

Fault Detection Method in Intelligent Lighting System using by Modeling of Lighting Environment by Kalman Filter

Fumiya KAKU^{*}, Mitsunori MIKI^{**}, Tomoyuki HIROYASU^{***} and Masato YOSHIMI^{**}

(Received October 6, 2010)

We propose the fault detection method in Intelligent Lighting System. Modeling of Lighting Environment is used for detection. It shows relation between lighting fixture and illuminance sensor. It is calculated based on log data of Intelligent Lighting System by Kalman Filter. The fault is detected quickly used by comparison of actual measured value and predicted value by Modeling, or used by comparison with the past model. As a result of verification, it was confirmed that this method was successfully calculated Modeling of Lighting Environment in accordance with changing of environment, and detected the various faults.

Key words : Light Control, Fault Detection, Kalman Filter

キーワード : 照明制御, 障害検出, カルマンフィルタ

知的照明システムにおけるカルマンフィルタによる 照明環境のモデル化を用いた障害検出手法

加来史也, 三木光範, 廣安知之, 吉見真聡

1. まえがき

近年の電子デバイスや情報処理技術の発展に伴い、様々な制御機器において、使用者や環境に合わせてシステムが自身の動作や管理を自律的に制御する知的化が行われている。システムの知的化により、ユーザの負荷は大きく減少してきた¹⁾。

このような中、オフィスにおける照明システムはオ

フィスビル全体の消費電力量の 20%以上を占めており²⁾、ユーザの負荷を軽減するだけでなく、省エネルギーの観点から知的化が進み始めている。その一例として、セルフコントロールシステムが挙げられる。このシステムは、照明器具に併設された照度センサが、机上面などからの反射光を計測し、反射光の明るさに応じて照明器具の明るさを制御するシステムである。

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

Telephone:+81-774-65-6924 E-mail:fkaku@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:mmmiki,myoshimi@mail.doshisha.ac.jp

^{***} Department of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6932,Fax:+81-774-65-6019 E-mail:tomo@is.doshisha.ac.jp

これによって、計測するエリア内の明るさを一定に保つことを可能となり、設計時に意図した以上の明るさを抑えることで、消費電力量の削減を図る^{3, 4)}。ただし、このシステムは、照明器具に併設された照度センサにより測定した反射光を基に制御を行うため、セグメント単位でしか照明の制御が行えず、ユーザが指定した場所にユーザが要求する明るさを提供することは容易ではない。

一方、オフィス環境がオフィスワーカーの生産性に及ぼす影響に関する研究が広く行われており、オフィス環境を改善することにより、生産性が向上すると報告されている^{5, 6)}。特に、オフィス環境のうち、照明環境に着目した研究では、執務に最適な明るさ（照度）を個人ごとに提供することがオフィス環境の改善に有効であると言及されている⁷⁾。このように執務に最適な明るさを個人ごとに提供することは、タスク照明を用いることにより容易に実現できる。しかしながら、現在のオフィスでは、フロアに均一の明るさを提供する天井照明が一般的であり、タスク照明を採用することは容易ではない。このため、既存の天井照明を用いて、個々に最適な明るさを提供する照明制御システムが必要となる。

このような観点から、著者らは知的照明システムを提案している⁸⁾。知的照明システムは、ネットワークに接続されたマイクロプロセッサ搭載の照明器具、照度センサ、および電力センサから構成される。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き、最適化手法により各照明器具を制御することによって、任意の場所にユーザが要求する明るさを提供する。現在は、複数のオフィスビルにプロトタイプシステムを導入し、実用化に向けた実証実験を行っている。

実証実験の過程において、机上の書類などが障害物となり照度センサが正しい照度情報を取得できないトラブルがたびたび報告された。知的照明システムは、照度情報を基に制御を行うため、照度情報を正しく取得できない状況下においては、ユーザが要求する明るさを実現することは困難となる。

そこで、このような障害の発生を迅速に検出する機構が必要となる。また、各制御装置との断線など、想定される障害への対応も、知的照明システムの実用化に向けて不可欠である。本稿では、知的照明システムにおける種々の障害をソフトウェアにより検出する手法を提案する。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムは、任意の場所にユーザが要求する明るさ（目標照度）を提供可能な照明制御システムである。複数の照明器具、照度センサ、および電力センサをネットワークに接続することで構成される。Fig 1 に知的照明システムの構成を示す。

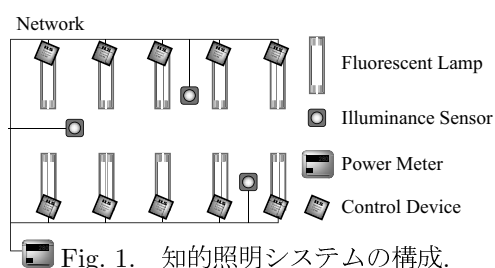


Fig. 1. 知的照明システムの構成.

Fig 1 に示すように、知的照明システムを構成するハードウェアをネットワークに接続することにより、照明器具に搭載された制御装置が、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を取得できる。これらの情報から、最適化手法に基づいて制御装置が照明の点灯の強弱（光度）を制御することにより、ユーザが要求する明るさを実現するとともに、不必要な明るさを抑え、消費電力量の削減を図る。なお、目標照度は、各オフィスワーカーが所持する照度センサごとに設定される。すなわち、照度センサ付近の明るさが目標照度となるように各照明器具の制御を行う。

2.2 知的照明システムの制御

2.2.1 制御方法

知的照明システムにおける制御は、Simulated Annealing (SA) を照明制御用に改良したアルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regres-

sion Coefficient : ANA/RC) ^{9, 10, 11)} を用いる。

SA は、現在の解から次ステップの解をランダムに生成し、その際の目的関数値の変化および現在の温度パラメータに応じて、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。ただし、温度パラメータを徐々に減少させ、改悪解の受理率を徐々に低下させるクーリング処理を必要とする SA では、常に環境の変化に対応しなければならないシステムの制御を行うことは容易ではない。そこで、次ステップの解を生成する範囲（近傍）を変化させることで、クーリング処理を行わずに最適解を得る ANA/RC を提案している ^{9, 10, 11)}。

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、および消費電力量を用いることで、最小の消費電力量で目標照度を満足する光度を導出する。また、各照明が各照度センサに及ぼす影響を回帰分析により学習し、その影響度合いに応じて光度を適切に変化させることで、より迅速に最適な光度へ変化させることができる。

2.2.2 回帰分析による影響度の把握

最適解を導出するまでの探索時間の短縮化には、各照明がそれぞれの照度センサに及ぼす明るさの度合い（以下、影響度）の把握が重要となる。なぜなら、照明は、照度センサに及ぼす影響度を把握することで、照明の付近にある照度センサの照度情報に応じた光度変化を行えるためである。

そこで ANA/RC では、回帰分析を用いて照明が各照度センサに与える影響度を把握する。回帰分析は、説明変数を変化させた際に観測値がどのように変化するかという 2 変数間の因果関係を定式化する手法である。この因果関係は、式 (1) に示す説明変数 x と観測値 y の関係式により明示できる。

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 * x_j \quad (1)$$

y : 観測値, x : 説明変数

β_0 : 定数項, β_1 : 回帰係数

式 (1) に示すように、回帰係数 β_1 の大きさによって因果関係が数値化される。そこで、ANA/RC では 1 回

の探索における照明の光度変化量を説明変数 x_j とし、照度センサの照度変化量を観測値 y_i として回帰分析を行う。これにより、照明が照度センサに及ぼす影響度を回帰係数として数値化することが可能となる。

2.2.3 制御の流れ

ANA/RC における処理の流れを以下に示す。

1. 初期化パラメータ（初期光度、目標照度など）を設定する
2. 各照明を初期光度で点灯させる
3. 各照度センサから照度情報を取得する
4. 電力センサから消費電力情報を取得する
5. 現在の環境における目的関数値を計算する
6. 回帰係数に基づき適切な次光度生成範囲（近傍）を決定する
7. 6 の近傍内に次光度をランダムに生成し、次光度で照明を点灯させる
8. 各照度センサから照度情報を取得する
9. 電力センサから消費電力情報を取得する
10. 現在の環境（次光度）における目的関数値を計算する
11. 照明の光度変化量、および照度センサの照度変化量を基に回帰分析を行う
12. 目的関数値が良好になった場合、次光度を受理する。そうでなければ、以前の光度に戻す
13. 項目 3 に戻る

上述の項目 3 から項目 12 を探索の 1 ステップとし、これを繰り返すことによって最小の消費電力量で目標照度を満足する光度を導出する。

次に目的関数について述べる。知的照明システムの目的は、目標照度を満足させつつ、消費電力量を最小化することである。したがって、これらを目的関数として定式化する。目的関数を式 (2) に示す。

$$f = P + w \times \sum_{j=1}^n g_j \quad (2)$$

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

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

$$R_j = \begin{cases} r_j & r_j \geq T \\ 0 & r_j < T \end{cases}$$

n : 照度センサの数, m : 照明の数

w : 重み, P : 消費電力量, Ic : 現在の照度

It : 目標照度, L : 光度, r : 回帰係数, T : 閾値

式(2)に示すように, 目的関数 f は消費電力量 P と制約条件 g からなる. 制約条件 g には, 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にのみ増加する. これにより, 照度が目標照度よりも下回るほど, 目的関数値が大きく増加する. ただし, 回帰係数が閾値以下である場合には制約条件 g に0を乗算する. これにより, 回帰係数が低い照度センサが目標照度を満たされない場合には目的関数値は増加しない. ゆえに, 回帰係数の高い, すなわちその照明器具が強い影響を及ぼす照度センサにのみ最適化の対象を絞ることができる. また, 制約条件 g 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, 消費電力量の最小化を優先するかが定まる.

3. 知的照明システムの実用化に向けた課題

3.1 実環境における知的照明システム

知的照明システムは, 実験室における検証実験によって, その有効性を示した^{9, 10, 11)}. 今後は, システムの実用化に向けて実環境における有効性を検証する必要があることから, 複数のオフィスビルにプロトタイプシステムを導入し, 実証実験を行っている. 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

第2章で述べたように, 知的照明システムはそれぞれの照明器具に制御装置を搭載し, 分散制御アルゴリ

ズムに基づいて制御する. しかしながら, 現在開発中の制御装置は大型であり, 実環境において照明1灯ごとにそれぞれ制御装置を搭載させることは容易ではない. このため, プロトタイプシステムでは各照明器具ごとに制御装置を搭載せず, 1台の制御用PCですべての照明の制御を行う.

3.2 実環境における知的照明システムの障害

前節で述べた環境は実験室と比べ複雑であり, 知的照明システムの制御において, 影響度推定に大きな誤差が生じるなどといった問題が報告されている. このうち, 特に懸案となっている問題は照度情報を正しく取得できない問題である.

知的照明システムは, 照度センサ付近の明るさが目標照度となるように制御を行うため, 執務において明るさが最も必要となる机上に照度センサを配置する. しかし, 机中には書類など執務に必要な備品がある場合が多く, それらが障害となることで, 実際よりも70%~90%程度低い, 誤った照度情報を取得する事例がたびたび発生した.

このような事例によって, 正しい照度情報を取得できないと, 知的照明システムの制御に問題が生じる. 実際よりも低い照度情報を取得してしまうことで, 目標照度が満たされていないと判断した知的照明システムによって, センサの付近にある照明が増光し, 必要以上の明るさを提供してしまう. また, 各照明の光度変化に関わらず, 照度が瞬時に変化してしまうことで, 影響度推定に誤差が生じ, どのセンサの付近にどの照明があるのかを正しく判別できなくなってしまう. この結果, 適切な制御を行うことが困難となる.

知的照明システムは, 現在の照度情報や消費電力情報に応じて制御を行うため, 前述のような障害が発生しても, 障害の原因を排除することができれば, 適切な制御に復帰できる. そこで, 障害の発生を検出する機構が必要となる. また, 想定されるハードウェアトラブルへの対応も知的照明システムの実用化に向けて必要となる.

4. 知的照明システムにおける障害検出

4.1 検出対象

本稿では、知的照明システムにおける障害として、照度センサに起因するトラブルと照明に起因するトラブルを検出対象とする。前者は障害が発生した照度センサ（以下、障害センサ）を、後者は障害が発生した照明（以下、障害照明）を特定することを目的とする。

照度センサに起因するトラブルの原因は以下の3点を想定する。

1. 照度センサが障害物の影響を受ける
2. 制御用 PC とのネットワークが断線する
3. 照度センサが故障する

上述の項目1から項目3に示した障害が発生すると、実際よりも低い照度情報を取得してしまう。その結果、照明が必要以上の明るさで点灯してしまうなど、執務に適切でない照度環境を提供してしまう。このため、障害センサを迅速に特定し、障害から回復する必要がある。

一方、照明に起因するトラブルの原因は以下の2点を想定する。

1. 制御用 PC とのネットワークが断線する
2. 照明が故障する

上述の項目1および項目2に示した障害が発生すると、知的照明システムの制御に関わらず、照明が一定の光度で点灯する。障害照明の制御が行えなくなることで、一時的に目標照度を満たすことが出来なくなる。ただし、障害照明以外の照明を制御することによって、再び目標照度を実現する。しかしながら、省エネルギーの観点において望ましい状況ではないため、障害照明を特定し、障害から回復する必要がある。

4.2 障害検出手法

前節で述べた障害を検出するために、オフィスの環境情報をシステムが把握する必要がある。第2章で述べたように、環境情報のうち知的照明システムが有する情報は、照明の光度情報、消費電力情報、および照度センサの照度情報である。そこで、これらの情報、

特に照明の光度情報と照度センサの照度情報を用いて障害検出を行う。

ある照明が強く点灯すると、ある照度センサの照度値が大きく増加するといったように、光度と照度には強い因果関係がある。光度と照度の関係は、式(3)で表される¹²⁾。

$$E = \frac{L}{2} \oint_{S_e} d\beta \cos \delta \quad (3)$$

$$L = \frac{I}{A \times \cos \delta}$$

E : 照度, L : 輝度, S_e : 光源面

$d\beta$: 光源面 S_e の境界線の微小部分が成す角度

δ : 光源と被照面との仰角

I : 光度, A : 光源面の面積

式(3)より、照度および光度は線形関係にあることがわかる。また、式(3)の各項は、輝度と光度を除き、光源の形状や光源との位置関係などに応じて変化する値である。そのため、これらが変化しない環境下においてはこれらの係数は定数とみなせ、式(3)は式(4)で表すことができる。以下、この定数を影響度係数 (Influence Factor) と呼ぶ。

$$E = R \times I \quad (4)$$

E : 照度, R : 影響度係数, I : 光度

式(4)に示すように、影響度係数 R を算出することで、光度および照度の関係を数値化することができる。すなわち、影響度係数 R により、照明が照度センサに及ぼす影響の強弱を数値化できるとともに、光度情報から現在の照度を予測することが可能である。以下、影響度係数 R の集合を照明環境のモデルと呼ぶ。

一方、前節で述べた障害が発生すると、照明と照度センサの因果関係に大きな変化が生じる。そこで、障害による影響を最小化した照明環境のモデルにより、実際の環境（光度情報および照度情報）を検定することで障害検出を行う。

5. 照明環境のモデル化

5.1 モデル化の概要

前章で述べたように、障害検出において、照明と照度センサの関係性を数値化した照明環境のモデルが必要となる。光度と照度の関係は式 (4) で表すことができるため、複数の照明および照度センサから構成される知的照明システムにおける照明環境のモデル式は式 (5) となる。

$$E_i = \sum_{j=1}^n (R_{ij} \times I_j) + D \quad (5)$$

i : 照度センサ ID, j : 照明 ID, n : 照明の数

R : 影響度係数, I : 光度, D : 外光による照度

式 (5) に示す影響度係数 R および外光による照度 D を算出することで、光度情報から照度情報を予測できる照明環境のモデルを導出する。

知的照明システムは、人間には感知できない範囲で照明の光度をランダムに増減させ、その結果得られる照度情報および消費電力情報に基づいて、解の受理判定を行う。この繰り返しにより、ユーザの要求を満たし、かつ消費電力量が最小となる最適解を導出する。すなわち、解の探索過程において、様々な光度変化が行われ、それに応じて照度が様々に変化する。そこで、知的照明システムによる光度遷移履歴および照度遷移履歴を基に、数値解析手法を用いて影響度係数 R および外光による照度 D を算出する。

5.2 カルマンフィルタによるモデル化

5.2.1 カルマンフィルタ

式 (5) を導出するための数値解析手法として、カルマンフィルタを用いる。

カルマンフィルタは、時々刻々と変化する線形システムの状態を推定するための数値解析手法である。カルマンフィルタは、観測値およびシステムの状態に雑音（ただし、正規分布に従う雑音）が含まれていても、雑音による影響を最小化した推定が可能である。このため、実環境においても安定した挙動が見込める。また、逐次推定方式であるため、すべてのデータではな

く、最新のデータのみで計算する。ゆえに、遷移履歴データの増加に伴う計算量の増加を抑制できる。

なお、ある照度センサにおける障害が、他の照度センサにおけるモデルに影響を及ぼさないように、照度センサごとに独立してカルマンフィルタを構成する。

5.2.2 外乱処理

照度センサが取得する照度情報には、知的照明システムが光度情報を有していない光源などが及ぼす影響、すなわち外乱が多い。外乱には、以下の5種類がある。

1. センサの雑音
2. 照明の雑音
3. 障害物の影響による誤った照度情報の取得
4. 徐々に生じる外光の変化
(太陽光)
5. 瞬時に生じる外光の変化
(タスク照明の点灯など)

上述の項目1および項目2の外乱は正規分布に従う外乱であるため、カルマンフィルタの特性として、カルマンフィルタの更新処理が進むにつれてその影響が最小化される。

一方、項目3の外乱は正規分布に従わないため、異常な観測値として棄却し、現在のモデルに及ぼす影響を最小化する必要がある。そこで、観測値の受理判定を行う。カルマンフィルタが有効であれば、観測予測誤差 ν は正規分布に従う。したがって、観測予測誤差 ν および誤差共分散 S からなる評価規範 ϵ を用いてカイ2乗検定を行う。評価規範 ϵ を式 (6) に示す。

$$\epsilon = \nu_k^T S_k^{-1} \nu_k \quad (6)$$

$$\nu_k = Z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}$$

ϵ : 評価規範, ν : 観測予測誤差, k : ステップ数

S : 誤差共分散, Z : 観測値, H : 観測モデル, \hat{x} : 状態変数

検定の結果、観測予測誤差 ν が有意な確率で生じるならば、観測値を受理し、カルマンフィルタを更新する。そうでなければ、観測値を棄却し、カルマンフィルタを更新しない。これにより、項目3の外乱がモデルに及ぼす影響を最小化する。

項目 4 および項目 5 の外乱は照明環境の変化としてモデルの修正が必要である。まず、項目 4 の外乱は徐々に微小な外光変化が生じるため、カルマンフィルタの更新処理が長期間にわたって行われることでほぼ対応できる。ただし、より照明環境を模したモデルを導出するためには、太陽光による外乱の時間的な変化をカルマンフィルタの状態方程式に取り入れる必要がある。具体的には、外光変化の近似曲線の微分値を状態方程式に加算する。このため、あらかじめ太陽光による影響を測定する予備実験が必要である。

一方、項目 5 の外乱は瞬時に離散的な外光変化が生じるため、カルマンフィルタの更新処理のみでモデルを補正することは困難である。特に、項目 3 の外乱との違いは、外乱の影響が短期間ではなく中長期間にわたって続くか否かだけであり、外乱発生時にそれを判断することも困難である。そのため、項目 5 の外乱は項目 3 の外乱と同様に棄却処理され、モデルに与える影響が最小化され、モデルの補正に多くのデータが必要となる。そこで、環境の変化が生じた時点から新たなカルマンフィルタを構成し、一定時間後に従来のフィルタとの比較を行う手法を提案する。

5.3 カルマンフィルタの生成と選択

前節の項目 5 の外乱による影響によってモデルを補正するため、環境変化に応じてカルマンフィルタを複数構成し、より環境に適したフィルタを選択する。

まず、知的照明システム稼働時にカルマンフィルタを構成する（以下、主フィルタと呼ぶ）。主フィルタを更新するとともに、式 (6) に基づいて観測値の受理判定を行う。この結果、異常な観測値が検出された場合、項目 5 の外乱が発生したと仮定し、その時点から主フィルタとは独立した、新たなカルマンフィルタを構成（以下、主候補フィルタと呼ぶ）し、主フィルタと同様に更新する。一定時間後に主フィルタと主候補フィルタの比較を行い、式 (7) に示す評価規範 E がより小さいフィルタを新たな主フィルタとする。

$$\begin{aligned} E &= \nu_k^T \nu_k \\ \nu_k &= Z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1} \end{aligned} \quad (7)$$

E : 評価規範, ν : 観測予測誤差, k : ステップ数

Z : 観測値, H : 観測モデル, \hat{x} : 状態変数

以上の処理により、一定時間後に再び元の環境に戻るような短期間の影響（項目 3 の外乱）に対してはもとの主フィルタがそのまま更新され、一定時間後も環境が変化したままとなる中長期間の影響（項目 5 の外乱）に対しては外乱の影響を大きく考慮した主候補フィルタが新たな主フィルタとなる。すなわち、比較評価までの時間の大小によって、棄却される外乱と反映される外乱が決定する。

以上の処理によって選択されたカルマンフィルタが導出する状態変数を照明環境のモデルとする。

6. 環境モデルに基づく障害検出

前章の処理により導出した照明環境のモデルを用いて障害検出を行う手法について述べる。

6.1 照度センサに起因する障害

照度センサに起因するトラブルが発生した場合、障害センサにおいて、実際よりも低い、または 0 [lx] の照度情報が取得される。そこで、導出したモデルによって各照明の光度から現在の照度を予測し、取得した照度情報と比較する。比較した結果、予測照度よりも一定の閾値以上下回る照度情報を取得した照度センサを、障害センサとする。ただし、人影の影響などがエラー検出されないように、一定時間にわたってエラーが発生した照度センサのみをエラーとして通知する。

6.2 照明に起因する障害

照明に起因するトラブルが発生した場合、知的照明システムが出力する光度情報と照明の光度が一致しなくなる。その結果、システムにおける障害照明の光度情報と照度情報の因果関係がなくなる、そのため、モデル式における障害照明の影響度係数は 0 に近づく。そこで、モデル式における影響度係数を検証し、影響度係数が一定の閾値以上変化した照明を障害照明としてエラー通知を行う。

7. 提案手法の検証

シミュレーションを用いて提案手法の検証を行う。導出したモデル式が適切であるか、また種々のシステム障害を検出できるかの2点に関して検証した。

7.1 実験環境

シミュレーションのモデルは、三菱地所株式会社エコツェリア（東京都千代田区新丸ビル）導入システムとした。エコツェリアでは、10.1[m] × 7.2[m]のフロアに13名のオフィスワーカーが執務を行っている。オフィスワーカーにはそれぞれ固定の座席が与えられており、机上面における照度を計測するための照度センサを1台ずつ設置する。また光源として照明器具が24台設置されている。照明器具および照度センサの配置をFig 2に示す。なお、Fig 2内の数字はそれぞれ、照明識別用のIDナンバーおよび照度センサ識別用のIDナンバーである。

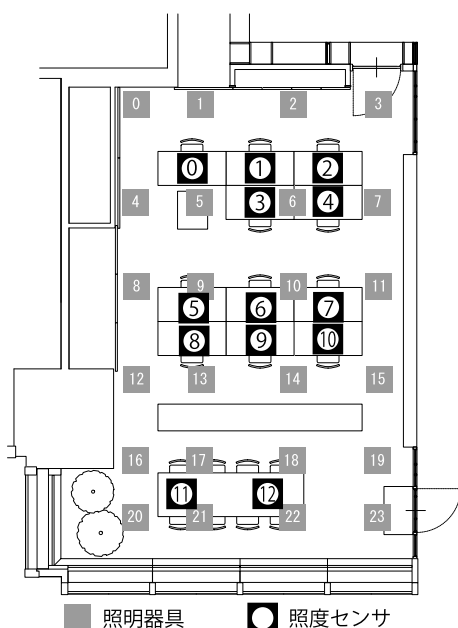


Fig. 2. シミュレーション環境 (エコツェリア平面図).

シミュレーションにおける照度計算は、各照明の光度から、第4章で述べた逐点法を基に算出する。なお、照度センサの観測雑音をシミュレートするために、平均値0 [lx]、分散5の正規分布の乱数を、観測雑音として照度情報に加算する。

また、照度センサに Table 1 に示す目標照度を設定した。

Table 1. 目標設定.

照度センサ ID	目標照度 [lx]
0, 1, 2, 3, 4	400
5, 6, 7, 8, 9, 10	600
11, 12	800

さらに、主フィルタと主候補フィルタの比較までの時間は300ステップ（約5分）とした。すなわち、300ステップ未満の外乱による影響は障害として（3の外乱）棄却され、300ステップ以上の外乱による影響は環境の変化（5の外乱）として反映される。

7.2 影響度係数の検証

提案手法によって導出したモデル式が適切であるかを検証する。検証にあたり、知的照明システムを一定時間稼働させ、各照明の影響度係数、および外光値の遷移状況を検証する。また、導出したモデル式を用いた予測照度と実際の照度との比較を行う。

7.2.1 実験パターン1：外光なし

照度センサに外光による影響がない場合の検証を行う。検証にあたり、3000ステップ（約50分）の間、知的照明システムを稼働させたシミュレーションを行った。

Fig 2の室内中央部に位置する照度センサ6と、照明1、照明8および照明10との影響度係数をFig 3に示す。縦軸は影響度係数 [lx/cd]、横軸は時間 [秒] を表す。なお、Fig 2に示すように、照度センサ6と照明10は近く、照明8はやや近く、照明1は遠い位置関係にある。Fig 3に示すように、照度センサと遠い照明1は影響度係数が安定するまでに1000ステップ程度要しているが、照度センサと近い照明8および照明10は100ステップ程度で安定している。また、照明10の影響度係数は高く、照明8の影響度係数はそれに次ぎ、照明1は低くなっている。

また、シミュレーション終了時（3000ステップ時）における各照明の影響度係数をFig 4に示す。縦軸は

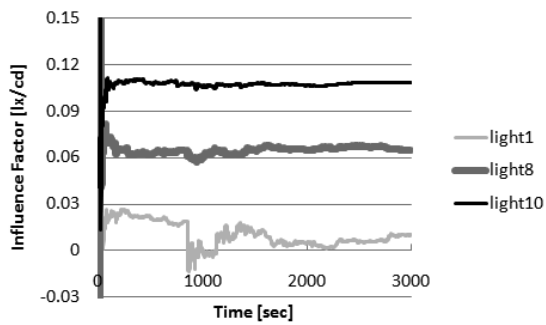


Fig. 3. 実験パターン 1 における照明の影響度係数履歴。

影響度係数 [lx/cd], 横軸は照明 ID を表す。Fig 4 に示

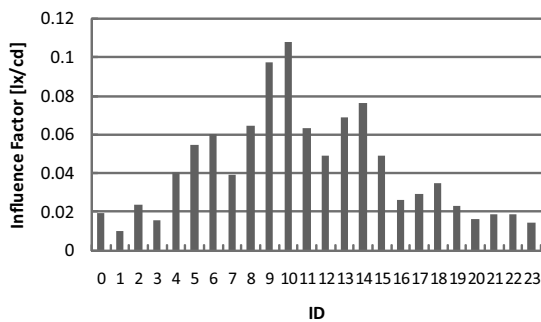


Fig. 4. 実験パターン 1 における照明の影響度係数比較。

すように、照明 9 および 10 の影響度係数が高く、照明 8, 10, 13 および 14 が次いで高くなっている。Fig 2 から、照度センサ 6 と、照明 9 および 10 が最も近く、照明 8, 10, 13 および 14 は次いで近くなっている。以上のことから、一定ステップ後に影響度係数が安定し、かつ照明との位置関係に応じて値が変化していることがわかる。

外光の影響度係数を Fig 5 に示す。なお、外光の影響度係数は式 (4) に示すように係数を 1 としたため、外光が及ぼす照度値と一致する。縦軸は照度値 [lx], 横軸は時間 [秒] を表す。Fig 5 から、200 ステップ程度で影響度係数が安定している事が確認できる。また、影響度係数は 0 [lx] で安定していることから、外光による影響がないことを判断できていることがわかる。

モデル式に基づく予測照度と実際の照度との比較を行う。Fig 6 に、照度センサ 6 におけるモデル式に基

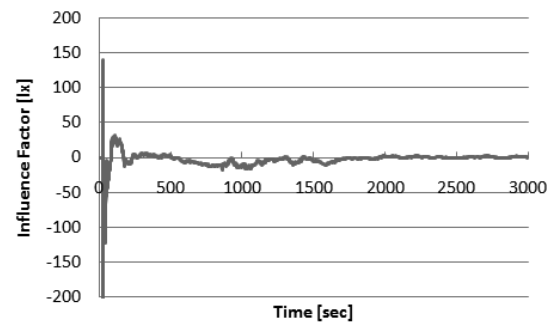


Fig. 5. 実験パターン 1 における外光値の履歴。

づく予測照度と実際の照度の遷移を示す。縦軸は照度値 [lx], 横軸は時間 [秒] を表す。Fig 6 に示すように、

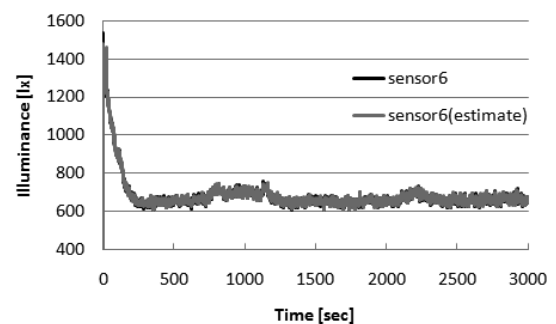


Fig. 6. 予測照度および実測照度の遷移。

予測照度と実測照度がほぼ一致していることが確認できる。

以上の結果から、外光がない場合において適切なモデル式が導出できていることがわかる。

7.2.2 実験パターン 2 : 外光変化あり

外光が変化する場合の検証を行う。検証にあたり、外光による影響は 1000 ステップまでが 0 [lx], 1000 ステップ以降を 500 [lx] とし、3000 ステップ (約 50 分) の間、知的照明システムを稼働させたシミュレーションを行った。

前節と同様に、照度センサ 6 と、照明 1, 照明 8 および照明 10 との影響度係数を Fig 7 に示す。縦軸は影響度係数 [lx/cd], 横軸は時間 [秒] を表す。なお、Fig 2 に示すように、照度センサ 6 と照明 10 は近く、照明 8 はやや近く、照明 1 は遠い位置関係にある。Fig 7 に示すように、どの影響度係数も 100 ステップ程度で安定しているが、1300 ステップにおいて一旦不安定に

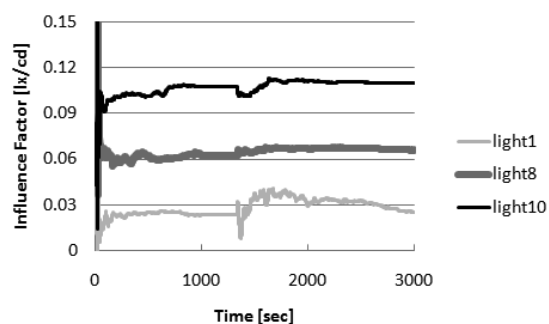


Fig. 7. 実験パターン 2 における照明の影響度係数履歴.

なっている．これは，1000 ステップ時の外光変化に応じて主候補フィルタが構成され，300 ステップ後の1300 ステップ時に主フィルタと主候補フィルタの切り替えが行われたためと考えられる．また，1300 ステップ以降，影響度係数はほぼ安定しており，正常にフィルタの切り替えが行われたことが確認できる．

また，シミュレーション終了時（3000 ステップ時）における各照明の影響度係数を Fig 8 に示す．縦軸は影響度係数 [lx/cd]，横軸は照明 ID を表す．Fig 8 に

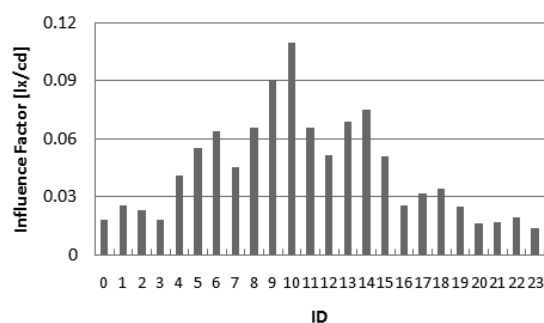


Fig. 8. 実験パターン 2 における照明の影響度係数比較.

示すように，各照明の影響度係数は Fig 4 に示した実験パターン 1 とほぼ一致する．このことから，外光の変化に対しても照明の影響度係数は大きな影響を受けず，正しい値を維持できることが確認できる．

外光の影響度係数を Fig 9 に示す．なお，外光の影響度係数は式 (4) に示すように係数を 1 としたため，外光が及ぼす照度値と一致する．縦軸は照度値 [lx]，横軸は時間 [秒] を表す．Fig 9 から，1300 ステップ以

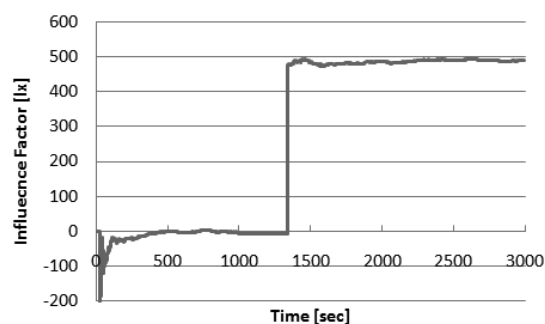


Fig. 9. 実験パターン 2 における外光値の履歴.

前は 0 [lx] 程度，1300 ステップ以降は 500[lx] 程度を外光による影響として導出している．前者は 1000 ステップ以前の外光の設定値と，後者は 1000 ステップ以降の外光の設定値とほぼ一致していることから，外光の変化に応じて適切にモデル式が補正されていることが確認できる．

モデル式に基づく予測照度と実際の照度との比較を行う．Fig 10 に，照度センサ 6 におけるモデル式に基づく予測照度と実際の照度の遷移を示す．縦軸は照度値 [lx]，横軸は時間 [秒] を表す．Fig 10 に示すように，

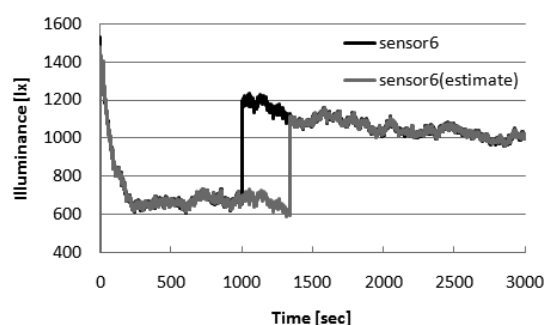


Fig. 10. 予測照度および実測照度の遷移.

実測値は 1000 ステップで外光の変化によって 500 [lx] 程度上昇している．一方，予測値は 1000 ステップ以前および 1300 ステップ以降は実測値とほぼ一致しており，1000 ステップから 1300 ステップまでは外光の変化分だけ誤差が生じている．このことから，外光の変化に応じて，モデル式の補正を行っていることが確認できる．

以上の結果から，外光が変化する場合においても適切なモデル式が導出できていることがわかる．

7.3 障害検出の検証

提案手法によって、障害検出が行えるかを検証する。

7.3.1 センサ障害検出

センサ障害を模擬するため、1000 ステップから 1200 ステップの間、照度センサの照度値を 70% 低減する。Fig 11 に、影響度係数に基づく予測照度と実際の照度の遷移を示す。縦軸は照度値 [lx]、横軸は時間 [秒] を表す。Fig 11 に示すように、1000 ステップから 1200

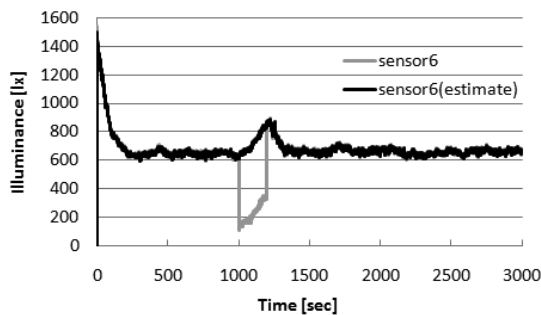


Fig. 11. 予測照度および実測照度の遷移。

ステップにかけて実測値が大きく減少している。しかしながら、予測照度はその影響を受けず、実測値とに大きな差がある。また、センサ異常から回復した 1200 ステップ以降は予測値と実測値が一致している。

また、シミュレーション終了時 (3000 ステップ時) における各照明の影響度係数を Fig 12 に示す。縦軸は影響度係数 [lx/cd]、横軸は照明 ID を表す。Fig 12

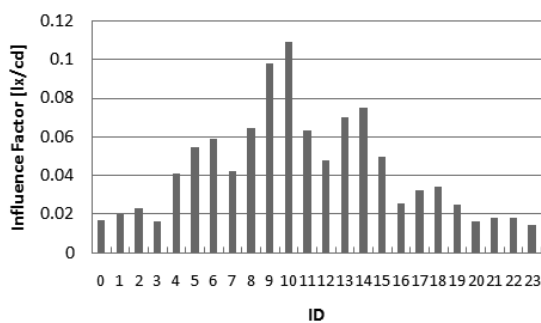


Fig. 12. センサ障害検出における照明の影響度係数比較。

に示すように、各照明の影響度係数は Fig 4 に示した実験パターン 1 とほぼ一致する。このことから、センサ障害に対しても照明の影響度係数は大きな影響を受

けず、正しい値を維持できることが確認できる。

外光の影響度係数を Fig 13 に示す。なお、外光の影響度係数は式 (4) に示すように係数を 1 としたため、外光が及ぼす照度値と一致する。縦軸は照度値 [lx]、横軸は時間 [秒] を表す。Fig 13 から、センサ障害に関

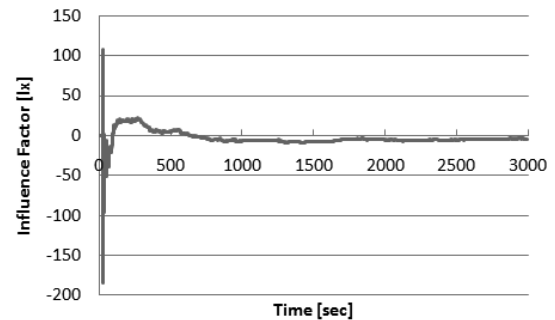


Fig. 13. センサ障害検出における外光値の履歴。

わらず 0 [lx] 程度を外光による影響として導出している。このことから、センサ障害を外光変化による影響と誤認識していないことが確認できる。

以上のことから、センサ障害に対してモデル式が大きな影響を及ぼされず、予測値と実測値の差分をチェックすることでセンサ障害を検出できることがわかる。

7.3.2 照明障害検出

照明障害を模擬するため、1000 ステップ以降、照明 9 の光度値を照明の最大点灯光度である 1500 [cd] で固定した。

照明障害発生時 (1000 ステップ時) およびシミュレーション終了時 (3000 ステップ時) における各照明の影響度係数を Fig 14 に示す。縦軸は影響度係数 [lx/cd]、横軸は照明 ID を表す。Fig 14 に示すように、照明 9 以外の照明の影響度係数はどちらも大きな差異はないが、照明 9 は大きく減少している事がわかる。

照明 9 の影響度係数の遷移を Fig 11 に示す。縦軸は照度値 [lx]、横軸は時間 [秒] を表す。Fig 15 に示すように、1300 ステップまでは影響度係数が 0.1 程度で安定していたが、1300 ステップ以降はほぼ 0 になっていることがわかる。これは 1000 ステップ以降に照明 9 の光度値を照明の最大点灯光度である 1500 [cd] で固定したことに起因すると考えられ、照明異常に応じてモデル式が補正されていることが確認できる。この

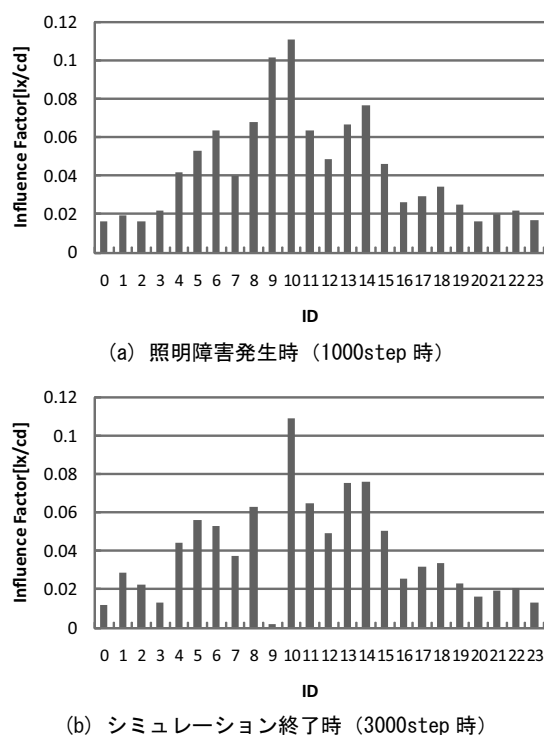


Fig. 14. センサ障害検出における照明の影響度係数比較.

ことから、影響度係数の変化を検証することで照明障害を検出できることがわかる。

8. まとめ

本稿では、知的照明システムにおける種々の障害発生をソフトウェアが検出する手法について述べた。そして、シミュレーションによる検証実験の結果、環境の変化に応じて適切なモデルを導出できることを確認するとともに、モデルに基づいて障害発生を検出できることを確認した。これにより、障害発生に対して迅

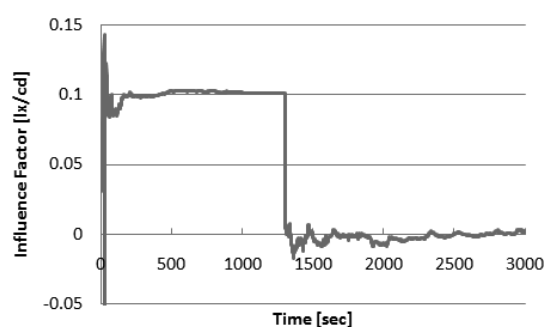


Fig. 15. 照明0の影響度係数遷移.

速に対応することが可能となり、知的照明システムの信頼性を向上させることが出来た。

今後は、実環境における知的照明システムに本手法を組み込み、実環境における実証実験を行うことが肝要であると考えられる。

参考文献

- 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
- 3) 鶴岡伸一, 田中和穂, 川並尚, 長崎文彦, 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講演論文集 Vol.15th pp.37-38,1997
- 4) 太田正明, 森本康司, オフィスにおける照明設備の省エネ制御, 東芝レビュー, Vol.59, No.10, pp.22-26, 2004
- 5) 大林史明, 富田和宏, 服部瑤子, 河内美佐, 下田宏, 石井裕剛, 寺野真明, 吉川榮和, オフィスワークのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究 - 照明制御法の開発と実験的評価, ヒューマンインターフェースシンポジウム 2006, Vol.1, No.1322, pp.151-156, 2006
- 6) 西原直枝, 田辺新一, 中程度の高湿環境下における知的生産性に関する被験者実験, 日本建築学会環境系論文集 No.568, pp.33-39, 2003
- 7) Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, S. Noel Simpson, Individual Lighting Control: Task Performance, Mood and Illuminance JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, 2000
- 8) 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
- 9) M.Miki, T.Hiroyasu, K.Imazato, Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness, Proc IEEE CIS, pp.520-525, 2004
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 社団法人 照明学会, 照明ハンドブック, オーム社, 2003