

修士論文

人物の重要度提示のための照明制御法

指導教官 美濃 導彦 教授

京都大学大学院情報学研究科  
修士課程知能情報学専攻

新宮 淳

平成 15 年 2 月 5 日

# 人物の重要度提示のための照明制御法

新宮 淳

## 内容梗概

人物に照明をあてて明るくすることは、その人物が重要であることを、見ている人に知らせるために有効である。特に、コミュニケーションしている複数の人物を撮影する際、この映像を見る人のために、従来の映像と音声に加え、人物の明るさを照明制御によって変化させ、各人物の重要度を提示することは有効であると考えられる。

複数の人物が、それぞれどの程度重要であるかは、状況によって変化する。会議や講義において、議論が行われている状況では、発言している人物や議論に参加している人物の重要度は高く、議論に参加せず、聞いているだけの人物の重要度は低いと考えられる。本研究では、複数の人物に対して、各人物の重要度が与えられ、これに対応する明るさが定められていると仮定する。この仮定のもとで、移動する複数人物を撮影するとき、各人物の画像輝度が、定められた明るさになるように、複数照明の光量を制御する手法を提案する。

照明制御するためには、照明から発せられる光の特性や、各照明が人物の画像輝度に与える影響を知る必要がある。これらは、照明やカメラの性質、人物の形状、位置や反射係数、撮影環境などによって左右され、測定することが難しい。本研究では、人物の形状をしたモデル物体に照明をあてて撮影し、撮影された画像を用いてこれらを事前測定する。各人物の位置や重要度が変化するたびに、各人物の画像輝度が与えられた明るさになるような照明の光量を計算によって求め、これに基づいて照明を制御する。

本手法を実装し、歩行により移動する、あるいは座席に着席している複数人物に対して照明制御を行った。その結果、各人物の画像輝度が、与えられた明るさになるように照明制御することができた。さらに、実際の間人同士のコミュニケーションの様子を撮影し、本手法の照明制御が人物の重要度を提示することに有効であることが示された。

# A Lighting Control Method for Dynamic Displaying of the Significance of Persons

Jun SHINGU

## Abstract

Each person plays her/his own significant role in a communication. For example, a speaker is significant in a conversation while other persons who do not speak are less important than the speaker. It is useful to know how much significant each person is for understanding the communication. When a viewer watches the conversation of many persons on a video, it is difficult for the viewer to estimate the significance of each person in the video. Changing brightness of each person that reflects her/his significance could be very helpful for the viewer, because the viewer easily recognizes the significance of each person from the brightness.

In this paper, we propose a lighting control method for dynamic displaying of the significance of persons in a video. In this method, we control lighting dynamically so that the brightness of each person is adjusted in accordance with the significance of each person. The relationship between the light intensity and the image brightness is modeled. The intensity of lights is controlled based on the model. Our experiment shows that the brightness of each person can be controlled accurately. It also proved that our approach helps the viewers recognizing the significance of persons.

# 人物の重要度提示のための照明制御法

## 目次

第1章	はじめに	1
第2章	人物の重要度とその提示方法	3
第3章	照明光量と人物の画像輝度との関係	6
3.1	照明光量と物体の画像輝度との関係の定式化	6
3.1.1	物体の画像輝度の物理モデル	6
3.1.2	照明光量と光量制御変数及び物体の画像輝度との間の関係	8
3.2	人物を対象とした場合の光量制御変数と画像輝度との関係の定式化	12
3.3	人物を対象とした場合の未知項の測定法	13
3.3.1	カメラの反応関数 $g$ 、照明の光量変化関数 $h$ の測定方法	13
3.3.2	照明が人物の画像輝度に与える影響 $\bar{w}^{human}$ の測定	14
第4章	照明制御	17
4.1	光量制御変数 $v$ の算出	17
4.1.1	人物の顔の明るさの平滑化	19
4.1.2	環境照明	20
4.2	照明制御のアルゴリズム	21
第5章	実験	23
5.1	実験環境	23
5.2	照明光量と人物の画像輝度の関係の測定結果	25
5.2.1	カメラの反応関数 $g$ 、照明の光量変化関数 $h$ の測定結果	25
5.2.2	照明が人物の画像輝度に与える影響 $\bar{w}^{human}$ の測定結果	28
5.3	複数人物に対する照明制御	33
5.4	人物の明るさに対する人の認知結果	42
5.5	重要度に基づく照明制御	43
5.6	照明制御によって重要度を提示する上での問題点と今後の課題	50
5.6.1	照明制御の処理時間と人物の重要度	50

5.7	撮影の場にいる人のための照明制御 .....	51
第6章	結論	54
	謝辞	55
	参考文献	56

## 第1章 はじめに

人物に照明をあてて明るくすることは、その人物が重要であることを、見ている人に知らせるために有効である。例えば演劇では、それぞれの場面ごとに、台詞を話し重要な役割を持つ役者が明るくなるように、台詞がなくそれほど重要ではない脇役の役者が暗くなるように、照明を技師が手動で制御して、舞台上の役者がそれぞれどの程度重要であるかを、観客に示している。演劇では舞台上に多くの役者が存在し、このうちのどの役者が劇中で重要なのかを観客が見つけ出すのは難しいため、このように照明を制御することは効果的である。照明制御は、演劇のように人が対面して見る場合だけでなく、カメラで撮影して映像越しに見る場合にも有効であると考えられる。映像上に複数の人物が撮影されているとき、この映像を見る人は、映像上の複数の人物がそれぞれどの程度重要であるかを、映像と音声のみから判断する必要があり、これを照明制御による人物の画像輝度で提示することは有効であると考えられる。

複数の人物が、それぞれどの程度重要であるかは、状況によって変化する。ある状況における人物の重要さを数値化したものを、人物の重要度とする。重要度は、それぞれの人物ごとに定まる。状況は時々刻々変化し、各人物の重要度も、これにともなって変化する。会議や講義において、議論が行われている状況では、発言している人物や議論に参加している人物の重要度は高く、議論に参加せず、聞いているだけの人物の重要度は低いと考えられる。各人物の重要度は、システムや人が状況を推定あるいは理解することで定められる。東 [15] は、マイクロフォンアレイやポジションセンサなどのセンサを用い、講義における話者状況を推定している。本研究では、複数の人物に対して、各人物の重要度が与えられ、これに対応する明るさが定められていると仮定する。この仮定のもとで、移動する複数人物を撮影するとき、各人物の画像輝度が、その重要度によって定められた明るさになるように、複数照明の光量を制御する手法を提案する。

人物の画像輝度が設定された明るさになるように照明制御するためには、照明と人物の画像輝度との関係を知り、これに基づいて、人物が設定された明るさになる照明の光量を求め、制御する必要がある。

照明と物体の明るさとの関係に関する研究は、コンピューターグラフィックスの分野や Photometric Image-based Rendering[5] で行われている。コンピュー

ターグラフィックスでは、仮想世界における、ある照明環境下の物体の明るさを、物体の反射モデルをもとに計算している。この技法を用いて現実の物体の明るさを調べるためには、物体の形状や反射係数、照明から発せられる光の振舞いなどは既知でなければならない。しかし、現実の物体や照明で、これらを精度よく測定することは難しいため、実際の撮影に応用することは困難である。Photometric Image-based Rendering は、異なる照明環境下で撮影した画像から基底画像を求め、これを用いて任意照明環境下での画像を生成する。しかし、静止していない人物ではその位置や形状がフレームごとに変化するので、可能性のあるすべての基底画像を、前もって撮影しておかなければならない。

人物の撮影における照明制御の研究として、debevec らは、実在する背景の照明環境を多数の照明の光量を制御することで再現し、そのもとで人物の映像を撮影する手法を提案している [6]。この手法の意義は、背景映像に対して、人物の映像を明るさの整合性を保って合成できるように撮影することである。そのため、人物の映像上での明るさは、合成する背景の照明環境によって定まり、人物を設定した明るさで撮影することはできない。

本研究の手法の概要は次の通りである。人物の形状をしたモデル物体を用いて、各照明が、人物の明るさに与える影響度を事前測定する。そしてこの影響度をもとにして、複数人物の画像輝度が、それぞれの重要度によって定まった明るさで撮影されるような複数照明の光量を求める。各照明の光量を、各々求めた光量に制御し、複数人物の映像上での明るさを、各人物の重要度に基づいた明るさにする。

本稿の構成は以下のとおりである。まず第 2 章では、人物の重要度とその提示方法について述べる。次いで、第 3 章では照明の光量と人物の画像輝度の関係を定式化し、その測定方法を提案する。第 4 章では、第 3 章の方法で得た照明の光量と人物の画像輝度の関係をもとに、複数人物の映像上での明るさを、各人物の重要度に基づいた明るさになるように照明制御する方法を提案する。そして、第 5 章では、第 3 章、第 4 章で提案した手法を実装して実験し、複数人物の映像上での明るさを、各人物の重要度に基づいた明るさになるように照明制御できることを示す。また、本手法が人物の重要度を提示するために有効であることを示す。最後に第 6 章で、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 人物の重要度とその提示方法

本章では、人物の重要度を定義し、その提示方法について議論する。

本研究で想定する撮影環境としては、会議室や講義室といった、複数の人物が入れる室内を想定する。撮影環境には、複数の人物が存在し、それぞれ座席に着席しているか、歩行により移動するものとする。これらの人物は互いに発言し、コミュニケーションを行う。

複数の人物の間でコミュニケーションが行われているとき、この空間にはコミュニケーションの状況が存在している。例えば、「人物Aが発言した内容に対して人物Bが発言しており、人物Cがこれを聞いている」といった状況がある。この状況において重要な人物は、発言している人物Bだけでなく、人物Bの発言している内容に関係する発言した人物Aも重要であり、これを聞いている人物Cも、このコミュニケーションに参加しているために重要であると考えられる。さらに、それぞれの人物がどの程度重要であるかは、人物Bの発言内容と人物Aの発言内容の関連性などのより詳細なコミュニケーション状況によって定まる。人物Bの発言内容と人物Aの発言内容の関係が強いコミュニケーション状況ならば、人物Aはより重要であり、関係が弱いコミュニケーション状況ならば、人物Aはあまり重要でなくなる。本稿では、コミュニケーション状況によって定まる人物の重要さを数値化したものを、人物の重要度とする。コミュニケーション状況は人物の動作によって定まり、人物の重要度は、この状況を人やシステムが解釈することで定まる。人物の動作は時間軸に対して連続に変化するため、コミュニケーション状況も連続に変化する。よってコミュニケーション状況から定まる重要度も連続に変化する。

本研究では、このように複数の人物がコミュニケーションしている環境を撮影する際に、それぞれの人物の重要度を映像上に提示することを考える。

遠隔会議システムであるHERMES[17]は、比較的少人数の人物が着席している会議室において、それぞれの人物を撮影するカメラ、音声を取得するマイクを設置し、発言している人物の映像と音声を送る。このシステムでは、人物一人一人に専用のカメラがあり、それらのカメラからの映像のうち、主に話者の映像を選択する。東[15]は、遠隔講義における話者状況の映像化を行っている。このシステムでは、マイクロフォンアレイによって話者を特定し、カメラ制御、映像選択を行ってこの話者を映像化する。HERMES及び東のシステムは、とも



に話者一人のみが映った映像を撮影する。この映像を見ることにより、映像に映っている人物が話者であり、重要な人物であることが分かる。本研究では複数人物の重要度を提示するが、これらの手法では一人の人物が重要であることしか示すことができない。

複数人物のそれぞれの重要度を映像上で提示する方法としては、まず、カメラワークの制御がある。重要度の高い人物を画像の中心に大きく、重要度の低い人物を画像の周辺部に小さくなるように撮影することで、複数人物の重要度を提示することができる。しかし、画像上の人物の位置や大きさは、カメラの位置や向きだけでなく、人物の位置関係に依存する。人物の重要度は時間によって変化するため、重要度が変化するたびに人物の位置を変えることは難しい。

また、複数人物を撮影した映像上に、矢印などの記号を表示することで、その人物の重要度を映像上に提示する方法も考えられる。映像上の人物に、直接に重要度を数値で表示すれば、その人物の重要度を明確に提示できる。しかし、映像上に記号が表示されると、映像を見ている人の注意は記号に向いてしまい、人物に注意が向きづらくなると考えられる。中島 [20] は、アニメーションに文字情報を加えて提示した場合、アニメーションのみに比べて注視点の移動が大きく、映像全体への注視時間も下がることを確かめている。

そこで本研究では、照明を制御することで、人物の明るさをコントロールし、その明るさによって人物の重要度を提示することを考える。照明制御は、人物の位置関係に関わらず、その明るさを同時にコントロールできる点がカメラワークに基づく方法に比べて優れている。人物の明るさそのものを変えるので、記号など、撮影されるもの以外の情報を表示する必要がない。コミュニケーションの進行に従って人物の重要度は変化し、重要度の提示もこの変化にともなって迅速に変えなければならない。また人物の移動に追従して提示しなければならない。照明の光量制御にかかる時間は短いため、照明の制御を複数照明の光量制御によって実現することで、人物の重要度の変化に対しても迅速に照明制御でき、人物が移動しても、これに追従することができる。Light Stage 3[6]では、LED照明の光量制御をフレームレートで実現している。以上から、複数人物の重要度を映像上に提示するために、照明の光量を制御することは妥当であるといえる。

本研究では、コミュニケーションを行っている人物を撮影するため、映像において人物の顔が最も重要だと考える。そこで、人物の顔の明るさを制御の対

象とし、その平均画像輝度を人物の画像輝度とする。ここでは、人物の重要度とそれに基づく人物の画像輝度は、与えられるものとする。各人物の重要度に基づいた顔の平均画像輝度を、その人物の目標輝度と呼ぶことにする。照明制御は、すべての人物の顔の平均画像輝度が、目標輝度になるように行なう。

本研究で撮影を行うカメラは固定して設置し、その露出時間のみを制御する。ただしカメラワークが、複数の人物が撮影され、それぞれの解像度が十分高くなるようにカメラを設置する。このカメラで撮影されている人物のみを対象として照明制御を行う。照明は複数台設置し、それぞれ位置や向きは固定する。これらの照明は、外部から入力される値によって、その光量が制御される。撮影環境には、システムの制御下にある照明のみが存在するとし、太陽光など、システム外の要因で変化するような光源の影響はないものとする。この環境に存在する物体は、人物を除いて、位置、形状、反射係数が固定であるとする。照明から発せられた光は、これらの物体で相互反射が起き得るとする。本研究の撮影環境は室内を想定しているので、このような環境は通常よくみられる環境であり、妥当な仮定である。

## 第3章 照明光量と人物の画像輝度との関係

本研究では、複数人物が、それぞれの重要度によって定められた目標輝度になるように、複数照明の光量を制御する。このような制御を行うためには、照明光量と人物の画像輝度との関係を知る必要がある。本章では、照明光量と人物の画像輝度との関係を定式化し、この関係を実験によって測定する手法を述べる。

### 3.1 照明光量と物体の画像輝度との関係の定式化

本節では、複数照明の光量と、物体の画像輝度との一般的な関係を定式化する。

#### 3.1.1 物体の画像輝度の物理モデル

まず、光源、物体の反射、カメラの撮影における物理モデルについて述べる。

点光源  $i$  が光量  $I_i$  の光を発しているとき、点光源  $i$  から距離  $r$  離れた場所に存在する物体の表面には、

$$\frac{I_i}{r^2} \quad (3.1)$$

の強さの光が入射する。

図 3.1 のように、法線ベクトルが  $\mathbf{n}$  であるような物体表面に対して、強さが  $I_j^{in}$  の入射光  $j$  がベクトル  $\mathbf{l}_j$  の方向から入射したとき、視線方向  $\mathbf{e}$  への反射光の強さ  $I_j^{ref}$  は Torrance-Sparrow モデル [7] により、

$$I_j^{ref} = I_j^{in} \left( k_D \cos \theta(\mathbf{n}, \mathbf{l}_j) + k_S \frac{1}{\cos \psi(\mathbf{n}, \mathbf{e})} e^{-\frac{\phi(\mathbf{n}, \mathbf{l}_j, \mathbf{e})^2}{2\sigma^2}} \right) \quad (3.2)$$

となる。ただし、 $\mathbf{n}$ 、 $\mathbf{l}_j$ 、 $\mathbf{e}$  はそれぞれ単位ベクトルであり、 $\theta(\mathbf{n}, \mathbf{l}_j)$  は  $\mathbf{l}_j$  が  $\mathbf{n}$  となす角、 $\psi(\mathbf{n}, \mathbf{e})$  は  $\mathbf{e}$  が  $\mathbf{n}$  となす角、 $\phi(\mathbf{n}, \mathbf{l}_j, \mathbf{e})$  は  $\mathbf{l}_j$  と  $\mathbf{e}$  を二等分するベクトル  $\mathbf{h}$  が  $\mathbf{n}$  となす角をそれぞれ表す。 $k_D$ 、 $k_S$  は物体表面の持つ拡散反射、鏡面反射の反射率を表す係数で、それぞれ拡散反射係数、鏡面反射係数である。 $\sigma$  は、鏡面反射光の指向性の度合いを表す定数である。 $k_D$ 、 $k_S$ 、 $\sigma$  は物体毎に固有である。

実際の情景において、入射光は一つの方法からではなく様々な方向から入射する。それぞれの入射光に対する反射光の強さの和が、この物体表面の情景放射輝度  $L$  であり、以下の式で表すことができる。

$$L = \sum_j I_j^{ref} \quad (3.3)$$

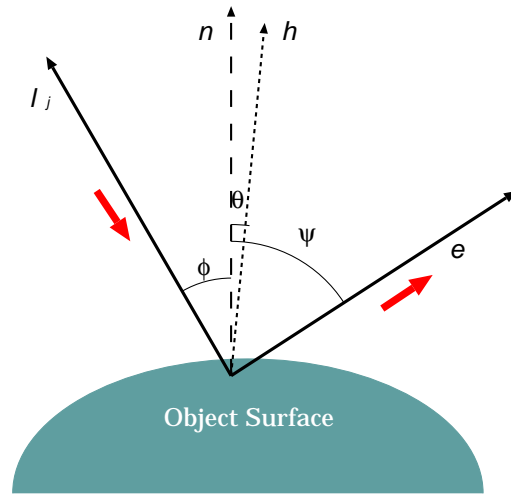


図 3.1: Torrance-Sparrow モデルに従う光の反射

画像上の画素  $p$  の画像輝度  $Z_p$  は、対応するカメラの CCD 素子内の画素  $m(p)$  の露光量  $H_{m(p)}$  によって定まる (図 3.2 参照)。  $m(p)$  の露光量  $H_{m(p)}$  は、  $m(p)$  に投影される物体表面  $k(p)$  の情景放射輝度  $L_{k(p)}$  により、

$$H_{m(p)} = \frac{1}{4}\pi\left[\frac{d}{f}\right]^2 \cos^4(\alpha_{k(p)})L_{k(p)}\Delta t \quad (3.4)$$

となる [12]。ただし、  $d$  はレンズの光が通過する部分の直径であり、絞りに相当する。  $f$  はレンズから CCD 素子までの距離、  $\alpha_{k(p)}$  は物体表面  $k(p)$  とレンズ中心を結んだ直線とカメラの光軸のなす角、  $\Delta t$  はカメラの露出時間である。

CCD 素子  $m(p)$  は、その露光量  $H_{m(p)}$  を計測することにより、画素  $p$  の画像輝度  $Z_p$  を得る。 CCD 素子が感知することのできる露光量にはダイナミックレンジと呼ばれる範囲がある。ダイナミックレンジの上限と下限をそれぞれ  $H^{max}$ 、  $H^{min}$  とし、そのときの画像輝度を  $Z^{max}$ 、  $Z^{min}$  とすると、  $H_{m(p)}$  と  $Z_p$  との関係は、 [1] より、カメラに固有な関数  $g$  を用いて

$$Z_p = \begin{cases} Z^{min} & (H_{m(p)} \leq H^{min}) \\ g(\ln(H_{m(p)})) & (H^{min} < H_{m(p)} < H^{max}) \\ Z^{max} & (H^{max} \leq H_{m(p)}) \end{cases} \quad (3.5)$$

と表すことができる。ただし、関数  $g$  は逆関数  $g^{-1}$  を持つ単調な関数であり、 CCD 素子の露光量と画像輝度との関係を表す。関数  $g$  を、カメラの反応関数と呼ぶことにする。なお、  $H^{max}$ 、  $H^{min}$ 、  $Z^{max}$ 、  $Z^{min}$  はカメラに固有の値である。

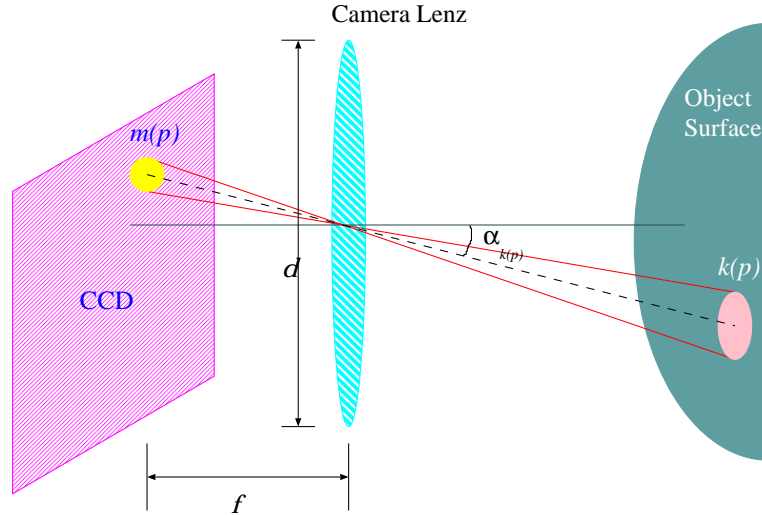


図 3.2: カメラのモデル

### 3.1.2 照明光量と光量制御変数及び物体の画像輝度との間の関係

本節では、3.1.1 節で定義した各モデルを用いて、照明光量と光量制御変数、及び物体の画像輝度との間の関係を定式化する。

本研究で用いる照明は点光源の集合であると仮定する。照明  $s$  は、その光量制御変数  $v_s$  によって光量が制御されている。光量制御変数は、各照明に外部から与える変数である。照明  $s$  を構成している点光源  $i_s$  が持つ  $I_{i_s}$  は、光量制御変数  $v_s$ 、実際の光量との関係を表す照明  $s$  に固有の 0.0–1.0 に正規化された関数  $h_s$ 、及びその係数  $a_{i_s}$  によって、

$$I_{i_s} = a_{i_s} h_s(v_s) \quad (3.6)$$

と表すことができると仮定する。つまり、照明  $s$  を構成する点光源  $i_s$  の光量  $I_{i_s}$  は、照明  $s$  の照明制御変数  $v_s$  と関数  $h_s$  に従っているとす。関数  $h_s$  は、光量制御変数と光量との関係を表し、ここでは照明  $s$  の光量変化関数と呼ぶ。

物体表面の放つ情景放射輝度  $L$  は、式 3.2、3.3 より

$$b_j = k_D \cos \theta(\mathbf{n}, \mathbf{l}_j) + k_S \frac{1}{\cos \psi(\mathbf{n}, \mathbf{e})} e^{-\frac{\phi(\mathbf{n}, \mathbf{l}_j, \mathbf{e})^2}{2\sigma^2}}$$

とおけば、

$$L = \sum b_j I_j^{in} \quad (3.7)$$

と表すことができる。

式 3.7 は、ある物体表面の放つ情景放射輝度  $L$  が、入射光  $j$  の強さ  $I_j$  の線形和であることができることを示している。

今、一つの点光源  $i_s$  のみが存在するときを考える。この光源が放つ光が物体表面  $k$  へ直接入射する場合、その入射光の強さ  $I_{i_s k}^{in}$  は、式 3.1、3.6 により、

$$I_{i_s k}^{in} = \frac{1}{r_{i_s k}^2} a_{i_s} h_s(v_s)$$

となる。 $r_{i_s k}$  は、点光源  $i_s$  から物体表面  $k$  への距離である。よって、この物体表面の反射光の強さ  $I_k^{ref}$  は、式 3.2、3.7 により、

$$\begin{aligned} I_k^{ref} &= b_{i_s k} \frac{1}{r_{i_s k}^2} a_{i_s} h_s(v_s) \\ &= c_{i_s k} h_s(v_s) \end{aligned} \quad (3.8)$$

となる。ここで  $c_{i_s k} = b_{i_s k} \frac{1}{r_{i_s k}^2} a_{i_s}$  である。しかし、本研究で想定する環境では相互反射が起こる。相互反射は、図 3.3 に示すように、ある物体表面に他の物体表面の反射光が入射することによってもたらされる。物体表面  $k$  に、物体表面  $k'$  の反射光が入射するとき、その入射光の強さは、物体表面  $k'$  の物体表面  $k$  への反射光の強さに等しくなる。物体表面  $k'$  の物体表面  $k$  への反射光の強さを  $I_{k' k}^{ref}$  とすると、物体表面  $k$  の反射光の強さは、

$$I_k^{ref} = b_{k' k} I_{k' k}^{ref} \quad (3.9)$$

となる。物体表面  $k'$  には、点光源  $i_s$  からの光が直接入射する場合、物体表面  $k$  の反射光の強さは、式 3.8、3.9 より、

$$\begin{aligned} I_k^{ref} &= b_{k' k} c_{i_s k'} h_s(v_s) \\ &= c_{i_s k k'} h_s(v_s) \end{aligned} \quad (3.10)$$

となる。ここで  $c_{i_s k k'} = b_{k' k} c_{i_s k'}$  である。物体表面  $k'$  に点光源  $i_s$  からの光が直接入射せず、他の物体の反射光が入射する場合でも、式 3.9 を何回か用いることで、物体表面  $k$  の反射光の強さは、式 3.10 と同様の式で表される。

以上から、点光源  $i_s$  による物体表面  $k$  の反射光の強さは、式 3.8、3.10 のように  $h_s(v_s)$  の線形和であることが分かる。これを

$$I_k^{ref} = c_{i_s k} h_s(v_s)$$

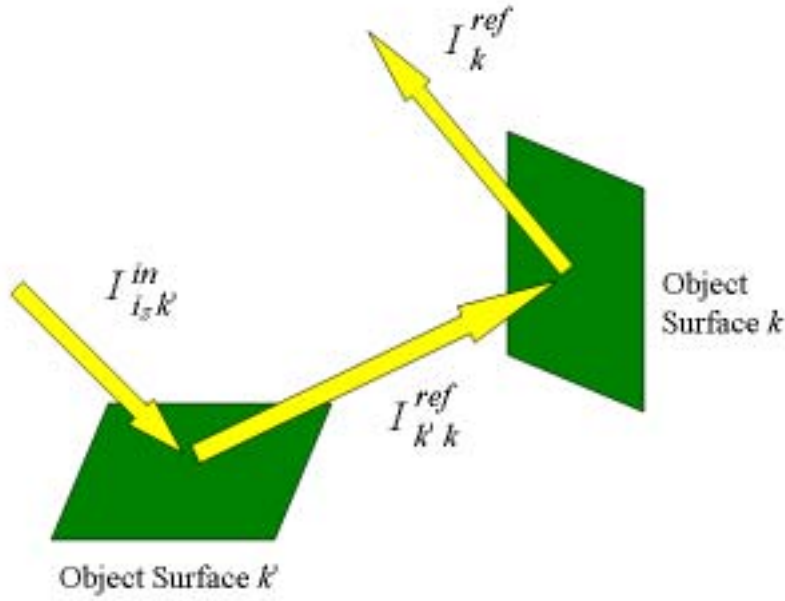


図 3.3: 相互反射における入射、反射光

と表す。照明  $s$  を構成するすべての点光源  $i_s$  で総和し、さらにすべての照明  $s$  で総和すると、物体表面  $k$  の情景放射輝度は、

$$\begin{aligned}
 L_k &= \sum_s \sum_{i_s \in s} (c_{i_s k} h_s(v_s)) \\
 &= \sum_s (c_{s k} h_s(v_s))
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

となる。ここで  $c_s = \sum_{i_s \in s} c_{i_s k}$  である。 $L_k$  は物体表面  $k$  における拡散反射、鏡面反射による反射光を再現するだけでなく、他の物体表面が放った反射光による反射も再現する。変数  $c_{s k}$  は、照明の向き、照明と物体の位置関係、物体の形状、物体の反射係数に依存するが、本研究では照明の向きと位置は固定であるとしているため、物体の位置、形状と反射係数のみに依存することになる。

式 3.4 において、 $u_p = \frac{1}{4}\pi\left[\frac{d}{f}\right]^2 \cos^4(\alpha_{k(p)})$  とおくと、CCD 素子内の画素  $m(p)$  の露光量  $H_{m(p)}$  は、

$$\begin{aligned}
 H_{m(p)} &= \frac{1}{4}\pi\left[\frac{d}{f}\right]^2 \cos^4(\alpha_{k(p)}) L_{k(p)} \Delta t \\
 &= u_p L_{k(p)} \Delta t
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

となる。 $u_p$  はカメラと画素  $p$  に固有の定数であり、カメラの向きや焦点距離、

カメラと物体との位置関係、カメラの絞りに依存する。しかし、本研究ではカメラの向き、位置、焦点距離と絞りは固定し、カメラの露出時間のみ制御する。よって、 $u_p$  は物体の位置にのみ依存することになる。

よって、画像上の画素  $p$  の輝度  $Z_p$  は、式 3.5、3.12 により以下のようにになる。

$$Z_p = \begin{cases} Z^{min} & (H_{m(p)} \leq H^{min}) \\ g(\ln(u_p L_{k(p)}) + \ln(\Delta t)) & (H^{min} < H_{m(p)} < H^{max}) \\ Z^{max} & (H^{max} \leq H_{m(p)}) \end{cases} \quad (3.13)$$

ここで、式 3.11 より、

$$\begin{aligned} u_p L_{k(p)} &= u_p \sum_s (c_{sk(p)} h_s(v_s)) \\ &= \sum_s c_{sk(p)} u_p h_s(v_s) \\ &= \sum_s w_{sk(p)} h_s(v_s) \end{aligned} \quad (3.14)$$

となる。ただし、 $w_{sk(p)} = c_{sk(p)} u_p$  である。

$u_p L_{k(p)}$  はカメラに対する物体表面  $k(p)$  の相対的な情景放射輝度である。これを物体表面  $k(p)$  の相対情景放射輝度と呼ぶことにし、 $\hat{L}_{k(p)}$  で表す。これにより、式 3.13、3.14 は以下のように書き直すことができる。

$$Z_p = \begin{cases} Z^{min} & (H_{m(p)} \leq H^{min}) \\ g(\ln(\hat{L}_{k(p)}) + \ln(\Delta t)) & (H^{min} < H_{m(p)} < H^{max}) \\ Z^{max} & (H^{max} \leq H_{m(p)}) \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\hat{L}_{k(p)} = \sum_s w_{sk(p)} h_s(v_s) \quad (3.16)$$

$h_s$  は照明  $s$  に固有の関数であり、 $g$  はカメラ固有の関数である。変数  $w_{sk(p)}$  は物体の位置、表面の形状と反射係数によって定まる変数である。よってこれらが固定である場合、つまり物体が静止している場合、 $w_{sk(p)}$  は定数となる。

式 3.15、3.16 において、既知であるのは照明制御変数  $v_s$ 、カメラの露出時間  $\Delta t$ 、画像輝度  $Z_p$  である。

式 3.15、3.16 により、照明の光量制御変数  $v_s$  と物体の画像輝度  $Z_p$  との関係が定式化された。



### 3.2 人物を対象とした場合の光量制御変数と画像輝度との関係の定式化

人物の明るさは、人物を撮影した画像中の顔の領域における平均画像輝度であるとみなせる。本節では、3.1節で定式化した光量制御変数と物体の画像輝度との関係を用いて、照明  $s$  の光量制御変数  $v_s$  と、人物の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}^{human}$  との関係を実式化する。

人物の顔の平均相対情景放射輝度  $\bar{L}^{human}$  は、顔の画像領域に含まれる画素  $p$  の集合に対応する表面  $k(p)$  の集合で、相対情景放射輝度  $\hat{L}$  を平均することで求められる。 $\bar{w}_s^{human}$  が  $w_{sk(p)}$  の人物の顔に対応する画素集合での平均であるとすると、式 3.16 から、

$$\bar{L}^{human} = \sum_s \bar{w}_s^{human} h_s(v_s) \quad (3.17)$$

と表すことができる。 $\bar{w}_s^{human}$  は照明  $s$  が人物の顔の平均画像輝度に与える影響を表し、人物の顔の位置、形状、反射係数に依存する。

式 3.15 から、相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}$  と画像輝度  $Z_p$  とは非線形の関係にある。本研究では、人物の顔に対応する CCD 素子内の画素  $m(p)$  の露光量  $H_{m(p)}$  は、すべてダイナミックレンジ内に収まるものとし、人物の顔の相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}$  は、分散が小さいものとする。これにより、人物の顔の平均相対情景放射輝度  $\bar{L}^{human}$  と平均画像輝度  $\bar{Z}^{human}$  との関係を、以下のように近似する。

$$\begin{aligned} \bar{Z}^{human} &= \frac{1}{n} \sum_{p \in human} Z_p \\ &= \frac{1}{n} \sum_{p \in human} (g(\ln(\hat{L}_{k(p)}) + \ln(\Delta t))) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{p \in human} (g(\ln(\hat{L}_{k(p)}) + \ln(\Delta t))) \\ &\sim g(\ln(\frac{1}{n} \sum_{p \in human} (\hat{L}_{k(p)})) + \ln(\Delta t)) \\ &= g(\ln(\bar{L}^{human}) + \ln(\Delta t)) \end{aligned} \quad (3.18)$$

ここで、 $n$  は人物の顔の画像領域に対応する画素数である。関数  $g$  と対数関数  $\ln$  は滑らかな関数であるので、 $\hat{L}_{k(p)}$  の分散が小さい場合には、この近似は十分に成り立つ。

式 3.17、3.18 から、式 3.15、3.16 は次のように書き直すことができる。

$$\bar{Z}^{human} = g(\ln(\bar{L}^{human}) + \ln(\Delta t)) \quad (3.19)$$

$$\bar{L}^{human} = \sum_s \bar{w}_s^{human} h_s(v_s) \quad (3.20)$$

この式は、照明  $s$  の光量制御変数  $v_s$  と、人物の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}^{human}$  との関係を表す。式 3.19、3.20 において、未知の関数、変数は、カメラの反応関数  $g$ 、照明の光量変化関数  $h_s$ 、照明  $s$  が人物に与える影響の変数  $\bar{w}_s^{human}$  である。よって、これらを求めれば、照明  $s$  の光量制御変数  $v_s$  と人物の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}^{human}$  の関係が分かる。

### 3.3 人物を対象とした場合の未知項の測定法

式 3.19、3.20 で、カメラの反応関数  $g$ 、照明の光量変化関数  $h_s$ 、照明  $s$  が人物に与える影響の変数  $\bar{w}_s^{human}$  は未知である。本節では、これらの測定方法を述べる。

#### 3.3.1 カメラの反応関数 $g$ 、照明の光量変化関数 $h$ の測定方法

カメラの反応関数  $g$ 、照明の光量変化関数  $h$  は、撮影される物体に依存しない、カメラおよび照明に固有の関数である。そこで、静止した物体に照明を当てて撮影し、3.1.2 節で述べた照明の光量と物体の画像輝度との関係式 3.15、3.16 に基づいて測定する。反応関数  $g$ 、光量変化関数  $h$  を求めることは、カメラ、照明の明るさのキャリブレーションを行うことである。

まず、関数  $g$  を求める。物体が静止し、照明の光量を固定している状況では、式 3.15 において、画素  $p$  に対応する物体表面  $k(p)$  の相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}$  は変化しない。いくつかの露出時間  $\Delta t$  で撮影し、これにともなう画素  $p$  の画像輝度  $Z_p$  の変化を測定することで、カメラの反応関数  $g$  を求めることができる [1]。

求めた関数  $g$  と画像輝度  $Z_p$  から、対応する相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}$  を求めることができる。式 3.15 より、

$$\hat{L}_{k(p)} = \exp(g^{-1}(Z_p) - \ln(\Delta t)) \quad (3.21)$$

によって求まる。ただし、CCD 素子内の画素  $m(p)$  の露出量  $H_{m(p)}$  がカメラのダイナミックレンジから外れているとき、つまり  $Z_p = Z^{min}$  または  $Z_p = Z^{max}$  のとき、 $\hat{L}_{k(p)}$  は正しく求まらない。そのため、 $\hat{L}_{k(p)}$  を求めるために、すべての  $H_{m(p)}$  が少なくとも一度はダイナミックレンジ内に収まるように、いくつかの露出時間で撮影して測定する。

次に、照明  $s$  の光量変化関数  $h_s$  を求める。物体が静止しているとき、照明  $s$

のみを点灯させると、式 3.16 は、

$$\hat{L}_{k(p)} = w_{sk(p)} h_s(v_s) \quad (3.22)$$

と同値である。なお、変数  $w_{sk(p)}$  は  $v_s$  の値にかかわらず固定である。よって、 $v_s$  を変化させ、このときの  $\hat{L}_{k(p)}$  の変化を測定する。この結果を 0.0–1.0 に正規化し、光量変化関数  $h_s$  を求める。以上の測定を、すべての照明において行う。

### 3.3.2 照明が人物の画像輝度に与える影響 $\bar{w}^{human}$ の測定

照明  $s$  が人物の画像輝度に与える影響を表す変数  $\bar{w}_s^{human}$  は、人物の位置、表面形状、反射係数に依存する。

人物の顔の位置は一定ではないため、 $\bar{w}_s^{human}$  を、その 3 次元座標  $\mathbf{q} = (x, y, z)$  による関数  $\bar{w}_s^{human}(\mathbf{q})$  とする。人物の形状は個人差があり、表情によって時々刻々変化する。そのため、前もって測定しておくことができず、リアルタイムで精度良く測定することも難しい。そこで、人物の頭部の標準的な形状をしたモデル物体を用い、これを人物の顔の代わりとして測定する。つまり、モデル物体の形状は人物と同じであると仮定し、モデル物体に照明を当て、これを撮影して、照明  $s$  がモデル物体の明るさに与える影響を測定する。人物の顔とモデル物体は、その反射係数が異なるので、この違いを測定により補正する。

位置  $\mathbf{q}$  にモデル物体を置いて撮影したとき、その相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}^{model}(\mathbf{q})$  は、式 3.16 により、

$$\hat{L}_{k(p)}^{model}(\mathbf{q}) = \sum_s w_{sk(p)}^{model}(\mathbf{q}) h_s(v_s) \quad (3.23)$$

で得られる。 $w_{sk(p)}^{model}(\mathbf{q})$  は、照明  $s$  が位置  $\mathbf{q}$  にあるモデル物体に与える影響度を表す変数である。同様に、位置  $\mathbf{q}$  の人物を撮影したとき、その相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}^{human}(\mathbf{q})$  は、

$$\hat{L}_{k(p)}^{human}(\mathbf{q}) = \sum_s w_{sk(p)}^{human}(\mathbf{q}) h_s(v_s) \quad (3.24)$$

と表すことができる。 $w_{sk(p)}^{human}(\mathbf{q})$  は、照明  $s$  が位置  $\mathbf{q}$  の人物に与える影響の変数である。人物とモデル物体との違いは、その反射係数のみであると仮定する。本研究では、人物、モデル物体の反射は、ともに均一な拡散反射であり、

$$w_{sk(p)}^{human} = r w_{sk(p)}^{model} \quad (3.25)$$

と表すことができる。 $r$  は、人物とモデル物体の拡散反射係数の比であり、反射

補正係数と呼ぶことにする。

照明  $s$  が位置  $\mathbf{q}$  のモデル物体に与える影響度を表す変数  $w_{sk(p)}^{model}(\mathbf{q})$  と、人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  を測定することで、照明  $s$  が、人物  $i$  の平均画像輝度に与える影響の変数  $\bar{w}_s^{human}$  を求めることができる。

位置  $\mathbf{q}$  にモデル物体を置き、照明  $s$  のみを点灯したとき、式 3.23 は、

$$\hat{L}_{k(p)}^{model}(\mathbf{q}) = w_{sk(p)}^{model}(\mathbf{q})h_s(v_s) \quad (3.26)$$

と表すことができる。その相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}^{model}(\mathbf{q})$  を式 3.21 によって求めると、照明  $s$  の光量制御変数  $v_s$  と光量変化関数  $h_s$  は既知であるため、 $w_{sk(p)}^{model}(\mathbf{q})$  が測定できる。

式 3.23、3.24、3.25 を、人物の顔に対応する画素、つまりモデル物体に対応する画素で平均すると、

$$\begin{aligned} \bar{L}^{model}(\mathbf{q}) &= \sum_s \bar{w}_s^{model}(\mathbf{q})h_s(v_s) \\ \bar{L}^{human}(\mathbf{q}) &= \sum_s \bar{w}_s^{human}(\mathbf{q})h_s(v_s) \\ \bar{w}_s^{human} &= r\bar{w}_s^{model} \end{aligned} \quad (3.27)$$

となる。これらの式から、人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  を求めることができる。

$$\begin{aligned} r &= \frac{\bar{w}_s^{human}(\mathbf{q})}{\bar{w}_s^{model}(\mathbf{q})} \\ &= \frac{\sum_s \bar{w}_s^{human}(\mathbf{q})h_s(v_s)}{\sum_s \bar{w}_s^{model}(\mathbf{q})h_s(v_s)} \\ &= \frac{\bar{L}^{human}(\mathbf{q})}{\bar{L}^{model}(\mathbf{q})} \end{aligned} \quad (3.28)$$

すなわち、 $r$  は人物とモデル物体が同じ位置、同じ照明環境の下でのそれぞれの平均相対情景放射輝度の比で表され、これらを測定することで求めることができる。

以上の手順により、照明  $s$  が位置  $\mathbf{q}$  のモデル物体に与える影響の変数  $w_{sk(p)}^{model}(\mathbf{q})$  と、人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  が求まる。 $w_{sk(p)}^{model}(\mathbf{q})$  をモデル物体の画像領域で平均し、式 3.27 から照明  $s$  が、人物  $i$  の平均画像輝度に与える影響の変数  $\bar{w}_s^{human}(\mathbf{q})$  を求めることができる。

この測定方法では、モデル物体を置いた位置  $\mathbf{q}^{model}$  での  $\bar{w}_s^{human}(\mathbf{q}^{model})$  のみ

測定できる。人物は移動するため、人物の移動範囲内で、任意位置で測定する必要がある。そこで、人物の移動範囲内で、いくつかの位置にモデル物体を置いて  $\bar{w}_s^{human}(\mathbf{q}^{\text{model}})$  を測定し、その結果を照明  $s$  ごとに、位置  $\mathbf{q}$  に対して補間することで、任意位置の  $\bar{w}_s^{human}(\mathbf{q})$  を求める。

## 第4章 照明制御

照明  $s$  の光量制御変数  $v_s$  と人物の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}^{human}$  との関係は、第3章の定式化と測定法によって求められる。本章では、それをもとに人物の顔の平均画像輝度を目標輝度になるように照明を制御する方法について述べる。

### 4.1 光量制御変数 $v$ の算出

本節では、人物  $n$  ( $n = 1 \dots N$ ) の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  がそれぞれの目標輝度  $\bar{Z}_n^T$  になるような、照明  $s$  ( $s = 1 \dots S$ ) の光量制御変数  $v_s$  を求める方法について述べる。

照明  $s$  の光量制御変数  $v_s$  と人物  $n$  の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  との関係は、式 3.19、3.20 により、

$$\bar{Z}_n^{human} = g(\ln(\bar{L}_n^{human})) + \ln(\Delta t) \quad (4.1)$$

$$\bar{L}_n^{human} = \sum_s \bar{w}_{n,s}^{human} h_s(v_s) \quad (4.2)$$

で表される。 $\bar{L}_n^{human}$  は、人物  $n$  の顔の平均相対情景放射輝度である。

人物  $n$  の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  が、目標輝度を  $\bar{Z}_n^T$  であるとき、目標相対情景放射輝度  $\bar{L}_n^T$  は、式 4.1 により

$$\bar{L}_n^T = \exp(g^{-1}(\bar{Z}_n^T) - \ln(\Delta t)) \quad (4.3)$$

で求められる。

よって、式 4.2 から、すべての人物  $n$  において、制約式

$$\bar{L}_n^T = \sum_s \bar{w}_{n,s}^{human} h_s(v_s) \quad (4.4)$$

が成り立つような光量制御変数  $v_s$  を求め、これに従って照明を制御する。

式 4.4 は、

$$X_s = h_s(v_s) \quad (4.5)$$

とおくことで、

$$\bar{L}_n^T = \sum_s \bar{w}_{n,s}^{human} X_s \quad (4.6)$$

という線形制約式の形になる。

ここで、照明の光量変化関数  $h_s$  は、その値域が 0.0–1.0 に正規化された関数

であるから、式 4.5 により、

$$0.0 \leq X_s \leq 1.0 \quad (4.7)$$

という制約がある。

$N$  個の線形制約式 4.6、 $S$  個の線形制約式 4.7 をすべて満たす解  $X_s$  を解くために、シンプレックス法 [13][14] を用いる。シンプレックス法は、線形計画問題を解く際によく用いられている。シンプレックス法により、線形制約式を満たし、かつ、ある線形な目的関数を最大にするような解  $X_s$  を求めることができる。さらに、解が存在しない場合にはそれを判定することができる。本研究では、線形制約式を満たす解を求めることのみが必要なため、目的関数は特に定めないことにする。

解  $X_s$  が存在する場合、つまりすべての人物に対して、その顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  が目標輝度  $\bar{Z}_n^T$  になるような照明制御が可能ならば、シンプレックス法によって求められた解  $X_s$  から、式 4.5 により、

$$v_s = h_s^{-1}(X_s) \quad (4.8)$$

によって光量制御変数  $v_s$  を求め、この  $v_s$  に基づいて照明制御を行う。

式 4.6 の制約の数は、照明制御の対象とする人数  $N$  である。これらの制約をすべて満たすためには、少なくとも  $N$  以上の変数が必要である。変数  $X_s$  の数は照明数  $S$  であるから、すべての人物に対して照明制御するためには、照明数は、

$$S \geq N$$

である必要がある。

しかし、それぞれの照明には式 4.7 の制約が存在する。そのため、式 4.6 において、

$$\bar{L}_n^T > \sum_s \bar{w}_{n,s}^{human}$$

である場合は、この人物の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  を目標輝度  $\bar{L}_n^T$  にすることができない。

式 4.6 における係数  $\bar{w}_{n,s}^{human}$  は、人数  $n$  は  $1 \dots N$ 、照明数  $s$  は  $1 \dots S$  から、

$N \times S$  行列  $W$  によって、

$$W = \begin{pmatrix} \bar{w}_{1,1}^{human} & \bar{w}_{1,2}^{human} & \cdots & \bar{w}_{1,S}^{human} \\ \bar{w}_{2,1}^{human} & & \cdots & \bar{w}_{2,S}^{human} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \bar{w}_{N,1}^{human} & & \cdots & \bar{w}_{N,S}^{human} \end{pmatrix}$$

と表せる。 $N$  個の線形制約式 4.6 で解  $X_s$  が存在するためには、

$$\text{rank}W \geq N \quad (4.9)$$

である必要がある。

行列  $W$  は、 $N \times S$  行列であるから、少なくとも

$$S \geq N$$

でなければならない。つまり、照明数  $S$  は照明制御対象の人数  $N$  以上でなければならない。3.2 節で述べたように、照明  $s$  が人物  $n$  の明るさに与える影響  $\bar{w}_{n,s}^{human}$  は、人物  $n$  の位置によって定まる。照明  $s$  の照射範囲が広いとき、人物  $n$  の明るさに与える影響  $\bar{w}_{n,s}^{human}$  は、人物  $n$  の位置に関わらずほぼ同じになる。このとき、行列  $W$  の行ベクトル  $W_n$  が等しい行ができる。これによって  $\text{rank}W$  が減少し、式 4.9 が満たされなくなると、解  $X_s$  が存在しなくなる。よって、各照明の照射範囲を狭くし、照明  $s$  が人物の明るさに与える影響  $\bar{w}_s^{human}$  は、人物の位置の違いによって大きく変化するようにした方が、解  $X_s$  が求まる可能性が大きくなる。

#### 4.1.1 人物の顔の明るさの平滑化

本研究では、人物  $n$  の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  が目標輝度  $\bar{Z}_n^T$  になるように照明制御を行う。変数  $X_s$  が式 4.6 の制約を満たす場合、変数  $X_s$  に従って照明制御を行えば、人物  $n$  の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  が目標輝度  $\bar{Z}_n^T$  になることが保証される。本節では、人物  $n$  の顔の平均画像輝度  $\bar{Z}_n^{human}$  を目標輝度  $\bar{Z}_n^T$  にすることに加え、人物の顔の画像輝度の分散ができるだけ小さくなるように照明制御することを考える。人物の顔の画像輝度の分散を小さくすることで、ハイライトや影のように、極端に明るい、または暗い部分ができることを防ぎ、人物の顔の映像がより見やすくなると考えられる。

人物の顔の画像領域をいくつかの部分に分割し、それぞれの平均画像輝度が



等しくなるように照明制御することで、人物の顔の画像輝度の分散を小さくする。本稿では、人物の顔の画像領域をその重心によって左右の画像領域に分け、各々の平均画像輝度が等しくなるように照明制御する。人物の顔は左右対象であり、左右の平均画像輝度が等しいとき、人物の顔の画像輝度の分散は十分に小さいと考えられる。ここでは人物の顔を左右の2つの画像領域に分けるが、より多くの画像領域に分けた場合でも、同様に照明制御することができる。

照明  $s$  の光量が人物の顔の左、右画像領域の画像輝度に与える影響を  $\bar{w}_s^{humanL}$ 、 $\bar{w}_s^{humanR}$  とする。 $\bar{w}_s^{humanL}$ 、 $\bar{w}_s^{humanR}$  は、3.3.2 節の照明の光量が人物の画像輝度に与える影響の測定において、照明  $s$  がモデル物体に与える影響の変数  $w_{sk(p)}^{model}$  をモデル物体の左、右画像領域で平均して  $\bar{w}_s^{modelL}$ 、 $\bar{w}_s^{modelR}$  を求め、式 3.27 により、

$$\begin{aligned}\bar{w}_s^{humanL} &= r\bar{w}_s^{modelL} \\ \bar{w}_s^{humanR} &= r\bar{w}_s^{modelR}\end{aligned}$$

とすることで求まる。人物の顔の左、右画像領域の平均画像輝度を等しくすることは、人物  $n$  の顔の左右の平均相対情景放射輝度  $\bar{L}_n^{humanL}$ 、 $\bar{L}_n^{humanR}$  を等しくすることであるから、式 4.2、4.5 より、

$$\begin{aligned}\bar{L}_n^{humanL} &= \bar{L}_n^{humanR} \\ \sum_s \bar{w}_{n,s}^{humanL} h_s(v_s) &= \sum_s \bar{w}_{n,s}^{humanR} h_s(v_s) \\ \sum_s \bar{w}_{n,s}^{humanL} X_s &= \sum_s \bar{w}_{n,s}^{humanR} X_s\end{aligned}\quad (4.10)$$

となる。

よってこの制約を加え、解  $X_s$  を求める。本研究では人物の顔の平均画像輝度を目標輝度にすることが目的であり、画像輝度の分散を小さくすることについては付加的な制約条件である。そのため、解が存在しない場合は、式 4.10 の制約を一人分ずつ除き、解を求める。人物  $n$  の目標輝度  $Z_n^T$  が小さいほど、人物の顔の画像輝度の分散の絶対値が小さいと考えられるので、 $Z_n^T$  が小さい人物  $n$  の順に、その制約を除いてゆく。

#### 4.1.2 環境照明

一般に、撮影を行っている部屋全体の明るさを保つために、いくつかの照明の光量を固定しておくことがある。この照明は、撮影環境にいる人や映像を見

ている人に、人物だけでなく部屋全体の様子を見せるために用いられる。このような照明を環境照明と呼ぶことにする。環境照明の光量は固定されるため、人物の明るさを制御するために変化させることができない。

環境照明の光量制御変数は変化させることができないため、環境照明  $s$  については、式 4.7 の制約に代わって、

$$X_s = C_s \quad (4.11)$$

という制約を用いる。  $C_s = h_s(v_s^{const})$  であり、  $v_s^{const}$  は環境照明  $s$  に与えられた光量制御変数である。

## 4.2 照明制御のアルゴリズム

4.1 節の照明光量の計算手法をもとに、照明制御のアルゴリズムを整理して以下に示す。

- Step 1. 制約集合  $\mathfrak{R}$  を空集合にする。
- Step 2. 環境照明について、制約式 4.11 を制約集合  $\mathfrak{R}$  に加える。
- Step 3. 環境照明以外の照明について、制約式 4.7 を制約集合  $\mathfrak{R}$  に加える。
- Step 4. 人物  $n$  の位置を取得し、3.3.2 節で事前測定されたデータから、照明  $s$  が人物の画像輝度に与える影響  $\bar{w}_{n,s}^{human}$  を求める。同時に、照明  $s$  が人物  $n$  の顔の左、右画像領域の画像輝度に与える影響  $\bar{w}_{n,s}^{humanL}$ 、 $\bar{w}_{n,s}^{humanR}$  を求める。
- Step 5. 目標輝度  $Z_n^T$  から式 4.3 によって、目標相対情景放射輝度  $L_n^T$  を求める。
- Step 6. すべての人物  $n$  について、顔の平均画像輝度に関する制約式 4.6 を制約集合  $\mathfrak{R}$  に加える。
- Step 7. すべての人物  $n$  について、顔の画像輝度の分散に関する制約式 4.10 を制約集合  $\mathfrak{R}$  に加える。
- Step 8. シンプレックス法により、制約集合  $\mathfrak{R}$  を満たす解  $X_s$  を求める。
- Step 9. シンプレックス法の結果、解が存在するかどうかにより、以下に分岐する。
  - (a) 解が存在する場合:

式 4.8 により照明  $n$  の光量制御変数  $v_s$  を求め、これによって照明の光量を変化させる。その後、Step 1 に戻る。
  - (b) 解が存在しない場合:

制約集合  $\mathfrak{R}$  内の式 4.10 の制約の数により、以下に分岐する。

    - i. 制約集合  $\mathfrak{R}$  内に式 4.10 の制約が存在しない場合:

すべての人物の顔の平均画像輝度を目標輝度にする照明制御ができないので、照明制御を行わず、Step 1 に戻る。

- ii. 制約集合  $\mathcal{R}$  内に式 4.10 の制約が存在する場合:  
式 4.10 の制約のうち、最も目標輝度が低い人物  $n$  の制約を除き、Step 8 に戻る。

## 第5章 実験

本章では、3.3節で述べたように照明の光量と人物の画像輝度との関係を測定し、第4章の照明制御の実験を行った。

### 5.1 実験環境

京都大学学術情報メディアセンター R202 教室において実験を行った。実験環境を図 5.1 に示す。

実験環境では複数の人物が存在し、コミュニケーションを行うことができる。実験環境は、教壇側、座席側の 2 つに分けられる。教壇側は座席がなく、人物は歩行により移動できるが、人物の床と並行な平面上の移動範囲は、図 5.7 のように  $x$  軸方向 (横向き) に 0–300cm、 $y$  軸方向 (奥行き方向) は 0–155cm であるとした。人物が歩行によって移動する場合、その顔の高さはほぼ一定であると考えられるため、人物の頭頂部の高さは 180cm で固定であるとする。よって、人物の顔の位置は、 $q = (x, y)$  であるとする。座席側には図 5.1 のように位置が固定された座席  $e$  ( $e = 1 \dots 5$ ) を用意し、人物はこの座席に着席して移動しないものとする。教壇側の人物と座席側の人物は互いに向かい合ってコミュニケーションを行うものとする。そのため、教壇側の人物と座席側の人物の顔の向きは、正面を向いていると仮定する。このようなコミュニケーション環境は、講義や会議などに多くみられる。教壇側、座席側の人物を照らす照明、撮影するカメラなどの設備は以下のものを用意した。

#### 教壇側の人物のための設備

カメラ (SONY 製 EVI-D30) は露出時間以外のパラメータを固定して設置し、システムへの入力画像は  $640 \times 480$ pixel である。カメラはカラーカメラであり、RGB それぞれ 256 階調の輝度が得られるが、これをグレースケールに変換し、画像輝度  $Z$  ( $Z = 0 \dots 255$ ) とした。

カメラは、教壇側の人物の正面に設置し、移動範囲内の人物がすべて撮影されるようにした。そのため、教壇側の人物はすべてこのカメラで撮影され、その顔の向きはカメラに対して正対している。

教壇側の人物のための照明として、LPL 製 500W のハロゲンランプ照明を 8 台、位置や向きを固定して設置した。それぞれのハロゲンランプ照明は、調光

機 (Effect Arts 製) によって、128 段階の光量制御が可能である。つまり、 $v_s = 0 \dots 127$  である。

教壇側の人物は移動するため、各人物の位置を取得するため、図 5.1 のように超音波式ポジションセンサー (InterSense 製 IS-600 Mark2 X-Bar) を設置した。ポジションセンサーによって、複数のマーカーの 3 次元位置を測定することができる。各人物の頭頂部にマーカーを置き、その位置を測定することで人物の位置を取得した。位置の精度は、約 5cm で取得した。

#### 座席側の人物のための設備

座席側の人物を撮影するカメラとして、教壇側の人物を撮影するカメラと同じ型のカメラをもう一台用意し、座席側の人物の正面に固定して設置した。座席 1...5 に着席している人物が、映像上で重なりがなく、全員撮影できるように設置しているため、撮影された映像には、座席側の人物が全員、カメラに正対した映像が撮影される。

座席に着席している人物のための照明としては、プロジェクター (SANYO 製 LP-XP46, 4100ANSI ルーメン) を 2 台用いた。これをプロジェクター 1、2 とする。各プロジェクターで  $1024 \times 768$  pixel の投影画像を表示し、投影画像を変化させることで、プロジェクターの光量を制御した。各プロジェクターの投影画像において、図 5.2 のように、各座席に着席している人物に投影される投影画像領域を前もって測定した。

人物毎の投影画像領域を仮想照明とし、それぞれ一つの照明とした。仮想照明の光量は、対応する投影画像領域の画像輝度を変化させることで制御する。プロジェクターの投影画像輝度は、RGB 値をそれぞれ 0-255 で制御可能だが、本研究では人物の色のコントロールは行わず明るさのみをコントロールするため、RGB 値を同じ値にし、これらを制御する。よって、仮想照明の光量制御変数は  $v_s = 0 \dots 255$  である。プロジェクター 1 において、座席 1...5 に着席している人物に対応する仮想照明を仮想照明 1...5 とし、仮想照明 1...5 以外の投影画像領域を、環境照明 1 とした。プロジェクター 2 においても、座席 1...5 に着席している人物に対応する仮想照明を仮想照明 6...10 とし、仮想照明 6...10 以外の投影画像領域を、環境照明 2 とした。プロジェクター 1、2 の投影画像を図 5.3 に示す。

座席側の人物は、座席に着席して移動しないため、各人物の位置は、各座席

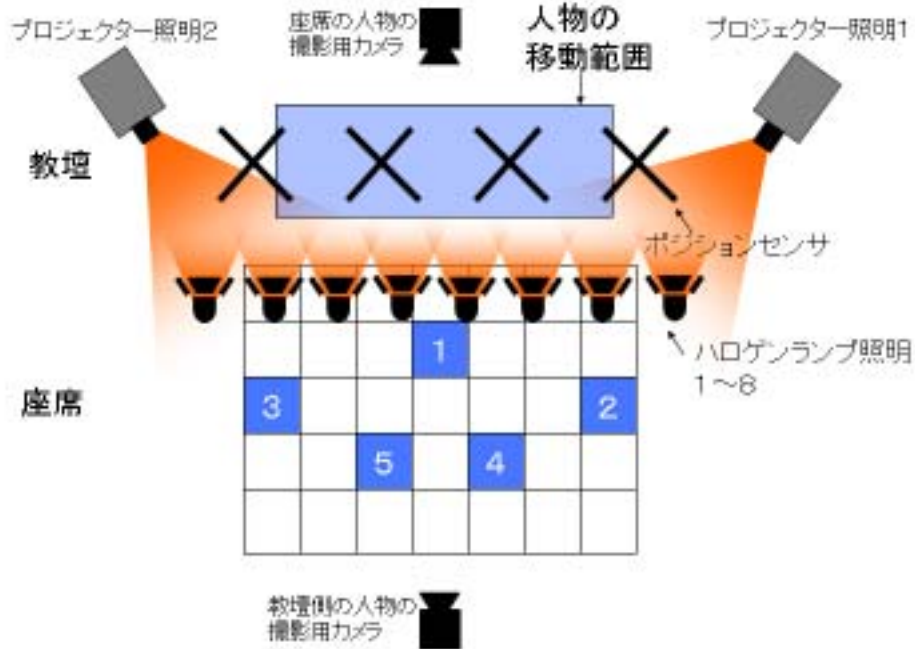


図 5.1: 実験環境

ごとに一意に定まる。

本研究で用意した実験環境には、太陽光など、以上に挙げた照明以外の光源は存在しない。実験環境の壁や天井は白色であり、照明から発せられた光は壁などの実験環境に存在する物体間で相互反射する。しかし、実験環境に存在する物体の位置、反射係数は変化しない。

## 5.2 照明光量と人物の画像輝度の関係の測定結果

3.3 節で提案した手法を用いて、照明光量と人物の画像輝度の関係の測定を行った。この測定結果について述べる。

### 5.2.1 カメラの反応関数 $g$ 、照明の光量変化関数 $h$ の測定結果

3.3.1 節の手法を用いて、反応関数  $g$ 、光量変化関数  $h$  を測定した。これらを求めることは、カメラ、照明の明るさのキャリブレーションを行うことである。

まず、カメラの反応関数  $g$  を測定した。教壇側の人物を撮影するカメラを、照明環境を固定し、静止した情景の画像を、露出時間を  $\frac{1}{75}$  から  $\frac{1}{10000}$  (s) まで 13 段階変え、13 枚撮影した。267 個の画素をランダムに取り出し、露出時間の変化

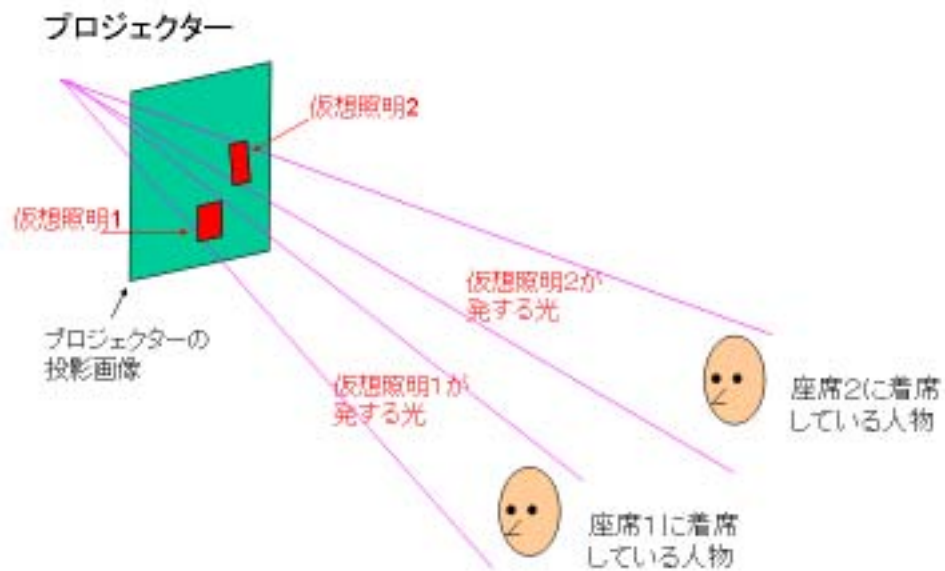
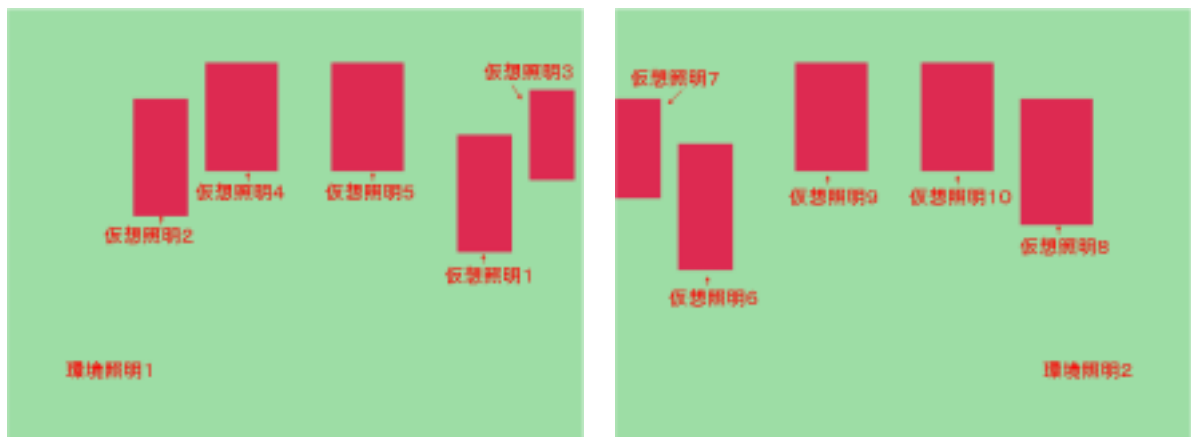


図 5.2: 仮想照明のモデル



(a) プロジェクター 1

(b) プロジェクター 2

図 5.3: プロジェクターの仮想照明と環境照明

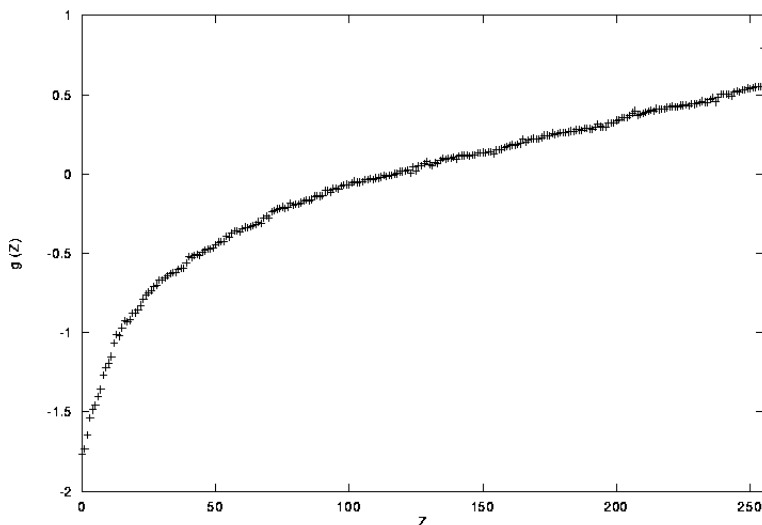


図 5.4: カメラの反応関数  $g^{-1}$

に対する各画素の画像輝度変化を測定し、反応関数  $g$  を測定した。図 5.4 に、関数  $g$  の逆関数  $g^{-1}$  のグラフを示す。横軸は画像輝度  $Z$  である。座席側を撮影するカメラにおいても、同様に測定し、図 5.4 と同様の結果が得られた。

静止した情景の画像を露出時間を  $\frac{1}{75}$  から  $\frac{1}{10000}$ (s) まで 13 段階変えて 13 枚撮影することで、測定されたカメラの反応関数  $g$  を用いて、式 3.21 によって、相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}$  を測定する。

次に、照明の光量変化関数  $h$  の測定を行った。ハロゲンランプ照明  $s$  の光量変化関数  $h_s$  を測定するために、静止した情景に対して一つのハロゲンランプ照明のみを点灯し、その情景の相対情景放射輝度を教壇側の人物を撮影するカメラで測定した。点灯しているハロゲンランプ照明の光量制御変数  $v_s$  を 0–255 まで 8 ごとに変化させ、それぞれの光量制御変数  $v_s$  のときの、情景の相対情景放射輝度  $\hat{L}_{k(p)}$  を測定した。ノイズの影響を少なくするため、相対情景放射輝度を、すべての画素で合計し、情景の総相対情景放射輝度  $L^{scene}$  を求めた。つまり、

$$L^{scene} = \sum_p \hat{L}_{k(p)}$$

である。光量制御変数  $v_s$  の変化に対する  $L^{scene}$  の変化を、0.0–1.0 の間に正規化し、 $v_s$  に対して線形補間することで、ハロゲンランプ照明  $s$  の光量変化関数  $h_s$



を求めた。図 5.5(a) にハロゲンランプ照明 4 の測定結果を示す。他のハロゲンランプ照明についても同様に測定を行った結果、図 5.5(a) と同様の結果が得られた。

プロジェクターの仮想照明  $s$  についても、同様に仮想照明  $s$  のみを点灯した情景の総相対情景放射輝度  $L^{scene}$  を、座席側の人物を撮影するカメラで測定し、光量変化関数  $h_s$  を求めた。仮想照明 1 の結果を図 5.5(b) に示す。仮想照明で測定した結果、すべて図 5.5(b) と同様の結果が得られたため、以降では、すべてのプロジェクターの仮想照明、環境照明で、図 5.5(b) の測定結果を採用した。

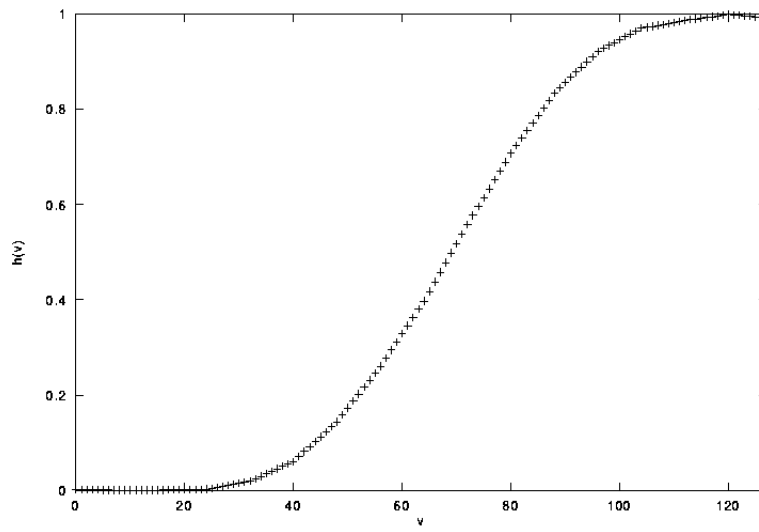
### 5.2.2 照明が人物の画像輝度に与える影響 $\bar{w}^{human}$ の測定結果

3.3.2 節の手法を用いて、照明が人物の画像輝度に与える影響  $\bar{w}^{human}$  の測定を行った。

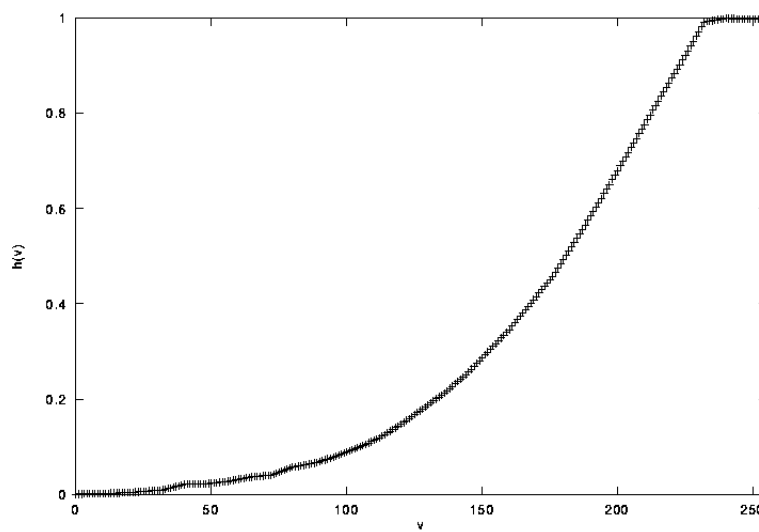
まず、人物の頭部とほぼ同じ形状を持ち、かつ白色で拡散反射のみの表面を持った、モデル物体 (図 5.6) を用いて、照明がモデル物体の平均画像輝度に与える影響  $\bar{w}^{model}$  の測定を行った。

#### 教壇側の測定

教壇側の人物は歩行によって移動する。そこで、人物の移動範囲内のいくつかのサンプル位置  $(x_o, y_o)$  に、人物と同じ高さ、向きにモデル物体を置いて、照明  $s$  がモデル物体の平均画像輝度に与える影響  $\bar{w}_s^{model}(x_o, y_o)$  を測定した。測定するカメラは、教壇側の人物を撮影するカメラを用いた。図 5.1 のように、プロジェクターは座席の方向を向いており、その光は教壇側のモデル物体には直接当たらない。プロジェクターが発した光は、実験環境の物体に相互反射するが、この光がモデル物体の平均画像輝度に与える影響は非常に小さいため、プロジェクターの仮想照明、環境照明がモデル物体の画像輝度に与える影響は 0 であるとした。よって、ハロゲンランプ照明  $s$  が、サンプル位置  $(x_o, y_o)$  にあるモデル物体の平均画像輝度に与える影響  $\bar{w}_s^{model}(x_o, y_o)$  のみを測定した。なお、モデル物体の画像領域は、撮影された画像においてモデル物体の顔にあたる画像領域を、手動で抽出することで得た。図 5.7 に示すように、 $x$  軸方向にほぼ等間隔で 7 点、 $y$  軸方向 4 点、合計 28 点のサンプル点で  $\bar{w}_s^{model}(x_o, y_o)$  を測定し、この結果を  $x$  軸方向に 6 次元関数、 $y$  軸方向に 3 次元関数で補間した。 $0 \leq x \leq 300$ 、 $0 \leq y \leq 155$  の範囲において、5cm ごとに  $\bar{w}_s^{model}(x, y)$  の値を求めたグラフを図 5.8 に示す。



(a) ハロゲンランプ照明



(b) プロジェクターの仮想照明

図 5.5: 照明の光量変化関数  $h$



図 5.6: 使用したモデル物体

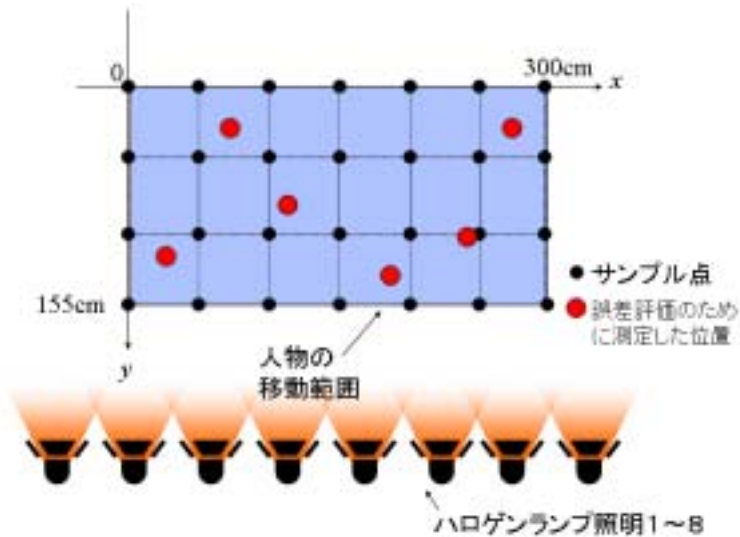
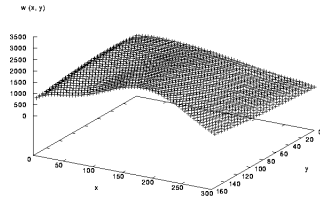
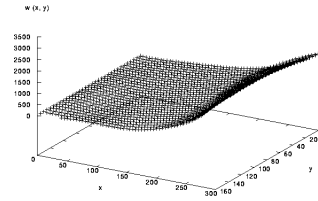


図 5.7: モデル物体を置いたサンプル点の位置

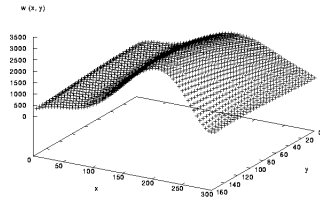
本手法による測定の誤差を評価するため、上記の 28 点のサンプル点以外に、図 5.7 に赤丸で示すように 6 点とり、実際にモデル物体を置いて  $\bar{w}_s^{model}(x, y)$  を測定し、補間によって推定した値と測定値との誤差を求めた。この結果を表 5.1 に示す。測定値の総和及び絶対誤差の総和は、それぞれ、測定値及び測定値と推定値との絶対誤差を、すべての照明で合計したものである。この誤差比が 8% 以下になっている。人物モデルと人物の顔の形状の差を考えると、実用上問題ない精度である。



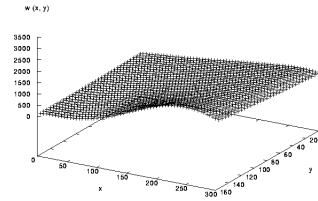
(a) ハロゲンランプ照明 1



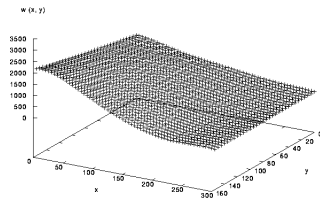
(b) ハロゲンランプ照明 2



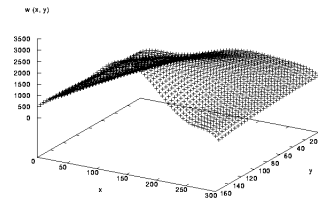
(c) ハロゲンランプ照明 3



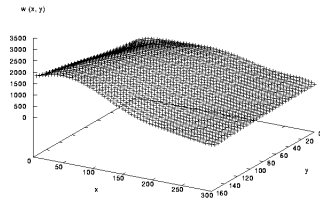
(d) ハロゲンランプ照明 4



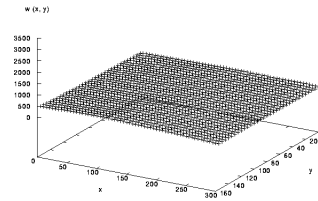
(e) ハロゲンランプ照明 5



(f) ハロゲンランプ照明 6



(g) ハロゲンランプ照明 7



(h) ハロゲンランプ照明 8

図 5.8: モデル物体に与える影響  $\bar{w}_s^{model}(x, y)$

座標 (x, y)	測定値の総和	絶対誤差の総和	誤差比
(35, 110)	6418.7	400.3	6.24 %
(70, 50)	6415.3	287.7	4.49 %
(115, 80)	8292.9	325.2	3.92 %
(185, 130)	10302.5	296.2	2.87 %
(245, 100)	7721.8	554.9	7.19 %
(275, 35)	5553.1	239.0	4.30 %

表 5.1: 計測値と推定値との誤差

次に、人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  を測定した。人物をある位置に正面を向いて立たせ、その顔の平均相対情景放射輝度  $\bar{L}^{human}$  を測定した。同じ照明環境の下、人物と同じ位置にモデル物体を正面を向いて立たせ、その平均相対情景放射輝度  $\bar{L}^{model}$  を測定した。人物の顔の画像領域とモデル物体の画像領域は、撮影された画像から、それぞれ手動で抽出した。 $\bar{L}^{human}$ 、 $\bar{L}^{model}$  により、式 3.28 から人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  を求めた。人物 1 に対し、6 点で測定した結果を表 5.2 に示す。 $r$  の 6 点での平均  $\bar{r} = 0.2133$  に対する各点での誤差は 10% 以内に収まり、標準偏差は 0.0152 となった。この結果から、 $r$  の値は、同一人物であれば、座標  $(x, y)$  によらず、ほぼ一定であることが確認された。

また、別の人物 2、人物 3 に対しても同様に測定し、 $\bar{r}_2 = 0.2033$   $\bar{r}_3 = 0.2267$  を得た。これらの 3 人の反射補正係数の平均をさらに平均した値は 0.2144 であり、各人物との差は 10% 以内である。本実験では、これら 3 人の人物と同程度の顔の色である人物に対して照明制御を行い、すべての人物の反射補正係数として、3 人の人物の平均値である  $r = 0.2144$  を用いた。

ハロゲンランプ照明  $s$  が位置  $(x, y)$  のモデル物体に与える影響  $\bar{w}_s^{model}(x, y)$  と、人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  を用いて、ハロゲンランプ照明  $s$  が教壇側の人物の顔の平均画像輝度に与える影響の変数  $\bar{w}_s^{human}(x, y)$  が式 3.27 から求められる。

#### 座席側の測定

座席に着席している人物は、その顔の位置はほとんど動かないため、座席に着席したときの人物の顔の位置にあわせてモデル物体を正面を向かせて設置し、

座標 (x, y)	r	$ \bar{r} - r /\bar{r}$ (%)
(0, 0)	0.2284	7.08
(155, 0)	0.2258	5.88
(300, 0)	0.2307	8.16
(0, 155)	0.2024	5.11
(155, 155)	0.1976	7.37
(300, 155)	0.1948	8.64
平均 $\bar{r}$	0.2133	

表 5.2: 人物 1 の反射補正係数  $r$

照明  $s$  がモデル物体の平均画像輝度に与える影響  $\bar{w}_s^{model}$  を測定した。測定するカメラは座席側の人物を撮影するカメラを用いた。図 5.1 にあるように、座席とハロゲンランプ照明との位置が近いため、ハロゲンランプ照明から発せられた光は相互反射によって座席側の人物の平均画像輝度に与える影響が大きい。そこで、プロジェクターの仮想照明、環境照明だけでなく、ハロゲンランプ照明が座席においたモデル物体に与える影響も測定した。この測定をすべての座席に対して行い、座席  $e$  ( $e = 1 \dots 5$ ) のモデル物体の平均画像輝度に、照明  $s$  が与える影響  $\bar{w}_s^{model}(e)$  を測定した。

人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  は、人物とモデル物体の反射係数によって定まるため、人物やモデル物体の位置や照明の種類に左右されない。そこで、人物とモデル物体の反射補正係数  $r$  は、教壇側の人物において測定した値  $r = 0.2144$  を用いた。

これにより、照明  $s$  が座席  $e$  に着席している人物の顔の平均画像輝度に与える影響  $\bar{w}_s^{human}(e)$  が求められる。

### 5.3 複数人物に対する照明制御

5.2 節で測定した結果を用いて、第 4 章の手法によって、複数人物に対して照明制御を行い、目標として設定した明るさになるように照明制御されているかどうかを評価した。

教壇側の人物に対する照明制御

位置		人物 1	人物 2
1	平均画像輝度	158.0	62.8
	絶対誤差	8.0	12.8
2	平均画像輝度	160.2	61.7
	絶対誤差	10.2	11.7
3	平均画像輝度	152.7	63.4
	絶対誤差	2.7	13.4
4	平均画像輝度	157.0	55.4
	絶対誤差	7.0	5.4
5	平均画像輝度	154.0	54.4
	絶対誤差	4.0	4.4
6	平均画像輝度	152.9	63.0
	絶対誤差	2.9	13.0

表 5.3: 照明制御結果 (目標輝度: 人物 1 は 150, 人物 2 は 50)

教壇側の 2 人の人物に対して照明制御を行った。人物 1、2 の目標輝度を、それぞれ 150、50 と設定し、それぞれの人物の位置を変えて照明制御、撮影を行った。図 5.9 に撮影された画像を示す。図 5.9(a)、(c)、(f) の左側、図 5.9(b)、(d)、(e) の右側の人物が人物 1 である。人物 1、2 の顔の平均画像輝度を測定し、目標輝度と比較した。この結果を表 5.3 に示す。また、同一の人物 1、2 において、各人物の目標輝度を 70、120 と設定し、同様に照明制御、撮影した結果を、図 5.10、表 5.4 に示す。図 5.10(a)、(e)、(f) の左側、図 5.10(b)、(c)、(d) の右側の人物が人物 1 である。

これらの結果から、それぞれの人物の顔の平均画像輝度と目標輝度との絶対誤差が、20 以下であることが分かる。

#### 座席側の人物に対する照明制御

次に、座席 1...5 に着席している 5 人の人物に対して照明制御を行った。座席  $e$  に着席している人物が人物  $e$  である。5 人の人物に対し、ランダムに目標輝度を設定し、照明制御を行って撮影した。プロジェクター 1、2 の環境照明は、



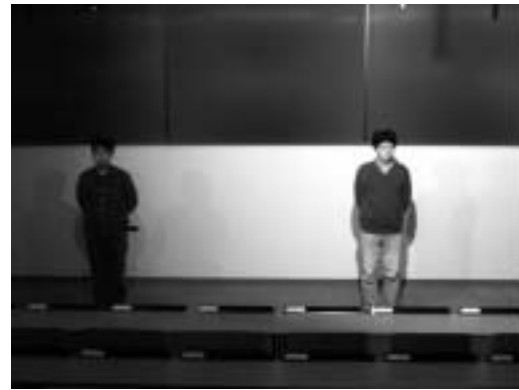
(a) 位置 1



(b) 位置 2



(c) 位置 3



(d) 位置 4



(e) 位置 5



(f) 位置 6

図 5.9: 照明制御結果 (目標輝度: 人物 1 は 150, 人物 2 は 50)





(a) 位置 1



(b) 位置 2



(c) 位置 3



(d) 位置 4



(e) 位置 5



(f) 位置 6

図 5.10: 照明制御結果 (目標輝度: 人物 1 は 70, 人物 2 は 120)

位置		人物 1	人物 2
1	平均画像輝度	62.4	136.4
	絶対誤差	7.6	16.4
2	平均画像輝度	71.3	131.0
	絶対誤差	1.3	11.0
3	平均画像輝度	73.1	138.0
	絶対誤差	3.1	18.0
4	平均画像輝度	72.9	139.5
	絶対誤差	2.9	19.5
5	平均画像輝度	71.1	129.5
	絶対誤差	1.1	9.5
6	平均画像輝度	69.1	131.0
	絶対誤差	0.9	11.0

表 5.4: 照明制御結果 (目標輝度: 人物 1 は 70, 人物 2 は 120)

それぞれ式 4.11 において

$$X_s = C_s = 0.1$$

として固定した。撮影された画像を図 5.11 に示す。人物 1...5 の顔の画像領域を手動で抽出し、平均画像輝度を測定して、それぞれの目標輝度との絶対誤差を求めた。これを表 5.5 に示す。この結果からも、それぞれの人物の顔の平均画像輝度と目標輝度との誤差は、20 以下となることが分かる。

本研究では、教壇側の人物と座席側の人物は互いに向き合い、各人物の顔の向きは正面を向いて固定であるとしたが、実際にコミュニケーションを行うときには、人物の顔は必ずしも正面に固定されず、左右を見ることも多い。そこで、人物の顔が横を向いた場合について同様に照明制御を行い、人物の横顔の顔に相当する画像領域を手動で抽出し、人物の顔の平均画像輝度を測定した。撮影された画像と測定結果を、図 5.12 と表 5.6 に示す。この結果から、人物の顔が横を向いた場合でも、絶対誤差の最大値は 24.9 であり、本手法の照明制御によってもたらされる人物の顔の平均画像輝度は、顔の向きに対して比較的頑健であり、目標輝度に近い明るさになることが実験的に確かめられた。



(a) パターン 1



(b) パターン 2



(c) パターン 3



(d) パターン 4



(e) パターン 5



(f) パターン 6

図 5.11: 照明制御結果 (正面)



(a) パターン 1



(b) パターン 2



(c) パターン 3



(d) パターン 4



(e) パターン 5



(f) パターン 6

図 5.12: 照明制御結果 (横向き)

パターン		人物 1	人物 2	人物 3	人物 4	人物 5
1	目標輝度	100	150	30	30	70
	測定値	117.9	141.7	30.7	34.5	84.4
	絶対誤差	17.9	8.3	0.7	4.5	14.4
2	目標輝度	180	150	180	170	110
	測定値	191.7	142.6	171.4	157.7	111.4
	絶対誤差	11.7	7.4	8.6	12.3	1.4
3	目標輝度	130	140	130	120	30
	測定値	147.4	131.0	131.4	120.2	39.3
	絶対誤差	17.4	9.0	1.4	0.2	9.3
4	目標輝度	20	110	20	110	40
	測定値	26.4	101.9	20.4	110.7	54.1
	絶対誤差	6.4	8.1	0.4	0.7	14.1
5	目標輝度	80	80	100	160	140
	測定値	81.7	66.0	104.5	147.4	155.0
	絶対誤差	1.7	14.0	4.5	12.6	15.0
6	目標輝度	100	20	30	120	180
	測定値	119.1	17.1	37.4	119.1	186.1
	絶対誤差	19.1	2.9	7.4	0.9	6.1

表 5.5: 照明制御結果 (正面)

パターン		人物 1	人物 2	人物 3	人物 4	人物 5
1	目標輝度	100	150	30	30	70
	測定値	121.3	149.1	34.9	33.2	76.9
	絶対誤差	21.3	0.9	4.9	3.2	6.9
2	目標輝度	180	150	180	170	110
	測定値	189.2	148.4	173.8	158.7	85.1
	絶対誤差	9.2	1.6	6.2	11.3	24.9
3	目標輝度	130	140	130	120	30
	測定値	145.9	139.7	132.6	114.4	36.9
	絶対誤差	15.9	0.3	2.6	5.6	6.9
4	目標輝度	20	110	20	110	40
	測定値	28.5	116.3	21.9	104.9	52.0
	絶対誤差	8.5	6.3	1.9	5.1	12.0
5	目標輝度	80	80	100	160	140
	測定値	73.7	86.2	107.5	143.5	147.8
	絶対誤差	6.3	6.2	7.5	16.5	7.8
6	目標輝度	100	20	30	120	180
	測定値	116.7	21.9	25.7	111.0	180.5
	絶対誤差	16.7	1.9	4.3	9.0	0.5

表 5.6: 照明制御結果 (横向き)

## 5.4 人物の明るさに対する人の認知結果

人が人物の顔の平均輝度の差を、どの程度まで認知することができるかを、実験により調べ、5.3節の実験結果の、目標輝度と測定値との誤差を評価した。

2人の人物に対して照明制御を行い、これを撮影した。人物の着席している座席の違い、人物の違いが、人の認知に影響を与えるかどうか調べるため、2人の人物を、以下の3つのパターンで着席させた。

1. 人物1、2が、それぞれ座席1、5に着席している場合
2. 人物1、2が、それぞれ座席1、2に着席している場合
3. 人物1、3が、それぞれ座席1、5に着席している場合

以上の3パターンにおいて、座席1に着席している人物1の目標輝度として50、100、150の3通りに設定し、それぞれにおいて、もう一人の人物の目標輝度を0から200まで、20ごとに11段階変えて照明制御し、撮影した。

撮影された映像はDVテープに録画し、DVデッキ(SONY製WV-DR9)で再生してトリニトンモニター(SONY製PVM-1444Q)で出力した。モニターの明るさやコントラストは、明るさの差が充分に分かる程度に調節し、固定した。10人の被験者にこれを見てもらい、2人の人物の顔の明るさが、同じに見えるかどうか評価してもらった。ある画像において、2人の人物の顔の画像領域を手動で抽出し、その平均画像輝度の差を測定した。この画像を被験者に見せたときに、2人の人物の顔の明るさが同じであると答えた被験者の数を調べた。図5.13の結果は、パターン1のもので、人物1の目標輝度が50、100、150であるときの結果である。横軸が2人の人物の顔の平均画像輝度差であり、縦軸が2人の人物の顔の明るさが同じであると答えた被験者の数である。図5.14、5.15は、パターン2、パターン3のときの結果である。これらのグラフから、この結果は正規分布に近い分布に従っていると考えられる。

それぞれのパターンにおける結果において、人物1の目標輝度を50、100、150に設定したときの結果で比較し、有意差があるかt-検定を行ったところ、5%の有意水準で有意差が認められなかった。この結果から、2人の人物において、その顔の明るさの違いに対する人の認知精度は、人物の顔の設定された明るさに関係がないことが分かる。

パターン1、2、3の結果を同様にt-検定により比較したところ、それぞれのパターンの結果に有意差は見られなかった。この結果から、人物の顔の明るさ

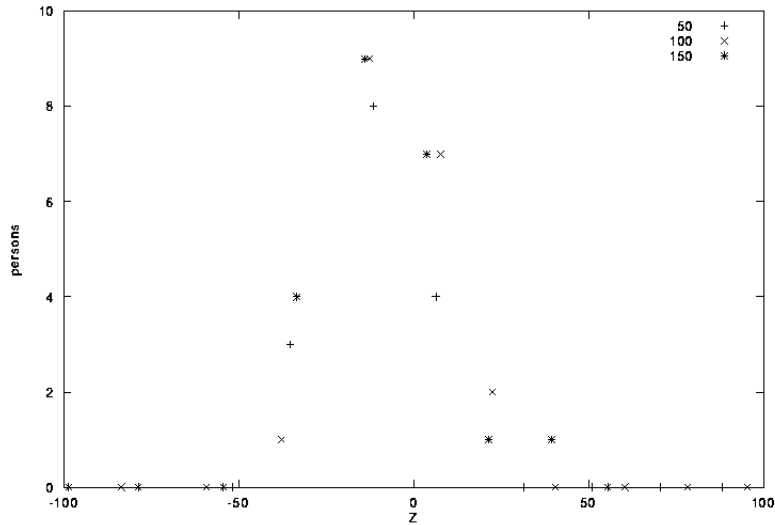


図 5.13: 人物 1、2 が、それぞれ座席 1、5 に着席している場合

の違いに対する人の認知精度は、人物の位置や、人物が誰であるかに関係がないことが分かる。

以上から、図 5.13、5.14、5.15 の結果は、人物の顔の明るさの違いに対する人の認知精度を表しており、設定された顔の目標輝度、人物の位置や、人物が誰であるかに左右されないことが分かる。図 5.13、5.14、5.15 のすべての結果の平均は  $-8.55$ 、分散は  $305.86$  であった。よって、この結果が正規分布であるとすると、信頼度 95% の信頼区間は、 $-43.18$  から  $26.08$  である。つまり、目標輝度として設定した明るさと実際の顔の平均画像輝度との誤差がこの範囲内であれば、同じ明るさであると認知される。5.3 節の照明制御による誤差は 20 未満であることから、提案した照明制御手法は、人の認知精度よりも高い精度で照明制御できると言える。

## 5.5 重要度に基づく照明制御

本研究で提案した照明制御を用いて、実際のコミュニケーションの撮影において、複数人物の重要度をどの程度提示することができるか調べた。実験環境において、教壇側に 2 人、座席側に 4 人の人物が参加し、自由に会話する。教壇側の 2 人の参加者は移動範囲内を自由に移動し、座席側の 4 人の人物は、互



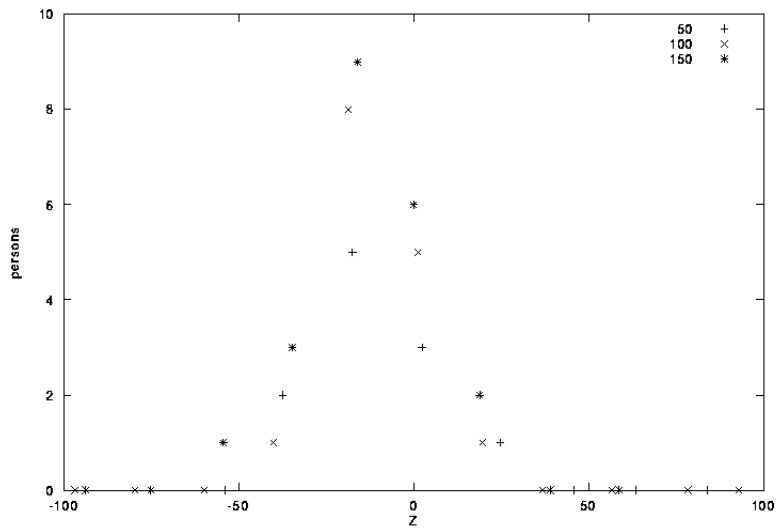


図 5.14: 人物 1、2 が、それぞれ座席 1、2 に着席している場合

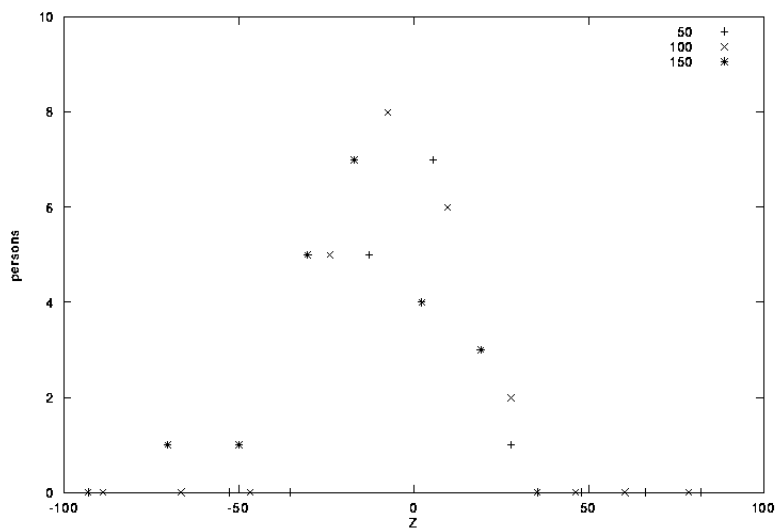


図 5.15: 人物 1、3 が、それぞれ座席 1、5 に着席している場合

いの顔が見やすいように座席 2...5 に着席させた。実験で行ったコミュニケーションは、参加者が互いに発言しあう一般的な会話であり、それぞれの参加者は対等な関係で教師と生徒などといった役割を持っていない。また、他の人物を指示するなどといったジェスチャーはなるべく行わず、会話のみによってコミュニケーションが行われるように、参加者に指示した。

このような会話において、コミュニケーション状況は主に、発言している人物と、その発言内容によって変化し、各人物の重要度は、発言している人物とその発言内容によって定まる。人物の重要度は発言している人物が最も高く、その人物が発言を終えた後も、しばらくは人物が発言した話題に従って会話が行われると仮定する。従って、人物  $n$  の重要度  $F_n$  は発言中だけでなく、発言後も緩やかに減少してゆく。そこで、時刻  $t$ (s) の人物  $n$  の重要度  $F_n(t)$  を以下のよう

$$F_n(t) = \begin{cases} 1.0 & (\text{人物 } n \text{ が発言しているとき}) \\ \max(1.0 - d(t - t_{n,0}), 0.0) & (\text{人物 } n \text{ が発言していないとき}) \end{cases}$$

ここで、 $t_{n,0}$  は人物  $n$  が発言を終了した時刻である。定数  $d$  は、発言後の重要度の減衰速度を表す。本研究では、

$$d = \frac{1}{30}$$

とし、発言後 30(s) で重要度が 0.0 になるようにした。これにより、人物  $n$  の重要度  $F_n(t)$  の値域は、0.0–1.0 となる。

人物  $n$  の重要度  $F_n$  に従い、それぞれの人物の目標輝度  $Z_n^T$  を定める。本研究の実験では、人物  $n$  の重要度  $F_n$  とその目標輝度  $Z_n^T$  とは、線形な関係で表されるとし、

$$Z_n^T = (Z^{T,max} - Z^{T,min})F_n + Z^{T,min}$$

とする。つまり、人物  $n$  の重要度  $F_n$  が最大値 1.0 のとき、目標輝度  $Z_n^T$  は最大値  $Z^{T,max}$  になり、人物  $n$  の重要度  $F_n$  が最小値 0.0 のとき、目標輝度  $Z_n^T$  は最小値  $Z^{T,min}$  になる。本研究の実験で使用しているカメラの画像輝度  $Z$  は、0–255 であるため、人物の顔の画像輝度がダイナミックレンジを外れるのをできるだけ防ぐために、

$$Z^{T,max} = 200$$

$$Z^{T,min} = 30$$

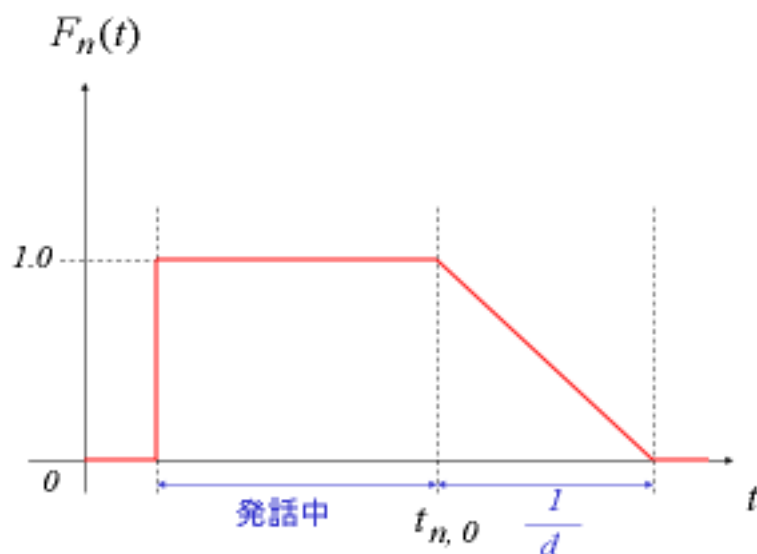


図 5.16: 人物の重要度  $F_n(t)$

とした。

人物  $n$  の位置は、教壇側の人物についてはポジションセンサーを用い、座席側の人物については着席している席の座標を用いた。

人物  $n$  が発言しているかどうか判断するために、マイクロフォンアレイシステム [15] を用いた。マイクロフォンアレイシステムは、天井に設置された 8 本のマイクからの信号を取り込み、CSP 法によって音源位置を数 cm のオーダーで推定する。マイクロフォンアレイシステムによって推定された音源位置と、教壇側の人物の位置、座席側の人物の座席の位置から、それぞれの人物が発言しているかどうか判断する。物音など、音声以外の音に対して頑健であるようにするため、音が 500ms 以上続いた音源を話者とした。これにより、人物の重要度を求めた。

実験では、教壇側の人物を撮影カメラと、座席側の人物を撮影するカメラの 2 台のカメラを用いる。これらのカメラによって撮影された 2 本の映像の中から、スイッチャー (IMAGENICS 製) によりどちらかの映像を選択する。切り替え方針として、重要度の最も高い人物が撮影されている映像を選択することにした。ただし、映像選択による切り替わりが頻繁に起きないようにするため、直前の

切替えから 2(s) 以内は、切替えを行わないようにした。直前の切替えから 2(s) 経過した時点で、そのときに重要度の最も高い人物が撮影されている映像が選択される。なお、話者が存在しない場合は切替えを行わない。2 台のカメラの露出時間は、それぞれ  $\frac{1}{150}$ (s) で固定して撮影した。

以上の状況で実際に会話を参加者に行ってもらい、重要度を求め、照明制御、映像選択を行った。それぞれの人物の音声は、ピンマイク及びハンドマイクで取得した。撮影された映像の一部を、図 5.17 に示す。図 5.17 は時刻  $t$  の映像であり、それぞれのコミュニケーション状況は、

- (a)  $t = 0$  教壇側で左の人物が発言
  - (b)  $t = 11$  座席側で座席 2 の人物が発言
  - (c)  $t = 22$  教壇側で右の人物が発言
  - (d)  $t = 26$  座席側で座席 4 の人物が発言
  - (e)  $t = 33$  座席側で座席 5 の人物が発言
  - (f)  $t = 62$  座席側で座席 3 の人物が発言
- である。

撮影された映像を録画し、モニターに表示して被験者に提示した。それぞれの被験者に、撮影された映像と音声を、約 5 分間見せた後、5 点を最良とする 5 件法によるアンケートを行った。これを 10 人の被験者に対して行った。アンケートの項目と平均点を、表 5.7 に示す。Q2 と Q4 の結果から、人物の明るさ、及び明るさの変化が映像上で確認できたことが分かる。明るさの変化の方が、明るさ自体よりも気づかれやすい傾向にあるが、Q3 と Q5 の結果により、明るい人物は重要であると感じるのに対し、人物の明るさの変化が大きくても、その人物が重要であるとは思われないことが分かる。本研究の照明制御は人物のみを対象として行っている。そのため、人物以外の明るさについては考慮していない。しかし、実験で行ったコミュニケーションの映像においては、Q6 の結果により、被験者は人物以外の物体に特に注目せず、主に人物を見ていることが分かる。また Q7 の結果から、複数人物が撮影されている映像と音声のみから、誰が話者であるかを十分に判断できず、本研究の照明制御によって重要度を提示することが有効であると言える。しかし、Q3 において人物の明るさによってその人物が重要であると認識しているにもかかわらず、Q10 の結果から、誰が重要であるかを十分に提示できていないことが分かる。これは、Q1、Q8 や Q9 の結果にあるように、照明や映像選択が適切でなかったためであると考えら

質問番号	質問項目	平均点
Q1	見たい人物はよく見えましたが？	2.7
Q2	人物の明るさ (=明るさ自体、変化は含まない) の違いによく気がつきましたか？	4.1
Q3	明るい (=明るさ自体、変化は含まない) 人物が重要だと思いましたか？	3.7
Q4	明るさの変化によく気がつきましたか？	4.5
Q5	明るさの変化が大きい人物が重要だと思いましたか？	2.7
Q6	人物以外の物体を見ましたか？	2.2
Q7	音声から、画像上のどこの人物が話しているか分かりましたか？	3.4
Q8	照明の変化は適切でしたか？	2.3
Q9	映像の切り替えは適切でしたか？	2.6
Q10	誰が重要であるか分かりましたか？	3.0
Q11	会議や講義の撮影で、このような照明システムが用いられることを考えると、どのくらい満足できますか？	3.3
Q12	もう一度、このシステムを使いたいですか？	3.3

表 5.7: 撮影された映像を見た人へのアンケート結果

れる。アンケートの自由意見では、ある人物が発言しはじめてしばらくしてから照明の変化や映像の切替えが行われるため、一人の発言が短く、発言している人物が頻繁に入れ替わる場合には、発言している人物を十分に見ることができなかつたという指摘が多く見られた。これは、実際のコミュニケーション状況の変化に対して、重要度が適切に求まらず、照明制御や映像選択が遅れていることが原因と考えられる。照明制御や映像選択を適切に行うためには、重要度を適切かつコミュニケーション状況の変化に対して高速に求め、それにとまって照明制御や映像選択も高速に行う必要がある。Q10、Q11により、本システムが実用に使える可能性があることが分かる。



(a)  $t = 0$



(b)  $t = 11$



(c)  $t = 22$



(d)  $t = 26$



(e)  $t = 33$



(f)  $t = 62$

図 5.17: 重要度提示のための照明制御

## 5.6 照明制御によって重要度を提示する上での問題点と今後の課題

### 5.6.1 照明制御の処理時間と人物の重要度

5.5 節での結果により、人物の重要度は適切かつ、コミュニケーション状況の変化に対して高速に求める必要があることが分かった。

5.5 節で用いた照明制御で、一回のループに必要な処理時間を表 5.8 に示す。これにより、一回のループに必要な時間は 934.8ms であり、およそ 1(s) に 1 回の照明制御が行われる。ただし、マイクロフォンアレイシステムからの情報の受け取りは、マイクロフォンアレイシステムが取得した音源の位置を得るのみであり、誰が発言者であるかを判断するためには 500ms 以上の時間が必要である。そのため、一人の人物が発言を始めたとき、この人物が発言者であることを判断し、これに基づいた重要度を計算して照明制御するまで、少なくとも 2 回の処理ループが必要であり、約 2(s) かかる。

この処理時間の中で大半を占めるのは、ポジションセンサーによる位置の取得や照明装置での制御などのハードウェアによるものである。これに対し、第 4 章の照明制御のアルゴリズムに必要な時間は、1.5ms である。よって、より高速な装置を用いることで、重要度の変化に対してより早いレスポンスで照明制御することができる。Light Stage 3[6] では、LED 照明の光量をフレームレートで制御しており、このような装置が理想である。また、誰が発言者であるかをより早く、正確に見つけるため、マイクロフォンアレイシステムを改良する必要がある。

5.5 節の実験で行った会話では、各人物の重要度は、誰が発言しているかで求められる。しかし、より高度なコミュニケーションにおいては、人物の重要度は、人物の表情やしぐさ、発言内容によって左右されると考えられる。これらを、コミュニケーション状況の変化に対して高速に求める必要があり、その方法を検討することが求められる。

さらに、人物の重要度をその明るさで提示するためには、重要度と目標輝度との関係を適切に定める必要がある。5.5 節の実験では、人物の重要度と目標輝度との関係は線形に設定したが、より効果的に提示するためには、人物の明るさと、この人物を見たときに人が感じる重要度との関係を知る必要がある。この関係は人物の数、位置などによって左右され、個人差も大きいと考えられる

処理	平均処理時間 (ms)
ポジションセンサーによる位置の取得	104.3
マイクロフォンアレイシステムからの情報の受け取りと目標輝度の計算	1.2
目標輝度を満たす照明光量の算出	1.5
照明装置への制御信号の送信	804.3
スイッチャーへの制御信号の送信	23.5
合計	934.8

表 5.8: 照明制御の処理時間

ので、心理実験を行って調べていくことが今後の課題である。

## 5.7 撮影の場にいる人のための照明制御

本研究は、映像上に人物の重要度を提示することを想定して、人物の画像輝度を照明によってコントロールした。照明を制御することで、人物の映像上の明るさだけでなく、この人物の実際の明るさも変化させることができる。そのため、映像を見る人だけでなく撮影の場にいる人に対しても、人物の重要度を明るさで提示することができる。5.5 節の実験において、映像を見た人ではなく、実験環境でコミュニケーションを行った場にいた 10 人に対してアンケートを行った。このアンケートの質問項目と平均点を表 5.9 に示す。

Q2 から Q5 の結果は、表 5.7 の映像を見た人の結果と同様に、人物の明るさの違いや変化は認識され、明るい人物が重要であると感じることが分かる。この結果から、映像を見ている人だけでなく、同じ場にいる人に対して人物の重要度を提示するためにも、本手法が有効であることが分かる。Q10 において、誰が重要であるか十分に提示することができていないが、この原因も映像を見た人の結果と同様に、コミュニケーション状況の変化に対して照明の変化が遅れ、Q8 の結果にあるように照明の変化が十分に適切でないと感じることにあると考えられる。この実験では、他の参加者を直接見ているため、映像選択は必要でない。そのため、映像選択が適切でないことによって見たい人物が見えないということはない。しかし被験者からは、座席側の人物は対面している人物の明るさの違いは分かりやすいが、同じ座席側の別の人物の明るさの違いが分



かりにくいという意見が多く聞かれた。本研究の実験環境において、照明と撮影カメラが、人物の正面に取り付けられており、正面から見た人物の明るさをもって照明制御しているため、正面の位置から見ると人物の明るさは目標輝度になっているが、正面ではない位置から見ると人物の明るさは目標輝度になっていない可能性がある。同じ側にいる人物は、正面から見るができないため、その明るさが、目標輝度になっていないことが、この原因として考えられる。さらに、本実験で用いた照明は、人物をほぼ正面から照らす位置にあるため、視界に照明が入り、Q9の結果にあるようにまぶしいと感じる。そのため、他の参加者が見にくいという意見も聞かれた。これらのように、他の人物が見づらいことも、誰が重要であるか、十分に分からなかった原因であると考えられる。これらの問題を解決するためには、人物の正面だけでなく、様々な方向に照明やカメラを設置し、それぞれのカメラにおいて、人物の明るさを目標輝度にするように照明制御すれば、撮影の場にいる人に対しても、本手法の照明制御を用いて重要度の提示が可能であると考えられる。

質問番号	質問項目	平均点
Q1	他の参加者はよく見えましたか？	3.6
Q2	他の参加者の明るさ (=明るさ自体、変化は含まない) の違いによく気がつきましたか？	4.6
Q3	明るい (=明るさ自体、変化は含まない) 参加者が重要だと思いましたか？	4.2
Q4	明るさの変化によく気がつきましたか？	4.4
Q5	明るさの変化が大きい参加者が重要だと思いましたか？	3.1
Q6	参加者 (人物) 以外の物体を見ましたか？	2.5
Q7	声が聞こえてくる向き、あるいは声の質でどこの人が話しているか分かりましたか？	4.8
Q8	照明の変化は適切でしたか？	3.1
Q9	まぶしかったですか？	3.9
Q10	誰が重要であるか分かりましたか？	3.2
Q11	このような照明制御が会議や講義で用いられることを考えると、どのくらい満足できますか？	3.1
Q12	もう一度、このシステムを使いたいですか？	3.3

表 5.9: 実験環境にいた人のアンケート結果

## 第6章 結論

本研究では、コミュニケーションを行っている複数の人物を撮影するときに、各人物の画像輝度が、その重要度によって定められた明るさになるように、複数照明の光量を制御する手法を提案した。

本手法では、まず、人物の形状をしたモデル物体を用いて、各照明が、人物の明るさに与える影響度を事前測定した。そしてこの影響度をもとにして、複数人物の画像輝度が、それぞれの重要度によって定まった明るさで撮影されるような複数照明の光量を求め、これに基づいて照明を制御した。

本手法の有効性を確認するために、実験を行った。光量制御可能な複数の照明を用いて、歩行する、あるいは着席している複数の人物の顔の平均画像輝度が、それぞれの目標輝度になるように照明制御することができることを確認した。さらに、実際にコミュニケーションを行っている複数の人物を撮影し、各人物の重要度を求め、これに基づいて目標輝度を定めて本手法の照明制御を行った。その結果、照明制御によってもたらされた人物の明るさによって、各人物の重要度を映像上に提示することが可能であることを示した。

5.6節で述べたように、本手法の照明制御を用いて人物の重要度を提示するためには、照明制御を高速化し、人物の重要度をより正確に求めることが必要となる。さらに、本手法を用いて映像上だけでなく、撮影の場にいる人に対して重要度を提示することも可能である。しかし、撮影の場にいる人の視点は様々であるため、これらの人に対して重要度を提示できるようにしなければならない。これらを解決してゆくことが、今後の課題である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くのご教示を賜りました美濃導彦教授、角所考助教授、日頃より熱心なご指導と有益で適切な助言をいただきました亀田能成助手、八木啓介助手、西口敏司助手に深く感謝致します。また、研究に関する有用な助言をいただき、過酷な実験にも快く協力していただいた美濃研究室の皆様へ感謝致します。

## 参考文献

- [1] Paul E. Debevec, Jitendra Malik “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs”, SIGGRAPH97, pp.369-378, 1997 Proceedings, pp.369-378, 1997
- [2] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, ”Illumination distribution from shadows,” Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’99), pp. 306-312, June 1999.
- [3] 佐藤いまり、佐藤洋一、池内克史、「全方位ステレオによる実光源環境の計測とそれに基づく仮想物体の実画像への重ね込み」、電子情報通信学会論文誌 D-2 Vol.J81-D-2 No.5 1998 pp.861-871、 1998.
- [4] Paul E. Debevec, “Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography”, SIGGRAPH98, pp.189-198, 1998
- [5] 向川康博、宮木 一、三橋 貞彦、尺長健、「Photomatic Image-Based Rendering による仮想照明画像の生成」、情報処理学会 CVIM 論文誌、Vol41、No.SIG10(CVIM1)、 pp.19-30、 2000
- [6] Paul Debevec, Andreas Wenger, Chris Tchou, Andrew Gardner, Jamie Waese, Tim Hawkins, “A Lighting Reproduction Approach to Live-Action Compositing”, SIGGRAPH 2002, 2002
- [7] K.E.Torrance and E.M.Sparrow, “Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces”, Jor. Optical Society of America, Vol. 57, pp.1105-1114, 1967
- [8] 新宮 淳, 亀田 能成, 角所 考, 美濃 導彦、「背景画像合成による前景抽出とそれに基づく照明の動的制御」、信学技報 PRMU2001-218, pp.95-102、 2002
- [9] 新宮 淳, 亀田 能成, 西口 敏司, 美濃 導彦、「複数人物に対する照明の動的制御」、信学技報 PRMU2002-135, pp.37-42、 2002
- [10] Sato, Y., Wheeler, M.D. and Ikeuchi, K. “Object Shape and Reflectance Modeling from Observation”, SIGGRAPH97 Proceedings, pp.379-387, 1997
- [11] 「コンピュータビジョン」(新技術コミュニケーションズ) 松山 隆司、久

野義徳、井宮淳編

- [12] 「ロボットビジョン」(朝倉書店) Horn, B 著 NTT ヒューマンインターフェース研究所・プロジェクト RVT 訳
- [13] 「オペレーションズ・リサーチ」(工学図書株式会社) 木下栄蔵著
- [14] 「Numerical Recipes in C [日本語版]」(技術評論社), W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky, W.T.Betterling 著, 丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠訳
- [15] 東 和秀 「遠隔講義における多様なセンサを用いた話者状況の映像化」 京都大学情報学研究科修士論文、2002
- [16] 青木 啓史 「未知光源環境での物体形状と反射特性のボクセル独立な再構成法」 京都大学情報学研究科 修士論文 2000.
- [17] 井上 知雄、岡田 謙一、松下 温 「空間設計による対面会議と遠隔会議の融合：テレビ会議システム HERMES」 電子情報通信学会論文誌 D-II vol.J80-D-II No.9 pp.2482-2492, 1997
- [18] 岡田 謙一、松下 温 「臨場感のある多地点テレビ会議システム：MAJIC」 情報処理学会論文誌 Vol.36 No.3, 1995
- [19] Roel Vertegaal “The GAZE Groupware System: Mediating Joint Attention in Multiparty Communication and Collaboration” CHI99, 1999
- [20] 「映像の心理学 マルチメディアの基礎」(サイエンス社) 中島義明著, 梅本堯夫, 大山正監修

# 予備審査報告書に対する回答

## 修正が必要な点 1

研究の適用環境を設定し、この適用環境における本手法の有意性を明確に示すこと。

### 回答

第2章において、本研究の適用する環境を、室内で複数人物がコミュニケーションを行いこれを撮影する環境と設定し、人物の重要度を映像上で提示するために照明制御が有効であることを示した。第5章の実験において、室内で複数人物がコミュニケーションを行う環境で、人物の重要度を映像上で示すために本手法の照明制御が有効であることが確かめられた。

## 修正が必要な点 2

人物の明るさの違いを、人がどの程度判断できるか調べること。これに基づき、照明制御の精度がどの程度必要なのか調べること。

### 回答

5.4節の実験において、人が人物の顔の明るさの違いを、どの程度の精度で判断することができるか調べ、図 5.13、5.14、5.15 にこの結果を示した。これを統計的に分析し、人の人物の顔の明るさの違いに対する認知精度を求め、本研究の照明制御が、この人の認知精度よりも良い精度で行うことができることを示した。

## 修正が必要な点 3

人物の重要度と照明制御によって照らされる対象人物の明るさとの関係を、研究の目的に沿って定義すること。

### 回答

第3章において、人物の明るさは人物の重要度によって定まる明るさとした。人物の重要度とこれによって定まる明るさとの関係は、参加人数や、行われるコミュニケーションの質によって左右される。本研究は、人物の明るさを与えられた明るさになるように照明制御することを研究の目的としている。本稿では、5.5節のように6人の人物が対面してコミュニケーションを行うことを想定

し、人物の重要度を求め、人物の重要度と目標輝度との関係を線形の関係に設定して照明制御の実験を行った。撮影された映像を被験者に見せ、アンケートによる主観評価を行った結果、人物の重要度を映像上の明るさによって提示できることを示した。

#### 修正が必要な点 4

予備審査では、2人の人物に対する照明制御を実験で行っているが、より多人数に対する照明制御の実験を行い、その検証をすること。

#### 回答

5.3節において、プロジェクターを照明の代わりとして使用し、5人に対する照明制御を行って、複数人物がそれぞれの目標輝度になるように照明制御ができていていることを示した。

#### 修正が必要な点 5

本研究の位置付けを、従来研究/関連研究との比較で明確に記述してください。特に、新規性を明確に。また、それを明確に評価できる結果も示してください。

#### 回答

第1章に述べたように、従来研究として、与えられた照明環境を再現する照明制御手法がある。この照明下での人物の明るさは、与えられた照明環境下での人物の明るさは再現できるが、その画像輝度がどの程度の明るさになるか分からない。本研究は人物の明るさを、ある設定された明るさにする照明環境を求め、照明制御する点に新規性がある。第5章の実験で、この照明制御を十分な精度で行うことが可能であることを示した。