧値を A/D 変換器を介してデジタル信号に変換した後に、システム制御 PC で取得する。照明の最大点灯時において、受信機が送信機から受信したデータを図 7 に示す。縦軸は電圧 [mV]、横軸は時間 [ms] を示す。

この時の可視光通信のエラー率は 10% 程度である。

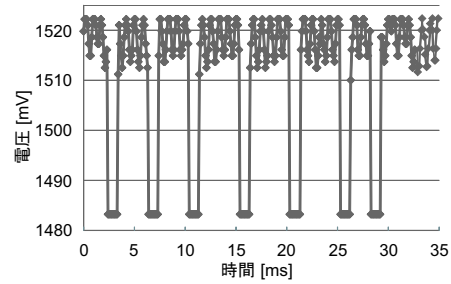


図 7 受信データ

Fig. 7 Received data.

なお、送信機からは同じ信号を送り続けており、その信号を一度でも受信をできればよいため、このエラー率による問題はない。

そして、システム制御 PC は受信機から受信したデータから ID の取得を行い、制御を行う。

4.3 動作実験による提案システムの有効性の検証

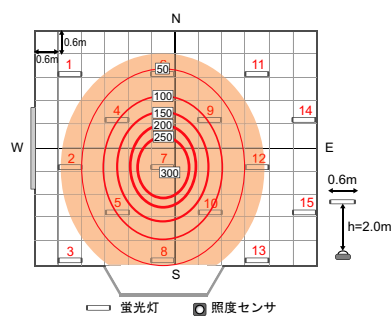
4.3.1 可視光通信の範囲に関する検討

知的照明システムでは照明を調光しており、照明の光度によって明るさは変化する。ここで、蛍光灯照明の最大点灯光度および最小点灯光度における照度分布を図 8 に示す。

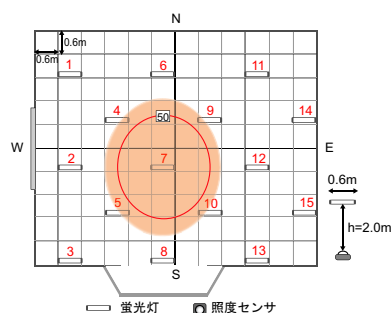
図 8 に示すように、照度分布は照明の光度に応じて異なる。知的照明システムでは、光度を変化させながらユーザの要求する照度を満たすため、可視光通信を知的照明システムに導入した場合、光度の変化により可視光通信が可能な範囲も変化する。しかしながら、本実験においては調光を行う照明用の光源とは別に試作 LED を用いるため、光度変化による可視光通信範囲の変化に対応することができない。そのため、試作 LED を適切な位置に配置する必要がある。本実験では、照度が低い場所に照度センサを移動させた際の提案システムの有効性を検証することが目的であるため、ここでは図 8(b) に示す、照明が最小点灯時において机上面 50 [lx] 以上を実現している範囲において可視光通信が可能となるように、同じ ID を持つ複数の試作 LED を配置して実験を行う。

4.3.2 実験概要

可視光通信の有効性を検証するために、以下に示す各条件に対して従来手法である ANA/CC、および提案手法の比較実験を行う。実験環境は図 9 に示す幅 6.0[m]、奥行き 7.2[m]、高さ 2.7[m] の部屋を用い、照度センサを高さ 0.7[m] の机上面に設置した。なお、図 9 は部屋の天井伏図である。



(a) 最大点灯光度



(b) 最小点灯光度

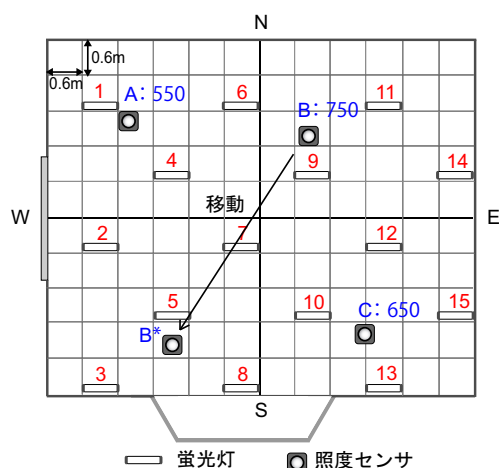
図 8 照度分布
Fig. 8 Illuminance distribution.

図 9 実験環境

Fig. 9 Experimental environment.

条件 1 : 照度センサの位置を固定

図 9 に示す位置に照度センサを配置し、照度の収束

を行う。なお、各センサにおける目標照度はセンサ A が 550[lx], センサ B が 750[lx], センサ C が 650[lx] とする。

条件 2 : 照度センサの移動

センサ B の場所が目標照度に収束した後、場所 B* へ移動させて、照度の収束を行う。なお、センサ B の初期位置および目標照度は条件 1 と同様とする。センサ B は照度が十分収束した後に移動を開始し、移動から 2 秒後に目標地点に到達した。

また、表 4 に実験に用いたパラメータを示す。

表 4 パラメータ

Table 4 Parameters of the experiment.

光源の種類	蛍光灯照明
蛍光灯照明の数	15
照度センサの台数	3
最大点灯光度 [cd]	1320
最小点灯光度 [cd]	396
初期点灯光度 [cd]	1320
照度取得間隔 [s]	1

4.3.3 結果

条件 1 における各照度センサの照度の履歴を図 10 および 11 に示す。図 10 および 11 は、横軸に時間、縦軸に照度センサの照度を示す。なお、人間の目には認識できない照度変化範囲は、照度の 0.92~1.06 倍と報告されている [11]。そのため、それぞれの照度センサの目標照度に対して、この範囲内の照度を目標照度収束状態とみなす。

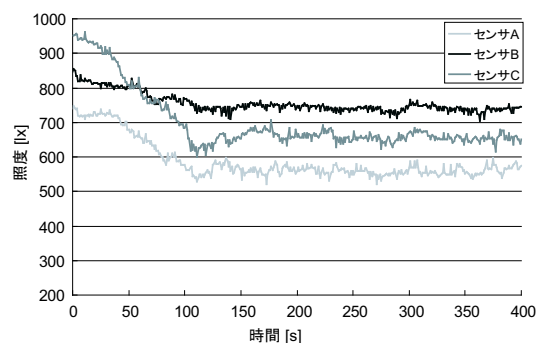


図 10 従来手法における照度履歴

Fig.10 Illuminance history of the conventional method.

条件 1 における実験では、従来手法では、目に感知できない程度の光度変化を繰り返すことにより相関係数を求めているため、110 秒ほどで目標照度へ収束し

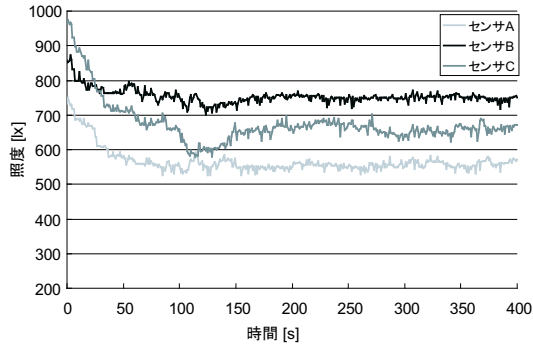


図 11 提案手法における照度履歴
Fig. 11 Illuminance history of the proposed method.

ている。一方、提案手法では可視光通信により通信を行っている照度センサに対して、照明は相関係数を直接与えているため、目標照度を満たすために減光を重視した光度変化を行うことにより、70 秒ほどで目標照度に収束していることが分かる。

次に、条件 2 における各照度センサの照度の履歴を図 12 および 13 に示す。図 12 および 13 は、横軸に時間、縦軸に照度センサの照度を示し、照度が十分に収束している 500 秒を起点とし、その 50 秒後に照度センサを移動させた。

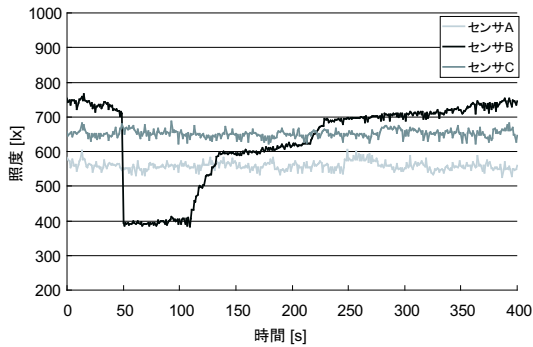


図 12 従来手法における照度履歴
Fig. 12 Illuminance history of the conventional method.

条件 2 における実験では、照度センサを移動させることにより照度が急激に減少する。照度センサを移動させた場合、従来手法では位置推定を行うために照明と照度センサの相関係数を再び求める必要があるため、しばらくは照度があまり上がらず、この相関係数を求めた後に、素早く目標照度へ収束していく。

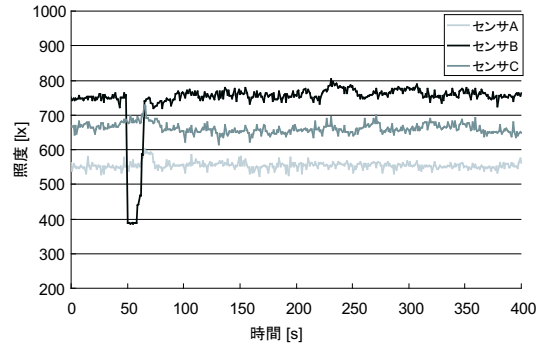


図 13 提案手法における照度履歴
Fig. 13 Illuminance history of the proposed method.

提案手法では、移動した後に新しい位置で可視光通信により位置推定を行い、急激に減少した照度を目標照度まで増加させるために急速増光を行う。そのため、照度が下がって 10 秒ほどで照度が目標照度を満たすように上昇していることが確認できる。

続いて、条件 2 における使用電力量の履歴を図 14 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、横軸は時間である。

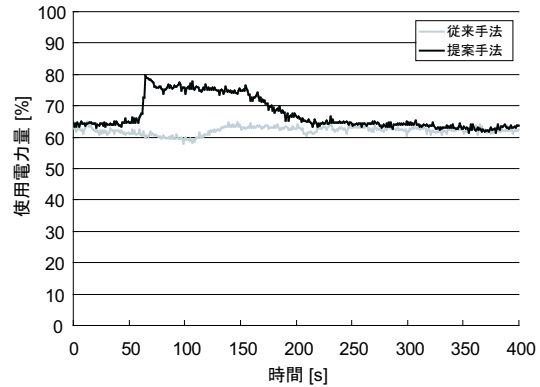


図 14 使用電力量の履歴
Fig. 14 History of electric power.

図 14 より、提案手法は従来手法と同様の電力に収束していることがわかる。ただし、照度センサ B の移動直後には、移動前の隣接照明と、照度センサ B の目標照度を満たすために急速増光を行った隣接照明が強く点灯しているため、一時的に電力が増加している。しかしながら、しばらくすると電力が下がり、従来手

法と同等の使用電力量に収束していることがわかる。

以上より、照度センサの移動に速やかに対応できることがわかる。

5. む す び

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、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) 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、全体の消費電力を最小にする各照明の光度を求め、ユーザが要求する照度を満たすことが可能である。この場合、この相関係数の算出に多少時間を要するため、照度センサの移動など環境が変化した場合、目標照度に収束する時間は約 2 分となる。

本研究では、この収束時間を短縮するため可視光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「可視光通信を用いた知的照明システム」を提案した。また、可視光通信を用いた際の照明制御アルゴリズムを提案し、それに基づき動作実験システムを構築した。そして動作実験により提案手法の有効性の検討を行った。

本研究で開発した可視光通信を用いた知的照明システムは、目標照度を高く設定し十分に収束した地点の照度センサを照度の低い地点へ人の平均歩行速度で移動させた際に、照度の低い地点を約 10 秒で目標照度に満たし、かつ従来手法と同等の電力へ収束した。これにより、従来の知的照明システムの収束速度の改善を達成した。

文 献

- [1] 三木光範. 進化する人工物. オーム社, 1999.
- [2] 財団法人省エネルギーセンター. http://www.eccj.or.jp/office/_bldg/01.html. 参照 Apr.1, 2011.
- [3] 佃和吉, 五島成夫, 山本一喜. ネットワーク式自律照明制御型照明器具. 松下電工技報, pp. 74-80, 2001.
- [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] 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 C, Vol. 130, No. 5, pp. 750-757, 2010.
- [6] 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 D, Vol. J94-D, No. 4, pp. 637-645, 2011.
- [7] 春山真一郎. 可視光通信. 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J86-A, No. 12, pp. 1284-1291, 2003.
- [8] 中川正雄. ユビキタス可視光通信. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J88-B, No. 2, pp. 351-359, 2005.
- [9] 成尾太希, Sertthin Chinnapat, 春山真一郎, 中川正雄. 可視光通信における光電力差を用いた高精度屋内測位システム. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 109, No. 131, pp. 157-162, 2009.
- [10] 杉山英充, 春山真一郎, 中川正雄. 可視光通信に適した変調方式の実験的検討. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 105, No. 76, pp. 43-48, 2005.
- [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変動知覚に関する研究. *J. Illum. Engng. Inst. Jpn.*, Vol. 85, No. 5, pp. 346-351, 2001.

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)



伊藤 博高

1987 年生. 2010 年同志社大学工学部インテリジェント情報工学科卒業. 同年, 同志社大学大学院工学研究科修士課程入学. 知的照明システムにおける目標照度の実現可能性のユーザ通知等の研究に従事.



三木 光範

1950 年生. 1978 年大阪市立大学大学院工学研究科博士課程終了, 工学博士. 大阪市立工業研究所研究員, 金沢工業大学助教授を経て 1987 年大阪府立大学工学部航空宇宙工学科助教授, 1994 年同志社大学工学部教授. 研究分野はシステム工学, 最適化, 並列処理など, 最近は並列処理と最適化を組み合わせた技術をオフィス照明の分野に展開し, 知的照明システムを研究・開発している. 著書は「工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法」(技法堂出版)等多数. IEEE, 情報処理学会, 人工知能学会, システム制御情報学会, 日本機械学会, 計算工学会等各会員. 超並列計算研究会代表. 経済産業省産業技術審議委員など歴任. 知的オフィス環境コンソーシアム会長. NEDO 技術開発機構「省エネルギー照明システムの研究開発」プロジェクトリーダー.



吉見 真聡 (正員)

2004 慶大・理工・情報工学卒. 2009 同大学院理工学研究科後期博士課程了. 2006 年度より, 日本学術振興会特別研究員 (DC1). 現在, 同志社大学理工学部助教. リコンフィギャラブルシステム, 並列処理, 知的システムの研究に従事. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会各会員.

Abstract We have proposed an intelligent lighting system that provides required illuminance to required locations. The system can satisfy required illuminance in a few minutes by using the influence of the lightings and the illuminance sensors. However, there are cases where we want to brighten the location of low illuminance immediately. In this research, we propose an intelligent lighting system using visible light communication technology for direct communication between lightings and illuminance sensors. We confirmed that the illuminance converged to the preset target illuminance in a very short time and the system can respond adaptively to the movement of illuminance sensors.

Key words Optimization, Lighting Control, Office Environment, Illuminance, Visible Light Communication