

直感的な照明システム操作のための照度分布制御

中村 彰之^{†1} 廣安 知之^{†2} 三木 光範^{†3}
横内 久猛^{†2} 吉見 真聡^{†3}

近年、多くの人工物がネットワークに繋がれ、ネットワーク上での制御が可能である。これによりシステムは高度なものとなるが、一方でその操作は複雑かつ多様になっている。照明システムにおいても照明をネットワーク化することで複数の照明の個別制御が可能となっているが、ユーザの操作負担が課題である。そこで、照明システムにおける直感的な操作性実現のために照度分布制御に着目した User Interface を提案する。

Illuminance Distribution Control for Intuitive Operation on the Intelligent Lighting System

AKIYUKI NAKAMURA,^{†1} TOMOYUKI HIROYASU,^{†2}
MITSUNORI MIKI,^{†3} HISATAKE YOKOUCHI^{†2}
and MASATO YOSHIMI^{†3}

Recently, many types of artifacts are networked and can be controlled over the network. However, since these new artifacts become complex and diverse, it is very difficult to use these new artifacts for users with the traditional user interface. In this paper, we discussed new type of networked artifacts in the case of intelligent lighting systems. We introduced the new user interface where the illuminance distribution of lighting system is directly designed. By this operation, intuitive operation can be performed for intelligent lighting systems.

^{†1} 同志社大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Doshisha University

^{†2} 同志社大学生命科学部

Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University

^{†3} 同志社大学理工学部

Faculty of Knowledge Engineering, Doshisha University

1. はじめに

近年、ユビキタス技術が脚光を浴びており、人々の身の周りに多くのコンピュータやセンサなどのハードウェアが存在し、それらがネットワークで繋がっている¹⁾²⁾。そして多くのハードウェアをネットワーク化することで、システムの機能は向上している。しかし、このようにシステムの機能が向上するに伴い、操作は複雑かつ多様なものとなり現状と同様な User Interface (以下、UI) ではユーザの負担が増加すると考えられる。そのため、ネットワーク化したシステムに適応した操作性が今後の UI には求められている。

照明システムにおいてもネットワーク化による操作負担の増加が生じている。照明システムはネットワーク化により複数の照明を個別制御できるように進歩した³⁾。それに伴い、照明システムにおいても操作は複雑かつ多様なものとなり、従来の UI ではユーザの操作負担が大きなものとなっている。

そこで、本稿ではハードウェアのネットワーク化に適応する UI の要件について述べ、ネットワーク化した照明システムの UI の一例として照度分布制御に焦点を当てた UI を提案する。

2. ネットワーク化における UI の要件

ハードウェアをネットワーク化したシステムにおいて UI に求められる要件であるが、操作が複雑かつ多様になったシステムの UI が備えるべき性質として2つの性質が考えられる。1つ目は、求める結果とそれを得るための操作方法をユーザが感覚的に結びつけられる性質である⁴⁾。本稿ではこのような性質を「直感的な操作性」と呼び、この性質によりユーザはより軽負担で自身の求める結果を得ることができる。2つ目は、操作方法または表示をユーザの好みや使用頻度などにより振る舞いを変化させる性質である⁵⁾。本稿ではこれを「パーソナライズ機能」とし、この性質によりユーザごとに最適な UI を提供することができる。

これらの性質が示すように、重要なことはユーザの求める結果にいかに関わり易にユーザが辿り着けるかということである。ハードウェアがネットワーク化していく中で、UI はこのコンセプトを念頭に置いて設計されるべきである。

3. ネットワーク化した照明システムの UI

3.1 照明のネットワーク化

以前の照明システムは複数の照明を一括に制御することしかできず、UI も ON と OFF を切り替えるだけのスイッチで充分であった。一方、現在は複数の照明と制御装置をネットワーク化することで、複数の照明を個別に制御でき、且つ照明の放つ明るさ（光度）を自由に調節できるように進歩している³⁾。実際に本研究では図 1 に示すように、そのような照明システムを備えた実験室を構築している。



図 1 ネットワーク化した照明システムを備えた実験室

本実験室には、図 1 に示すような照明が 48 灯備わっており、それらの光度を個別に調節することが可能である。本実験室の照明システムにおけるネットワークの概要を図 2 に示す。

図 2 に示すように各々の制御装置は複数の照明と繋がっており、最大で 5 灯の照明を個別に制御可能である。このように複数の照明と制御装置をネットワーク化することにより、PC から複数の照明を個別に制御できる。この機能により多様な光環境の実現や、同一空間内の複数のユーザに対して異なる明るさを提供することが可能となる。

しかし、2 章で述べた背景と同様に、照明システムの操作対象が増えたことで、ユーザが行う操作は複雑かつ多様なものとなる。このような照明システムにおける UI として、照明の光度を個別に設定する形式の UI が考えられているが⁶⁾⁷⁾、複数の照明の光度を個別に調

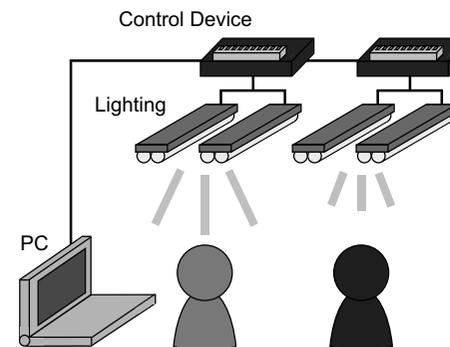


図 2 照明システムのネットワーク概要

節する操作はユーザにとって大きな負担となる。そこで、ネットワーク化した照明システムの UI は 2 章で述べた性質を備える必要がある。本稿では 2 章で述べた性質の中から直感的な操作性に着目し、照明システムにおける直感的な操作性とはどのようなものかを検討する。

3.2 直感的な操作性

直感的な操作性を実現するためには、求める結果とそれを得るための操作方法を感覚的にユーザが結びつけられる必要がある。照明システムにおけるユーザの求める結果とは明るさである。しかし、この明るさには 2 つの視点がある。それは照明が放つ光の明るさ（光度：cd）と、物体を照らす光の明るさ（照度：lx）である。つまり、照明システムにおけるユーザの求める結果とは、手元の明るさである照度の分布ということになる。それに対して、従来の照明制御 UI は照明の光度を操作するものであり、ユーザは求める照度分布を得るためにはどのように照明の光度を設定すべきかを考えなければならない。直感的な操作性実現のためには、照度分布を得るために光度を操作するのではなく、照度分布を得るために照度分布を操作する UI を開発する必要がある。そこで、本稿ではネットワーク化した照明システムにおける直感的な操作性を実現するために照度分布を操作できる UI を提案する。

4. 照度分布制御に着目した UI

本稿では、3.1 節で紹介した実験室を例に照度分布制御に着目した UI を提案する。本章では本 UI における照度分布の操作と制御について説明する。

- 照度分布の操作

本 UI では、照度分布を 3 Dimensional Computer Graphics (以下、3DCG) を用いて視覚化している。そして、3DCG で表現した照度分布をドラッグ&ドロップによって変形させる操作性を備える。

- 照度分布の制御

本 UI の内部では、ユーザが要求した照度分布を満たす各照明の光度を算出する必要がある。そこで、照度分布のシミュレートと最適化により適切な光度を算出して照度分布を制御する。

4.1 照度分布の操作

光の回折する性質などによる物理的な制約のために、ユーザが要求する照度分布は必ずしも実現できる訳ではない。本実験室においては事前調査により、複雑な照度分布が実現不可能であることが分かっている。そのため、本 UI ではユーザのできる要求を照度分布の高低差を調節する要求のみに制限している。この UI のユースケースとして、室内でプレゼンテーションする場合や消費エネルギーを削減したい場合などを想定している。本 UI の初期画面を図 3 に示す。

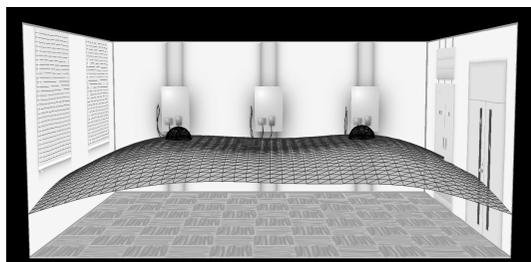


図 3 本 UI の初期画面

図 3 に示す UI は、図 1 で紹介した実験室を模している。この図 3 の実験室の中心にある網目状のオブジェクト (以下、照度分布オブジェクト) が室内の照度分布を 3DCG で表したものであり、照明を調節するためにユーザが操作する対象である。実験室の床平面の z 軸を x 軸と y 軸、床平面に垂直な軸を z 軸とすると、この照度分布オブジェクトの x 軸と y 軸が床平面における位置、 z 軸がその位置での照度を示す。この z 軸が示す照度は上方に行く程高い照度を表す。そして、照度分布オブジェクト上にある 2 つの球体が、照度分布を

操作するためにユーザがドラッグ&ドロップできる点 (以下、コントロールオブジェクト) である。このコントロールオブジェクトは視点を移動させることで任意の角度に配置することができる。

本 UI 上に表示される照度分布は、実現可能であるとシミュレートされたものである。図 3 は、室内の照度を可能な限り均一に保つようにシミュレートした結果の照度分布を表している。そして、ユーザはコントロールオブジェクトを z 軸方向にドラッグ&ドロップすることで照度分布オブジェクトを変形する。上方でドロップした場合には高さに応じて照度分布が盛り上がり、下方でドロップした場合は沈み込む。図 3 の初期状態から照度分布オブジェクトの左側を盛り上げ、右側を沈み込ませた後の UI 画面を図 4 に示す。

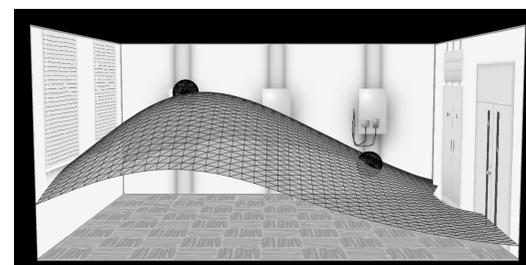


図 4 操作後の本 UI 画面

図 4 の状態は、室内の左側の照度が高く、右側の照度が低くなるように照明の光度を設定していることを表す。このように、本 UI ではユーザの求める結果である照度分布を操作することが可能である。

4.2 照度分布の制御

本 UI では、ユーザから要求された照度分布を実現するために個々の照明の光度を算出する。そのためには、まずどのような光度を設定した際にはどのような照度分布が実現されるのかをシミュレートできる必要がある。そこで本 UI ではそのシミュレートのために、光度から理論的に照度を算出する逐点法を用いる⁸⁾⁹⁾。逐点法によって算出される水平面照度 Eh を式 (1) に示す。

$$Eh = \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}} \cdot En \quad (1)$$

$$En = \frac{l\theta}{2} \left(\frac{m}{h^2 + d^2 + m^2} + \frac{1}{\sqrt{h^2 + d^2}} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \right)$$

E_n : normal illuminance

$l\theta$: θ directional luminance per unit length

m : measurement of lighting

h : height of lighting

d : horizontal distance between right under lighting and measurement point

式 (1) により求まるのは、ある一つの照明によってある測定点に与えられる照度である。照明が複数ある場合は、各々の照明により与えられる照度を足し合わせることで、任意の測定点の照度を算出できる。式 (1) における m , h , d はシミュレートする照明と測定点を決定すると一意に定まる定数であるため、照度 Eh は光度 $l\theta$ に依存する。そしてこの照度分布制御は、ユーザが提示する照度分布と逐点法によってシミュレートした照度分布の差異を最小にする光度を算出する最適化問題として考えられ、目的関数 f は式 (2) のように定式化できる。

$$\min f(L\theta) = (Eh_1(L\theta) - Eh_1^0)^2 + (Eh_2(L\theta) - Eh_2^0)^2 + \dots + (Eh_n(L\theta) - Eh_n^0)^2 \quad (2)$$

subject to $L\theta = \{ l\theta \mid 0 < l\theta < \text{maximum luminance} \}$

Eh_n^0 : target illuminance

$L\theta$: a set of the luminance in all lightings

$l\theta$: the luminance of certain lightings

n : number of measurement point

式 (2) の $Eh_n(L\theta)$ は全照明の光度 $L\theta$ による測定点 n の照度であり、 Eh_n^0 は測定点 n の目標照度である。式 (2) に示すように、目的関数はシミュレートによる照度と目標照度の差異の 2 乗の総和で表され、この関数による評価値を最小にする光度が最適解となる。そして、この目的関数は単峰性関数であるため、最急降下法により解くことができる¹⁰⁾¹¹⁾。最急降下法を用いた照度分布制御のフローチャートを図 5 に示す。

図 5 に示すように、最急降下法では目的関数の勾配情報を基にその関数の最小値を探索する。

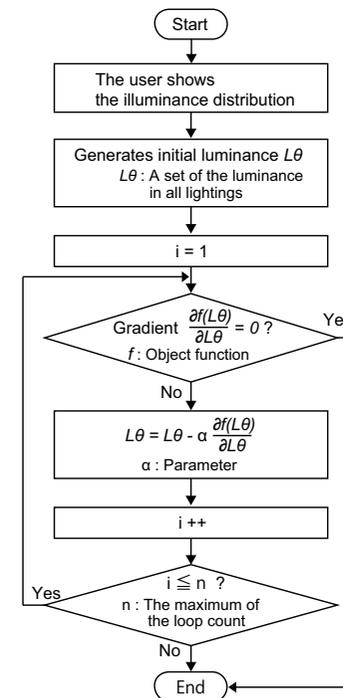


図 5 照度分布制御のフローチャート

5. 数値実験

4章で述べた照度分布制御アルゴリズムの数値実験結果を本章で述べる。本実験は図 1 に示した実験室を想定して行った。ただし、この実験室の 48 灯の照明は 2 灯 1 組で構成されている。そこで本実験ではその 1 組を 1 灯の照明と見立て、照明数を 24 灯として数値実験を行った。この光度 $l\theta$ は $0 \leq l\theta \leq 3633$ である。また、この実験室は広さ 8.26m×6.15m、高さ 2.75m である。そして照度の測定点は 1681 点とした。この条件の下、図 5 のフローチャートに従って、式 (2) の目的関数を最適化した際の評価値の推移を図 6 に示す。

図 6 の横軸は評価回数であり、縦軸は評価値を示している。図 6 に示すように、最急降下法により評価値が収束しており、最適化できていることが分かる。図 7 に目標とした照度分布と最急降下法により最適化させた照度分布を示す。

図 7 の (a) と (b) の図の横軸と縦軸は測定点の座標を表し、高さはその点における照

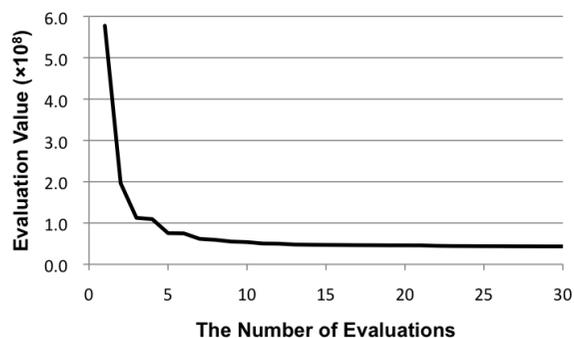


図 6 最急降下法による評価値の推移

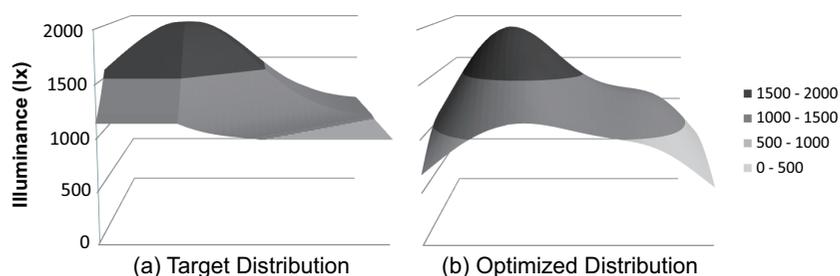


図 7 照度分布の比較

度値を表す。図 7 に示すように、(a) と (b) の照度分布に差異があることが確認できる。

評価値が 0 にならない、また照度分布に差異がある原因として、 θ の上限、照明の配光角、そして光の回折する性質などの物理的な制約により実現できる照度分布に限りがあることが考えられる。

6. まとめ

本稿では、ハードウェアのネットワーク化による機能向上に伴い、システムの操作は複雑かつ多様になることを述べた。そして、そのようなシステムにおける UI に必要な性質として「直感的な操作性」と「パーソナライズ機能」という 2 つの性質があり、ユーザの求める結果にいかにか容易にユーザが辿り着けるかということが重要であると説明した。

またこのような背景と同様に、照明システムにおいてもネットワーク化により複数の照明の個別制御が可能となったが、従来の UI ではユーザの操作負担が大きという現状を述べた。そこで、本稿では照明システムにおける直感的な操作性を考慮した UI として、照度分

布を制御する UI を提案した。

照度分布を制御するためには、ユーザが要求した照度分布を満たす各照明の光度を算出する必要があった。そして、その算出は逐点法による照度分布シミュレートと最急降下法による最適化で実現できることを示した。また、照明や光の物理的な制限により、実現できる照度分布には限界があることを述べた。今後の課題として、ユーザが要求する照度分布を完璧に再現できる訳ではないが、照度分布においてユーザが重視する要素を検討し、ユーザの満足度がより高まる照度分布を提供できるように改良する。

参考文献

- 1) David Ley, Becta : Ubiquitous computing, Emerging Technologies for Learning, Vol.2, 2007.
- 2) Teruyasu Murakami : Establishing the Ubiquitous Network Environment in Japan, NRI Papers, No.66, 2003.
- 3) Vipul Singhvi, Andreas Krause, Carlos Guestrin, James H. Garrett Jr, H. Scott Matthews : Intelligent light control using sensor networks, Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, pp.218-229, 2005.
- 4) Steffen Higel, Tony O'Donnell, Dave Lewis, Vincent Wade : Towards an Intuitive Interface for Tailored Service Compositions, Lecture Notes in Computer Science, Vol.2893, pp.266-273, 2003.
- 5) Daniel S. Weld, Corin Anderson, Pedro Domingos, Oren Etzioni, Krzysztof Gajos, Tessa Lau, Steve Wolfman : Automatically Personalizing User Interfaces, IJCAI 03, 2003.
- 6) Barry Brumitt, JJ Cadiz : "Let There Be Light" Examining Interfaces for Homes of the Future, Proceedings of Interact '01, 2001.
- 7) Krzysztof Gajos, Daniel S. Weld : SUPPLE -Automatically Generating User Interfaces-, Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces, 2004.
- 8) Masayoshi Nagata : Monte Carlo Simulation of Illuminance Distribution in a Cubic Interior with Interreflection, Journal of light and visual environment, vol.11(2), pp.85-92, 1987.
- 9) Imari Sato, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi : Illumination distribution from brightness in shadows: Adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions, The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on, Computer Vision, vol.2, pp.875-882, 1999.
- 10) Raphael T.Haftka, Zafer Gürdal : Elements of Structural Optimization, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- 11) Anders Ericsson, Kalle Åström : Proc. British Machine Vision Conference, Vol.2, pp.93-102, 2003.