

# Development of Intelligent Lighting System Based on Distributed Optimization by Resource Addition and Reduction Method

Mitsunori MIKI\* Tomoyuki HIROYASU\* and Rintaro NAGANO\*\*

(Received October 30, 2004)

In this paper, an intelligent lighting system which contributes to energy saving is developed. This system is capable of autonomous distributed control based on an optimization algorithm. In cooperation with illuminometers which can move freely, this system can provide optimum illumination for required places only. The prototype system consisting of incandescent lamps, an electric power control device, a computer, and illuminometers is developed, and the validity of the system is verified through this prototype. The optimization algorithm for controlling the lamps of luminous intensity used the Distributed Optimization by Resource Addition and Reduction (DORAR) method. In the environment where there are illuminometers with illumination constraints, and where the illuminometers move, and some lights are failed, this lighting system is confirmed to be effective for comfortable lighting and energy saving.

**Key words** : Lighting System, Autonomous Distributed Control, Intellectualization, Parallel Optimization

キーワード : 照明システム, 自律分散制御, 知的化, 並列最適化

## 資源追加削減法に基づく知的照明システムの構築

三木光範・廣安知之・長野林太郎

### 1. はじめに

近年, 周囲の環境に応じて自律的に動作を決定することにより, 人間の操作性の向上や省エネルギーを実現する知的なシステムに対する要求が高まっている<sup>1)</sup>. 特に知的化により省エネルギーを実現するシステムはコストの削減や環境問題の観点から注目されており, 現在までに省エネルギーを目的とする様々な照明システムが開発されている. 具体的には, スイッチや人感センサの情報を組み合わせて最も効果的な点灯パターンを実現するシステム<sup>2)</sup>や, 照度センサを利用して自然光の採光量を検出し, 不必要な照明を自動的にコントロールするシステム<sup>3)</sup>などが挙げられる.

しかしながら, これらのシステムですべての問題が解決しているとは言えない. 依然として残される問題として, 照明や制御装置の障害に対してシステムが柔軟な動作を行えない点, システムを稼働させる際に多くの設定を行う必要がある点などが存在し, これらの問題を解決することで, より高度な照明システムが実現できると考えられる.

このような問題を解決する方法として, システム全体を集中管理するのではなく, 自律分散制御<sup>4)</sup>の概念を適用して照明制御する方法が提案されている. これは, 各照明に知的性質を付与しておのおのの照明が独立に制御を行うものであり, 障害に対して柔軟な対応を行うなど従来の問題点を解決するシステムと考え

\* Department of Knowledge Engineering and Computer Sciences, Doshisha University, Kyoto  
Telephone:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6930, E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp, tomo@is.doshisha.ac.jp

\*\* Graduate Student, Department of Knowledge Engineering and Computer Sciences, Doshisha University, Kyoto  
Telephone:+81-774-65-6716, Fax:+81-774-65-6716, E-mail:nrintaro@mikilab.doshisha.ac.jp

られている<sup>5)</sup>。このような知的な照明システムの制御アルゴリズムとして、強化学習<sup>6)</sup>や最適化手法が検討されており、これらの手法を用いることによりどのような環境においても、また照度計の移動や照明の故障などの環境の変化にも柔軟に対応するシステムを実現できることが確認されている。

本研究ではこのような知的照明システムの実験機を実際に構築し、その有効性を検証する。制御アルゴリズムとしては自律分散制御に適した並列最適化手法である資源追加削減法<sup>7)</sup>(以下、DORAR法)を用いる。そして、市販の白熱電灯、照度計、およびコンピュータを接続して構築した実験機にDORAR法を実装して適切な動作を行うかの検討を行う。

## 2. 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの概要

近年の照明システムには、人間の操作性の向上や省エネルギーやを目的として様々なものが開発されている。前者の代表例としては、高度なインターフェイスを用いて複雑な照明操作を容易に実現するシステム<sup>8)</sup>が存在し、後者の例としては自然採光の量を照度センサで検知し不必要な照明を自動的に減光するシステム<sup>3)</sup>などが挙げられる。

しかしながら、省エネルギーを目的とした自動制御については、複数の場所に異なる照度を実現するような制御が難しい点、照明の故障や照度の設定変更などの環境変化への対応ができていない点、照明の自動制御のために特別な制御機器を用意する必要があり、施工の際に照明の初期設定を行う必要がある点などが問題点として挙げられる。また、複雑な制御を行うシステムの場合は操作が煩雑化し、ユーザビリティが低下する可能性がある。本研究で構築を行う知的照明システムでは、これらの問題点を解決する様々な工夫を行っている。

構築を行う知的照明システムでは、各照明と複数の移動可能な照度センサがネットワークで接続され、各照明が照度センサに与えられた制約照度を満足するように動作を行う。すなわち、ユーザは照度を必要とする場所に照度センサを配置して制約照度を設定するだけで、Fig. 1のように各照明が学習によって自律的に点灯光度を判断し適切な点灯パターンを行う。そのため、ユーザは照明の位置や配線を意識することなく照明を操作でき、スイッチによる煩雑な照明操作を行う必要がない。また、各照明が制約照度を満足するため

の必要最低限の点灯のみを行うため、不必要な照明が点灯することなく省エネルギーに貢献するという特長も持っている。その他にも、常に環境の状態を把握することにより、照度計の移動や照明の故障などの状況に対しても柔軟な対応を行うことができる。具体的には、Fig. 2のように照度計が移動した際にそれに対応して自動的に点灯する照明が変更したり、照明の故障の際には周囲の照明が自動的に点灯光度を上げたりすることが可能である。

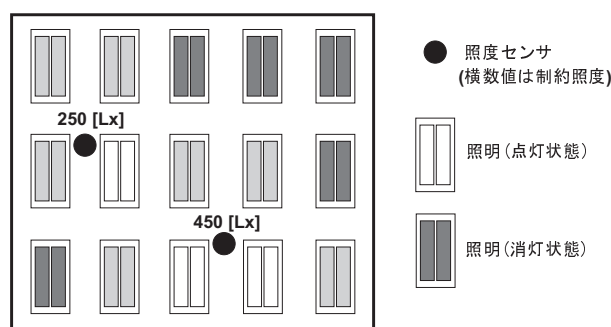


Fig. 1. Automatic illumination control by an intelligent lighting system.

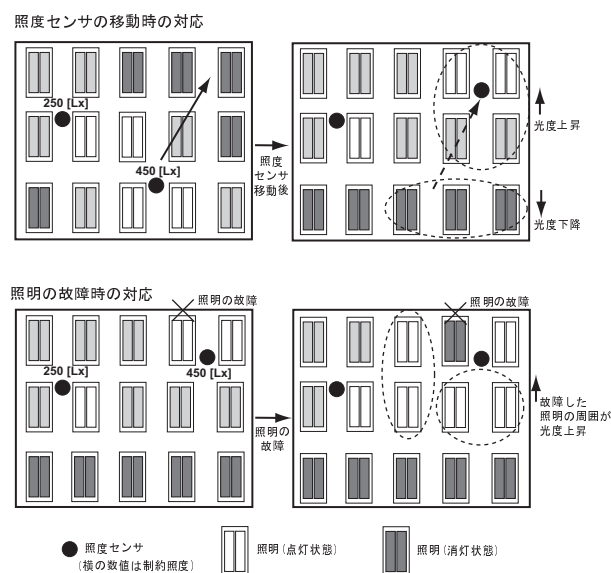


Fig. 2. When the illuminometers move, or the lights are failed, the lights change luminous intensity automatically.

## 2.2 知的照明システムの制御

知的照明システムの制御方法としては、従来の全体を統括する機器による集中制御ではなく、自律分散制御を採用する。すなわち、Fig. 3のように環境の学習および光度の判断を行う学習ユニットを各照明に対して設け、ネットワークを流れる照度センサの情報を基にそれぞれの照明が互いに独立に照明制御を行い、与えられた目的を満たすように動作する。

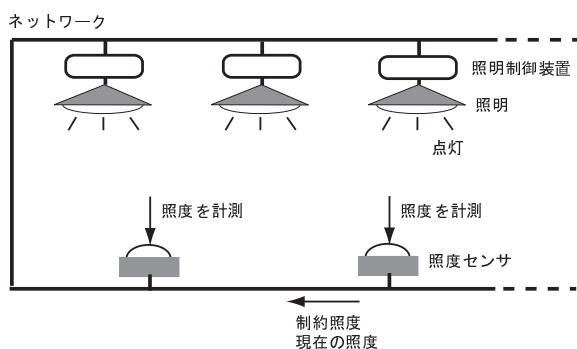


Fig. 3. Schematic of intelligent lighting system.

具体的には自律分散制御による知的照明システムの制御の流れは以下のようになる。

1. 各照度センサが照度を読み取る。
2. 各照度センサは、現在の照度と設定された制約照度をネットワークに流す。
3. 各学習ユニットはネットワークに流れた各センサの現在照度と制約照度から次の照明の点灯光度を決定し、照明に伝える。
4. 各照明はおおのこの学習ユニットの判断にしたがって点灯光度を変更する。
5. 1~ 4の動作を繰り返し行う。

自律分散制御を用いることにより、各照明の制御が互いに独立に行われるため、照度センサの移動や照明の故障の際の柔軟な対応が実現できる。また、照明の制御装置が各照明に対して設けられるため、施工の際に複雑なネットワークの配線や設定などが不要になる。および配線変更の際にも設定変更が不要となる。

知的照明システムを自律分散制御で制御する方法として、強化学習や並列最適化アルゴリズムなどの有効性が確認されている。

## 3. 構築した知的照明システムの構成

### 3.1 ハードウェア構成

本研究で構築した知的照明システムの実験機は、照明として調光が比較的容易な市販の白熱電灯を用いている。そして、照明の光度を計算するためのコンピュータ、市販の照度センサ、および照明の光度を制御するための照明調光ユニットを接続して構成した。照度センサからの照度を取り込むためにアナログ入力ボード (CONTEC社 AD12-16(PCI))、および照明調光ユニットに対してデジタルの調光信号を出力するためにデジタル出力ボード (CONTEC社 PIO64/64L(PCI))を用いている。本実験機のハードウェア構成を Fig. 4に示す。

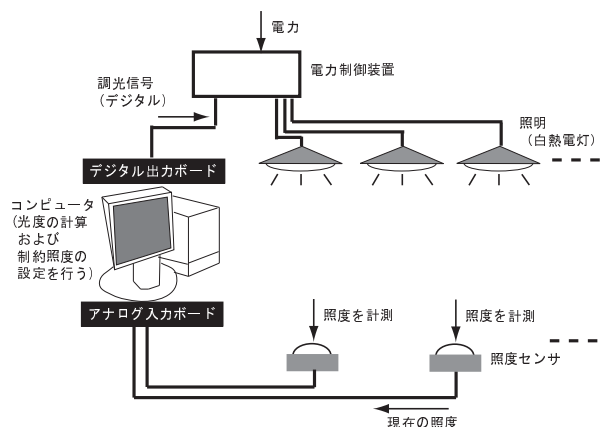


Fig. 4. Hardware composition of built system.

コンピュータでは、入力された照度センサの照度、および制約照度から、制御アルゴリズムにしたがって各照明の光度を判断する。また制約照度の設定もコンピュータを用いて行う。電力制御装置は、コンピュータから出力された調光信号にしたがって、各照明の電力を制御することにより調光を行うシステムである。照明の電力制御はトライアック回路とパルスモーターにより実現している。

本実験機のハードウェア構成はコンピュータが光度を決定する集中制御方式となっているが、3.2で述べるように制御アルゴリズムとして自律分散制御に適用できる手法を用いており、自律分散制御方式のハードウェアにも適用することが可能である。

構築したシステムの写真を Fig. 5 および 6 に示す。



Fig. 5. Photograph of the lighting system.



Fig. 6. Photograph of the lamps controlled by the system.

### 3.2 制御アルゴリズム

知的照明システムの制御方法として、強化学習や並列最適化アルゴリズムの有効性が示されているが、本実験機では制御アルゴリズムとして並列最適化アルゴリズムである DORAR 法<sup>7)</sup>を適用した。DORAR 法を用いた理由は、他の手法と比較して制御の際に確率的オペレータを用いないため確実に光度の収束が見込める点、アルゴリズムのパラメータが少なくチューニングが容易な点からである。

DORAR 法は、資源余裕見積もり処理、資源削減処理、資源追加処理の 3 つの処理を繰り返し適用することにより最適解を発見するアルゴリズムである。資源余裕見積もり処理は、各設計変数に対して制約条件からどの程度の余裕があるかを読み取る処理、資源削減

処理は、資源余裕見積もり処理で読み取った余裕に基づいて一定に削減を行う処理、資源追加処理は、各設計変数に対して一定値を加える処理である。設計変数が 2 つの時の DORAR 法による探索の様子を Fig. 7 に示す。

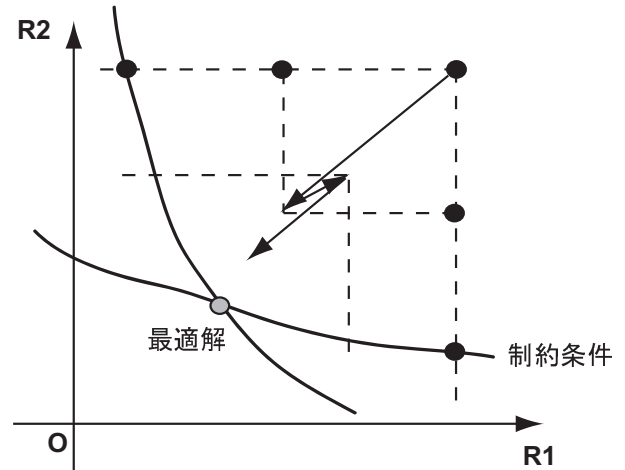


Fig. 7. The DORAR method.

DORAR 法を知的照明システムに適用する場合、各照明の光度が各設計変数に当たり、制約条件が各照度センサに設定された制約照度、目的関数は全照明の光度和となる。すなわち、DORAR 法を知的照明システムに適用すると、制約条件として各照度センサの制約照度を満足しつつ、目的関数として全照明の光度和を最小化するという省エネルギーなシステムを実現できる。

DORAR 法を知的照明に適用する際に問題となるのが、資源余裕見積もり処理の扱いである。資源余裕見積もり処理を行い制約条件までの余裕を求める際に、通常では照明から各照度センサまでの距離が必要となるためである。しかし、制御の際に照度センサまでの距離を計算する方法では照度センサの移動に対処することができない。そこで照明を 1 基ずつ一定の割合で減光させて各照度センサの影響度を読み取り、線形的に予測することで余裕を計算する方法を採用した。この方法では照度センサまでの距離を計算に用いずに余裕を読み取ることが可能である。

以下に本実験機に適用した DORAR 法の流れを示す。

**資源余裕見積もり処理** 各照明がどの程度の光度削減が可能かを判断する。各照明が光度変化量  $\Delta L$  だけ光度を削減し、その際の各照度計の照度の変化量  $\Delta x_i$  から削減が可能な光度を判断する。資源余

裕, つまり削減可能な光度  $L_d$  は以下の式で線形的に求める. ただし,  $x_i$  は現在の照度センサ  $i$  の照度,  $x_{ig}$  は照度センサ  $i$  の制約照度である.

$$L_{id} = (x_i - x_{ig}) \times \frac{\Delta L}{\Delta x_i}$$

そして, 全照度センサに対して資源余裕を計算し, その最小値を照明の資源余裕とする.

**資源削減処理** 見積もった資源余裕に責任係数  $\alpha$  を乗じた値だけ各照明の光度を削減する. 通常, DORAR 法では責任係数  $\alpha$  は要素数の逆数を用いるため, 本実験機でも照明数の逆数を責任係数とした.

**資源追加処理** 微少資源追加量  $\Delta R$  だけ全照明の光度を追加する.

これにより知的照明システムに適用する DORAR 法のパラメータは資源余裕見積処理の際の光度変化量  $\Delta L$ , および微少資源追加量  $\Delta R$  となる.  $\Delta L$  は照度の変化量  $\Delta x_i$  の読み取りの際の各照明の変化量であり, 光度の変化量が正確に照度の変化量を読み取ることができるため,  $\Delta L$  が大きいほど正確な計算が可能となる. しかし, 光度の変化が大きいと照明の動作に時間を要するため,  $\Delta L$  が大きいほど資源余裕見積もりに時間がかかると考えられる. 一方, 微少資源追加量  $\Delta R$  に対しては, 値が大きいほど解の動きが大きくなるが, 最適解に近い値を求めることができないこと. および要素数が多いほど値を小さくすることがよいことが知られている<sup>9)</sup>.

一方で, 制約条件を満たさない照度センサが存在する場合は, 制約条件を満たすまで資源追加処理を適用し制約条件下まで引き戻しを行う. これは実際にシステムを利用する際に制約条件を満たさない状態は不適当な状態であるため, 即座に制約条件下に引き戻す必要があると考えられるためである.

## 4. 動作実験

### 4.1 実験内容とパラメータ

構築した知的照明システムの動作確認のため, 設定照度の異なる照度センサが存在する環境で動作実験を行った. 実験環境は Fig. 8 に示す 9 照明 3 照度センサの環境である. 照度センサ A, B, および C の制約照度はそれぞれ 400, 300, および 200[lx] である. また実験パラメータを Table 1 に示す.

実験は以下の 3 パターンで行った.

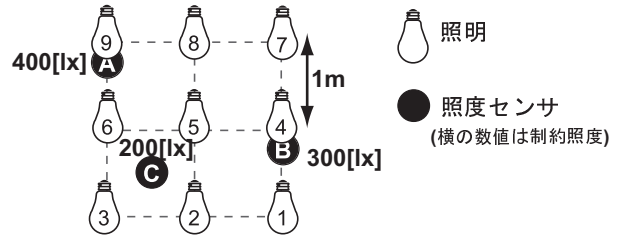


Fig. 8. The environment of experiments.

Table 1. The parameter of experiments.

照明の数	9
照度センサの数	3
光度変化量 $\Delta L$ [%]	5
微少資源追加量 $\Delta R$ [%]	4
初期光度 [%]	100
動作時間 [s]	600

**実験 A:環境変化なしの場合** Fig. 8 の環境から, 環境の変化が起きなかった場合

**実験 B:照明故障の場合** Fig. 8 の環境で実験を行い, しばらく経過したのちに照明 3 を故障させた場合

**実験 C:照度センサが移動した場合** Fig. 8 の環境で実験を行い, しばらく経過したのちに照明 9 の真下に存在する照度センサ A を照明 7 の真下に移動させた場合

## 4.2 実験結果と考察

### 4.2.1 実験 A 環境変化なし

実験 A:環境変化なしの場合における, 各照度センサの照度の履歴を Fig. 9 に, 全照明の光度の和の履歴を Fig. 10 に, 各照明の履歴を Fig. 11 にそれぞれ示す.

Fig. 9 において, 照度センサ A, B, および C の制約照度はそれぞれ 400, 300, および 200[lx] であり, 照度センサが設置されたすべての地点において制約照度以上の照度を維持できていることが確認できる. また, Fig. 10 を見ると, 目的関数である全照明の光度和が最小化する方向に探索が行われていることがわかる. Fig. 9 を見ると, DORAR 法が常に資源追加を続けるために最適解に収束しないことから, 各照度センサとも制約照度から限りなく近い照度とはなっていないが, 制約照度を満たしつつ全体の光度和を最小化する

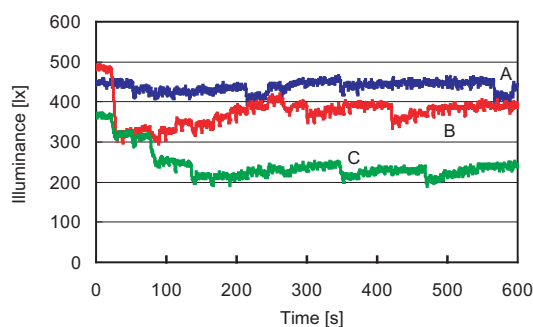


Fig. 9. The history of illumination in experiment A (alphabets in graph designate illuminometers).

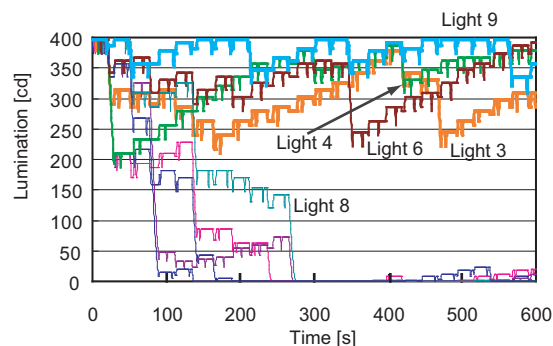


Fig. 11. The history of lumination in experiment A.

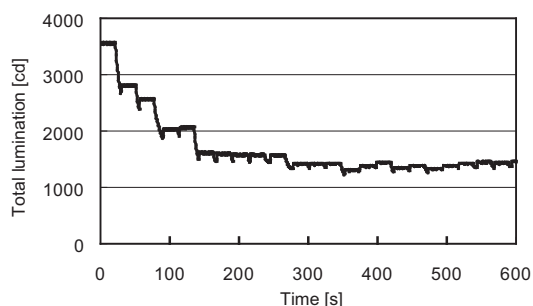


Fig. 10. The history of total lumination in experiment A.

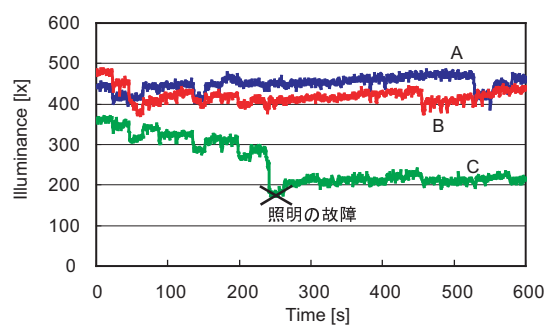


Fig. 12. The history of illumination in experiment B (alphabets in graph designate illuminometers).

るという要件を満たすシステムが構築できることが確認できた。

Fig. 11 から各照明の動作について検証する。各照明には一定時間ごとに細かい光度の変化が見られるが、これは資源余裕見積処理時の光度変化である。この光度変化は、実験機で確認したところおおむね人間の目には変化と感じられない程度であった。したがって、人間が感じない程度の光度変化で資源余裕見積処理を行うことができることが分かった。一方、各照明の探索に関しては、Fig. 11 を見ると一定時間経過した後に照度センサに近い照明 3, 4, 6, および 9 の光度のみが維持されており、DORAR 法によって必要最低限の点灯で制約照度を維持するように探索されることが確認できた。

#### 4.2.2 実験 B 照明故障の場合

実験 B: 照明故障の場合における、各照度センサの照度の履歴を Fig. 12 に、全照明の光度の和の履歴を Fig. 13 に、各照明の履歴を Fig. 14 にそれぞれ示す。照明故障時の各照明の動作および照度センサの照度

に関して検討する。Fig. 12 より、照明故障時に故障した照明 3 に近い照度センサ C が制約照度を下回っていることがわかる。しかし、その後即座に照度が上昇して制約照度を満たしており、照明が故障した際にも即座に対応できていることが確認できる。一方、目的関数である光度和については、照明故障時に制約条件を満足させるために全照明の光度が上昇するため、Fig. 13 を見れば分かるようにいったん光度和が上昇している。しかし、その後は再び光度和が減少するように探索が行われていることがわかる。

次に Fig. 14 から各照明の動作について検討すると、照明 3 の故障時に制約照度を満たさなくなるため、消灯していた照明を含めて全照明の光度が上昇している。その後、故障した照明 3 の代わりに照明 2 および 5 の光度が環境変化がない場合と比較して上昇しており、しばらくすると、探索の結果照度センサ B にも近い照明 5 の光度の方が維持される。このように構築したシステムは、照明の故障に対しては各照明が環境の変化から柔軟に対処し、その後も照度センサの位置などを

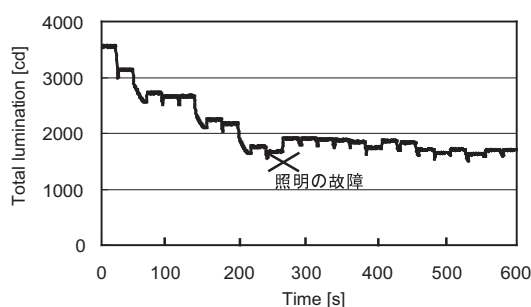


Fig. 13. The history of total lumination in experiment B.

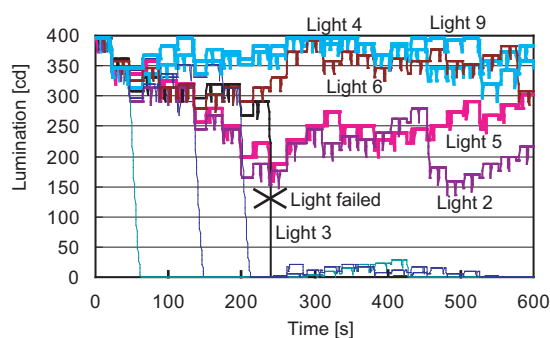


Fig. 14. The history of lumination in experiment B.

自律的に判断して動作するなどのすぐれた動作を行っていることが確認できる。

#### 4.2.3 実験 C 照度計移動の場合

実験 C:照度計移動の場合における、各照度センサの照度の履歴を Fig. 15 に、全照明の光度の和の履歴を Fig. 16 に、各照明の履歴を Fig. 17 にそれぞれ示す。

Fig. 15, 16, および 17 を見ると、最も制約照度が大きい照度センサ A が移動するという大きな環境変化が生じたにもかかわらず、実験 B:照明故障の場合と同様の対処を各照明が行っており、制約照度を外れた場合も即座に制約照度を満足するように動作していることが確認できる。Fig. 16 を見ると、探索が進んで光度和が減少していたが、環境が変化したことによって制約条件を外れたために、それを満足するように全照明の光度を上がり、光度和が大きく上昇していること、およびその後再度光度和が下がる方向に探索が行えていることが確認できる。

Fig. 17 より照明の動作について検討すると、環境変化時に全照明の光度が大きくなっていることが確認できる。

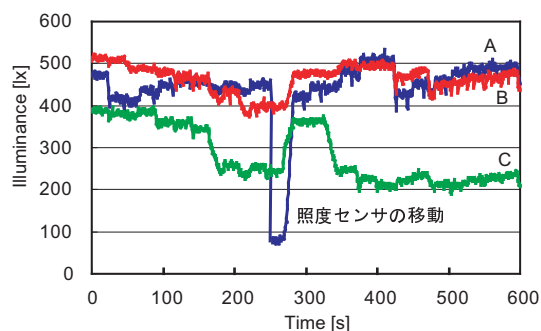


Fig. 15. The history of illumination in experiment C (alphabets in graph designate illuminometers).

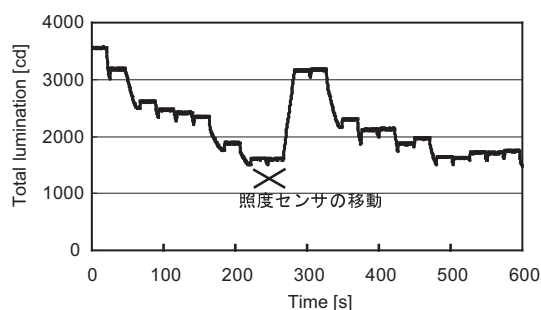


Fig. 16. The history of total lumination in experiment C.

また、移動前は照度センサ A の真上にあった照明 9 の光度が高かったが、環境変化後の探索では移動後の照度センサ A の真上に存在する照明 7 の光度が高くなるように探索が行われ、一方で照明 9 が消灯している。これは環境変化後、必要となる照明が変化してもそれに対して柔軟な対処が行えているということができ、今回構築したシステムが環境の変化に対しても柔軟に対処できることを示している。

## 5. 結論

本研究では、移動可能な照度センサの情報を基に、自律分散制御により各照明が適切な点灯パターンを行う知的照明システムの実験機を構築した。知的照明システムでは、照度センサを必要となる場所に配置して制約照度を設定するだけで各照明が自律的に適切な点灯パターンを実現し、省エネルギー面、システムの操作性の面、および照明の設置コストの各面から非常に優れたシステムである。

本研究で構築した実験機ではハードウェアとして市

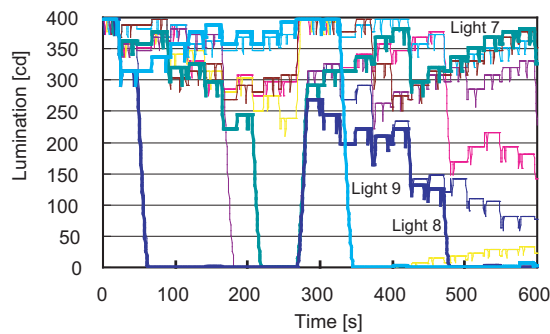


Fig. 17. The history of lumination in experiment C.

販のパソコン、白熱電灯、照度センサ、およびトライアック回路とパルスモーターを用いた電力制御装置を用い、制御アルゴリズムとして並列最適化手法であるDORAR法を用いた。複数の異なる制約照度を持つ照度センサの存在する環境で実験を行った結果、適切な動作を行うことを実証した。また、照明の故障する場合や照度計の移動する場合など、環境が変化する場合であっても、各照明が柔軟に判断して適切な動作を行うことを実証した。以上のことからDORAR法を制御アルゴリズムとする知的照明システムは、実際の環境でも適切な動作を行うシステムであることが実証された。

#### 参 考 文 献

- 1) 三木光範, 河岡司. 知的人工物に関する基本的考察. 同志社大学理工学研究報告 No.37 Vo.3, pp. 32-52, 1996.
- 2) 特開 2002-231468, 照明システム.
- 3) 特開平 7-21814, 自然採光と人工照明のコントロールシステム.
- 4) 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一. 自律分散概念の提案. 電気学会論文誌 C Vol.104, No.12, 1987.
- 5) 三木光範, 香西隆史. 照明システムの知的化設計. 同志社大学理工学研究報告 No.39 Vo.2, pp. 24-34, 1998.
- 6) 廣安知之, 三木光範, 富田浩司. 知的ネットワークシステムへの強化学習の適用 (Q-learningによる知的照明システムの構築). 計測自動制御学会 第13回自律分散システムシンポジウム, pp. 27-32.

- 7) 三木光範, 廣安知之. 資源の追加と削減に基づく並列分散最適化法. 日本機械学会論文集 (A編) Vol.66, No.642, pp. 411-418, 2000.
- 8) Vari-lite 社. <http://www.vari-lite.com/>.
- 9) 三木光範, 廣安知之, 小栗伸, 池田大樹. 多変数非線形最適化問題への資源追加削減法の適用. 同志社大学理工学研究報告 Vol.40 No.3, pp. 28-37, 1999.