

# 組み込み制御による非同期型知的照明システムの構築

## Implementation of Asynchronous Intelligent Lighting Systems for Embedded Systems

吉見 真聡\*<sup>1</sup>

Masato Yoshimi

三木 光範\*<sup>1</sup>

Mitsunori Miki

小野 景子\*<sup>2</sup>

Keiko Ono

\*<sup>1</sup>同志社大学 理工学部 インテリジェント情報工学科

Faculty of Science and Engineering, Doshisha University

\*<sup>2</sup> 龍谷大学 理工学部 電子情報学科

Faculty of Science and Technology, Ryukoku University

This paper reports evaluation results of an asynchronous intelligent lighting system which implements embedded processors that perform distributed processing using TCP/IP communication. We implemented the pseudo-distributed processing system by multi-thread execution, and evaluated the system by activating three threads for illuminance sensors and 15 threads for illumination lamps. As the result, we confirmed that the system could adjust the environment to the target illuminance level within 200 steps or two minutes under frequent change of the target value.

### 1. はじめに

近年はオフィスにおけるワーカーの創造性、快適性を向上させる方法に関する注目が集まっており、オフィス環境の改善により、知的生産性が向上することが報告されている [大林 06]。また、オフィス環境では、ワーカーの執務内容や好みにより、求められる光の明るさ (照度) が異なることが報告されている [Boyce 00]。著者らの研究グループは、最適化手法を用いて任意の照度をワーカーごとに提供する知的照明システムの研究を進めている [三木 07]。知的照明システムは、照度センサから得られたデータをもとに照明の光度が制御され、任意の場所にユーザが指定する照度を提供する照明システムとして、省エネルギーを実現するとともに、執務環境の向上に効果があることが実証されてきた。

知的照明システムにおいてセンサの移動や増減、故障など、システムを取り巻く状況の変化に柔軟に対応するためには、センサや照明が個別の制御装置を持ち、それらが非同期に協調動作する分散環境が考えられる。非同期型の知的照明システムでは、イーサネットを介した TCP/IP 通信により、任意のタイミングでセンサ-照明間で照度データの通信を行い、光度を制御して実現する。

本論文では、照明と照度センサそれぞれに組み込まれたマイクロプロセッサが情報を交換して照明を制御する分散/非同期型の知的照明システムについて、照明 15 灯の環境を想定したシミュレーションによる評価について報告する。実装したシステムは、実際のセンサ用、照明用のプログラムコードとして利用可能なモジュールな構造を持ち、以前の実装と組み合わせることで実システムへの応用が可能となっている [吉見 10]。本論文における計算機シミュレーションは、実験システムの構築が困難な比較的大規模な環境を設定し、非同期型知的照明システムの実用化に向けた議論を行う。

### 2. 知的照明システム

知的照明システムは、調光可能な照明、照度センサ、電力計をひとつのネットワークに接続することで構成され、各照明の

光度を変化させることでユーザの要求する照度を提供し、かつ省電力な状況を実現するシステムである。照明器具には学習判断をする制御装置を備えることができ、自律分散動作が可能な制御アルゴリズムが用いられるため、照明器具の自律動作が可能となっている。

知的照明システムを実現するもっとも基本的なアルゴリズムは、確率的山登り法 (SHC: Stochastic Hill Climbing) によるものである。図 1 に示すような、照明 15 灯 ( $m = 15$ )、センサ 3 基 ( $n = 3$ ) が配置された環境を例に説明する。照度センサにはユーザ (オフィスワーカー) が目標照度  $I_{t_j}$  を設定しており、現在の照度  $I_{c_j}$  とともに各照明に送信する。その一方で、照明は現在点灯中の光度と受け取った照度値を用いて目的関数 (式 1)  $f$  の計算を行う。

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

ここで  $g_j$  および  $P$  はそれぞれ、照度を目標に近づけるための関数および消費電力を最小化するための関数である。消費電力は照明の光度の総和と定義している。

$$g_j = \begin{cases} 0 & \text{if } (I_{c_j} - I_{t_j} \geq 0) \\ (I_{c_j} - I_{t_j})^2 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$P = \sum_{i=1}^m C_i \quad (3)$$

目的関数の計算の後、現在光度の近傍に次の光度を設定し、その後計算が繰り返される目的関数値が、現在保持している目的関数の値よりも小さいならば、解が改良されたと判断し、そのときの光度を解として受理する。このように、知的照明システムは、各照明の近傍生成とセンサによる評価の繰り返しによって、任意のセンサ位置への適切な照度を提供する。

### 3. 関連研究

現在の知的照明システムは、SHC をベースとして照明制御用に改良された ANA/RC (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient) [池田 06] が主に利用されている。ANA/RC は、回帰係数を用いて各照明がセンサに与える影響度を学習し、最適な光度へと素早く変化させることができる方

連絡先: 吉見 真聡, 同志社大学 理工学部,  
京都府京田辺市多々羅郡谷 1-3, tel.0774-65-6780,  
myoshimi@mail.doshisha.ac.jp

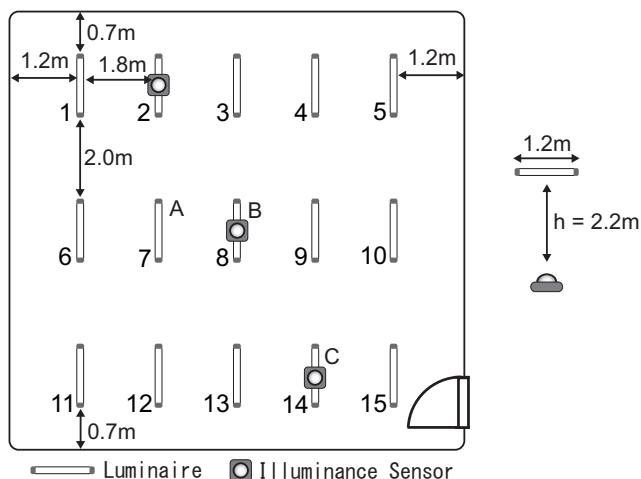


図 1: シミュレーション実験環境

法として、現在企業や大学などに導入され、実証実験が進められている。

知的照明システムは自律分散制御アルゴリズムを用いているため、制御形態として分散制御と集中制御のどちらとすることができる。既存のオフィスへのシステム設置に掛かるコストや、保守性の観点から、実際の執務環境を対象とした検証では知的照明システムの核となるサーバマシンを中心とした集中制御方式が採用されている。また近年では知的照明システムが扱う対象を光の明るさだけではなく、色温度や色度の制御 [三木 09a] を実現し、生体や心理に与える影響の調査も行っている [三木 09b]。

このような状況にあつて、分散、非同期型の知的照明システムは、システムの柔軟性を向上し、導入、維持運用に関するコストの問題を改善できる見込みがあり、実現時のインパクトは大きい。具体的には、イーサネットを介した TCP/IP 通信による制御が可能な知的照明システムの開発 [小野 10] や、センサと照明の制御プロセスが分離した知的照明システムを実現する提案 [吉見 10] など、実現に向けた試みが進められている。図 2 は TCP/IP 通信で蛍光灯の光度を制御する H8 マイコンボードの写真である。PWM 信号をトランジスタで増幅して調光信号を発生させる。

#### 4. 非同期型知的照明システム

知的照明システムは現在までに、オフィスにおける生産性や省エネルギー性の向上に効果的であることが実証されてきた。その一方で、照度値の取得および近傍の生成を同期して行う知的照明システムに対し、センサの増減など状況の変更への柔軟な対応や、導入コストの低減のためには、より小型のプロセッサを複数用いて実現する知的照明システムに関する検討が求められる。

我々の研究グループはその実装として、センサおよび照明に組み込まれたマイクロコントローラがイーサネットを介した TCP/IP ネットワーク上で照度値を送受信するシステムを提案した [吉見 10]。これは、センサと照明が同期を取らず、各自の処理を実行する非同期型の知的照明システムである。センサは取得した照度データを TCP/IP 通信を用いて各照明に送信する。各照明は受信した照度データを用いて目的関数を評価し、光度を変化させる。これらの手順は各機器で任意のタイミング

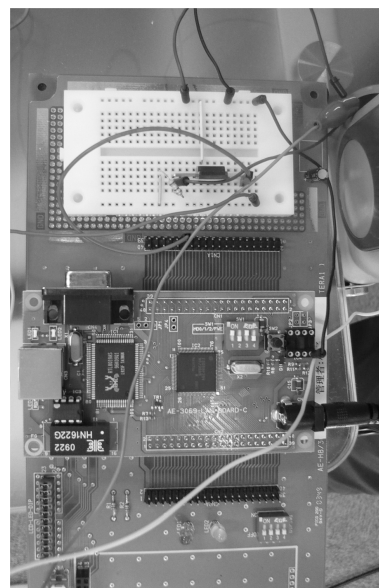


図 2: イーサネット調光のためのマイコンボード

で行われる。

このようなシステムでは、2つの問題が生じると考えられる。第一に、照明ごとに照度値の受信タイミングが異なり、個別に目的関数の評価を行うことになるため、光度変化が収束しなくなる問題である。これは、光度変化量が最大点灯光度の約 8% 程度と比較的大きめの幅が取れること、光度変化は 1 秒に 1 回から 2 回程度とデータの通信速度と比べて十分な余裕があることから、大きな問題にはならないと考えられる。これについては実際にシミュレーションで確認する。

また第二に、照明の光度値が同期されないため、電力を最小化する関数 (式 3) が利用しにくくなる問題である。現在の非同期型の知的照明システムでは目的関数は式 1 を簡略化して照度だけに注目する式 4 を用いている。後者の問題は、定期的に照明の電力を収集することで対応する。

$$f = \begin{cases} (I_{c_j} - I_{t_j})^2 & \text{if } (I_{c_j} - I_{t_j} \geq 0) \\ -1 \times (I_{c_j} - I_{t_j})^3 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

#### 5. 実装

我々の研究グループでは非同期型知的照明システムの予備的な評価として、マイクロコントローラが組み込まれたセンサおよび照明上で動作するプログラムを実装し、予備評価を行っている [吉見 10]。非同期型知的照明システムでは、TCP/IP ネットワークで複数同時に通信が可能なマイクロコントローラを組み込むことを想定し、照明用、センサ用のプログラムをそれぞれ C 言語で実装した。スレッド処理は pthread ライブラリ、データ送受信は socket 通信ライブラリを使用し、6 台の仮想マシンを使用して評価を行った。

本論文で扱う対象として比較的大規模な環境を想定するため、仮想マシンでは対応が難しい。そのため、センサ、照明の動作を行うスレッドを多数生成して知的照明システムを実現するマルチスレッド知的照明システムを実装した。

照明用のスレッドでは、共有メモリ領域から読み出した各センサの照度データを用いて、近傍生成と目的関数の計算を実行する。各センサのスレッドは、設定された目標照度と、逐点法

で求めた現在照度を共有メモリの所定の領域に書き込む。目標照度の値が変更されていた場合には、その時点での照度値を使って目的関数  $f$  の値を計算する。共有メモリは全てのスレッドが読み出すことができるが、書き込みできる領域はスレッドごとに制限を与えており、センサ間、照明間では通信が発生しないようになっている。また、この共有メモリへのアクセス部分は、関数名を書き換えることで socket 通信用のモジュールに入れ替えることができる構造になっている。

本論文はシミュレーションで効果を検証するため、センサは現在照度を得ることができない。そのため、センサ  $S_j$  の照度  $I_j$  [lx] は、各照明  $L_i$  からの距離と照明の光度  $C_i$  [cd] から式 5 で求められることを利用して計算した (逐点法)。

$$I_j = \sum_{i=1}^m \frac{C_i \cos \theta}{(x_{L_i} - x_{S_j})^2 + (y_{L_i} - y_{S_j})^2 + (z_{L_i} - z_{S_j})^2} \quad (5)$$

式 5 の  $x, y, z$  は照明とセンサの座標上の位置を表す。また、角度  $\theta$  は光源の法線と、光源とセンサとの線分のなす角である。照明は各センサに、その照明がセンサの照度値に与える影響を知らせ、センサは照明の照度値を読み出して総和を求めることで照度値を求める。

## 6. 評価と考察

図 1 のように 15 灯の照明および 3 台のセンサが設置された環境を想定し、照明およびセンサの制御プログラムを動作させ、目標照度への収束の確認と、消費電力の評価を行った。評価は各センサの目標照度を変更し、照度が収束することを確認した。

各センサに目標照度を与え、収束が確認された後に目標照度を変化させたときの図 1 のセンサ A, B, C の照度の履歴を図 3, 4, 5 にそれぞれ示す。各図では、目標照度を破線で示し、センサが計測した実際の照度を実線で示している。これらの結果から、照明 10 灯以上で構成される実際のオフィスに近い環境であっても、照度差 200[lx] 程度であれば 100 ステップから 200 ステップ程度で照度が収束し、非同期型の知的照明システムでも照度収束が行えることが確認された。また、この知的照明システムを動作させた際の消費電力を図 6 に示す。図 6 は照明を全点灯させたときの電力を 1 とした際の電力効率であり、非同期型知的照明システムにおいても 10% から 35% 程度の省電力化がなされていることが確認された。

現在の非同期型システムで想定される問題点として、照明数が多い環境では消費電力を小さく抑えられない局所解に収束する場合が挙げられる。これは、電力を目的関数のパラメータとして使用していないため、目標照度を満たすために距離の遠い照明が強 POINT 灯してしまうような場合である。この場合は、SHC ではなく ANA/RC を用いることで対応ができると考えられる。

## 7. まとめ

本論文では、組み込み機器を用いて TCP/IP 通信により分散処理を実現する、非同期型の知的照明システムの評価を行った。マルチスレッド実行による擬似的な分散処理のシステムを実装し、センサ 3 スレッド、照明 15 スレッドを配置した環境での評価の結果、目標照度を頻繁に変更しても、200 ステップ以内 (実システムでは 2 分程度) と十分な速度で目標照度に収束する様子が確認された。

今後の展開として、TCP/IP 制御される照明とマイクロコントローラを使用した実環境における照度収束実験を予定して

いる。また、照明間の通信の導入や、電力計からの情報を踏まえて省エネルギー性を向上させる手法や、センサの動的なネットワークへの参加や離脱、移動を可能とする手法について検討する予定である。

## 参考文献

- [Boyce 00] Boyce, P. R., Eklund, N. H., and Simpson, S. N.: Individual lighting control: Task performance, mood, illuminance, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, pp. 131–142 (2000)
- [吉見 10] 吉見真聡, 三木光範, 小野景子: 分散非同期式照明システムの提案, 情報処理学会創立 50 執念記念第 77 回全国大会, 情報処理学会全国大会, No. 6A-6 (2010)
- [三木 07] 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)
- [三木 09a] 三木光範, 加来史也, 廣安知之, 吉見真聡: ユーザの要求する照度および色温度を実現する知的照明システム ~ 重回帰分析を用いた収束時間の高速化 ~, 第 8 回情報科学技術フォーラム (FIT2009), 情報科学技術フォーラム, 第 1 巻, pp. 239–240 (2009)
- [三木 09b] 三木光範, 廣安知之, 吉見真聡, 鈴木真理子, 秋田雅俊: 照度・光色可変型知的照明システムを用いた実執務空間における最適な光環境について, 第 8 回情報科学技術フォーラム (FIT2009), 情報科学技術フォーラム, 第 3 巻, pp. 435–436 (2009)
- [小野 10] 小野景子, 三木光範, 吉見真聡: イーサネット制御を用いた知的照明システム, 情報処理学会創立 50 執念記念第 77 回全国大会, 情報処理学会全国大会, No. 6A-5 (2010)
- [大林 06] 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, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006 (2006)
- [池田 06] 池田聡, 三木光範, 廣安知之: 知的照明システムを用いた実執務環境における最適な照度, 第 16 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, pp. 121–124 (2006)

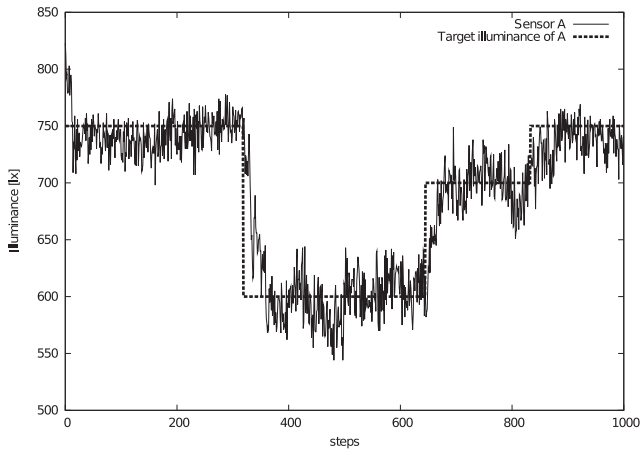


図 3: センサ A の照度履歴

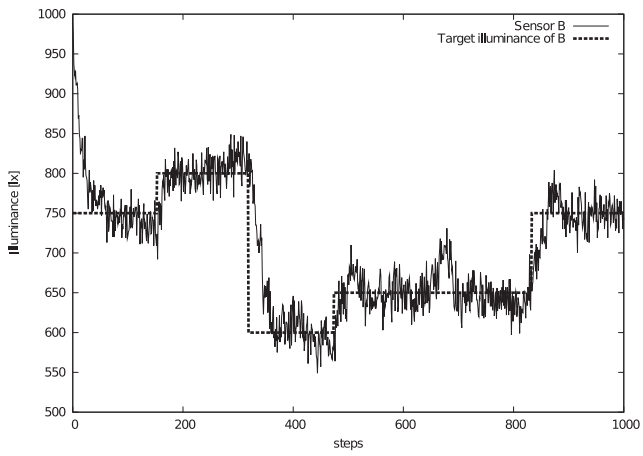


図 4: センサ B の照度履歴

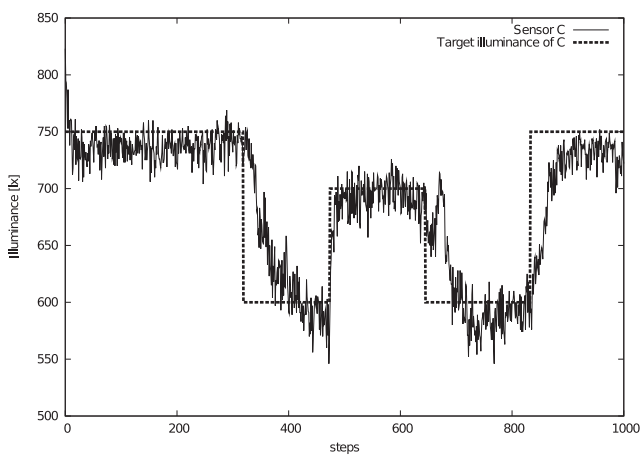


図 5: センサ C の照度履歴

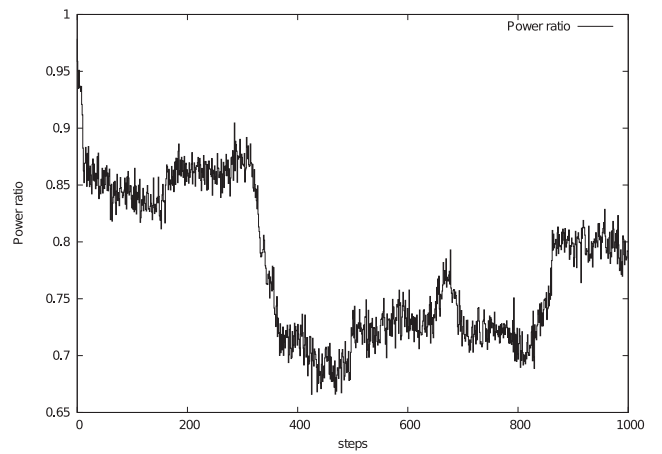


図 6: 電力削減の効果