

知的照明システムにおけるカルマンフィルタの多重化を用いた障害検出手法

加來 史也

1 はじめに

近年、オフィスの環境改善に関する研究が広く行われており、オフィス環境の改善によって、オフィスワークの知的生産性が向上すると報告されている¹⁾。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を個人ごとに提供することが有効であると報告されている²⁾。このような背景から、著者らは知的照明システムを提案している³⁾。知的照明システムは、照度センサおよび電力センサからの環境情報に基づき、最適手法により各照明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、システムの実用化に向け、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。

実証実験の過程において、執務に必要な書類などの障害物によって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しばしば報告された。知的照明システムは、照度センサが取得する照度情報を用いて制御を行うため、照度情報を正しく取得できない状況下においては、適切な制御を行うことが困難である。そこで、このような障害を迅速に検出する機構が必要となる。本稿では、知的照明システムにおける障害をソフトウェアにより検出する手法を提案する。

2 実環境における知的照明システムの障害

知的照明システムは、実験室における検証実験によって、システムの有効性を実証した³⁾。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。実証実験の過程において、ユーザの要求を満たすまでに時間を要する、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。この中でも、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、机には執務に必要な書類などがある場合が多く、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、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、正常な制御を行えるようになる。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。

3 知的照明システムにおける障害検出

3.1 検出対象

本稿では、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。障害検出に当たって、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は以下を想定する。

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

(1)~(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、執務に最適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は以下を想定する。

1. 制御用 PC・照明間のネットワークが断線する
2. 照明が故障する

(1) および (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の回復が必要である。

3.2 検出手法

知的照明システムは、各照度センサにおける照度情報および電力センサにおける電力情報を入力とし、各照明の光度を出力する制御系である。この中で、照度と光度

は式 (1) に示す関係にある。

$$E = \frac{L}{2} \oint_{S_e} d\beta \cos \delta \quad (1)$$

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

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 (1) より, 照度および光度は線形関係にあることが確認できる。また, 式 (1) の各係数は, 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, 光度と照度の関係は式 (2) で表すことができる。以下, この定数を影響度係数と呼ぶ。

$$E = R \times I \quad (2)$$

E : 照度, R : 影響度係数, I : 光度

したがって, 影響度係数 R を算出することで, 光度と照度の関係を数値化することができる。そして, この影響度係数 R に基づき, 知的照明システムの入出力情報を検定することで, 障害検出を行う。

4 照明環境のモデル化

4.1 モデル化の概要

前章で述べたように, 知的照明システムの入出力情報を検定することで, 障害を検出する。すなわち, 知的照明システムの入出力情報である光度から, 入力情報である照度を予測・比較し, 障害検出を行う。そこで, 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。光度と照度の関係は式 (2) で表すことができるため, 知的照明システムにおける照明環境のモデル式は式 (3) となる。

$$E_i = \sum_{j=1}^n (R_{ij} \times I_j) + D \times 1 \quad (3)$$

i : 照度センサ ID, j : 照明器具 ID, n : 照明器具の数

R : 影響度係数, I : 光度, D : 外光による照度

式 (3) における影響度係数 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各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から目的関数を算出する。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, 数値解析手法によって影響度係数 R および外光による照度 D を算出する。

4.2 カルマンフィルタの多重化によるモデル化

4.2.1 カルマンフィルタ

式 (3) のモデル式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, 誤差のある観測値を用いて, 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。また, 観測予測誤差に基づき, フィルタの有効性を評価することが出来るため, 障害として検出するほどではない短期の異常な観測値 (人影の影響など) に対して柔軟に対応可能である。

各照度センサが取得する照度情報は, 太陽光, 知的照明システム以外の照明, および人影の影響などといった外乱が多い。外乱は主に以下の 4 種類に分類できる。

1. センサの観測雑音
2. 人影の影響など短期間の外乱
3. 障害物の影響による誤った照度情報の取得
4. タスク照明など中長期間にわたる外乱

(1)~(3) の外乱は, 現在のモデル式に影響を与えないように異常な観測値として棄却する必要がある。そこで, 観測値および観測モデルの更新ごとに, 観測予測誤差に基づいて観測値の有効性を評価する処理を行う。この処理によって異常な観測値を棄却することで, これらの外乱による影響を最小化する。

一方, (4) の外乱は, 環境の変化としてモデル式の補正が必要である。しかしながら, 異常な観測値を棄却する処理を行っているため, (4) の外乱も異常な観測値として棄却され, モデル式に影響を与えない。そこで, カルマンフィルタを時系列的に多重化し, 現在の環境に応じたカルマンフィルタを選択する手法を提案する。

4.2.2 カルマンフィルタの多重化

カルマンフィルタの多重化の概念を図 1 に示す。

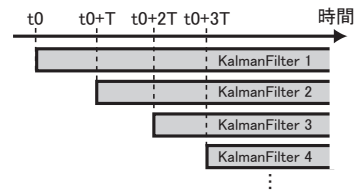


Fig.1 カルマンフィルタの多重化の概念

図 1 に示すように, 更新処理の起点が異なるカルマンフィルタを一定時間ごとに構成する。カルマンフィルタごとにモデル式を導出できるため, 時間 t において複数のモデル式をもつ。(4) の外乱が発生した場合, 外乱発生以後を更新処理の起点とするカルマンフィルタは, 外乱の影響を考慮したモデル式を導出できる。したがって, モデル式を適切に選択することで, (1)~(3) の外乱による影響を棄却しつつ, (4) の外乱による影響を加味したモデル式を導出する。なお, 更新処理を一定回数行ったカ

ルマンフィルタは破棄し、時間の経過に伴うカルマンマンフィルタの増加を抑える。

4.2.3 モデル式の選択

モデル式を導出するカルマンフィルタの選択基準は以下の通りである。

1. 同程度の状態変数を多くのカルマンフィルタが導出する
2. カルマンフィルタの母集団が多い

条件 (1) を満たすカルマンフィルタを選択するためにウォード法によるクラスタ分析を行う。クラスタ分析により、各カルマンフィルタを一定数のクラスタに分類し、最も要素数が多いクラスタを最適なクラスタとして選択する。なお、カルマンフィルタ間の類似度には、マハラノビス距離を用いる。マハラノビス距離を式 (4) に示す。

$$D_{ij} = \sqrt{(\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j)^T \left(\frac{\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_j}{2} \right) (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j)} \quad (4)$$

D : マハラノビス距離

\mathbf{X} : 状態変数, \mathbf{P} : 推定誤差共分散

式 (4) に示すように、状態変数 \mathbf{X} の差だけでなく、推定誤差共分散 \mathbf{P} も含めて類似度を算出する。推定誤差共分散 \mathbf{P} を類似度指標に用いることで、推定誤差共分散 \mathbf{P} が高い、すなわち状態変数 \mathbf{X} の信頼性が低いカルマンフィルタを選択しない。

最も要素数の多いクラスタを選択したのち、条件 (2) に基づき、クラスタを構成する要素のうち最も母集団が多いカルマンフィルタを、最適なカルマンフィルタとして選択する。

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モデル式を用いて、入出力情報を検定する。

5 環境モデルに基づくシステム障害検出

5.1 照度センサに起因するシステム障害

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、導出したモデル式によって各照明の光度から照度を予測し、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。

5.2 照明に起因するシステム障害

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。ただし、環境の変化による影響度係数の変化と誤

認しないように複数の照度センサにおける影響度係数が同じ挙動をした照明のみをエラーとして通知する。

6 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 点から検証した。

6.1 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 名のオフィスワークが執務を行っている。オフィスワーク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図 2 に示す。なお、図 2 内の数字はそれぞれ、照明器具識別用の 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。

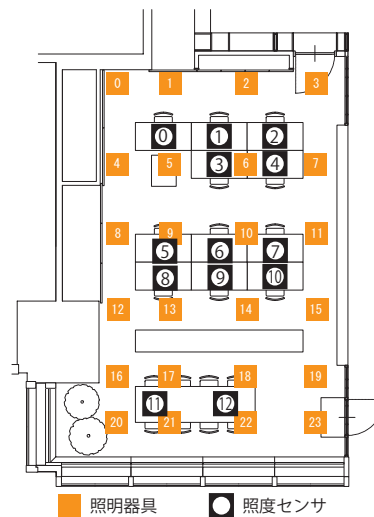


Fig.2 シミュレーション環境

シミュレーションにおける照度計算は、各照明の光度から逐点法を基に算出する。なお、照度センサにおける観測雑音を模擬するために、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。

6.2 影響度係数の検証

提案手法によって導出したモデル式における各係数が、適切であるかを検証する。検証に当たり、知的照明システムを一定時間稼働させ、照度センサに近い照明、遠い照明の影響度係数、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。

外光が変化する場合の検証を行う。検証に当たり、外光による影響は 500step までが 0[lx]、500step 以降を 300[lx] とし、照度センサ 0 における目標照度を 800 [lx] とした場合、4000step (8000 秒) の間、知的照明システムを稼働させる。

照度センサ 0 と照明 1 および照明 12 の影響度係数を図 3 に示す。前述のように、照度センサ 0 と照明 1 は近く、照度センサ 1 と照明 12 は遠い位置関係にある。縦軸は影響度係数、横軸はステップ数を表す。

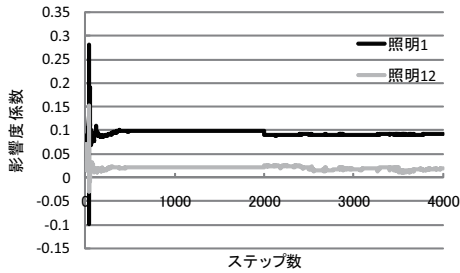


Fig.3 照明の影響度係数履歴

図 3 から、400 ステップ程度で影響度係数が安定していることが確認できる。また、照度センサ 0 と近い照明 1 の影響度係数は高く、照度センサ 0 と遠い照明 12 の影響度係数は低くなっていることが確認できる。以上のことから、照明との位置関係に応じて、影響度係数の値が変化していることがわかる。なお、図 3 に示すように 500step から 2000step の間は影響度係数が同じ値を示している。これは、500step において外光が変化したことで、異常値として観測値の棄却が行われ、カルマンフィルタが更新されていないためである。外光値の遷移を図 4 に示す。縦軸は照度値 [lx]、横軸はステップ数を表す。

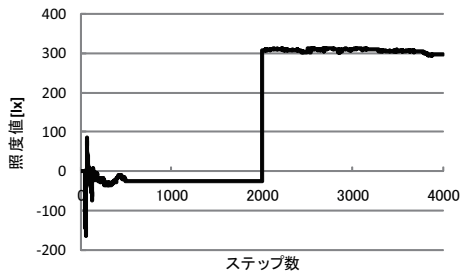


Fig.4 外光値の履歴

図 4 に示すように、2000step 以前は 0[lx] 程度、2000step 以降は 300[lx] 程度を外光による影響として導出している。前者は 500step 以前の外光の設定値と、後者は 500step 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。

6.3 障害検出の検証

6.3.1 センサ障害検出

センサ障害を模擬するため、500step から 800step の間、照度センサの照度値を 70% 低減する。図 5 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]、横軸はステップ数を表す。

図 5 に示すように、500step から 800step 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 800step 以降は予測値と実測値が一致している。以上のことから、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。

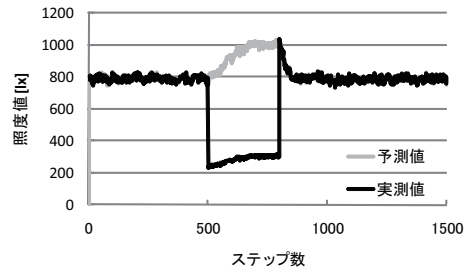


Fig.5 予測照度および実測照度の遷移

6.3.2 照明障害検出

照明障害を模擬するため、500step 以降、照明 0 の光度値を 1400[cd] で固定した。図 5 に、照明 0 の影響度係数の遷移を示す。縦軸は照度値 [lx]、横軸はステップ数を表す。図 6 に示すように、影響度係数が段階的に減少し、

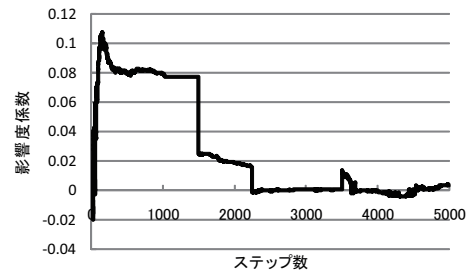


Fig.6 照明 0 の影響度係数遷移

2200step 以降はほぼ 0 に近い値を出力している。このことから、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。

7 まとめ

本稿では、知的照明システムにおける種々のシステム障害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式を導出できることを確認するとともに、モデル式に基づいてシステム障害を検出できることを確認した。

提案手法では、照明数やセンサ数が増大するに従って計算量が膨大となる問題があるため、今後は計算量の増加を抑える工夫を検証するとともに、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) 橋本 哲ら：室内環境の改善によるプロダクティビティ向上に関する調査研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.93, pp.67-76, 2004
- 2) Peter R.Boyce ら：Individual lighting control: Task performance, Mood, and Illuminance, JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, 2000
- 3) 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