

照明状態の動的変化を検知可能な LED 制御システム

小林祥朋^{†1} 栗山繁^{†1}

外光の強度変化や人・物体の移動に伴う影の発生等、時々刻々変化する照明状態を検知して調光するためには、屋内の複数地点での各光源からの明るさに対する影響の変化を瞬時に計測する必要がある。本研究では、各光源に対して個別に設定されている周波数に基づいた照度値の分解測定が可能なセンサ内蔵型 LED 光源ユニットを開発し、照明機器のみを用いた動的な照明環境変化にも頑健な、調光制御機構を提案する。

LED Controls by Detecting Dynamical Variations of Lighting Conditions

YOSHITOMO KOBAYASHI^{†1} SHIGERU KURIYAMA^{†2}

Real-time measurement of the effect on the brightness from every light sources is useful in smartly controlling them, according to the continuous change of lighting condition caused by the variations of natural light or the shadows of moving persons and objects. We develop a frequency-controllable LED lighting unit. The built-in sensor equipped in this unit, can separately measure the illuminance separately from the lighting sources having individual frequencies. Using these capabilities, we propose a dynamical dimming control mechanism that can robustly detect the dynamical variation of lighting conditions without using any external sensing system.

1. 序論

1.1 研究の背景・目的

近年の電力エネルギー問題を背景に電気機器の消費エネルギー削減に関する取り組みが活発になっている。その中でも一日の使用時間が長い照明は消費エネルギー削減の効果が高い項目として認知されている。

各光源を個別に制御する照明制御では各光源から放射された後に物体による反射や散乱、および吸収の過程を経て部屋の各地点に到達する際の減衰率を取得できれば、最適な調光機構の構築に役立つ。このような減衰率を取得する一般的な方法としては、各光源のみの点灯状態を切り替えながら照度計を用いて部屋の各点における照度を測定するといった方法が考えられるが、これは光源の個数や測定地点の増加に伴い、非常に手間のかかる作業となる。そのため、各照明の減衰率を光源の個数に依らずに即座に直接推定できる機構が望まれる。

そこで本研究では、環境条件に影響される光量の減衰率を即座に取得するための新しい手法を提案し、これを用いた照明システムを構築する。

1.2 関連研究

照明システムに関する関連研究として、知的照明システム[1]と呼ばれる研究が挙げられる。これらの研究では自律分散型の照明と照度計を用いて、照度計のおかれている場所を目的の照度に近づけながら、不要な部分の照明を消灯させる。この研究では照明を変化させた際の照度計の出力変化から照明と照度計との相関を求めることで照明状態の

最適化を図っている。この手法は自律分散的な処理が可能であり、照明の配置情報を必要としない利点を有する。しかしながら、照明の出力を変化させた場合の照度変化から相関を求めるため、15 台の照明と 4 点の照度測定箇所に対しての 40 秒程度の計測期間を必要としているので、外光の変化や物体の移動といった動的な照明環境の変化に弱いという問題点が指摘される。

1.3 システムの概要

従来の照明システムは、作業面における照度を操作するために、床面や机の上に照度計を設置するものが多いが、ユーザーの作業エリアに照度計が常に存在すると作業の妨害となる場合が考えられる。また、ユーザーが壁面や床面における反射光を見ているのに対し、照度計が観測する対象はその面に入射する光量である。そのため、例えば机表面の反射率が変化すると、照度計の値が変化しないにも関わらず、ユーザーから見た明るさは変化してしまう。

そこで、本研究では照明側に照度センサを設置し、制御対象の面における反射光を観測する。制御の手順はまず、照明デバイスに内蔵された照度センサを用い、周囲の光源から放射された光がセンサから観測される物体面で反射した際の減衰率を推定する。本照明システムはユーザーが指定する所望の照度を基に最適な出力強度を算出する。

本照明デバイス以外の光源が存在しない環境では、光源の個数を M 、各照明デバイスの光源の輝度を L 、および照度センサで計測される照度を E とすると、照射経路における光量の減衰率 ζ は式(1)の関係となる。ここで、減衰率 ζ は光源の状態に依存しないため、これを推定できれば所望の照度 E を設定することで、制約付きの線形方程式を解くことにより必要な輝度 L を求められる。

^{†1} 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \cdots & \zeta_{1M} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \cdots & \zeta_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \zeta_{M1} & \zeta_{M2} & \cdots & \zeta_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_M \end{pmatrix} \quad (1)$$

2. 照明システムの構成

本研究で構築する照明システムは光源である照明デバイスと照度データを収集するためのセンサネットワークを統合したものである。このシステムでは光の照射経路における減衰率を推定する際、光源を個別の周波数で点灯させ、フィルタを用いて帯域別に照度信号の振幅を取得する。しかし、これらの機能を有する市販の照明機器は存在しないので、我々は独自に照明デバイスを製作して実験に用いた。

本章では、製作した照明デバイスの仕様とそれを用いた照明システムの構成に関して述べる。

2.1 照明デバイスの仕様

本研究のシステムを実現するために、図 1 の照明デバイスを製作した。

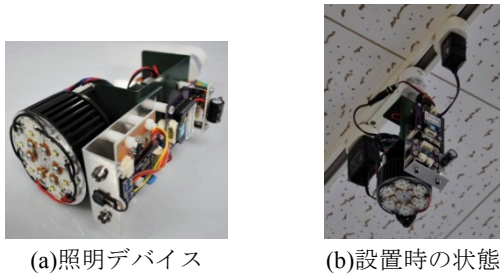


図 1 製作した照明デバイス

Figure 1 Lighting device

本デバイスの電氣的及び光學的仕様を表 1 に示す。本手法を用いる場合、高速に光源を点滅させる必要があるため、照明デバイスに使用する光源には高い応答速度が必要となる。また、照明の出力は一般的に普及している電球や電球型蛍光灯と同等以上の明るさ(1200(lm))を確保するため、CREE社のハイパワーLED(XP-Gシリーズ)を6個使用した。加えて、このデバイスは色温度の異なる2種類の白色LEDを有し、任意に色温度を調整できるが、今回の実験では色温度の制御は対象としていない。

表 1 照明デバイスの定格

Table 1 Rating of lighting device

項目	仕様
供給電圧	5,24(V)
最大消費電力	13(W)
全光束	0-1200(lm)
色温度	3000-6650(K)

本デバイスの回路構成は図 2 に示すように、照度センサとそれから得られるデータを収集して分解するためのマイコンで構成され、これらを用いて照明直下で反射した光を分解し、そこから得られる光の減衰率や照度を無線ネットワークにより他のデバイスと共有する。

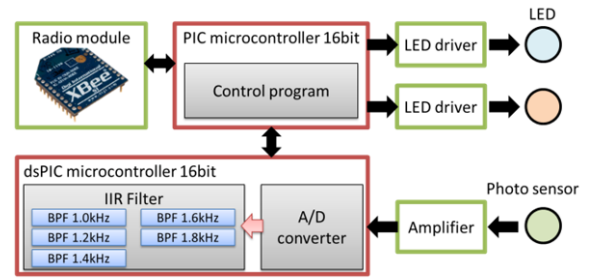


図 2 デバイスの回路構成

Figure 2 Device configuration

また、本デバイスは減衰率推定と照度の取得を行うため、2系統の増幅回路を有しており、これらのデータは個別に分析される。

2.2 照明デバイスの調光手法

本デバイスでは LED 素子の出力強度の調整にパルス幅変調 (PWM) と呼ばれる手法を用いる。この手法では図 3 のように照明を高速に点滅させ、その際のオンとオフの時間の割合 (デューティ比) を調整することで明るさを変化させる。本デバイスでは点滅の周波数を帯域分離に利用するが、点滅の周波数が低いと人間の視覚にはちらつきとして知覚されるため、200(Hz)以上に設定する必要がある。

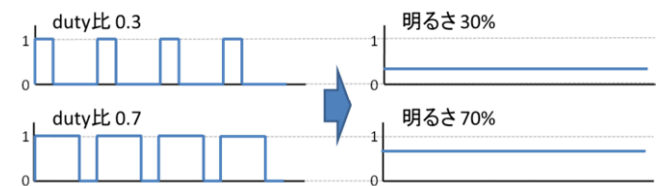


図 3 パルス幅変調を用いた調光

Figure 3 Dimming using Pulse-Width-Modulation

2.3 照明システムの構成

本研究で構築する照明システムを図 4 に示す。本システムは照明に内蔵されたマイコンで減衰率の推定と照度収集を行う。その後、各照明から得られる減衰率と照度を無線ネットワークに接続したパソコンで収集し、それを用いて最適な照明状態を算出する。

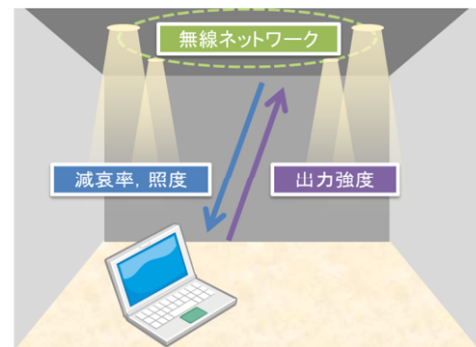


図 4 照明システムの構成

Figure 4 Configuration of the lighting system

3. 光の照射経路における減衰率推定

本手法では光源を個別の周波数で点灯させ、照度センサの出力をフィルタによって分解し、その振幅から減衰率を推定する。発光周波数によって帯域を分離することで、外光の影響下でも複数個所の減衰率を同時に推定できる。

本章では、減衰率推定の際に用いる帯域分離手法、周波数の制限、および振幅から減衰率を推定する手法について述べる。

3.1 IIR フィルタを用いた帯域分離

本手法では減衰率推定に用いるフィルタとして無限インパルス応答(IIR)フィルタを採用した。図 5 に示される係数 a, b を適切に設定することで、バンドパスフィルタなどの所望の特性を持つ様々なフィルタを構築できる。また、このフィルタは他のデジタルフィルタと比較して少ない計算コストで急峻なフィルタ特性を得られるという特徴を持つので、今回のようなマイコンを使った計算でも実時間処理が可能である。このフィルタを用いて図 6 に示すように、特定の周波数を得ることができる。

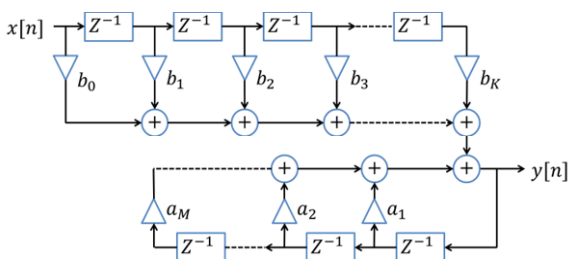


図 5 IIR フィルタのブロック図

Figure 5 Block diagram of IIR-Filter

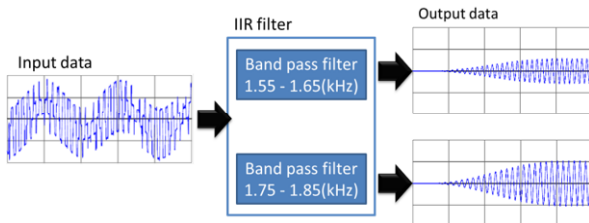


図 6 IIR フィルタを用いた信号分離

Figure 6 Signal separation using IIR-Filter

3.2 利用する帯域

2.2 節で述べたように、本デバイスは調光に PWM を用いるので、出力光は図 3 のような矩形波となる。ここで矩形波 $f(t)$ の 1 周期を $[-\pi, \pi]$ 、デューティ比を $0 < d < 1$ とし、 $f(t)$ を式(2)のように与えると、フーリエ級数展開により式(3)を得る。この式は矩形波が直流成分と整数倍の周波数成分を有することを示している。よって、本手法に用いる帯域を設定する場合、互いの周波数が整数倍とならないようにする必要がある。ゆえに、本実験では利用する帯域を 1(kHz), 1.2(kHz), 1.4(kHz), 1.6(kHz), 1.8(kHz)に設定した。

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (|t| \leq d\pi) \\ 0 & (d\pi < |t| \leq \pi) \end{cases}, f(t + 2\pi) = f(t) \quad (2)$$

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin(n\pi d) \cos(nt) \quad (3)$$

3.3 振幅からの減衰率推定

本デバイスでは照明の出力調整に PWM を用いるため、照明デバイスの輝度 L は出力光の振幅 a と照明のデューティ比 d を用いて式(4)のように表すことができる。振幅 a は本デバイスでは共通であるため、これを式(1)に当てはめると式(5) (または、簡略化された式(6))を得る。照度 E は制御の目標値として与えられるため、照度センサにおける帯域ごとの振幅 ζ' の値を推定することでそれを実現するためのデューティ比 d が算出できる。しかし、IIR フィルタは矩形波中の特定の周波数成分しか通過させないため、その出力振幅は入力矩形波から変化してしまう。このときの変化率 $f(d)$ は式(3)における $n = 1$ の周波数成分の振幅から求めることができ、出力振幅 b は(7)式となる。よって、照明デバイスに設定されているデューティ比 d を用いることで、式(8)のように ζ' を推定できる。純粋な減衰率を推定しているわけではないが、式(6)にも同様の項が存在するため、この値をそのまま最適化に使用できる。

$$L = ad \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_M \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \cdots & \zeta_{1M} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \cdots & \zeta_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \zeta_{M1} & \zeta_{M2} & \cdots & \zeta_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_M \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$E = a\zeta D = \zeta' D \quad (6)$$

$$b_{ij} = \zeta'_{ij} f(d_i) = \zeta'_{ij} \frac{2}{\pi} \sin(\pi d_i) \quad (7)$$

$$\zeta'_{ij} = \frac{\pi b_{ij}}{2 \sin(\pi d_i)} \quad (8)$$

3.4 実環境における減衰率推定実験

実環境において減衰率の取得実験を行い、本手法の有効性を検証する。まず、外光や照明間に障害物が無く、減衰率の精度が最も高くなるデューティ比 $d = 0.5$ という理想的な状態で減衰率を推定する。その後、外光がある環境、照明間に障害物が設置されている環境、照明のデューティ比を変更した場合において減衰率を推定する。

3.4.1 理想的な環境における減衰率推定

図 7 のように部屋の天井面に照明デバイスを 4 基配置し、各照明デバイスにおける減衰率を観測した。このとき、照明デバイスの発光周波数は A:1.0(kHz), B:1.2(kHz), C:1.4(kHz), D:1.6(kHz)とした。また、照明デバイス以外の光源や照明光を遮るような障害物も存在しない。

減衰率推定の結果を図 8 に示す。どのフィルタも自己と同じ帯域の出力が最も高く、その値は照明の距離に応じて減少する結果となった。光は照射経路の距離に応じた減衰が発生するため、このデータは実環境の状態が反映された結果といえる。

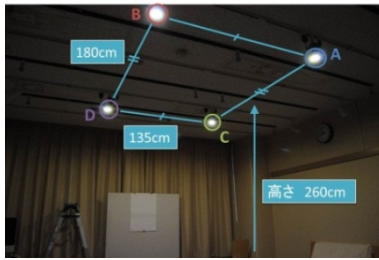


図 7 実験環境

Figure 7 Experiment environment

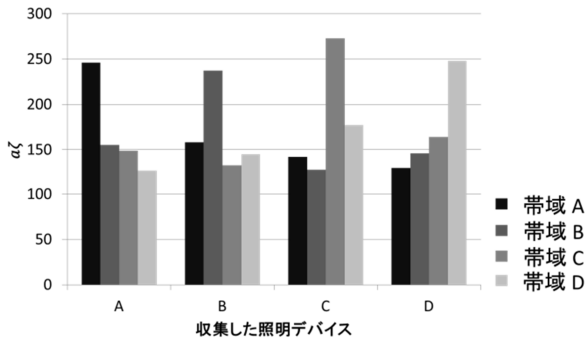


図 8 理想環境における減衰率推定

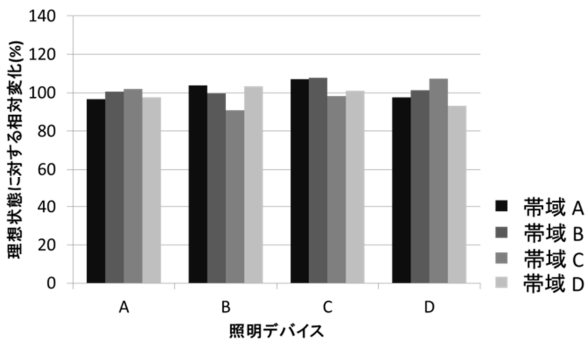
Figure 8 Estimation of attenuation factor for ideal environment

3.4.2 外光の影響に関する減衰率推定

本実験では周囲に他の光源が存在する場合の減衰率を推定する。実験環境は図 9(a)と図 10(a)に示すように図 7と同様の配置状態において、蛍光灯を点灯した場合と、カーテンを開いて太陽光を取り入れた場合の二つの条件を設定した。減衰率と出力光の振幅は外光により変化しないため、推定結果は理想環境の場合と同じ値が理想である。実験結果は理想環境において推定した減衰率を 100(%)とした場合の相対変化を示す。



(a)実験環境



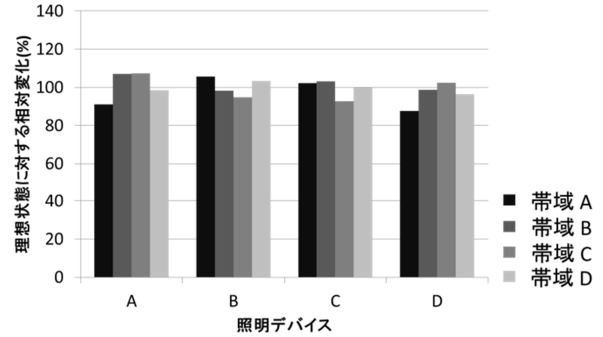
(b)推定結果

図 9 蛍光灯を点灯した場合の減衰率

Figure 9 Estimation of attenuation factor for fluorescent lighting



(a)実験環境



(b)推定結果

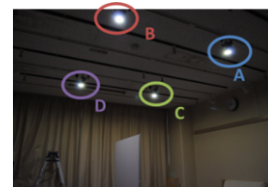
図 10 太陽光が入射する場合の減衰率推定

Figure 10 Estimation of attenuation factor for incident sunlight

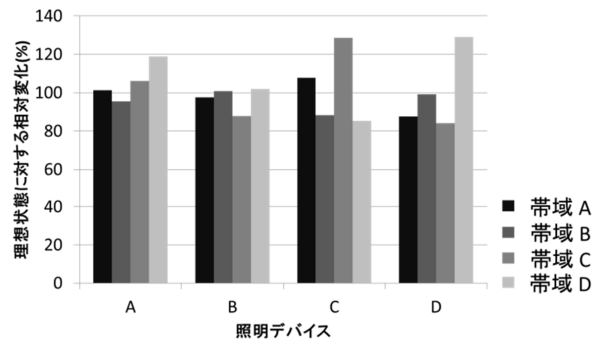
図 9(b), 図 10(b)に示す結果より、どちらの状態においても推定結果に大きな変動は見られなかった。部屋に太陽光が入射する場合の実験結果では蛍光灯の場合に比べると変動が大きい、カーテンを開けたことで、実際に減衰率が変化した影響と考えられる。以上のことから、本手法を用いることで、他の光源による影響下でも減衰率を取得できることを確認した。

3.4.3 障害物を配置した際の減衰率変化

本実験では照明 C-D 間、A-B 間のそれぞれについてが配置された場合において減衰率を推定し、障害物の配置による減衰率の変化を観測した。各状態における実験環境と実験結果を図 11, 図 12 に示す。



(a)実験環境



(b)推定結果

図 11 C-D 間についてが配置された場合の推定結果

Figure 11 Estimation by arranging a screen between C and D

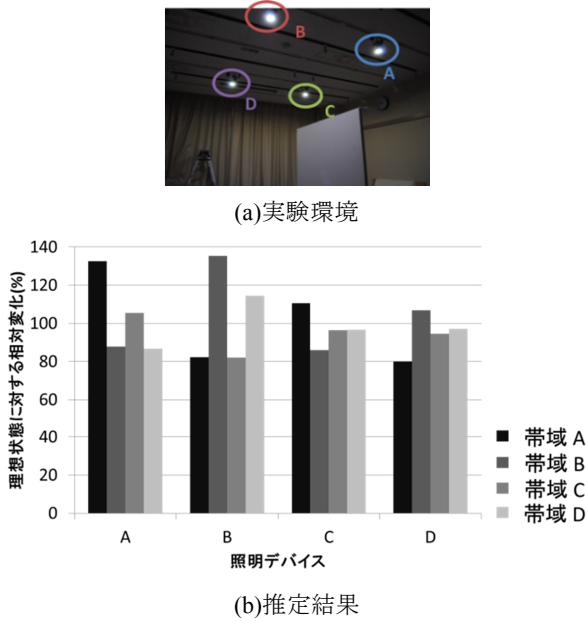


図 12 A-B 間についてが配置された場合の推定結果
 Figure 12 Estimation by arranging a screen between A and B

どちらの状態においても図 8 の理想環境に対する減衰率の変動を観測することができた。ついで越しの光源の光が遮られ自己の光は反射するため、光源と同じ帯域の値が増加し、ついで越しの光源の帯域は低下したと考えられる。以上の結果より、実空間の状態を反映した値を推定できることを確認した。

3.4.4 デューティ比を変更した場合の減衰率推定

フィルタの出力はデューティ比に依存して変動するので、3.3 節で述べた計算法により、デューティ比を変化させても得られる減衰率は原理的には変動しないことになる。ゆえに、本実験ではデューティ比を変化させた環境で減衰率を推定する。デューティ比を全て 0.3 とした場合、全て 0.9 とした場合、および各々 A:0.4, B:0.7, C:0.5, D:0.2 とした場合で減衰率を推定し、実験結果を図 13 に示す。

照明の配置は理想環境における実験と同じであるため、得られる減衰率は原理的には図 8 の理想環境における実験結果と同じ値となる。デューティ比を 0.3 とした場合はデューティ比を 0.9 とした場合に比べ、理想環境の結果に近い値を得られた。式(8)からわかるようにデューティ比を変更した際のフィルタの出力はデューティ比が 0 または 1 に近づくほど小さくなり、デューティ比が 0.9 の場合には減衰率推定に使用するフィルタの出力が小さい。ゆえに、式(9)による補正の誤差が減衰率の推定結果に与える影響が大きくなるため、精度が低下したと考えられる。また、デューティ比が 0 と 1 の状態ではフィルタの出力が 0 となるため、減衰率の推定は不可能となる。この場合、過去に取得した減衰率を用いるなどの改善が必要となる。

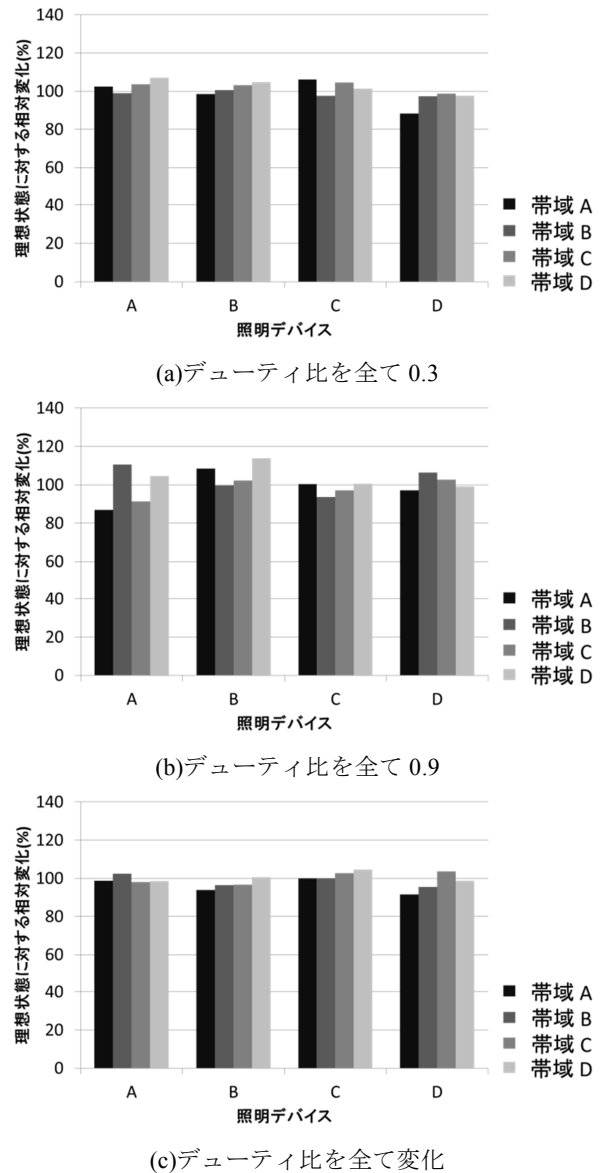


図 13 デューティ比を変更した場合の推定

Figure 13 Estimation by setting up various duty ratios

4. 照明状態の最適化手法

本章では、まず外光を考慮して照明の最適化を行う際の手法について述べ、次に外光の照度推定による照明状態の最適化を実験的に検証する。

4.1 外光を考慮した照明状態の最適化手法

照明のモデルとして用いた式(6)は外光を想定していないが、実空間で最適化を行う際には外光を考慮する必要があるため、これを考慮したモデルを考える。外光成分の照度を定数項 N として考えると、式(9)を得る。しかし、外光成分の照度は未知であるため、この値を事前に推定する必要がある。

現在各照明で収集している照度を $E(t)$ 、現在照明に設定されているデューティ比を $D(t)$ とすると、式(10)を得る。ここで $E(t), \zeta'$ は照明デバイスから得ることができ、 $D(t)$ は過去に設定した値であるため、このときの外光成分の照度

$N(t)$ を求められる。太陽光や蛍光灯などの外光は短時間で変化しないと考えられるので、ここで推定した $N(t)$ を用いて、次の状態における最適化を行う。ユーザーが制御目標として与えた照度を E_0 とすると、これを実現するためのデューティ比 $D(t+1)$ を求める式は式(11)となる。

$$E = \zeta'D + N \quad (9)$$

$$N(t) = E(t) - \zeta'D(t) \quad (10)$$

$$D(t+1) = \zeta^{-1}\{E_0 - N(t)\} \quad (11)$$

4.2 外光の推定実験

式(10)を用いて外光推定を推定する。図7と同じ配置状態で外光推定を行い、照明デバイスの出力を全て0とした状態の照度センサの実測値と比較する。照明デバイスの出力が0であるため、このとき照度センサから得られる照度は外光成分のみとなる。よって、推定した外光照度と照明出力0のときの実測値が等しければ外光推定が正しいといえる。本実験では外光として蛍光灯を利用し、デューティ比0.5のときの減衰率推定結果を用いて外光照度を推定する。このときの実験結果を表2に示す。推定値は10回推定を行った際の平均値とし、そのときの実測値に対する誤差の平均と誤差の最大値を示す。ここで7%程度の人工照明の変動を人間はまったく認識できないという報告[2]があるため、この程度の誤差は許容範囲内と考えられる。

表2 外光照度推定結果

Table 2 Estimation of external light illuminance

デバイス	実測照度	推定照度	平均誤差 (%)	最大誤差 (%)
A	241	238.1	1.45	3.73
B	206	207.6	2.41	4.46
C	278	278.6	1.67	4.25
D	217	219.6	3.59	7.73

4.3 照明状態の最適化実験

式(11)を用いて照明状態の最適化を行う。外光の無い状態で制御目標を全て600とした場合、同様に外光の無い状態でA:250,B:250,C:300,D:300とした場合、および外光のある状態で制御目標を全て600とした場合の3種類の環境を用いて実験した。各環境における最適化結果を表3に示す。最適化結果は5回の最適化を行った際の平均値とし、そのときの制御目標に対する誤差の平均と誤差の最大値を示す。

全ての環境で制御目標の周辺まで最適化を行うことができた。先に述べたように人間は7%程度の人工照明の変動をまったく認識できないという実験結果が報告されている[2]が、本手法で生じる制御誤差は7%以内に収まっているので、実用的な精度で最適化を達成できている。

表3 照明状態の最適化結果

Table 3 Optimization results of illuminated condition

(a)外光なし, 制御目標全て300

照明	制御目標	最適化結果	平均誤差 (%)	最大誤差 (%)
A	300	286.1	4.32	6.74
B	300	297.3	2.15	4.50
C	300	291.8	2.88	5.50
D	300	303.0	3.17	5.27

(b)外光なし, 制御目標 A:250,B:250,C:300,D:300

照明	制御目標	最適化結果	平均誤差 (%)	最大誤差 (%)
A	250	245.0	2.24	5.52
B	250	245.6	2.42	5.68
C	300	298.9	1.54	2.90
D	300	295.7	1.49	3.03

(c)外光あり, 制御目標全て600

照明	制御目標	最適化結果	平均誤差 (%)	最大誤差 (%)
A	600	583.6	2.74	4.30
B	600	587.4	2.10	3.23
C	600	592.6	1.23	3.31
D	600	589.1	1.81	2.52

5. おわりに

発光周波数による帯域分離を用いて、外光環境下でも即座に照明の照射経路における減衰率を推定する手法を提案した。提案手法は外光に対して頑強であり、実空間の特徴を反映した減衰率を推定できることを確認した。

さらに、この手法を用いて照明状態の最適化を行う手法を提案し、そのための外光照度の推定方法を述べた。本手法を用いることで、人間が目標照度との差を知覚できない状態まで照明状態を最適化することができた。

今後の課題として、照明のデューティ比0と1付近での減衰率推定手法の検討、利用可能な帯域以上の照明を用いる際の帯域割り当て手法の検討、自律分散的な最適化手法の検討等が挙げられる。また、本実験ではパソコンに制御目標を直接入力するという方法をとったが、実際にシステムを運用する場合、全ての照明に目標照度を設定することは現実的ではない。よって、ユーザーが直感的に照度を設定できるような手法に関しても今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 朝山絵美, 三木光範, 廣安知之, 米澤基: 自律分散制御に基づく知的照明システム, 第39回照明学会全国大会, 2006
- 2) 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.346-352 (2001).