

NAIST-IS-MT1651068

修士論文

自律分散型光環境制御システムの開発と制御

高本 雄太

2018 年 2 月 19 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

高本 雄太

審査委員：

杉本 謙二 教授	（主指導教員）
安本 慶一 教授	（副指導教員）
松原 崇充 准教授	（副指導教員）
南 裕樹 客員准教授	（副指導教員）
小蔵 正輝 助教	（副指導教員）
小林 泰介 助教	（副指導教員）

自律分散型光環境制御システムの開発と制御*

高本 雄太

内容梗概

快適な光環境の実現や省エネルギー化の推進において、照明システムの高度化は重要な課題である。しかし、従来の照明システムでは、照明の点灯パターンが電気配線やスイッチなどで固定されていたり、カーテンやブラインドといった遮光装置においては開閉操作の煩雑さから終日全閉とされていることが多く、人や環境の変化に応じて柔軟に照度提供を行うことは困難であった。この問題に対し、これまでいくつかの先行研究において、「複数の照明機器を個別に制御する」というアイデアに基づいたスマート照明システムが提案されてきた。しかしながら、点灯パターン決定に大掛かりな最適化アルゴリズムが必要であったり、照明光と自然光の組み合わせが考慮されていないといった課題があった。

本論文では、照明光と自然光を併用しつつ、任意の場所に適切な照度を提供可能な自律分散型光環境制御システムを提案する。提案システムは、複数の照明と遮光/透光を制御可能な複数の窓から構成される。このため、照明の点灯パターンと窓の遮光パターンを適切に決定することで、照度分布を柔軟に制御することができる。各照明と窓には分散制御器が搭載されており、それらはネットワークによって結ばれている。各分散制御器は互いに情報交換をしながら、適切な点灯/遮光パターンを決定する。本論文では、まず、提案システムの点灯/遮光パターン制御問題の定式化を行った。つぎに、制御問題の解として、与えられた目標照度分布をもとに適切な点灯/遮光パターンを求める分散制御アルゴリズムを提案した。最後に、提案システムの有効性を確認するために数値シミュレーションと実験を行った。

キーワード

分散制御, 照明設計, 自然光利用, プログラマブルアーキテクチャ

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651068, 2018 年 2 月 19 日.

Development and control of distributed lighting control system*

Yuta Takamoto

Abstract

The improvement of lighting system is a key factor in implementing comfortable lighting environments and promoting energy saving. However, conventional room lighting system have little variety in their illuminance distribution patterns because of fixed wiring and switches. Furthermore, shading system such as curtains or blinds are often left closed through the day due to troublesomeness or difficulty in their operation. Thus, such systems cannot easily provide proper illuminance distribution that correspond to environmental changes.

This thesis proposes a distributed lighting control system that enables provision of a desired illuminance distribution. The proposed system is composed of multiple lights, and switchable electric shades that can change their transparency independently. Distributed controllers are embedded in all lights and shades, and they communicate to determine the proper lighting and shading patterns needed to realize a desired illuminance distribution. In this thesis, we first formulated a design problem of distributed controllers which provide proper lighting and shading patterns such that the actual illuminance distribution is similar to a desired one. Then, we proposed an autonomous distributed algorithm as a solution to the design problem. Finally, we verified the effectiveness of the proposed algorithm via simulations and real-world experiments with a lighting control system composed of LED lights and electric shades.

Keywords:

Distributed control, Lighting design, Natural light usage, Programmable architecture

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651068, February 19, 2018.

目次

図目次	iv
第 1 章 はじめに	1
第 2 章 自律分散型光環境制御システム	4
2.1 自律分散型光環境制御システムの概要	4
2.2 実験装置の構成	8
第 3 章 点灯/遮光パターン制御問題	12
3.1 提案システムのモデル	12
3.2 分散制御器	15
3.3 制御器設計問題	19
第 4 章 適光適所と自然光の優先利用を達成する制御器	22
4.1 提案手法	22
4.2 シミュレーションと実験による提案手法の検証	29
第 5 章 自然光の選択的取り込みを行う制御器	34
5.1 提案手法	34
5.2 シミュレーションによる提案手法の検証	37
第 6 章 おわりに	39
謝辞	41
参考文献	42

図目次

1	自律分散型光環境制御システム	5
2	照度分布と点灯/遮光パターンの対応関係	6
3	実験装置の構成	8
4	LED 照明ユニットの取付図	9
5	電子シェードの取付図	9
6	電子シェードの動作	10
7	実験装置のモジュール構成	11
8	LED 駆動回路と電子シェード駆動回路	11
9	照明/窓の位置と投影点の定義	12
10	目標照度分布 ϕ	13
11	自然光制限情報 ρ	13
12	通信路 $G = (v, \epsilon)$	14
13	通信路 $G_{SL} = (v_{SL}, \epsilon_{SL})$	14
14	分散制御器 K_S^i	15
15	分散制御器 K_L^i	17
16	評価関数 J_1	20
17	評価関数 J_2	20
18	評価関数 J_3	21
19	制御器 K_{Ld}^i の動作	25
20	窓の分散制御器 K_S^i の動作	27
21	照明の分散制御器 K_L^i の動作	28
22	照度場実験の様子	29
23	問題 1-実験条件	30
24	提案手法によるシミュレーション, 実験結果	31
25	提案手法との比較実験結果	33
26	制御器 K_{Sq+}^i, K_{Sz+}^i	36

27	採光制限情報による窓間ネットワークの入切	36
28	問題 2-シミュレーション条件	37
29	提案手法によるシミュレーション結果	38

第 1 章 はじめに

快適な光環境の実現や省エネルギー化の推進において照明システムの高度化は重要な課題である [1, 2, 3]. しかし, 従来の照明システムでは, 照明の点灯パターンが電気配線やスイッチなどで固定されていたり, カーテンやブラインドといった遮光装置では, 昼光利用の可能性を併せ持つにも関わらず, 時間経過にあわせた開閉操作の煩雑さから終日全閉とされていることが多い [4]. そのため, 従来の照明システムでは, 環境の変化に応じて適切な照度分布を提供することが困難であった.

これに対し, 目標照度分布に合わせて複数の照明機器を個別に制御する照明システム [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] が提案されている. また, 自然光の利用に関連して, 複数の液晶スクリーンの透過率を個別に制御し自然光を選択的に採光する遮光システム [13, 14, 15] が提案されており, その手法の有効性と建築要素としての応用可能性が報告されている. これらの先行研究で取り上げられた, 「複数の照明機器を個別に制御する」というアイデアは, 適光適所 (必要な箇所に必要な分だけ照度提供を行うこと) という機能を実現しうるものであり, 照明システムの省エネルギー化やデザイン性向上が期待できる手法といえる. しかし, 先行研究にはいくつかの課題がある. たとえば,

- 集中型制御であるため, 全体を統括して制御する要素が必要となり, スケーラビリティが得られにくい (文献 [5, 10, 13, 14])
- フィードバック制御による調光を行うため, 照度センサが必要となる (文献 [5, 11, 12])
- 照明光の制御と自然光の制御が別々に考えられており, 「照明の点灯による光の加算」と「窓の遮光による光の減算」を統一的に行う試みがなされていない

といった課題が挙げられる.

そこで本論文では, 新たに照明光と自然光を併用可能な照明システムの構築を検討する. 提案システムは, 複数の照明と遮光/透光を制御可能な複数の窓から構成される. このため, 照明の点灯パターンと窓の遮光パターンを適切に決定することで, 照度分布を柔軟に制御することができる. このとき, 所望の照度分布を得るた

めには、適切な点灯パターンと遮光パターンを出力する制御手法の検討が必要となる。考えられるアプローチとして、組合せ最適化による点灯/遮光パターンの決定という方法がまず挙げられる。しかし、この手法では、全体を統括して制御する要素が必要になるため、制御アルゴリズムが複雑になることが予想される。実際、照明機器数が増えるに従って計算量が急激に増大するため、最適化問題を解くことは困難である。（たとえば、16 個の照明と 16 個の窓の点灯/遮光パターンは、400 億通りを超える。）

一方、文献 [6] で提案されている分散型 LED 照明システムでは、集中型制御器を用いることなく、照明間をネットワークで結び各照明が互いに情報交換を行うことで点灯パターンを自律的に決定する手法が提案されており、その有用性が確認されている。よって本論文においても、照明機器を自律分散的に制御することを目標とするが、提案システムは照明だけでなく、入射方向や光量に変化する自然光も適切に配光する必要があるため、先行研究の手法をそのまま適用することは難しい。そこで本論文では、自然光と照明光を適切に組み合わせることが可能な分散制御アルゴリズムを新たに検討する。

本論文では、まず、目標となる照度分布が任意に与えられたとき、その目標照度分布と実際に照明システムが出力する照度分布がほぼ等しくなるように点灯/遮光パターンを決定する制御問題を定式化する。そして、その問題への解として、照明と窓の分散制御器を提案する。さらに発展課題として、ユーザが指定した領域への自然光入射を制限する制御問題を定式化し、その問題への解として、自然光の選択的取り込みを達成する窓の分散制御器を提案する。最後に、提案手法の有効性を確認するために、数値シミュレーションおよび実験による検証を行う。

本論文の貢献について、以下にあげる 3 つの点を強調しておく。第 1 に、複数の照明と窓から構成される照明システムを提案し、制御問題を定式化した。これは照明工学や建築環境学で扱われる照明設計の分野にシステム制御の知見を導入する新しい試みである。特に、照明システムに自然光を積極的かつ選択的に取り込むという試みは、筆者の知る限り、これまでに組み込まれていない。そのため、今までにない照明空間のデザイン原理の発展に貢献することが期待できる。第 2 に、適切な点灯/遮光パターンを決定するために、分散制御器とそれらを結ぶネットワーク構造を提案した。このアプローチは、照明システムのスケーラビリティや耐故障性の観

点から優れている。第 3 に、ミニチュアスケールの照度場実験装置を製作し、実験および数値シミュレーションによる検証を行った。これにより、提案システムと制御手法の有効性を確認した。

本論文の構成は、以下のとおりである。第 2 章では、提案システムの概要と、製作したミニチュアスケールの照度場実験装置について説明する。第 3 章では、提案システムにおける各種記号の定義を行い、点灯/遮光パターン制御問題を定式化する。第 4 章では、適光適所と自然光の優先利用を達成する分散制御アルゴリズムを提案する。そして、数値シミュレーションおよび照度場実験によって提案手法の有用性を確認する。第 5 章では、適光適所と自然光の優先利用に加え、自然光の選択的取り込みを達成する分散制御アルゴリズムを提案する。そして、数値シミュレーションによって提案手法の有用性を確認する。最後に、第 6 章で本論文をまとめる。

[記法]

$\mathbb{R}$, $\mathbb{N}$, $\emptyset$ はそれぞれ実数の集合, 自然数の集合, 空集合を表す。有限集合 A を用いて表される $|A|$ は, 有限集合 A の要素数を表す。また, ベクトル $\mathbf{x} := (x_1, x_2, \dots, x_n)$ が与えられたとき, その 2 ノルムとは, $\|\mathbf{x}\|_2 := \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$ を表す。また, ベクトル $\mathbf{x}$ の 0 ノルムとは, $\|\mathbf{x}\|_0 := \sum_{k=1}^n \delta(x_k)$ を表す。ただし,

$$\delta(a) := \begin{cases} 1 & (a \neq 0) \\ 0 & (a = 0) \end{cases}$$

であるとする。

第 2 章 自律分散型光環境制御システム

本章では、まず、複数の照明と遮光/透光を制御可能な複数の窓から構成される、自律分散型光環境制御システムを提案する。つぎに、製作した実験装置の構成について説明を行う。

2.1 自律分散型光環境制御システムの概要

本論文では、図 1 に示すシステムを提案する。このシステムは複数の照明と遮光/透光を制御可能な複数の窓から構成される。すべての照明と窓には、分散制御器が組み込まれており、それらはネットワークで結ばれている。このとき、「各照明と窓が互いに情報交換しながら、適切に点灯/遮光パターンを決定する」というアイデアに基づいて、照明と窓の分散制御手法を提案する。以下に提案システムの特徴を述べる。

(1) 個別制御が可能な照明・採光機器

提案システムは、すべての照明と窓が独立した制御器をもっており、個別に点灯/消灯または遮光/透光が制御可能である。そのため、人や環境の変化に応じて、柔軟に照度分布を変更できる。その他の利点として、不必要な箇所の照明を消灯することで省エネ対策になる、システムの耐故障性を高くできる、などが考えられる。

(2) 照明光と自然光の積極的併用

提案システムは、照明による明るさ提供だけでなく、自然光が取り込める箇所については積極的に自然光による明るさ提供を行う。このため、照明点灯数の削減による省エネルギー効果が期待できる。また、照明光と自然光を組み合わせることにより、これまでにない意匠性の高い照明空間が創造されることも期待できる。

(3) 自律分散制御

提案システムにおいて、目標照度分布に近い出力照度分布を得るためには、

適切な点灯/遮光パターンを決定する必要がある．本論文では，すべての照明と窓に分散制御器を搭載し，それらをネットワークで結ぶというアプローチをとる．これにより，各照明と窓は，互いに情報交換しながら自律分散的に適切な点灯/遮光パターンを決定する．

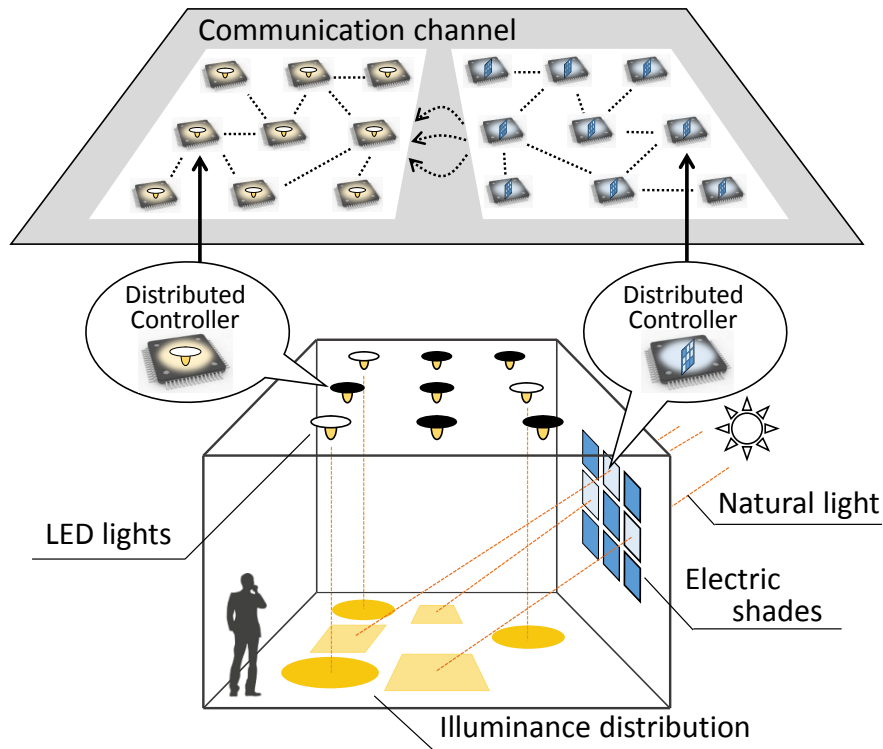


図 1: 自律分散型光環境制御システム

照度分布と点灯/遮光パターンの対応関係のイメージ図を図2に示す。提案システムにおいて、目標とする照度分布は事前に与えられるものとする。まず、各窓に搭載された分散制御器は、目標照度分布に従って遮光モードもしくは透光モードを選択する。ここで、窓が遮光モードを選択すれば、自然光の取り込みは行われず、逆に透光モードを選択すれば、自然光の取り込みが行われ床面に自然光照度分布が生成される。同様に、各照明に搭載された分散制御器は、目標照度分布に従って点灯モードもしくは消灯モードを選択する。照明が点灯モードを選択すれば、床面に照明光照度分布が生成され、逆に消灯モードを選択すれば、照度提供は行われない。すべての点灯/遮光パターンが得られた後、自然光照度分布と照明光照度分布を重畳すると、実際の出力照度分布が得られる。

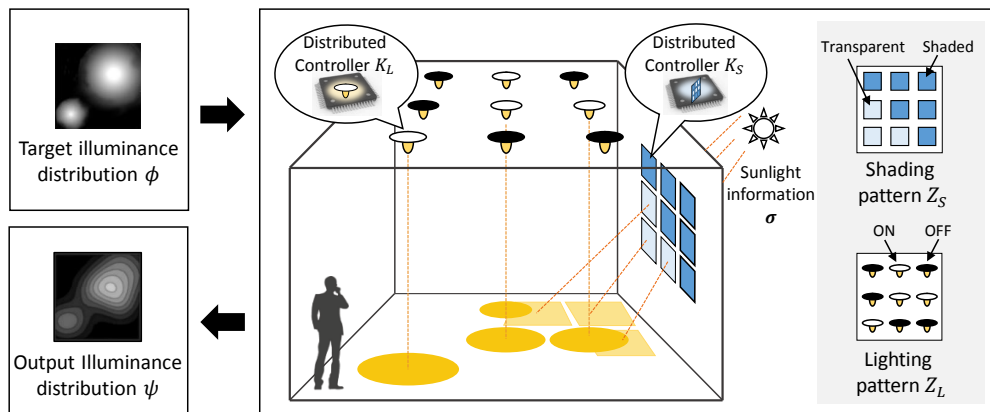


図2: 照度分布と点灯/遮光パターンの対応関係

提案システムにおいて所望の出力照度分布を得るためには、適切な点灯/遮光パターンを出力する分散制御器を設計する必要がある。ここで、分散制御器の設計指針として、つぎの3つの仕様を定める。

(i) 適光適所

目標照度分布と出力照度分布を近くする。具体的には、目標照度が高い領域では、窓の透過または照明の点灯による照度提供を行い、目標照度が低い領域では、窓の遮光や照明の消灯により照度提供を控える。

(ii) 自然光の優先利用

自然光が利用できる箇所では自然光を優先的に利用し、自然光が利用できない箇所や照度が不足している箇所については照明光による照度補完を行う。

(iii) 自然光の選択的取り込み

文献 [16](JIS Z 9125, 4.7, 2007) によると，“昼光によって視作業に必要な光のすべて，又はその一部を供給してもよい．”とされる一方，“作業域において窓面からのグレア（不快なまぶしさ）を減らすために，ブラインドや日よけなどの遮へい物を用いなければならない．”と記されている．つまり，自然光による照度提供が適当でない領域（たとえば，事務机といった執務スペース）では，適宜，自然光の入射を制限できなければならない．このため，自然光を選択的に取り込む制御手法の検討が必要となる．

よって本論文では，上記の仕様 (i)， (ii)， (iii) を満たす分散制御器の設計を目指す．

2.2 実験装置の構成

製作した照度場実験装置の外観を図 3 に示す．この実験装置は，床面積で約 $13[\text{m}^2]$ の広さをもつ部屋を，1/6 スケールで縮尺再現したものに相当する．装置外枠の寸法は，幅 600[mm]，高さ 600[mm]，奥行 600[mm] となっており，床から 480[mm] の高さのところに LED 照明ユニットを取り付けている．また，使用した機材の諸元を表 1 に示す．

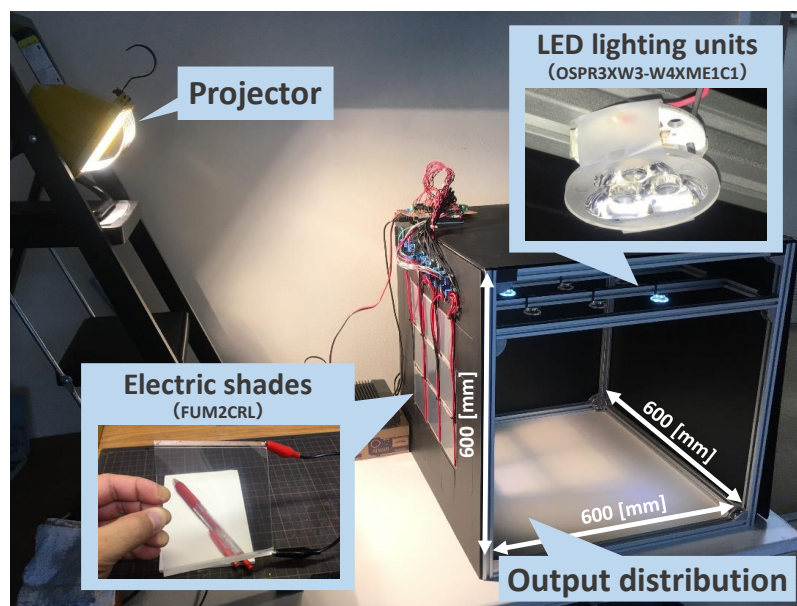


図 3: 実験装置の構成

表 1: 使用機材の諸元

Item	Parameter	Spec
LED lighting unit (OSPR3XW3-W4XME1C1)	Luminance [lm]	300
	Irradiation angle [°]	120
	Power consumption [W]	4.2
Electric shade (FUM2CRL)	Transmittance	ON : 5 [%]
		OFF : 74 [%]
	Power consumption [W/m^2]	2.5
Projector (CHP500)	Luminance [lm]	0-10000

図 4 は，装置を正面下方から撮影した写真である．9 個の LED 照明ユニット（OSPR3XW3-W4XME1C1E）を 150[mm] 間隔で格子状（3 行 3 列）に配置している．窓には電子シェード（日本板硝子ウムプロダクツ社製 FUM2CRL）を用いる．図 5 に示すように，100[mm] 四方の電子シェード 9 枚を格子状（3 行 3 列）に配置している．電子シェードとは，液晶が塗布された 2 枚の透明電極に電圧を印加することで，図 6 (a), (b) のように遮光/透光を切り替えることができるフィルムである．なお，投光器を点灯した状態で，電子シェードの遮光/透光を切り替えると，図 6 (c), (d) のように実験装置床面に陰影を生成することができる．補足であるが，電子シェードは電界駆動型の素子であり，フィルムにはほとんど電流が流れないため，消費電力が非常に小さいという特徴がある．

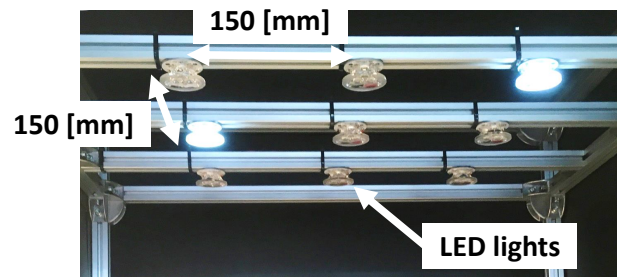


図 4: LED 照明ユニットの取付図

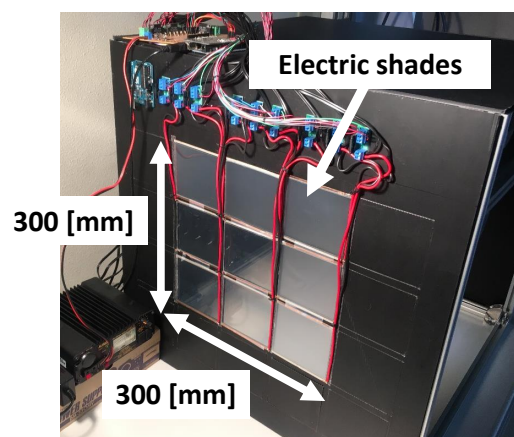


図 5: 電子シェードの取付図

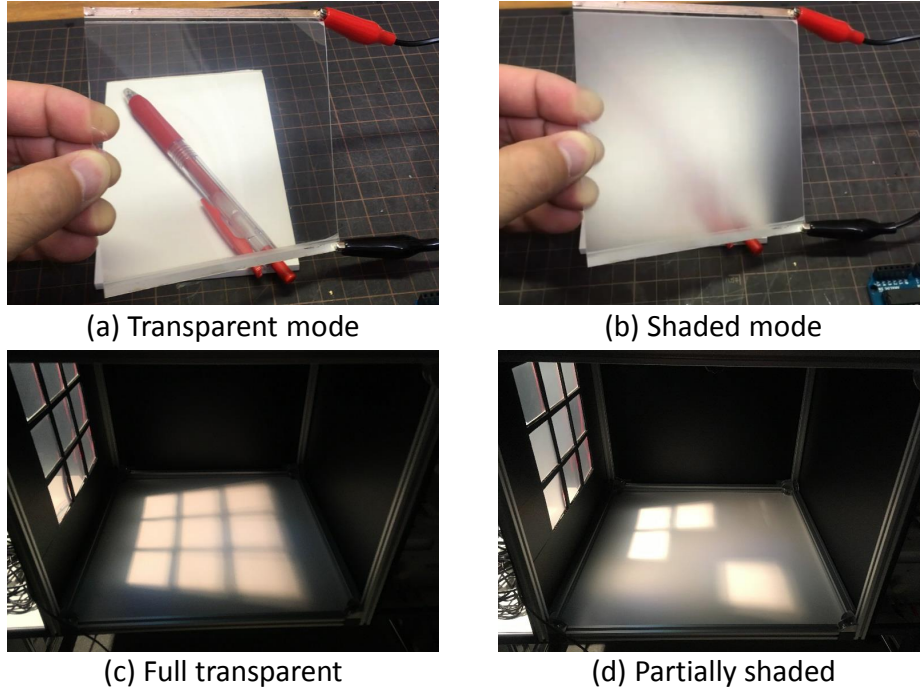


図 6: 電子シェードの動作

なお，提案システムの実装段階においては，各照明機器へ制御器を実際に搭載することを考える必要がある．しかし，本論文では，あくまで制御手法の有効性の確認に重点をおくため，点灯/遮光パターン決定には，Matlab 上で動作する提案システムの分散制御プログラムを使用する．求めた点灯/遮光パターンは，USB 経由で実験装置内の LED 駆動回路と電子シェード駆動回路に伝達される．ここで，照明の点灯/消灯，および窓の遮光/透光を制御する実験装置のモジュール構成を図 7 に示す．また，製作した LED 駆動回路と電子シェード駆動回路を図 8 に示す．まず，MATLAB 上で動作する分散制御プログラムによって得られた点灯/遮光パターンは，Arduino と呼ばれるマイコンに渡される．このとき，Arduino 側から LED 駆動回路へ信号 $z_L^i = 1$ が伝達された場合は LED が点灯し，信号 $z_L^i = 0$ の場合は消灯する．同様に，Arduino 側から電子シェード駆動回路へ信号 $z_S^i = 1$ が伝達された場合は電子シェードは透光モードとなり，信号 $z_S^i = 0$ の場合は遮光モードとなる．

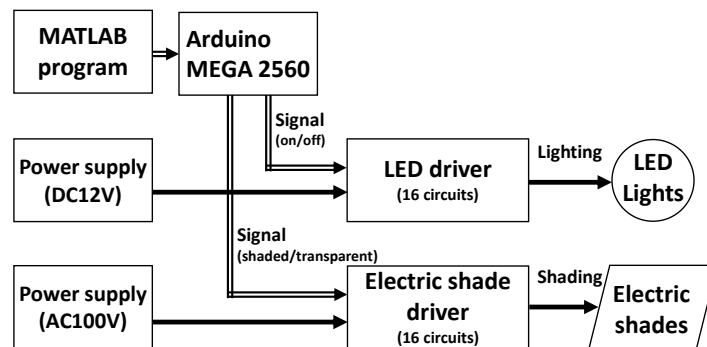


図 7: 実験装置のモジュール構成

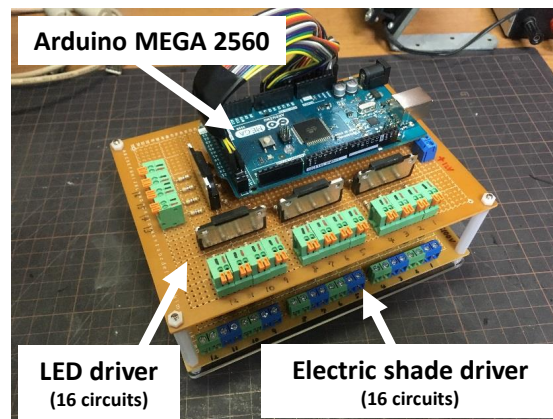


図 8: LED 駆動回路と電子シェード駆動回路

実験では，自然光の入射を再現するために，トライアック調光器を接続したハロゲン投光器 (Caster 社製 500W ハロゲンライト CHP500) を設置する．実験装置の床面に生成される出力照度分布は，照度計 (CEM 社製 デジタル照度計 DT-1309) を用いて測定する．その際，実験装置床面を 10×10 の格子に区切り，各格子点における照度 (単位: lux) を測定する．また実験を行う前に，窓 1 つあたりの出力照度が基準値 (単一照明の直下照度) と等しくなるように投光器を調光しておく．測定した照度は基準値で正規化した後， $[0, 1]$ の階調値で表される照度分布図に整理し，評価を行う．

第 3 章 点灯/遮光パターン制御問題

本章では，まず，提案システムのモデルを記述する．つぎに，窓と照明に搭載する分散制御器の一般形を示す．最後に，2章で述べた (i) 適光適所，(ii) 自然光の優先利用，(iii) 自然光の選択的取り込みの各仕様に対応した制御器設計問題について説明する．

3.1 提案システムのモデル

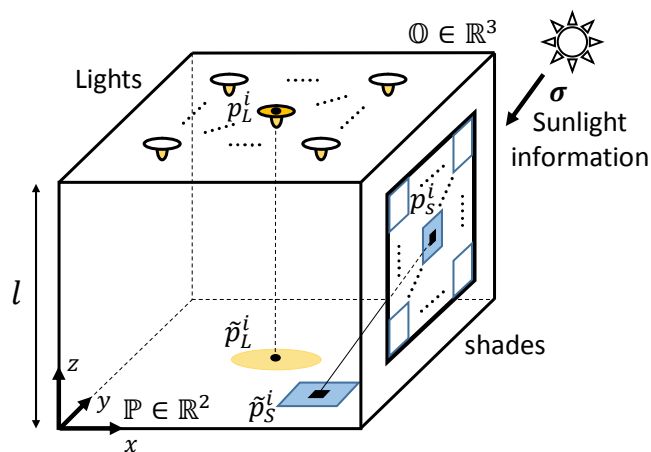


図 9: 照明/窓の位置と投影点の定義

図 9 のように， n 個の照明と m 個の窓が 3 次元有界領域 $\mathbb{O} \in \mathbb{R}^3$ に設置されているとする．(天井と壁面に相当する) このとき，照明の位置を $p_L^i \in \mathbb{O}$ ，窓の位置を $p_S^i \in \mathbb{O}$ と定めておく．また，2 次元有界領域 $\mathbb{P} \in \mathbb{R}^2$ を定め，その法線ベクトルを $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^3$ とする．(床面に相当する) ここで，点 p_L^i を床面に向かって鉛直に投影した点を $\tilde{p}_L^i \in \mathbb{P}$ とする．同様に，点 p_S^i を入射光情報 $\sigma \in \mathbb{R}^3$ に沿って床面に投影した点を $\tilde{p}_S^i$ とする．ここで，各照明機器の投影点はつぎのようにして求める．まず，照明の投影点 $\tilde{p}_L^i$ については，単純に取り付け高さ l だけオフセットすればよいので，

$$\tilde{p}_L^i = p_L^i - [0, 0, l]^\top \quad (1)$$

のように求めることができる．また，窓の投影点 $\tilde{p}_S^i$ については，ベクトル σ に

沿って、点 p_S^i を平面 $\mathbb{P}$ に投影することで、

$$\tilde{p}_S^i = p_S^i - \frac{p_S^i \cdot \mathbf{n}}{\sigma \cdot \mathbf{n}} \sigma \quad (2)$$

のように求めることができる。

提案システムにおいて、目標照度分布は事前に与えられるものとし、 $\phi: \mathbb{P} \rightarrow [0, 1]$ と表す。このとき、ある点 $p \in \mathbb{P}$ における照度は、 $\phi(p)$ で表すことができる。目標照度分布 ϕ において、白色で描かれている領域は照度の需要度が高いことを示し、黒色で描かれている領域は照度の需要度が低いことを示す。また、自然光制限情報 $\rho: \mathbb{P} \rightarrow \{0, 1\}$ を設定しておく。ある点 $p \in \mathbb{P}$ において、 $\rho(p) = 1$ であるとき、点 p において自然光の取り込みが行われ得ることを示す。一方、 $\rho(p) = 0$ である場合、点 p において自然光の取り込みが制限されていることを示す。

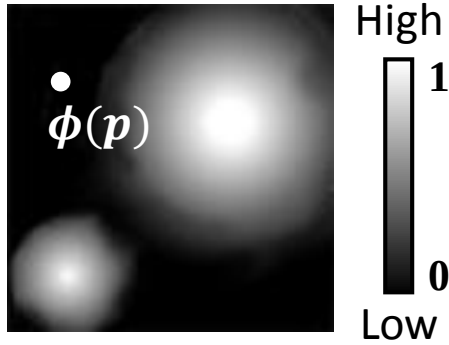


図 10: 目標照度分布 ϕ

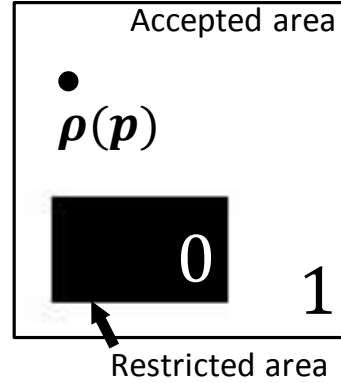


図 11: 自然光制限情報 ρ

分散制御器 K_L^i , K_S^i は、すべての照明と窓に搭載されているものとし、それぞれ有向グラフ $G_L = (v_L, \epsilon_L)$, $G_S = (v_S, \epsilon_S)$, $G_{SL} = (v_{SL}, \epsilon_{SL})$ で結ばれている。ここで、 v , ϵ はそれぞれグラフの頂点と辺を示している。ただし、矢印の向きに情報が送信されると考え、照明 $i \in v_L$ に情報を送信する照明の集合を $N_L^i := \{j \in v_L \mid (j, i) \in \epsilon_L\}$ とおく。たとえば、図 12 の場合、 $N_L^1 = \emptyset$, $N_L^2 = \{1\}$, $N_L^3 = \{1, 2\}$, $N_L^4 = \{2, 3\}$, $N_L^5 = \{3, 4\}$ などである。同様に $N_S^i := \{j \in v_S \mid (j, i) \in \epsilon_S\}$ と、 $N_{SL}^i := \{j \in v_{SL} \mid (j, i) \in \epsilon_{SL}, \|\tilde{p}_L^i - \tilde{p}_S^i\| < r_{SL}\}$ を定義しておく。ここで G_L , G_S はそれぞれ、照明間、窓間を結ぶネットワーク構造であり、 G_{SL} は窓と照明間を結

ぶネットワーク構造である．また，定数 r_{SL} は，窓と照明間を結ぶネットワーク G_{SL} を構築する際の最大通信距離とする．たとえば図 13 のように， $i = 4$ 番目の照明は，半径 r_{SL} 内の窓とネットワークを接続するので， $N_{SL}^4 = \{2, 3, 5, 6\}$ となる．

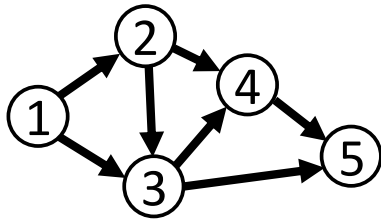


図 12: 通信路 $G = (v, \epsilon)$

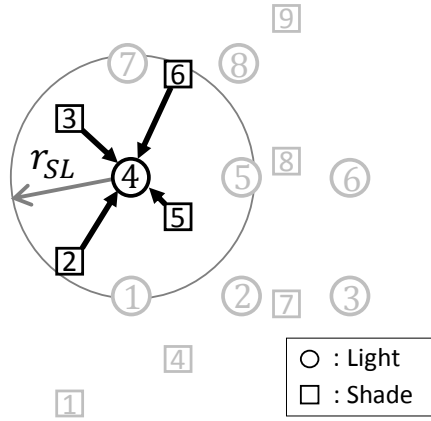


図 13: 通信路 $G_{SL} = (v_{SL}, \epsilon_{SL})$

3.2 分散制御器

窓の分散制御器 $K_S = (K_S^1, K_S^2, \dots, K_S^m)$

窓 i には図 14 に示すような分散制御器 K_S^i が搭載されており，各窓が互いに情報伝達を行うことで，遮光/透光モードを決定する．分散制御器 K_S^i は，目標照度分布 ϕ ，入射光情報 σ ，近傍の情報 y_S^j を入力とし，窓の遮光/透光モード z_S^i と伝達する情報 y_S^i を出力する．

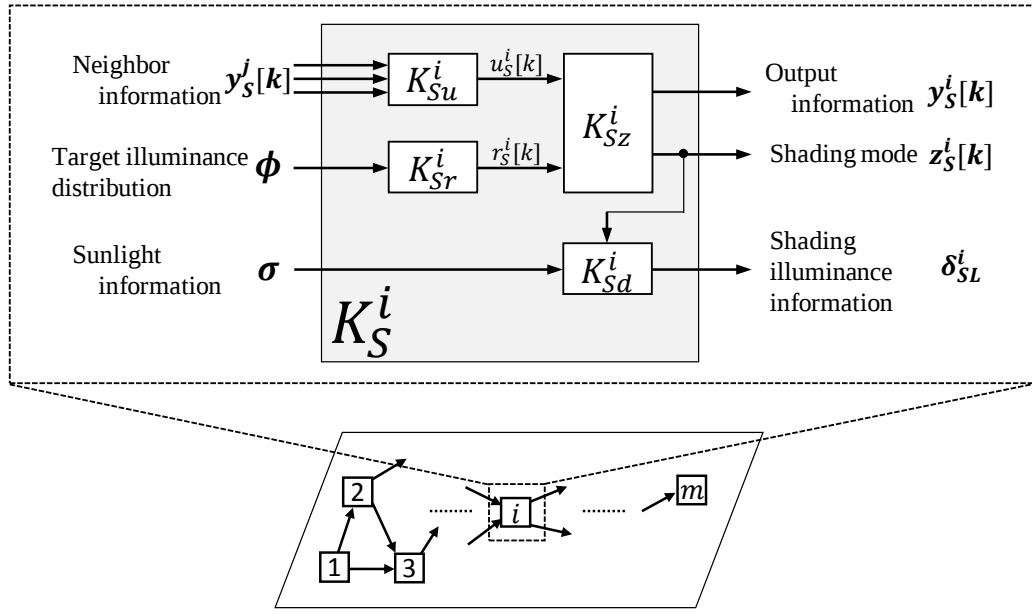


図 14: 分散制御器 K_S^i

窓 i に実装されている分散制御器 K_S^i は 4 つの制御器から構成されている．

制御器 K_{Su}^i :

近傍の窓から受け取る情報 y_S^j をもとに，照度調整量 u_S^i を決定するものであり，以下の式で与えられる．

$$K_{Su}^i : u_S^i[k] = f_u(y_S^{j_1}, y_S^{j_2}, \dots, y_S^{j_{m_i}}) \quad (3)$$

ただし， $\{j_1, j_2, \dots, j_{m_i}\} \in \nu_S$ は，窓 i が情報を受け取るすべての窓を表しており， $\{j_1, j_2, \dots, j_{m_i}\} = N_S^i$ および $m_i := |N_S^i|$ である．窓 i が取得できる情

報は、隣接する窓 $j \in N_S^i$ からの情報であり、これをどう処理するかは関数 $f_u : \mathbb{R}^{m_i} \rightarrow \mathbb{R}$ の設計に依存する．たとえば、 $N_S^5 = \{1, 3\}$ であるとき、窓 5 は窓 1 と窓 3 から情報を受け取るため、 $u_5 = f_u(y_S^{15}, y_S^{35})$ となる．

制御器 K_{Sr}^i :

目標照度分布 ϕ から $\tilde{p}_S^i$ 近傍の局所的な照度情報を取り出すものであり、以下の式で与えられる．

$$K_{Sr}^i : r_S^i[k] = \int_{L_{Si}} f_r(\phi(\tau)) d\tau \quad (4)$$

ただし、 L_{Si} は、窓 i が目標照度分布の情報を取得する領域を表しており、窓の投影形状などによって決定されるべきものである．関数 $f_r : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ は、領域内の照度情報をどう処理するかを決めるものである．

制御器 K_{Sz}^i :

K_{Su} 、 K_{Sr} からの情報 $r_S^i \in \mathbb{R}$ と $u_S^i \in \mathbb{R}$ をもとに、窓 i の遮光/透光モード $z_S^i \in \{0, 1\}$ と窓 i 近傍の窓間で伝達する情報 $y_S^i \in \mathbb{R}$ を決定するものであり、以下の式で与えられる．

$$K_{Sz}^i : \begin{cases} x_S^i[k+1] = ax_S^i[k] + b_1 r_S^i[k] + b_2 u_S^i[k] \\ y_S^i[k] = Q(c_1 x_S^i[k] + c_2 r_S^i[k] + d_1 u_S^i[k]) \\ z_S^i[k] = Q(c_3 x_S^i[k] + d_2 r_S^i[k]) \end{cases} \quad (5)$$

ただし、制御器内部におけるメモリ $x_S^i \in \mathbb{R}$ と、 $r_S^i \in \mathbb{R}$ 、 $u_S^i \in \mathbb{R}$ が入力であり、 $y_S^i \in \mathbb{R}$ 、 $z_S^i \in \{0, 1\}$ が出力である． $Q : \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$ は、実数値を四捨五入的に丸める量子化の操作を行う関数である．ここで、本制御器の出力 y_S^i は他の窓へ送信する情報であり、出力 z_S^i は窓の遮光/透光モードである．

制御器 K_{Sd}^i :

入射光情報 σ と窓の遮光/透光モード z_S^i から、窓 i が取り込んだ自然光照度からなる窓照度情報 δ_{SL}^i を算出し、後段の照明分散制御器 K_L に伝達する．

$$K_{Sd}^i : \delta_{SL}^i = g(\sigma, z_S^i) \quad (6)$$

ただし、関数 $g : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ は、入射した自然光が位置 $\tilde{p}_S^i$ において、どの程度の自然光照度を生成しているか算出するものである．

照明の分散制御器 $K_L = (K_L^1, K_L^2, \dots, K_L^n)$

照明 i には図 15 に示すような分散制御器 K_L^i が搭載されており，各照明が互いに情報伝達を行うことで，点灯/消灯モードを決定する．分散制御器 K_L^i は，目標照度分布 ϕ ，窓-照明間通信距離 r_{SL} ，窓照度情報 δ_{SL}^j ，近傍の情報 y_L^j を入力とし，窓の遮光/透光モード z_L^i と伝達する情報 y_L^i を出力する．

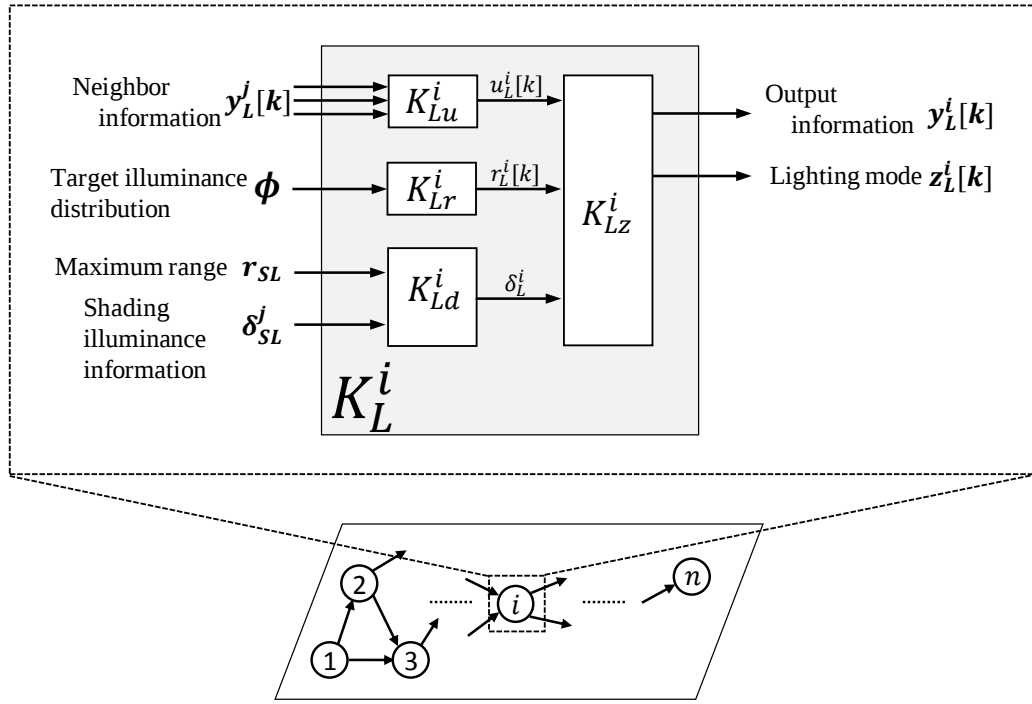


図 15: 分散制御器 K_L^i

制御器 K_{Lu}^i :

近傍の窓から受け取る情報 y_L^j をもとに，照度調整量 u_L^i を決定する．

$$K_{Lu}^i : u_L^i[k] = f_u(y_L^{j1}, y_L^{j2}, \dots, y_L^{jn}) \quad (7)$$

ただし， $\{j_1, j_2, \dots, j_{n_i}\} \in \nu_L$ は，照明 i が情報を受け取るすべての照明を表しており， $\{j_1, j_2, \dots, j_{n_i}\} = N_L^i$ および $n_i := |N_L^i|$ である．照明 i が取得できる情報は，隣接する照明 $j \in N_L^i$ からの情報であり，これをどう処理するかは関数 $f_u : \mathbb{R}^{n_i} \rightarrow \mathbb{R}$ の設計に依存する．

制御器 K_{Lr}^i :

目標照度分布 ϕ から $\tilde{p}_L^i$ 近傍の局所的な照度情報を取り出す.

$$K_{Lr}^i : r_L^i[k] = \int_{L_{Li}} f_r(\phi(\tau)) d\tau \quad (8)$$

ただし, L_{Li} は, 照明 i が目標照度分布の情報を取得する領域を表しており, 照明の配光特性などによって決定されるべきものである. 関数 $f_r : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ は, 領域内の照度情報をどう処理するかを決めるものである.

制御器 K_{Lz}^i :

K_{Lu} , K_{Lr} , K_{Ld} からの情報 $r_L^i \in \mathbb{R}$ と $u_L^i \in \mathbb{R}$, およびオフセット可能照度 δ_L^i をもとに, 照明 i の点灯/消灯モード $z_L^i \in \{0, 1\}$ と照明間で伝達する情報 $y_L^i \in \mathbb{R}$ を決定する.

$$K_{Lz}^i : \begin{cases} x_L^i[k+1] = ax_L^i[k] + b_1 r_L^i[k] + b_2 u_L^i[k] + b_3 \delta_L^i \\ y_L^i[k] = Q(c_1 x_L^i[k] + c_2 r_L^i[k] + d_1 r_L^i[k]) \\ z_L^i[k] = Q(c_3 x_L^i[k] + d_2 r_L^i[k]) \end{cases} \quad (9)$$

ただし, 制御器内部におけるメモリ $x_L^i \in \mathbb{R}$ と, $r_L^i \in \mathbb{R}$, $u_L^i \in \mathbb{R}$ が入力であり, $y_L^i \in \mathbb{R}$, $z_L^i \in \{0, 1\}$ が出力である. $Q : \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$ は, 実数値を四捨五入的に丸める量子化の操作を行う関数である. ここで, 本制御器の出力 y_L^i は他の照明へ送信する情報であり, 出力 z_L^i は照明の点灯/消灯モードである.

制御器 K_{Ld}^i :

窓 $j \in N_{SL}^i$ が取り込んだ自然光照度を表す窓照度情報 δ_{SL}^j をもとに, 照明 i 近傍のオフセット可能照度 δ_L^i を出力するものであり, 以下の式で与えられる.

$$K_{Ld}^i : \delta_L^i = h(r_{SL}, \delta_{SL}^j) \quad (10)$$

ただし, 関数 $h : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ は, 自然光の取り込みによって, 照明 i がどの程度, 自身の出力照度を削減できるか決めるものである.

3.3 制御器設計問題

ここでは、3.3 節 問題 1 において、仕様 (i), (ii) に対応する点灯/遮光パターン制御問題の検討を行う。つぎに、3.3 節 問題 2 において、仕様 (i), (ii) に加え、仕様 (iii) に対応する点灯/遮光パターン制御問題の検討を行う。

適光適所と自然光の優先利用

まず、適光適所と自然光の優先利用を行う制御問題を定式化するために、つぎの評価関数を導入する。

$$J_{P1}(K_S, K_L) := J_1 + \alpha J_2 \quad (11)$$

$$J_1 := \|\phi - \psi(Z_S[T], Z_L[T])\|_2 \quad (12)$$

$$J_2 := \|Z_L[T]\|_0 \quad (13)$$

ただし、 $\psi(Z_S[T], Z_L[T])$ は、終端ステップ $k = T$ における照明の点灯パターン $Z_L[T]$ 、窓の遮光パターン $Z_S[T]$ のもとでの出力照度分布であり、 $\alpha \in \mathbb{R}$ は評価関数 J_2 に対する重みである。ここで、式 (12) の値は、 $\phi - \psi(Z_S[T], Z_L[T])$ の 2 ノルムの値である。つまり、目標照度分布と出力照度分布の差を評価しており、その値が小さいほど適光適所が実現できていると言える。評価関数 J_1 のイメージ図を図 16 に示す。つぎに式 (13) は、照明の点灯パターン $Z_L[T]$ の 0 ノルムを評価している。これは、点灯パターン $Z_L[T]$ のうち、0 でない要素、つまり点灯している照明の個数を評価している。つまり、その値が小さいほど、照明による照度提供から自然光による照度提供に代替できていると言える。評価関数 J_2 のイメージ図を図 17 に示す。このとき、本論文ではつぎの問題を考える。

問題 1. 目標照度分布 ϕ 、入射光情報 σ 、照明の位置 p_L^i 、窓の位置 p_S^i 、ネットワーク構造 G_L 、 G_S が与えられたとする。このとき、

$$J_{P1}(K_L, K_S) = J_1 + \alpha J_2 \quad (14)$$

を小さくするような分散制御器 $K_L = (K_L^1, K_L^2, \dots, K_L^n)$ 、 $K_S = (K_S^1, K_S^2, \dots, K_S^m)$ を求めよ。 ■

評価関数 J_{P1} を小さくするような分散制御器 K_L , K_S を求めることで, (i) 適光適所, (ii) 自然光の優先利用を達成するように点灯/遮光パターンを決定することが期待できる. 本論文では第 4 章において, 問題 1 の解である分散制御器を 1 つ提案する.

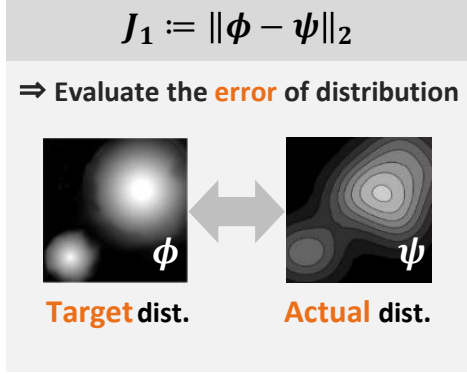


図 16: 評価関数 J_1

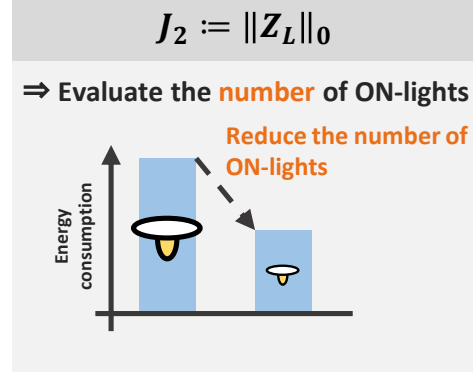


図 17: 評価関数 J_2

自然光の選択的取り込み

仕様 (iii) 自然光の選択的取り込みに関する制御問題を定式化するために, つぎの評価関数を導入する.

$$J_{P2}(K_L, K_S) := J_1 + \alpha J_2 + \beta J_3 \quad (15)$$

$$J_3 := \int_{\rho=0} \psi_S(Z_S[T], \tau) d\tau \quad (16)$$

ただし, $\beta \in \mathbb{R}$ は評価関数 J_3 に対する重みである. ここで, 式 (16) の値は, $\rho = 0$, つまり自然光の入射が制限されている箇所へ取り込まれた自然光照度を評価しており, その値が小さいほど, 自然光の選択的取り込みが行えているといえる. 図 18 に評価関数 J_3 のイメージ図を示す. このとき, 本論文ではつぎの問題を考える.

問題 2. 目標照度分布 ϕ , 採光制限領域 ρ , 入射光情報 σ , 照明の位置 p_L^i , 窓の位置 p_S^i , ネットワーク構造 G_L , G_S が与えられたとする. このとき,

$$J_{P2}(K_L, K_S) = J_1 + \alpha J_2 + \beta J_3 \quad (17)$$

を小さくするような分散制御器 $K_L = (K_L^1, K_L^2, \dots, K_L^n)$, $K_S = (K_S^1, K_S^2, \dots, K_S^m)$ を求めよ. ■

本論文では第 5 章において, 問題 2 の解である分散制御器を 1 つ提案する.

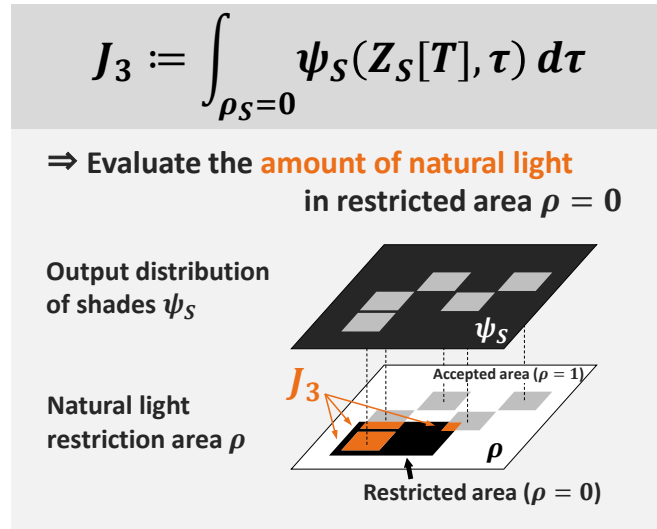


図 18: 評価関数 J_3

第 4 章 適光適所と自然光の優先利用を達成する制御器

本章では，仕様 (i) 適光適所，(ii) 自然光の優先利用を達成することを目標とし，評価関数 $J_{P1}(K_L, K_S)$ を小さくする分散制御器を考える．

4.1 提案手法

問題 1 のひとつの解として，以下の分散制御器 K_S^i ， K_L^i を提案する．

窓の分散制御器 $K_S^i : \{K_{Su}^i, K_{Sr}^i, K_{Sz}^i, K_{Sd}^i\}$

$$K_{Su}^i : \begin{cases} u_S^i[k] = - \sum_{j \in N_S^i} a_S^{ji} y_S^j[k] \\ a_S^{ji} = \frac{\exp(-\|\tilde{p}_S^i - \tilde{p}_S^j\|)}{\sum_{h \in I_S^i} \exp(-\|\tilde{p}_S^i - \tilde{p}_S^h\|)} \end{cases} \quad (18)$$

$$K_{Sr}^i : r_S^i[k] = \phi(\tilde{p}_S^i) \quad (19)$$

$$K_{Sz}^i : \begin{cases} x_S^i[k+1] = r_S^i[k] + u_S^i[k] \\ y_S^i[k] = Q(x_S^i[k]) - x_S^i[k] \\ z_S^i[T] = Q(x_S^i[T]) \end{cases} \quad (20)$$

$$Q(x_S^i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_S^i \geq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

$$K_{Sd}^i : \delta_{SL}^i = \|\sigma\| z_S^i \quad (22)$$

照明の分散制御器 $K_L^i : \{K_{Lu}^i, K_{Lr}^i, K_{Lz}^i, K_{Ld}^i\}$

$$K_{Lu}^i : \begin{cases} u_L^i[k] = - \sum_{j \in N_L^i} a_L^{ji} y_L^j[k] \\ a_L^{ji} := \frac{\exp(-\|\tilde{p}_L^i - \tilde{p}_L^j\|)}{\sum_{h \in I_L^i} \exp(-\|\tilde{p}_L^i - \tilde{p}_L^h\|)} \end{cases} \quad (23)$$

$$K_{Lr}^i : r_L^i = \phi(\tilde{p}_L^i) \quad (24)$$

$$K_{Lz}^i : \begin{cases} x_L^i[k+1] = r_L^i - \delta_L^i + \sum_{j \in N_L^i} a_L^{ji} y_L^j[k] \\ y_L^i[k] = Q(x_L^i[k]) - x_L^i[k] \\ z_L^i[T] = Q(x_L^i[T]) \end{cases} \quad (25)$$

$$Q(x_L^i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_L^i \geq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

$$K_{Ld}^i : \begin{cases} \delta_L^i = - \sum_{j \in N_{SL}^i} a_{SL}^{ji} \delta_{SL}^j \\ a_{SL}^{ji} = \frac{\exp(-\|\tilde{p}_L^i - \tilde{p}_S^j\|)}{\sum_{h \in I_{SL}^i} \exp(-\|\tilde{p}_L^i - \tilde{p}_S^h\|)} \end{cases} \quad (27)$$

以降，分散制御器 K_S^i ， K_L^i について，説明を行う．一部，窓の分散制御器と照明の分散制御器で同一の仕様となっている箇所 (関数 f_u ， f_r ， Q) については，詳細な説明を省略する．なお， $k \in \{0, 1, 2, \dots, T\}$ は分散制御器の更新ステップを示し， $T \in \mathbb{N}$ は計算の最終更新ステップを示す．

窓の分散制御器

第 1 に、制御器 K_{Su}^i について説明する．関数 f_u を、

$$f_u(y_L^{j1}, y_L^{j2}, \dots, y_L^{ji}) := - \sum_{j \in N_S^i} a_S^{ji} y_S^j[k] \quad (28)$$

とし、 u_S^i を式 (18) のように定めた．なお、重み a_S^{ji} は窓 i とその近傍の窓 $j \in N_S^i$ との間の距離が近いほど、大きくなる．これにより、距離が近い窓から送られてくる照度誤差情報 y_S^j をより重視させることで、距離の近い窓同士で過不足を補い合う．ここで、 $I_S^i := \{j \in \nu_S | i \in N_S^j\}$ を窓 i から情報を受け取る窓の集合とすると、式 (18) 中の $\sum_{h \in I_S^i} \exp(-\|\tilde{p}_S^i - \tilde{p}_S^h\|)$ は、窓 i が他の窓 j に誤差情報を送信する際の重み a_S^{ij} を正規化する役割がある．

第 2 に、制御器 K_{Sr}^i について、説明する．式 (4) で示した関数 f_r については、

$$f_r(\phi(\tau)) : \begin{cases} \phi(\tau) & \text{if } \tau = \tilde{p}_S^i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

とし、 r_S^i を式 (19) と定めた．厳密に窓 i 近傍の目標照度を取り出すことを考えれば、各窓がつくる影の形状を考慮した上で位置 $\tilde{p}_S^i$ 周辺の目標照度情報も取り扱う必要があるが、簡単のため、位置 $\tilde{p}_S^i$ における目標照度のみを取り扱う．

第 3 に、制御器 K_{Sz}^i について説明する．式 (5) において、 $a := 0$, $b_1 := 1$, $b_2 := 1$, $c_1 := 1$, $c_2 := -1$, $d_1 := 0$, $c_3 := 1$, $d_2 := 0$ とした． K_{Sz}^i は、 K_{Su}^i , K_{Sr}^i で決定される目標照度 r_S^i と窓間で伝達される情報 u_S^i を、メモリ x_S^i に保存する．それを用いてネットワークで接続された他の窓に送信する情報 y_S^i と遮光パターン z_S^i を決定する．関数 $Q: \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$ は、実数値を 0 か 1 に四捨五入的に丸める量子化の操作を表している．関数 Q の出力である 0, 1 は、それぞれ窓の遮光、透光と対応している．そして最終ステップ $k = T$ において、点灯/遮光モード z_S^i を出力する．

第 4 に、制御器 K_{Sd}^i について説明する． K_{Sd}^i は、窓 i の位置 $\tilde{p}_S^i$ 周辺に取り込まれた自然光照度を算出する．システムに取り込まれた自然光照度を厳密に評価するならば、各窓がつくる影の形状を考慮したうえで位置 $\tilde{p}_S^i$ 周辺の照度を算出する必要があるが、簡単のため、位置 $\tilde{p}_S^i$ における自然光照度のみを取り扱う．

照明の分散制御器

まず，制御器 K_{Lu}^i , K_{Lr}^i については，制御器内部の関数 f_u , f_r の仕様が窓の場合と共通であるため割愛する．

つぎに，制御器 K_{Lz}^i について説明する．式 (9) において， $a := 0$, $b_1 := 1$, $b_2 := 1$, $b_3 := -1$, $c_1 := 1$, $c_2 := -1$, $d_1 := 0$, $c_3 := 1$, $d_2 := 0$ とした． K_{Lz}^i についても，制御器内部の仕様は，ほぼ窓の制御器 K_{Sz}^i の場合と同じであるが，照明 i の位置に取り込まれるオフセット可能照度 δ_L^i 分だけ自身の目標照度をオフセットする機能が追加されている．これにより，自然光による照度提供を考慮したうえで，点灯/消灯パターンを決定することができる．

最後に，制御器 K_{Ld}^i について説明する． K_{Ld}^i は，窓と照明間のネットワーク G_{SL} を構築し，窓照度情報 δ_{SL}^j を受信する．また，照明 i のオフセット可能照度 δ_L^i を算出する．このとき，周辺の窓照度情報をどのように照明の点灯/消灯パターン決定に反映させるか検討が必要になる．提案手法では，式 (27) に示す，窓と照明間の距離に関する重み a_{SL}^{ji} を用いる．これにより，図 19 に示すように距離の近い窓からより多く窓照度情報を融通し，そのオフセット可能照度 δ_L^i 分だけ，自身の目標照度を削減する

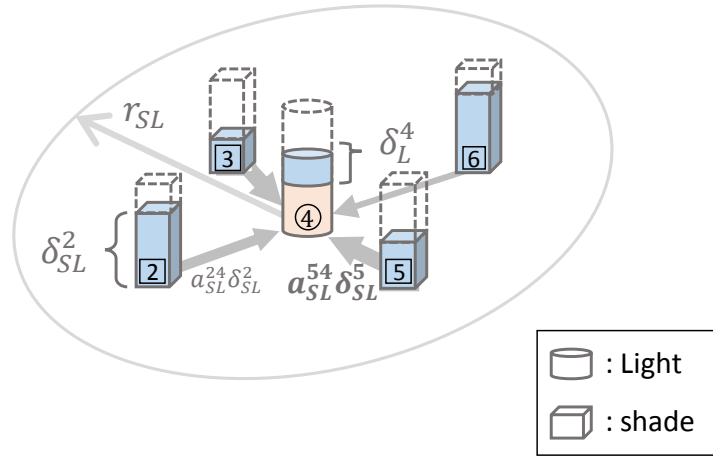


図 19: 制御器 K_{Ld}^i の動作

分散制御器の動作

窓の分散制御器 K_S^i の動作について説明する．図 20 に分散制御器 K_S^i の制御フローを示す．まず，窓 i の分散制御器 K_S^i は，自身の投影点 $\tilde{p}_S^i$ における目標照度

$\phi(\tilde{p}_S^i)$ および窓間で伝達される情報 y_S^i を用い、近傍の窓と繰り返し情報交換を行う。この y_S^i は、窓の遮光モードを決める際に生じた明るさの過不足に関する誤差である。これは窓 i が提供すべき照度 x_S^i に対して、実際の照度提供量 $Q(x_S^i)$ の差 $Q(x_S^i) - x_S^i$ であり、その正負が照度の過不足と対応する。たとえば、 $y_S^i > 0$ は、窓 i において照度提供が過剰であることを指し、 $y_S^i < 0$ であれば、照度提供が不足していることを意味する。また、窓 i が近傍の窓 j から情報 $y_S^j > 0$ を多く受信する場合、窓 i 近傍で照度が過剰であることを暗に意味する。逆に窓 i が近傍の窓 j から情報 $y_S^j < 0$ を多く受信する場合、窓 i 近傍で照度が不足していることを暗に意味する。分散制御器 K_S^i は、情報 $y_S^j > 0$ を多く受信した場合、遮光モードを選択しやすくなり、情報 $y_S^j < 0$ を多く受信した場合、透光モードを選択しやすくなる。これにより、ある窓で生じた照度の誤差をその近傍の窓が補うことで、結果的に照度誤差が小さくなることが期待できる。

照明の分散制御器 K_L^i の動作について説明する。図 21 に分散制御器 K_L^i の制御フローを示す。基本的な動作は窓の分散制御器と同様であるが、窓の分散制御器 K_S^i から取り込んだ自然光照度に関する情報 δ_{SL}^j を受け取り、その情報を自身の照度情報からオフセットする機能が追加されている。このため、窓の分散制御器 K_S^i を動作させた後に照明の分散制御器 K_L^i を動作させることにより、自然光による照度提供の過不足を補完するように照明光を配光することで、システム全体の照度誤差が小さくなることが期待できる。

これら 2 つの分散制御器 K_S^i , K_L^i を用い、以下の手順で点灯/遮光パターン Z_L , Z_S を決定する。

- STEP1 自然光を優先的に利用するために窓の分散制御器 K_S を動作させ、遮光パターン Z_S を求める。このとき、位置 $\tilde{p}_S^i$ 近傍に取り込まれた照度を δ_{SL}^i と表すことに注意する。
- STEP2 つぎに、照明の分散制御器 K_L を動作させ、点灯パターン Z_L を求める。このとき、分散制御器 K_L は、遮光パターン Z_S によって生じた照度誤差を考慮するため、オフセット可能照度 δ_L^i を自身の目標照度からオフセットする。
- STEP3 STEP1, STEP2 で得られた点灯/遮光パターン Z_S , Z_L を、実際に照明と窓へ適用し、実照度分布 ψ を得る。

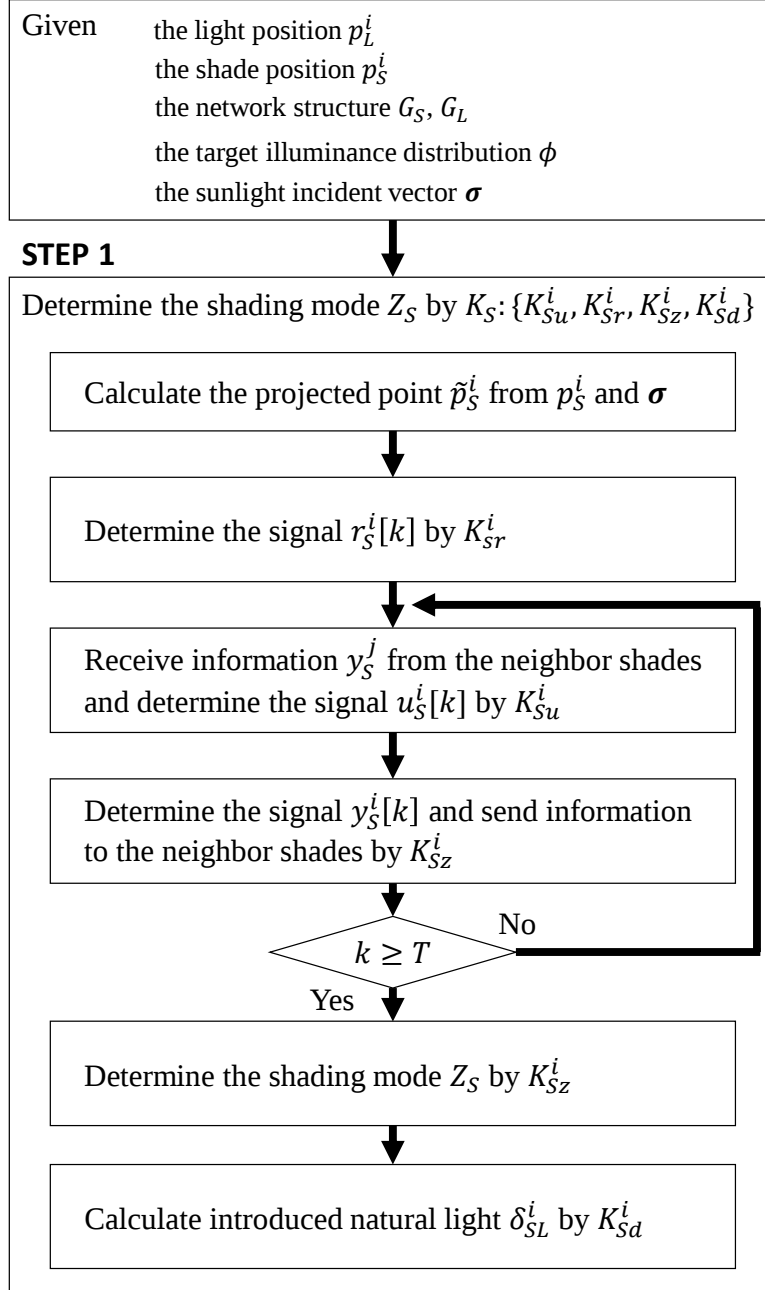


図 20: 窓の分散制御器 K_S^i の動作

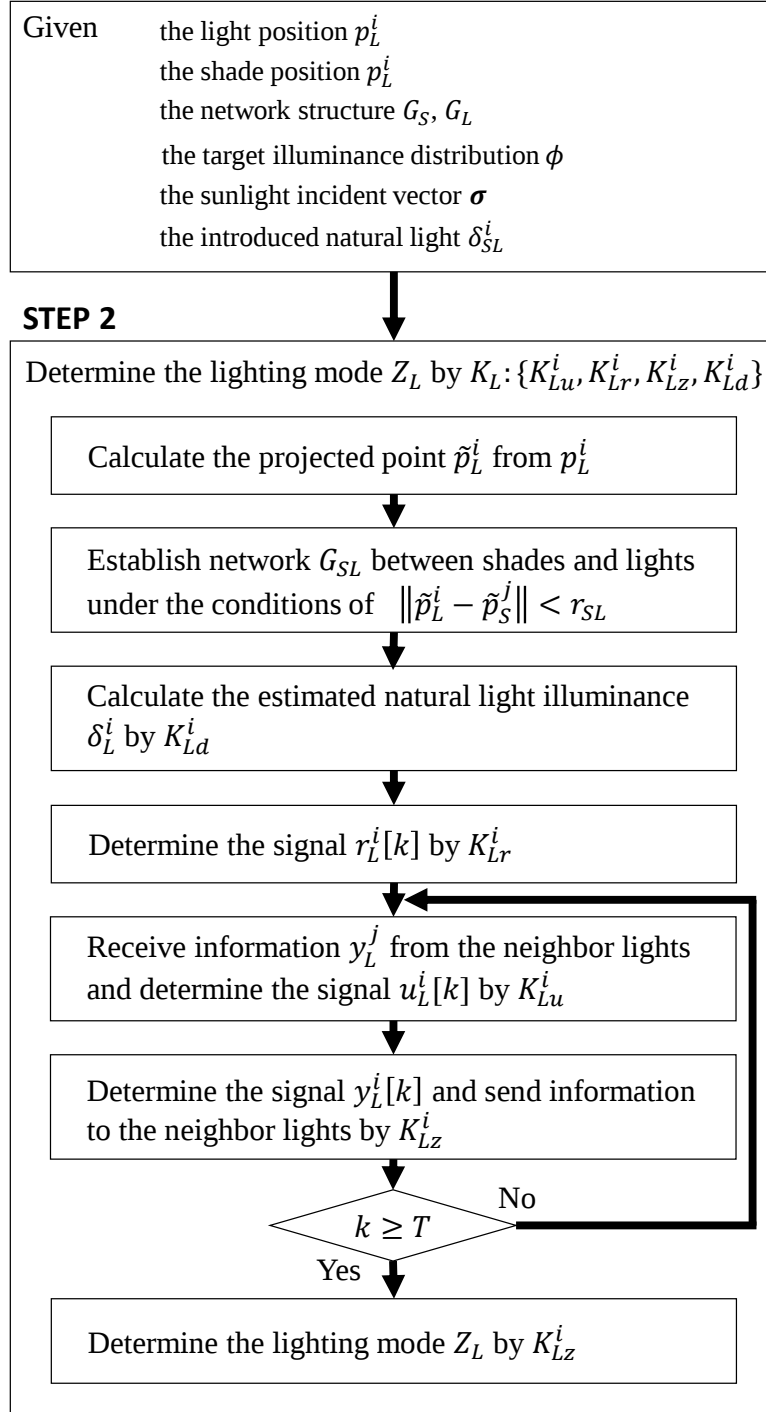


図 21: 照明の分散制御器 K_L^i の動作

4.2 シミュレーションと実験による提案手法の検証

提案手法の有効性を確認するために、簡易な照度場実験を行った。照度場実験の様子を図 22 に示す。まず、照明 $n = 9$ 個、窓 $m = 9$ 個を図 23(a), (b) のように設置する。また、これらの照明と窓は図 23(c), (d) に示すような単方向のネットワーク構造 G_L , G_S によって結ばれているとする。また、入射光情報 σ , 目標照度分布 ϕ をそれぞれ、図 23(e), (f) のように与える。

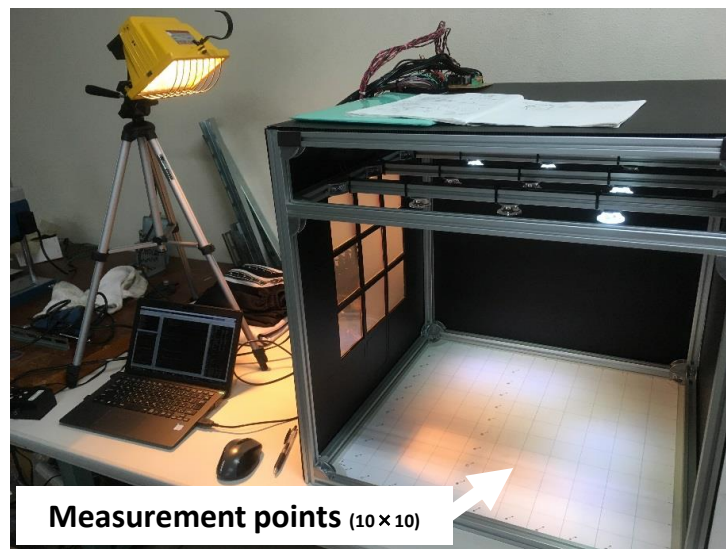
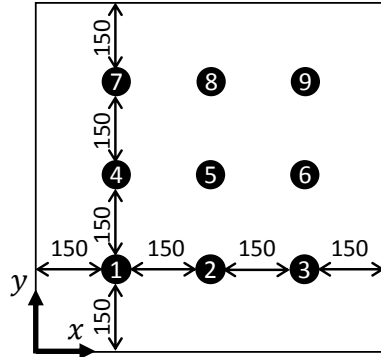
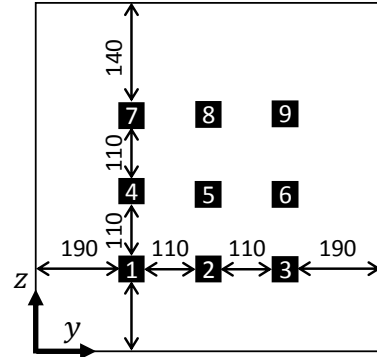


図 22: 照度場実験の様子

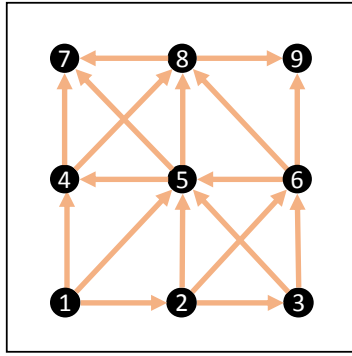
制御器の最大更新ステップを $k = 25$ とし、提案する制御器を用いて点灯/遮光パターン Z_L , Z_S を決定した結果を図 24(a), (b) に示す。図 24(a) において、記号○, ×はそれぞれ、照明の点灯と消灯を表している。図 24(b) において、記号■, □はそれぞれ、窓の遮光と透光を表している。また、出力照度分布 ψ のシミュレーション結果と実験による結果をそれぞれ、図 24(c), (d) に示す。



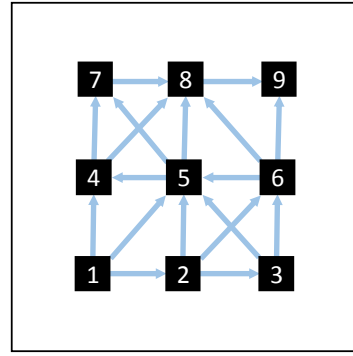
(a) Positions of lights p_L



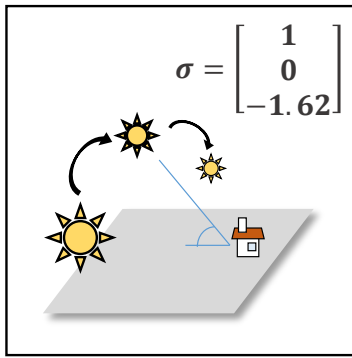
(b) Positions of shades p_S



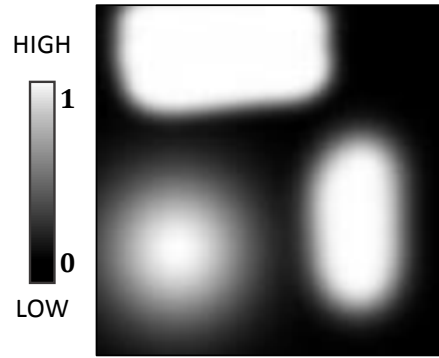
(c) Network G_L



(d) Network G_S

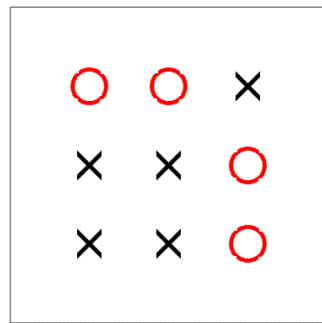


(e) Sunlight information σ

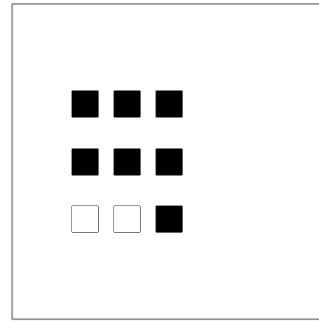


(f) Target distribution ϕ

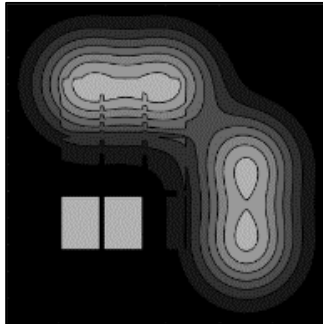
図 23: 問題 1-実験条件



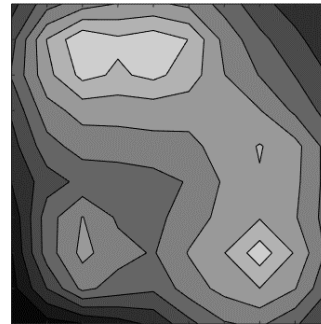
(a) Lighting pattern Z_L



(b) Shading pattern Z_S



(c) Simulation result



(d) Experimental result

図 24: 提案手法によるシミュレーション，実験結果

まず，図 24(a)，(b) から，照明の分散制御器，窓の分散制御器はともに，目標照度が高い箇所に照度を提供しようとするまうことが確認できる．また，自然光が取り込める箇所については，窓の分散制御器は透光モードを選択し，積極的に自然光を取り込もうとする動作が確認できる．さらに，自然光による照度提供がなされ，目標照度が充足されたとみられる領域 (床面左下) では，照明が消灯していることがわかる．一方で，自然光による照度提供が行えない領域 (床面右) においては，照明が点灯していることがわかる．また，図 24(c) に示す照度場シミュレーション結果と目標照度分布である図 23(f) を比較すると，分布が近くなっていることがわかる．さらに，図 24(d) に示す実験による結果と目標照度分布である図 23(f) においても分布が近くなっていることがわかる．

つぎに、提案手法と以下の手法について比較実験を行った。

- (a) 分散制御器 K_S^i による窓の制御，分散制御器 K_L^i による照明の制御，および，ネットワーク G_{SL} を介した照度調整 (提案手法)
- (b) 窓の手動制御（すべて遮光），分散制御器 K_L^i による照明の制御
- (c) 窓の手動制御（すべて透光），分散制御器 K_L^i による照明の制御
- (d) 分散制御器 K_S^i による窓の制御，照明の手動制御（すべて消灯）
- (e) 分散制御器 K_S^i による窓の制御，照明の手動制御（すべて点灯）
- (f) 分散制御器 K_S^i による窓の制御，照明の手動制御（3 列目のみ点灯）

図 25(a)～(f) に，実験結果を示す．これより，窓と照明間のネットワークを介した情報交換が無い場合，照度が過剰に提供されたり，逆に不足することで評価関数 J_1 の値が大きくなる傾向があることが確認できる．その一方で，提案手法を用いた場合，自然光による照度提供がなされた箇所については適切に照明が消灯しており，照明と窓の間で適切に照度調整が行われていることがわかる．

また，提案手法は，目標照度分布に近い出力照度分布が得られ，かつ評価関数値 J_1 が小さくなっていることから，適光適所を達成していることがわかる．また，提案手法の評価関数値 J_2 が示すように，照明点灯数が他の手法に比べ小さくなっていることから，自然光の優先的利用も達成されていることがわかる．以上より，仕様 (i) 適光適所，(ii) 自然光の優先利用を満足するためには，提案手法が有効であり，適切な点灯/遮光パターン決定が行えることを確認した．

	Shading/Lighting pattern Z_S, Z_L	Output illuminance distribution ψ	J_1	J_2
(a) Lighting/shading Control			3.42	4
(b) Lighting Control only (All shades close)			3.79	6
(c) Lighting Control only (All shades open)			3.97	6
(d) Shading Control only (All lights OFF)			4.26	*(0)
(e) Shading Control only (All lights ON)			5.07	*(9)
(f) Shading Control only (3 rd col. lights ON)			3.79	*(3)

(* : Set lighting pattern manually)

図 25: 提案手法との比較実験結果

第 5 章 自然光の選択的取り込みを行う制御器

本章では，仕様 (i) 適光適所，(ii) 自然光の優先利用に加え，仕様 (iii) 自然光の選択的取り込みを達成することを目標とし，評価関数 $J_{P2}(K_S, K_L)$ を小さくする分散制御器を考える．なお，仕様 (iii) を達成するために，4 章で求めた照明の分散制御器 K_L^i のもとで，窓の分散制御器 K_S^i 内部の制御器 $K_{S_z}^i$ の仕様変更を検討する．

5.1 提案手法

ここでは，窓の分散制御器 K_S^i に目標照度分布 ϕ だけでなく，採光制限情報 ρ も考慮したうえで遮光/透光パターン決定させることを考える．そこで，つぎの制御器 $K_{S_{q+}}^i$ ， $K_{S_{z+}}^i$ を新たに提案する．

$$K_{S_{q+}}^i : q_S^i = \rho(\tilde{p}_S^i), \quad (30)$$

$$K_{S_{z+}}^i : \begin{cases} x_S^i[k+1] = r_S^i[k] + u_S^i[k], \\ y_S^i[k] = Q_+(x_S^i[k], q_S^i) - x_S^i[k], \\ z_S^i[T] = Q_+(x_S^i[T], q_S^i), \end{cases} \quad (31)$$

$$Q_+(x_S^i, q_S^i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_S^i \geq \frac{1}{2} \text{ and } q_S^i = 1 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (32)$$

自然光の選択的取り込みを行う窓の分散制御器を図 26 に示す．式 (30) に示す制御器 $K_{S_{q+}}^i$ は，採光制限情報 ρ から，位置 $\tilde{p}_S^i$ で採光を行う否かを示す信号 $q_S^i \in \{0, 1\}$ を取り出すものである．たとえば， $q_S^i = 1$ であれば，位置 $\tilde{p}_S^i$ において自然光取り込みが行われうることを意味する．一方， $q_S^i = 0$ であれば，位置 $\tilde{p}_S^i$ において自然光取り込みを行わないことを意味する．

式 (31) に示す制御器 $K_{S_z+}^i$ は、4 章で示した制御器 $K_{S_z}^i$ と基本的には同様の動作を行うが、

- 採光制限情報を考慮した遮光/透光モードの決定
- 窓間ネットワーク G_S の入切による照度誤差伝播の抑制

という機能が付与されている。まず、採光制限情報を考慮した遮光/透光モードの決定には、関数 Q の仕様変更で対応する。新しく設計した関数 Q_+ は、1 (=透光モード) を出力する必要条件として、 $q_S^i = 1$ であることを求めている。言い換えれば、採光が制限されている (つまり、 $q_S^i \neq 1$ のとき) 場合、必ず 0 (=遮光モード) が出力される。これにより、ユーザが自然光採光を制限した箇所では自然光による照度提供は行われず、照明光のみによる照度提供が行われることが期待できる。

しかしながら、関数 Q_+ の導入のみでは不十分であると考えられる。たとえば、窓 i 周辺の目標照度が高く、かつ、採光制限の対象であった場合を考える。このとき、窓 i は採光制限のため、半ば強制的に遮光モード $z_S^i = 0$ を選択させられる。しかし、目標照度が高いにも関わらず遮光モードを選択させられている窓から、意図しない照度誤差情報 y_S^i が周辺の窓へ伝達されてしまう問題がある。そこで、提案手法では、採光制限情報 ρ をもとに、窓間ネットワーク G_S を入切することで、無用な照度誤差伝播を抑制することを考える。図 27 に、採光制限情報による窓間ネットワークの入切のイメージ図を示す。

なお、照明の分散制御器 K_L^i については、4 章で求めた制御器を用いる。

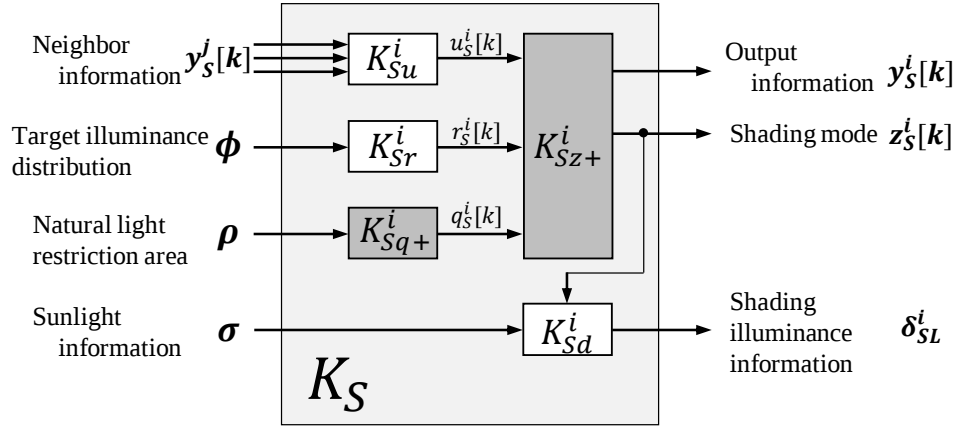


図 26: 制御器 K_{Sq+}^i , K_{Sz+}^i

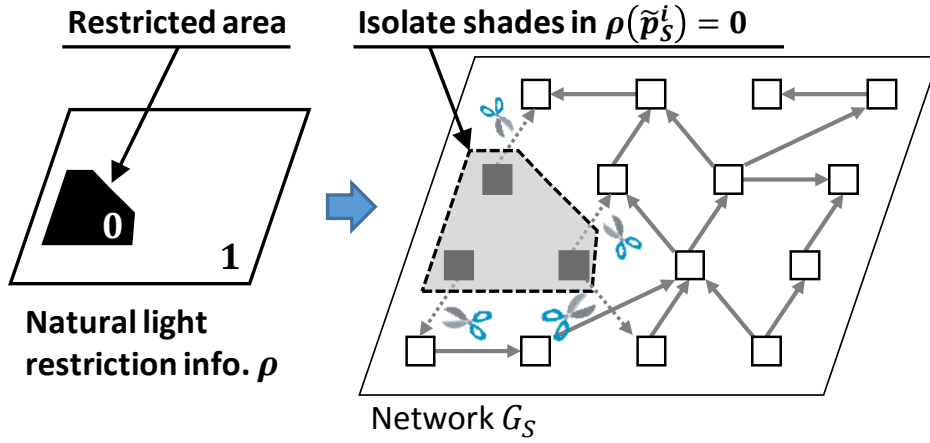


図 27: 採光制限情報による窓間ネットワークの入切

5.2 シミュレーションによる提案手法の検証

まず，照明 $n = 16$ 個，窓 $m = 16$ 個を図 28 (a), (b) のように設置する．また，これらの照明と窓は図 28 (c), (d) に示すような単方向のネットワーク構造 G_L , G_S によって結ばれているとする．また，入射光情報 σ ，目標照度分布 ϕ ，採光制限情報 ρ をそれぞれ図 28 (e), (f), (g) のように与える．

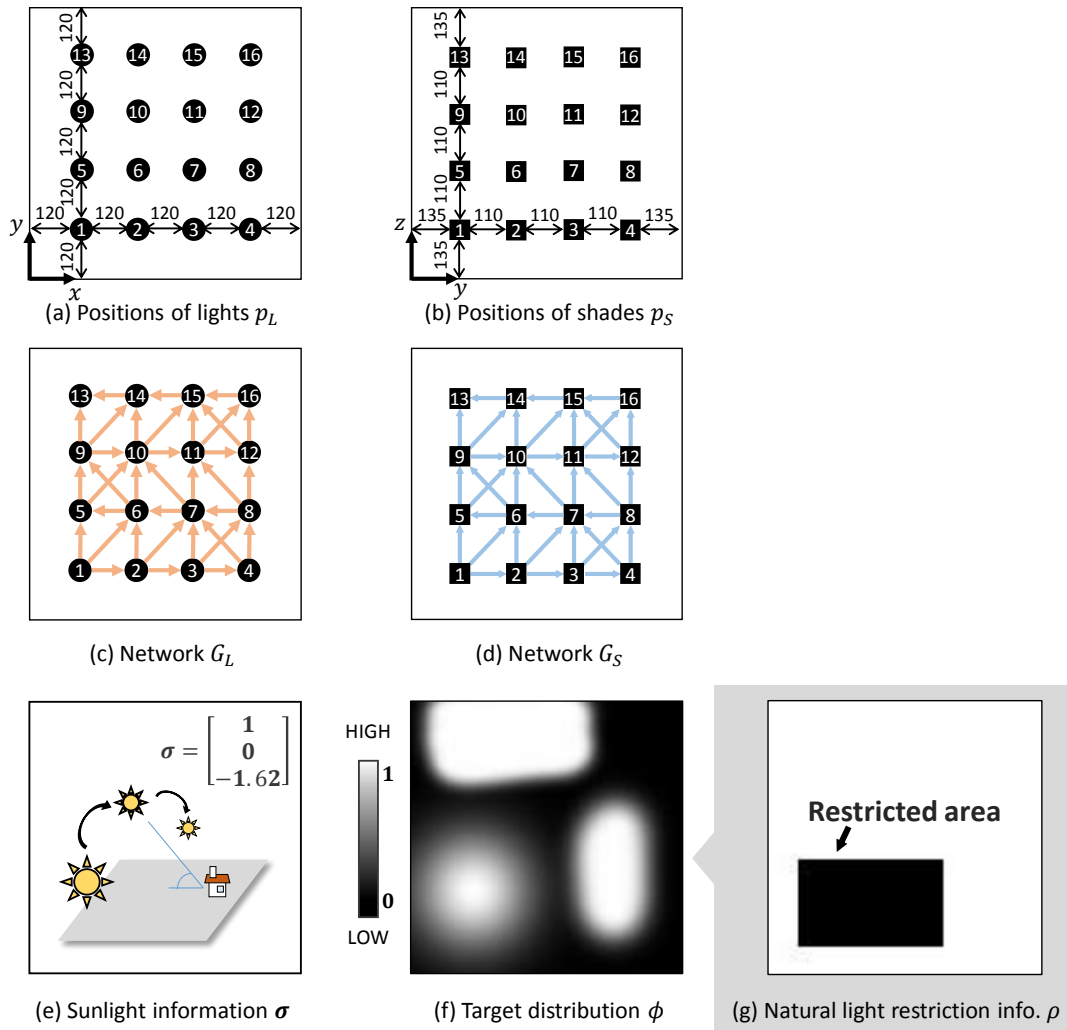


図 28: 問題 2-シミュレーション条件

制御器の最大更新ステップを $k = 25$ としたとき、提案する分散制御器を用いて点灯/遮光パターン Z_L, Z_S を決定した結果を図 29(a) に示す。また、比較手法として、自然光の選択的取り込みに対応していない 4 章で求めた分散制御器による結果を図 29(b) に示す。まず、提案手法 (a) では、採光制限情報 $\rho = 0$ の領域内に存在する窓は、すべて遮光モードを選択していることが確認できる。また、その領域付近で不足した照度を、照明の点灯によって適切に補完できていることがわかる。その一方、比較手法 (b) の場合、 $\rho = 0$ の領域にも自然光が配光されており、自然光の選択的取り込みに対応できないことがわかる。

また、提案手法を用いた場合、目標照度分布に近い出力照度分布が得られ、かつ評価関数値 J_1 が小さくなっていることから、適光適所を達成していることがわかる。なお、提案手法の評価関数値 J_2 は、自然光による照度提供が制限されている箇所において照明点灯による照度提供が行われるため、数値が大きくなってしまいうことが確認できる。その一方で、評価関数値 J_3 が示すように、採光制限領域に入射する自然光の光量は大きく制限できていることがわかる。以上より、仕様 (i) 適光適所、(iii) 自然光の選択的取り込みを満足するためには、仕様 (ii) 自然光の優先利用とトレードオフの関係が存在するものの、提案手法は有効であり、適切な点灯/遮光パターン決定が行えることを確認した。

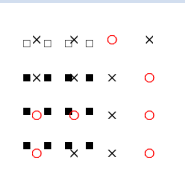
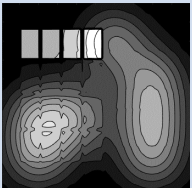
	Shading/Lighting pattern Z_S, Z_L	Output illuminance distribution ψ	J_1	J_2	J_3
(a) With selective natural light introduction			33.2	7	46.8
(b) Without selective natural light introduction			36.4	4	471.7

図 29: 提案手法によるシミュレーション結果

第 6 章 おわりに

本論文では，照明光と自然光を併用しつつ，所望の照度分布を提供可能な自律分散型光環境制御システムを提案した．まず，複数の照明と遮光/透光を制御可能な複数の窓から構成される提案システムの構成を示したうえで，3つの仕様 (i) 適光適所，(ii) 自然光の優先利用，(iii) 自然光の選択的取り込みを定めた．また，それらの仕様に対応する点灯/遮光パターン制御問題の定式化を行った．つぎに，制御問題に対する解として，すべての照明と窓に分散制御器を搭載し，それらをネットワーク上で協調させることにより適切な点灯/遮光パターンを決定する手法を提案した．具体的には，適光適所と自然光の優先利用を達成する分散制御器と，発展課題として自然光の選択的取り込みを行う分散制御器を提案した．最後に，いくつかの照度場シミュレーションと照度場実験によって，提案手法の有効性を確認した．

今後の課題

第 1 に，本論文における点灯/遮光パターン決定方法は，1. 窓の分散制御器による遮光パターン決定，2. 照明の分散制御による点灯パターン決定という，2 段階に分かれた制御フローに基づくものであった．これは，仕様 (ii) 自然光の優先利用を実現するひとつの解決策として採用したものである．しかしこの手法は，窓から照明へ向けた情報伝達しかなされておらず，照明光と自然光の相互作用を十分に考慮できていない可能性がある．そのため，窓と照明の分散制御器を同列に扱い，同一タイミングで点灯/遮光パターンを決定する手法の検討が必要であると考えられる．

第 2 に，解の収束性や最適性を検証するために，分散制御器間のネットワーク構造を解析的に考察する必要がある．本論文では，単方向の情報伝達のみで点灯/遮光パターン決定が行えることを確認した．その一方，各照明機器間で双方向の情報伝達を行うことを考えると，解が発散する可能性があるものの，より最適解に近い点灯/遮光パターンが得られる可能性がある．

第 3 に，本論文で扱った関数 Q の仕様は，簡単のため ON または OFF の 2 値出力のみであった．配光性能を高めるために，関数 Q の出力を多段階に拡張することで，よりきめ細かな照度提供が可能となることが予想される．

第 4 に，照明機器のモデルを改良する必要がある．特に，提案した分散制御器では，目標照度を取得する制御器 K_{Sr}^i , K_{Lr}^i において，目標照度情報を取得する領域 L_{Si} , L_{Li} を簡単のため点として扱っていた．つまり，現状では照明機器周辺の目標照度を正確に取得できているとは言えない．よりよい点灯/遮光パターン決定を行うためには，照明機器のモデル (たとえば，照明の配光特性) に即した領域 L_{Si} , L_{Li} の設定が必要になると考えられる．

謝辞

大学院の研究生生活において、知能システム制御研究室の杉本謙二教授には、本研究へ貴重な助言をいただいたのみならず、研究者・技術者としての心構えを示していただくなど様々な面でご指導を賜りました。心より御礼を申し上げます。

お忙しい中、副指導教員をお引き受けしていただいたユビキタスコンピューティングシステム研究室の安本慶一教授に深く御礼申し上げます。ゼミナール発表の際にいただいたご助言は、大変参考になりました。

松原崇充准教授には、定例研究会などで研究に関する貴重なご意見を頂きました。また研究以外にも、談話スペースにおいてユーモアあふれるお話をしていただいたり、ときには励ましの言葉もかけてくださいました。深く感謝を申し上げます。

南裕樹客員准教授には、研究に必要な基礎知識の伝授から、研究の進め方や論文を提出し学会で発表するまで、幅広くご指導をいただきました。また、プレゼン資料のデザインや相手に伝わりやすい資料を作るコツを教えていただいたことは大変勉強になりました。今後も是非活用させていただきます。とりわけ南先生には大阪大学に異動されてからも貴重なお時間を割いて研究のご指南をいただき、未熟な私を辛抱強く導いてくださりました。心より御礼申し上げます。

また、定例研究会や研究室輪講などにおいて鋭いご指摘と助言をいただきました小蔵正輝助教、さらに、研究に関する相談だけでなく、研究室の環境整備や各種行事などにおいて、お力添えをいただいた小林泰介助教に深く感謝申し上げます。また、学会参加時の手続きを一手にお引き受けいただくなど、学生生活をサポートしていただいた秘書の林英子様に深く感謝申し上げます。

最後に、研究室に配属されて間もない頃に右も左もわからなかった私にアドバイスしていただいた先輩の皆様、同じ研究室で2年間を共有し切磋琢磨しあった同期の皆様、そして今後の活躍が期待される新進気鋭の後輩の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Carol Jones, Kelly Gordon : Efficient Lighting Design and Office Worker Productivity, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, pp.112-123, 2004.
- [2] 橋本 秀紀, 渡邊朗子 : 空間知能化のデザイン 建築・ロボティクス・IT の融合, NTT 出版, 2004.
- [3] 松下 進 : 図解入門 よくわかる最新照明の基本と仕組み, 秀和システム, 2008.
- [4] 井上 隆, 松尾 陽 : 日射遮蔽装置の使用実態に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文報告書 第 378 号, p.10-18, 1987.
- [5] Mitsunori Miki, Tomoyuki Hiroyasu, Kazuhiro Imazato : Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness, IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2004.
- [6] 南 裕樹 : 分散型 LED 照明システムの点灯パターン制御, 計測自動制御学会論文集 Vol.49, No.10, 2013.
- [7] 室巻 孝郎, 二川 真太郎, 徳永 泰伸, 南 裕樹 : 分散型ロボティック照明システムの構築, 機械学会関西支部 第 90 期定時総会講演会 No.154-1, pp.177-179, 2015.
- [8] 室巻 孝郎, 南 裕樹, 徳永 泰伸 : ロボティック照明システムの分散型照射角度制御, IEEJ Transaction on Electronics, Information and Systems, Vol.137, No.1, pp.120-126, 2016.
- [9] 室巻 孝郎, 南 裕樹, 徳永 泰伸 : 分散型 LED 照明システムの照度パターン制御実験, 日本設計工学会学会誌 設計工学 Vol.51, No.2, 2016.
- [10] Sunao Hashimoto, Seung-tak Noh, Daiki Yamanaka, Youichi Kamiyama, Masahiko Inami, Takeo Igarashi : Lighty : Painting Interface for Controlling Robotic Room Lights, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp.305-306, 2012.
- [11] Daoyuan Zhang, Xiaohua Xia : Distributed illumination control of LED networked systems via local occupancy information, 56th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2017.

- [12] Alie El-Din Mady, Menouer Boubekur, Gregory Provan : Optimised embedded distributed controller for automated lighting systems, Proceedings of the 1st Workshop on Green and Smart Embedded System Technology, 2010.
- [13] Walter Haase, Marzena Husser, Werner Sobek : Adaptive Glazing System - Survey of Systems, IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp.929-933, 2017.
- [14] Jun Rekimoto : Squama: A Programmable Window and Wall for Future Physical Architectures, 14th International Conference on Ubiquitous Computing (Ubi-comp 2012), pp.667-668, 2012.
- [15] Patrick Bader, Stefan Schneegass : Interacting with LCD-Based Smart Windows, Proceedings of the 6th International Conference on the Internet of Things, pp.175-176, 2016
- [16] JIS Z 9125 : 屋内作業場の照明基準, 2007.