

THE IEICE TRANSACTIONS ON INFORMATION AND SYSTEMS, PT.2 (JAPANESE EDITION)

CiC 電子情報通信学会
D-II 論文誌 VOL.J87-D-II NO.3 MARCH
情報・システムⅡ—パターン処理 — 2004

情報・システムソサイエティ

社団 法人 電子情報通信学会

THE INFORMATION AND SYSTEMS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

複数人物の撮影における照明光量の動的制御

新宮 淳[†] 亀田 能成^{††} 西口 敏司^{†††} 美濃 導彦^{††}

Active Light Control Method for Filming Persons

Jun SHINGU[†], Yoshinari KAMEDA^{††}, Satoshi NISHIGUCHI^{†††},
and Michihiko MINOH^{††}

あらまし 位置が変化する複数人物の映像を撮影する際、各人物の画像輝度を撮影者が設定した明るさにして撮影し続けることが求められる。本論文では、複数の光量制御可能な照明を用い、人物の位置に応じてリアルタイムに照明制御を行う方法について述べる。照明制御を行うために、任意位置の人物に対して、各照明の光量と人物の画像輝度との関係を事前測定する。この事前測定結果を用い、撮影時には、各人物の画像輝度が目標とする明るさになるような光量を計算し、これに基づいて照明の動的制御を行う。本手法を実装し、複数人物の位置に応じて照明の光量を制御して、各人物の画像輝度を目標とする明るさに調節できることを示した。

キーワード 照明制御、画像輝度、情景放射輝度、照明のキャリブレーション、人物撮影

1. まえがき

講義や講演、会議などのような、複数の人物がコミュニケーションを行っている状況を撮影するとき、各人物の明るさを撮影者が設定した明るさに調節することが求められる。例えば、コミュニケーションを行っている複数人物のうち、どの人物が注目されるべき人物であるかを、映像を見ている人に伝えるために、発言などの重要な動作をしている人物を明るく、そうでない人物を暗く調節することが考えられる。

複数の人物の映像を各々目標として設定した画像輝度で撮影するためには、画像全体を一様に変化させてしまうカメラの露出制御だけでは不十分であるため、従来は照明技師などが手動で照明を調節していた。本論文では、これを自動制御する方法について述べる。

本論文は、室内でコミュニケーションを行っている複数人物を、一つの固定カメラで同時に撮影すること

を想定する。このような撮影状況において、撮影対象として重要なのは人物の顔である。多くの場合、注目すべき人物は聴衆に向かって話をしているため、カメラはこれを正面から撮影できるように、多くの場合聴衆とほぼ同じ視点に設置されている。そこで、本研究では、人物の顔の明るさを照明制御の対象とし、人物の顔はカメラに正対すると仮定する。

カメラに正対する人物の顔を照明制御の対象とし、顔の明るさについては、顔の画像領域における平均画像輝度が目標とする明るさになれば目標が達成されたとみなす。目標とする各人物の明るさを、その人物の目標画像輝度とする。

更に講義のような撮影環境では、教壇上の講師のように、人物のいる位置が変化することが考えられる。室内的照明では、人物への光の当たり方が人物のいる位置によって大きく異なり、人物の顔の明るさが変化する。このような状況に対応するため、人物の位置が変化してもその明るさが目標画像輝度となるように制御できる手法を提案する。照明制御は、人物のいる位置や目標画像輝度が変化するたびに動的に行われる。なお室内には照明以外に光を発するものはないとする。

人物の映像上での明るさを制御する場合、従来の手法としてはカメラの露出制御が行われてきた。しかしながらカメラの露出制御では、映像全体の画像輝度に影響を及ぼしてしまうため、複数の人物各々の画像輝

[†] 京都大学大学院情報学研究科、京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida
Nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{††} 京都大学学術情報メディアセンター、京都市
Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto
University, Yoshida Nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto-shi,
606-8501 Japan

^{†††} 京都大学大学院法学研究科、京都市
Graduate School of Law, Kyoto University, Yoshidahon-
machi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

度を同時に制御することができないという欠点がある。

富田らは、強化学習を用いることにより、複数照明の光量を制御して、ある位置にいる人物への照度を設定した明るさにする手法を提案している[11]。この手法では、照明の光量を変化させ、その結果の照度を用いて学習し、設定した照度に近づけていく方法を用いている。そのため、人物の位置が変化するたびに何度も照明を変化させて学習していく必要があるため、設定した照度になるまでに時間がかかり、実際の撮影には適応できない。

人物の撮影における照明制御の研究として、Debevecらは、多数の照明の光量を制御することで実在する背景の照明環境を再現し、そのもとで人物の映像を撮影する手法を提案している[7]。この研究の目的は、人物を撮影して実背景映像と合成する際に、背景と人物の明るさの整合性を保つことである。そのため、人物の映像上で明るさは合成する背景の照明環境によって一意に定められてしまい、人物を意図した明るさに調節することは難しい。

人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるように照明光量を制御することが本研究の目標であるが、そのためには、各照明の光量と人物の顔の平均画像輝度との関係を知る必要がある。

人物に限らず物体の画像輝度は、物体の周りの照明環境、物体の形状と反射特性によって定まる[13]。実照明環境を測定する研究[2]～[5]では、実照明環境に鏡面球などの参照物体を置いて撮影し、参照物体の明るさが照明から受ける影響を画像上で計測して、照明環境を推定する。この手法では、定常照明環境を測定することができるが、照明光量を変化させたときに、照明環境がどのように変化するかを知ることはできない。また、実物体の形状や反射特性を測定する研究としては、レーザレンジファインダなどで形状を精度良く測定し、次いで撮影された物体の画像から反射特性を推定する方法が提案されている[8]～[10]。しかしながら、これらのアプローチに基づいて物体の明るさを求めようとすると、人物の姿勢が変化するたびにその形状と反射特性を再取得する必要があることになる。

人物の画像輝度と各照明の光量との関係を知ることに関連する別の研究手法として、Photometric Image-based Rendering[6]がある。Photometric Image-based Renderingは、形状や反射係数が未知な物体を、いくつかの異なる照明環境下で撮影し、これらの画像を組み合わせて、物体の任意照明環境下での画像

を生成する手法である。これにより、物体の形状や反射特性を明示的に測定することなく、照明光量と物体の明るさとの関係を知ることができる。しかし、あるフレームの画像においてこの関係を知るためにには、そのフレームごとに物体を静止させていくつかの照明環境で撮影する必要がある。

本研究では、人物を撮影対象としているため、人物の位置の変化や目標画像輝度の変更に対して高速に照明制御することが求められる。そこで本手法では、任意位置の人物に対して、各照明の光量と人物の顔の平均画像輝度との関係を事前に測定する。このように事前測定しておくことで、撮影時には、各人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるような照明の光量を求めるだけで済む。求められた照明の光量に従って照明を動的に制御することで、人物の位置が変化したり目標画像輝度が変更されたりしても、各人物の顔の平均画像輝度を目標輝度に高速に調節することができる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず**2.**で各照明の光量と人物の顔の平均画像輝度との関係を定式化し、その測定方法を提案する。次に**3.**において、人物の顔の平均画像輝度が、それぞれの目標画像輝度になるような照明の光量を計算する方法を提案する。そして**4.**では、**2.3.**で提案した手法を実装し、各人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるように照明制御できることを示す。最後に**5.**で、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 照明の光量と人物の顔の平均画像輝度との関係

人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるように照明の光量を制御するためには、人物の顔の平均画像輝度と各照明の光量との関係を知る必要がある。本章では、まず**2.1**で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し、続いて**2.2**で人物の顔の平均画像輝度と各照明の光量との関係を測定する手法について述べる。**2.1**の定式化では画素単位の定式化について述べるが、**2.2**では拡散反射のみを仮定し、その計算過程を顔単位の領域に基づく定式化で表す。

2.1 照明の光量と物体の画像輝度との関係の定式化

本節では、人物を対象として考える前に一般的な物体を対象とし、照明の光量と物体の画像輝度との関係を定式化する。

照明*i* ($i = 1 \dots N$) の光量が光量制御変数 v_i ($v_i =$

$0-v_i^{MAX})$ によって制御されているとき、光量の変化を表す照明 i に固有の光量変化関数 h_i と係数 a_i によって、照明 i の光量 I_i は、

$$I_i = a_i h_i(v_i) \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、照明が消灯しているとき、 $v_i = 0$ であるとし、関数 h_i は、その値域が 0.0–1.0 で正規化された関数で、 $h_i(0) = 0.0$, $h_i(v_i^{MAX}) = 1.0$ である。

この照明環境下において撮影を行ったとき、画像輝度は、対応する物体表面の明るさによって定まる。映像上で位置 j の画素 j に対応する物体表面に注目すると、この物体表面がカメラ方向に放つ情景放射輝度 L_j は、

$$L_j = \sum_i b_{ij} I_i \quad (2)$$

となる。ここで b_{ij} は、当該物体表面の位置・法線・反射特性、及び照明とカメラの位置によって定まる変数である。この式は、物体の情景放射輝度が環境内に存在するすべての照明の影響を加法的に受けることにより成立する。 L_j は物体表面における拡散反射、鏡面反射による反射光を再現するだけでなく、撮影環境にあらかじめ設置されている物体からの相互反射光による反射をも再現する。

ゆえに式(2)に式(1)を代入すると、

$$L_j = \sum_i c_{ij} h_i(v_i), (c_{ij} = a_i b_{ij}) \quad (3)$$

が導かれる。ただし、 c_{ij} は、照明 i が物体の明るさに与える影響を示しており、照明・物体・カメラの3体の位置関係、及び物体の形状と反射特性によって定まる変数である。本研究では、照明とカメラの位置は固定であるとし、 c_{ij} は、物体の位置・形状・反射特性に依存する。

画像上の画素 j の画像輝度 Z_j と情景放射輝度 L_j との関係は、カメラの露出時間 Δt と、非線形な関数 f によって、

$$Z_j = f(L_j \Delta t) \quad (4)$$

となることが知られている[1]。ここで、関数 f は、カメラのCCD素子の露光量 $L_j \Delta t$ と画像輝度 Z_j との関係を表すカメラに固有の反応関数である。関数 f は単調で滑らかな関数であり、逆関数をもつ。

ただし、情景放射輝度 L_j の増減に伴って画像輝度 Z_j の値がダイナミックレンジを上にあるいは下に外れた場合、 Z_j はそれぞれ最大値 Z^{MAX} 、最小値 Z^{MIN} に丸められる。

式(3)と式(4)は、照明 i の光量制御変数 v_i と物体の画像輝度 Z_j との関係を示している。これらの式において、照明制御変数 v_i とカメラの露出時間 Δt の値は操作可能であり、画像輝度 Z_j は撮影により得られるため既知とみなせる。ゆえに、カメラの反応関数 f と照明の光量変化関数 h_i の2関数及び、照明 i が物体の明るさに与える影響の変数 c_{ij} をあらかじめ測定しておけば、照明の光量制御変数 v_i と画像輝度 Z_j の関係を求めることができる。

2.2 人物を対象とした場合の未知項の測定方法

式(3), (4)の未知項のうち、カメラの反応関数 f 、照明の光量変化関数 h_i は撮影する対象がどのような物体であるかに依存しないため、事前に静止した物体を撮影することでこれらを測定する。

一方、照明 i が物体の明るさに与える影響の変数 c_{ij} の値は、本来物体の位置・表面形状・反射係数に依存するが、本研究では、撮影対象物体が人物の顔であるため、人物の顔に合わせた測定方法を用いる。

本研究の達成すべき目的は、人物の顔の平均画像輝度を目標画像輝度にすることである。2.1での定式化において、 c_{ij} は画素 j ごとに定式化したが、本節では顔領域における平均の影響 \bar{c}_i を測定する。

本研究における撮影対象物体は正対した人物の顔である。人物のいる位置が変化するため、 \bar{c}_i を位置ごとに測定する。一方、形状については、人物がカメラに正対すると仮定しているので、カメラから見ると形状の変化はほとんどないと考えられる。反射係数は、人物の顔の反射係数はほぼ一定であり、拡散反射のみであると仮定して測定する。

2.2.1 カメラの反応関数 f の測定方法

物体を静止させ、照明の光量を固定している状況では、式(3)から情景放射輝度 L_j は固定値になる。このとき、カメラの露出時間 Δt を変化させて撮影し、そのときの画像輝度 Z_j の変化を測定することで、式(4)からカメラの反応関数 f が求まる[1]。

2.2.2 照明の光量変化関数 h の測定方法

照明 i のみを点灯させると、式(3)は、

$$L_j = c_{ij} h_i(v_i) \quad (5)$$

である。物体が静止しているとき、 c_{ij} は、 v_i の値に

かわらず固定である。よって、静止している物体に対して、照明 i のみを任意の光量制御変数 v_i で点灯して撮影し、そのときの情景放射輝度 L_j を調べることで、 v_i と L_j との関係が分かる。すべての光量制御変数 v_i において測定を行い、 v_i の変化に対する情景放射輝度 L_j の変化を求め、この結果を 0.0~1.0 に正規化することで、関数 h_i が求まる。

なお、情景放射輝度 L_j の値は、露出時間 Δt で撮影されているとすると、式(4)から、

$$L_j = \frac{1}{\Delta t} f^{-1}(Z_j) \quad (6)$$

で与えられるので、 Z_j の値を画像上で観測すれば求めることができる。

2.2.3 各照明が人物の明るさに与える影響の変数 c の測定

各照明が人物の明るさに与える影響の変数は、人物の顔の画像領域で平均したものを測定する。

画素 j ごとに定式化された式(3)を、人物の顔の画像領域で平均した形に書き直す。人物の顔の平均情景放射輝度 \bar{L} は、顔の画像領域 \mathfrak{R} に含まれる画素 j の集合において情景放射輝度 L_j を平均して求められるので、式(3)から、

$$\begin{aligned} \bar{L} &= \frac{1}{n} \sum_{j \in \mathfrak{R}} L_j = \frac{1}{n} \sum_{j \in \mathfrak{R}} \sum_i c_{ij} h_i(v_i) \\ &= \sum_i \left(\frac{1}{n} \sum_{j \in \mathfrak{R}} c_{ij} \right) h_i(v_i) \\ &= \sum_i \bar{c}_i h_i(v_i) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで \bar{c}_i は、人物の顔の画像領域 \mathfrak{R} における c_{ij} の平均であり、 n は、 \mathfrak{R} に含まれる画素数である。 \bar{c}_i は照明 i が人物の明るさに与える影響を表し、人物の顔の位置・形状・反射特性に依存する。

本研究では \bar{c}_i を事前測定する。人物の顔の位置は一定ではないため、 \bar{c}_i を、その 3 次元座標 $\mathbf{p} = (x, y, z)$ による関数 $\bar{c}_i(\mathbf{p})$ とする。 $\bar{c}_i(\mathbf{p})$ を測定している間、人物の位置や形状は変化しないことが求められるが、人物は完全に静止することが難しいため、モデル物体を用いて測定する。モデル物体は、人物の頭部の形状に近いものを用いる。そして、モデル物体と人物の反射特性の違いを吸収するため、モデル物体と人物の反射係数比を測定する。

(a) 各照明がモデル物体の明るさに与える影響の

変数の測定

照明 i が位置 \mathbf{p} にあるモデル物体の明るさに与える影響の変数を $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ とすると、その平均情景放射輝度 $\bar{L}_m(\mathbf{p})$ は、式(7)により、

$$\bar{L}_m(\mathbf{p}) = \sum_i \bar{m}_i(\mathbf{p}) h_i(v_i) \quad (8)$$

となる。

照明 i がサンプル位置 \mathbf{p}_s にあるモデル物体の明るさに与える影響の変数 $\bar{m}_i(\mathbf{p}_s)$ は、モデル物体を実際に撮影することで求める。モデル物体を \mathbf{p}_s の位置に向きを正面にして設置し、照明 i のみをある光量制御変数 v_i で点灯して、モデル物体の平均情景放射輝度 $\bar{L}_m(\mathbf{p}_s)$ を求める。このとき、式(8)より、

$$\bar{m}_i(\mathbf{p}_s) = \frac{\bar{L}_m(\mathbf{p}_s)}{h_i(v_i)} \quad (9)$$

によって $\bar{m}_i(\mathbf{p}_s)$ が測定される。すべての照明について $\bar{m}_i(\mathbf{p}_s)$ を求めるため、照明を一つずつ点灯して撮影し、測定する。任意の位置 \mathbf{p} における $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ を求めるため、いくつかのサンプル位置において $\bar{m}_i(\mathbf{p}_s)$ を測定し、これを補間して $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ を求める。

(b) モデル物体と人物の反射係数比の測定

照明 i がモデル物体の明るさに与える影響の変数 $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ を用いて、照明 i が人物の明るさに与える影響の変数 $\bar{c}_i(\mathbf{p})$ を求める。モデル物体と人物の顔の形状が同じであると仮定すると、モデル物体と人物の顔との違いは、その反射係数のみである。ここで、モデル物体と人物の顔の双方の表面における反射が、ともに均一な拡散反射のみであるとすると、その反射は位置によらず一定となる。それぞれの拡散反射係数の比を r とすると、任意の位置 \mathbf{p} において、

$$\bar{c}_i(\mathbf{p}) = r \bar{m}_i(\mathbf{p}) \quad (10)$$

である。式(7), (8), (10) より、 r は次のように定式化される。

$$r = \frac{\bar{c}_i(\mathbf{p})}{\bar{m}_i(\mathbf{p})} = \frac{\sum_i \bar{c}_i(\mathbf{p}) h_i(v_i)}{\sum_i \bar{m}_i(\mathbf{p}) h_i(v_i)} = \frac{\bar{L}(\mathbf{p})}{\bar{L}_m(\mathbf{p})} \quad (11)$$

よってモデル物体と人物の顔が、同じ照明下で同じ位置にあるときの $\bar{L}(\mathbf{p})$, $\bar{L}_m(\mathbf{p})$ を測定し、 r を求めることができる。

以上により、照明 i がモデル物体の明るさに与える影響の変数 $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ と、モデル物体と人物の顔の反射係数比 r が測定されるので、式(10)から、照明 i が人物の明るさに与える影響の変数 $\bar{c}_i(\mathbf{p})$ が得られる。

3. 照明制御方法

本章では、複数の人物に対して、各人物の顔の平均画像輝度 \bar{Z} が目標画像輝度 \hat{Z} になるような各照明の光量を求める手法について述べる。

人物の顔の平均画像輝度 \bar{Z} を目標画像輝度 \hat{Z} にすることは、人物の顔の平均情景放射輝度 \bar{L} を、 \hat{Z} に対応する目標情景放射輝度 \hat{L} にすることと等価である。そこで、ここでは \bar{L} について考える。

人物 k ($k = 1 \dots M$)において、その顔の平均画像輝度を \bar{Z}_k 、平均情景放射輝度を \bar{L}_k とする。 \bar{Z}_k と \bar{L}_k との関係を、式(6)から、

$$\begin{aligned}\bar{L}_k &= \frac{1}{n_k} \sum_{j \in \mathfrak{R}_k} L_j = \frac{1}{n_k} \sum_{j \in \mathfrak{R}_k} \frac{1}{\Delta t} f^{-1}(Z_j) \\ &\cong \frac{1}{\Delta t} f^{-1} \left(\frac{1}{n_k} \sum_{j \in \mathfrak{R}_k} Z_j \right) \\ &= \frac{1}{\Delta t} f^{-1}(\bar{Z}_k)\end{aligned}\quad (12)$$

で近似して定める。ここで、 n_k は人物 k の顔の画像領域 \mathfrak{R}_k に含まれる画素数である。カメラの反応閾数 f は滑らかな関数であるため、 Z_j の分散が小さい場合には、この近似は十分に成り立つ。よって、人物 k の顔の平均画像輝度が目標画像輝度 \hat{Z}_k であるとき、その平均情景放射輝度を目標情景放射輝度 \hat{L}_k とするとき、 \hat{L}_k は式(12)により、

$$\hat{L}_k = \frac{1}{\Delta t} f^{-1}(\hat{Z}_k) \quad (13)$$

によって定まる。

人物 k の顔が \mathbf{p}_k の位置にあるとき、その平均情景放射輝度 \bar{L}_k を目標情景放射輝度 \hat{L}_k にするためには、式(7)により、

$$\hat{L}_k = \sum_i \bar{c}_{ki}(\mathbf{p}_k) h_i(v_i) = \sum_i \bar{c}_{ki}(\mathbf{p}_k) X_i \quad (14)$$

を、すべての人物 k について満たすような変数 X_i を求めればよい。ここで、 $X_i = h_i(v_i)$ は、照明 i の光量に基づく変数であり、 $i = 1 \dots N$ 、 $k = 1 \dots M$ である。 M 個ある線形な制約式(14)をすべて満たすためには、 $\bar{c}_{ki}(\mathbf{p}_k)$ を要素とする $M \times N$ 行列 C の階数 $\text{rank } C$ が、 M でなければならない。 $\text{rank } C$ は、人物の数 M 、照明数 N や撮影環境に依存する。 N が M より小さい場合、 $\text{rank } C$ は N より小さくなり、解が存在しなくなる。また、人物の位置が近づい

た場合、 $\bar{c}_{ki}(\mathbf{p}_k)$ の値が異なる k においてほとんど同じになり、 $\text{rank } C$ が減ることで解が存在しなくなる。照明の光量には上下限があるため、 X_i の定義域は $0.0 \leq X_i \leq 1.0$ である。

M 個の式(14)の制約をすべて満たすような解 X_i を求めるために、シンプレックス法を用いる[16]。シンプレックス法は線形計画法でよく用いられており、これを用いることで、線形制約式を満たす解を高速に求めることができる。求められた解 X_i から、光量制御変数 $v_i = h_i^{-1}(X_i)$ を求め、この v_i に基づいて照明制御を行う。

光量の計算と照明制御は、

(1) 人物 k の位置 \mathbf{p}_k が変化し、照明 i が人物の明るさに与える影響の変数 $\bar{c}_{ik}(\mathbf{p}_k)$ が変化したとき

(2) 人物 k の目標画像輝度 \hat{Z}_k が変更されたときに動的に行われる。光量の計算は、上に述べたように線形な制約式を解くだけであるため高速に処理することができます。よって、(1)と(2)に対して高速に照明制御することができる。

4. 実験

4.1 実験環境

本学の講義室において、2人の人物を対象に実験を行った。実験環境の様子を図1に示し、この実験環境を上から見た図を図2に示す。

照明として、LPL 製 500 W のハロゲンランプ照明を八つ用い、位置、向きを固定して設置した。各々の照明は、Effect Arts 製調光機によって、128段階の光量制御が可能である。つまり、 $v_i = 0 \dots 127$ である。

カメラ (SONY 製 EVI-D30) は、人物に正対する位置に、向きを固定して設置した。露出時間は、 $\frac{1}{60}$ ~

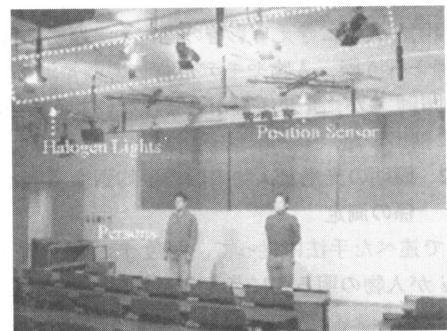


図1 実験環境の様子
Fig. 1 A snapshot of the room.

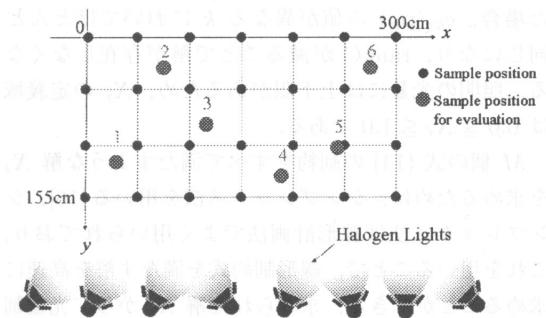


図 2 実験環境の図とモデル物体を置いたサンプル点の位置
Fig. 2 A floor plan of the room.

Fig. 2 A floor plan of the room.



図 3 手動で抽出した顔領域

Fig. 3 Manually extracted image region of the human face.

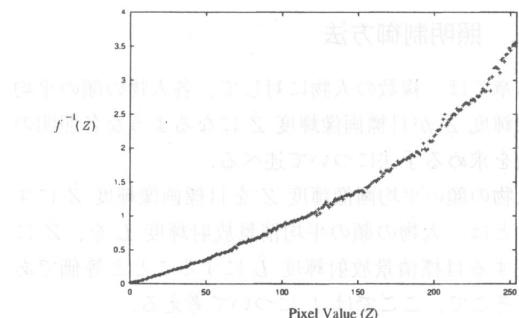
$\frac{1}{10000}$ (s) の 28 段階制御可能である。システムへの入力映像はモノクロ映像であり、 640×480 pixel、画像輝度 0~255とした。

人物とモデル物体の 3 次元位置を求めるために、ポジションセンサ (InterSense 製 IS-600 Mark2) を天井に設置した。これは、複数のマーカの 3 次元位置を取得することができる。人物、モデル物体の頭頂部にマーカを付け、それぞれの位置を測定した。

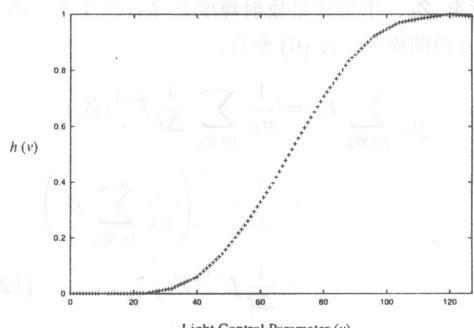
各照明が人物に与える影響の測定や、照明制御結果の評価を行う際、人物やモデル物体の顔領域 Ω を手動で抽出するが、 Ω に毛髪が含まれないように図 3 のように抽出した。

4.2 照明の光量と人物の顔の平均画像輝度との関係の測定

2. で述べた手法に従って、関数 f 、関数 h_i 及び、照明 i が人物の明るさに与える影響の変数 c_i を測定した。



(a) Camera reaction function f^{-1}



(b) Light volume transition function h

図 4 カメラの反応関数 f 、照明の光量変化関数 h の測定結果
Fig. 4 Camera reaction function f and light volume transition function h .

4.2.1 カメラの反応関数 f 及び照明の光量変化関数 h の測定

2.2.1 と 2.2.2 で述べた手法により、カメラの反応関数 f 、照明 i の光量変化関数 h_i を測定した。図 4(a) にカメラの反応関数 f の逆関数 f^{-1} のグラフ、図 4(b) に照明の光量変化関数 h_i のグラフを示す。本実験で用いたハロゲンランプ照明の場合、八つの照明とも同一形状のグラフとなった。

4.2.2 モデル物体を用いた測定

2.2.3 で述べた手法を用いて、照明 i が人物の顔に与える影響の変数 c_i を測定した。

人物の頭部とほぼ同じ形状をし、白色で拡散反射のみの表面をもったモデル物体 (図 5) を用い、照明 i がモデル物体の明るさに与える影響の変数 m_i と、モデル物体と人物の反射係数比 r を測定した。

人物の顔の位置は、歩行時にはほぼ一定の高さであるとみなせるので、人物の位置 p の高さ z を $z = 180$ cm に固定した。図 2 のように、床と平行な平面上において、 x 軸方向 (横方向) は 0~300 cm の間には等間

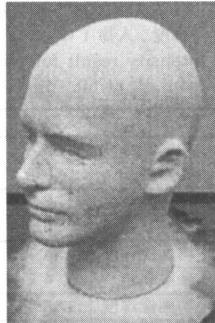


図 5 モデル物体
Fig. 5 The head model.

隔で 7 点, y 軸方向 (奥行方向) は 0~155 cm の間で 4 点, 合計 28 点の位置をサンプル位置としてモデル物体を設置し, $\bar{m}_i(\mathbf{p}_s)$ ($s = \{1 \dots 28\}$) を求めた. モデル物体の位置 \mathbf{p}_s の精度は約 5 cm の精度である. また, モデル物体の顔の画像領域は, 人物の顔に相当する範囲を手動で抽出した.

このように測定された 28 個のサンプルデータ $\bar{m}_i(\mathbf{p}_s)$ を, x 軸方向に 6 次元関数, y 軸方向に 3 次元関数で補間して, $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ の値を求めた.

ここで, 本手法による補間の誤差を評価するため, 図 2 のように, 6 位置に実際にモデル物体を置いて測定し, 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 1 に示す. 平均測定値は, 各照明の \bar{m}_i の測定値を, すべての照明において平均したものである. 平均絶対誤差は, 各照明の \bar{m}_i の測定値と推定値との絶対誤差をすべての照明において平均したものである. 誤差比は, 平均測定値に対する平均絶対誤差の比であり, 7.2%以下になっている. 照明 i がモデル物体の明るさに与える影響の変数 $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ の位置 \mathbf{p} による実際の変化と, 本論文で用いた補間との差がこの誤差として表れており, より細かい間隔で測定すれば精度が上がると考えられる. しかし, $\bar{m}_i(\mathbf{p})$ の変化は, 照明の位置や壁による相互反射などの撮影環境に依存するため, 完全に補間することは難しい.

モデル物体の反射係数と人物の顔の反射係数との比 r は, 同じ位置にモデル物体と人物を立たせて撮影し, モデル物体, 人物の顔の画像領域をそれぞれ手動で抽出して平均景気放射輝度を求ることで測定した.

人物 1 に対し, 6 位置で測定した結果を表 2 に示す.

r の 6 位置での平均 \bar{r} に対する各位置での誤差は, 8.7%以内に収まり, 標準偏差は 0.0152 となった. こ

表 1 計測値と推定値との誤差

Table 1 Estimation of \bar{m}_i .

位置 (x, y)	平均測定値	平均絶対誤差	誤差比
1 (35, 110)	802.3	50.0	6.24 %
2 (70, 50)	801.9	36.0	4.49 %
3 (115, 80)	1036.6	40.7	3.92 %
4 (185, 130)	1287.8	37.0	2.87 %
5 (245, 100)	965.2	69.4	7.19 %
6 (275, 35)	694.1	29.9	4.30 %

表 2 モデル物体と人物 1 の顔の反射係数比 r Table 2 Ratio r of reference model and person #1.

位置 (x, y)	r	$ \bar{r} - r /\bar{r}$ (%)
1 (0, 0)	0.2284	7.08
2 (155, 0)	0.2258	5.88
3 (300, 0)	0.2307	8.16
4 (0, 155)	0.2024	5.11
5 (155, 155)	0.1976	7.37
6 (300, 155)	0.1948	8.64
平均 \bar{r}	0.2133	

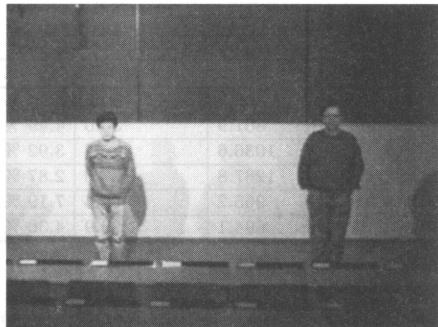
の結果から, r の値は位置によらず, ほぼ一定であることが確認できる. モデル物体と人物の反射係数比の位置による誤差の原因としては, モデル物体と人物の形状が一致していないこと, また人物の顔の反射係数が, 本研究で想定しているような拡散反射のみの反射ではなく, 鏡面反射も含まれていることが挙げられる. モデル物体と人物との形状の差, 鏡面反射の影響がもたらす誤差の結果が 8.7%以下と小さいことから, モデル物体と人物の形状とがほぼ同じとみなした仮定, 及びモデル物体と人物の反射係数がともに拡散反射のみであるとみなした仮定は, どちらも十分に成り立つことを示している.

本実験ではこれ以降, 人物 1 の r_1 として平均値 0.2133 を用いる. また, 人物 2, 3 に対しても同様に測定し, $r_2 = 0.2851$ $r_3 = 0.2033$ を用いる.

4.3 照明の動的制御

4.2.2 で測定した結果に従って, 3. で述べた手法によって照明を制御した.

2 人の人物に対し, 照明制御を行った. 人物の位置をポジションセンサで測定し, 各人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるように照明を制御して撮影した. これを人物の位置をランダムに変えて六つの状況で実験を行った. 照明制御は人物のいる位置が移動したとき, または目標画像輝度が変化したときに行われる. 人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になっているか評価するため, 照明制御後の画像から人物の顔の画像領域 \mathcal{R} を手動で抽出し, その平均画像輝度



(a) Person #1 (left) and person #2 (right)



(b) Person #1 (right) and person #2 (left)

図 6 照明制御結果

(目標画像輝度：人物 1 は 150, 人物 2 は 50)

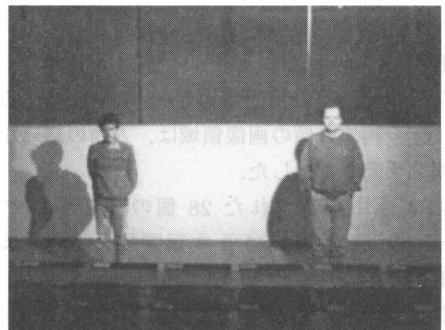
Fig. 6 Snapshots of active light control for person #1 at 150 and person #2 at 50.

表 3 照明制御による人物の顔の平均画像輝度

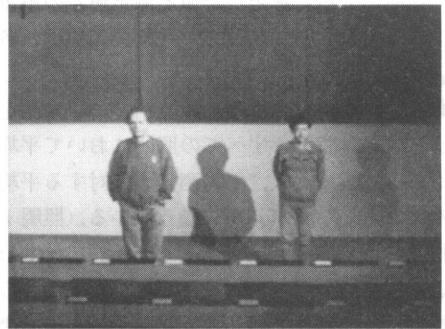
(目標画像輝度：人物 1 は 150, 人物 2 は 50)

Table 3 Image intensity result for person #1 at 150 and person #2 at 50.

状況		人物 1	人物 2
1	平均画像輝度	159.8	52.3
	絶対誤差	9.8	2.3
2	平均画像輝度	156.9	38.9
	絶対誤差	6.9	11.1
3	平均画像輝度	154.7	52.5
	絶対誤差	4.7	2.5
4	平均画像輝度	155.1	43.5
	絶対誤差	5.1	6.5
5	平均画像輝度	146.8	51.2
	絶対誤差	3.2	1.2
6	平均画像輝度	159.8	56.9
	絶対誤差	9.8	6.9



(a) Person #1 (left) and person #2 (right)



(b) Person #1 (right) and person #2 (left)

図 7 照明制御結果 (目標画像輝度：人物 1 は 80, 人物 2 は 170)

Fig. 7 Snapshots of active light control for person #1 at 80 and person #2 at 170.

を測定した。なお、2人の人物とも目標画像輝度となるような照明光量の解は存在している。

人物 1, 2に対し、それぞれの目標画像輝度を 150, 50 として照明制御した。実験画像を図 6 に示す。図 6(a) の左側、(b) の右側の人物が人物 1 である。この画像から人物 1, 2 の顔の平均画像輝度を測定し、目標画像輝度と比較した。

結果を表 3 に示す。256 階調の画像に対して、絶対誤差は最大で 11.1 であった。

人物 1, 2に対し、それぞれの目標画像輝度を 80, 170 に変えて照明制御した。実験画像を図 7 に示す。図 7(a) の左側、(b) 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と目標画像輝度とを比較した結果を表 4 に示す。この結果も同程度の誤差であり、目標画像輝度を変化させても正しく照明制御ができていることが示されている。

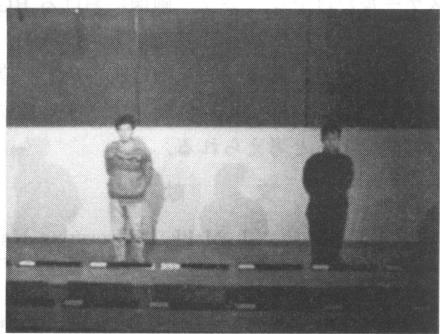
人物を交代し、人物 1, 3に対し、それぞれの目標画像輝度を 150, 50 に変えて照明制御した。実験画像

表 4 照明制御による人物の顔の平均画像輝度
(目標画像輝度: 人物 1 は 80, 人物 2 は 170)
Table 4 Image intensity result for person #1 at 80
and person #2 at 170.

状況		人物 1	人物 2
1	平均画像輝度	80.3	169.1
	絶対誤差	0.3	0.9
2	平均画像輝度	95.6	154.9
	絶対誤差	15.6	15.1
3	平均画像輝度	89.8	158.2
	絶対誤差	9.8	11.8
4	平均画像輝度	86.9	160.7
	絶対誤差	6.9	9.3
5	平均画像輝度	84.8	170.1
	絶対誤差	4.8	0.1
6	平均画像輝度	96.5	157.0
	絶対誤差	16.5	13.0



(a) Person #1 (right) and person #3 (left)



(b) Person #1 (left) and person #3 (right)

図 8 照明制御結果 (目標画像輝度: 人物 1 は 150, 人物 3 は 50)

Fig. 8 Snapshots of active light control for person #1 at 150 and person #3 at 50.

表 3～表 5 の結果において、絶対誤差を平均すると 6.7 となった。

人物の顔の平均画像輝度差を、人がどの程度見分けることができるかを調べるために、簡単な認知実験を行った。2 人の人物に対して、1 人の人物の目標画像

表 5 照明制御による人物の顔の平均画像輝度
(目標画像輝度: 人物 1 は 150, 人物 3 は 50)
Table 5 Image intensity result for person #1 at 150
and person #3 at 50.

状況		人物 1	人物 3
1	平均画像輝度	156.3	53.1
	絶対誤差	6.3	3.1
2	平均画像輝度	163.2	56.0
	絶対誤差	13.2	6.0
3	平均画像輝度	152.8	53.8
	絶対誤差	2.8	3.8
4	平均画像輝度	156.2	55.8
	絶対誤差	6.2	5.8
5	平均画像輝度	155.1	50.1
	絶対誤差	5.1	0.1
6	平均画像輝度	152.7	62.4
	絶対誤差	2.7	12.4

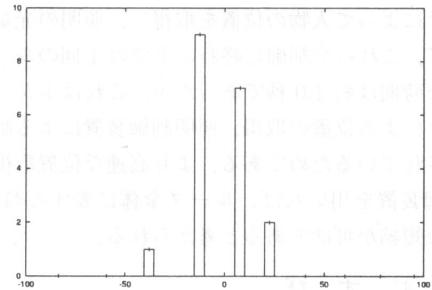


図 9 人物の顔の明るさに対する認知精度

Fig. 9 Cognitive accuracy for the brightness of the face.

輝度を 100 で固定し、もう 1 人の人物の目標画像輝度を 0 から 200 まで 20 ごとに 11 段階設定して照明制御を行い、撮影した。

撮影された映像を 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ロンモニタ (SONY 製 PVM-1444Q) で出力した。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を、はい/いいえで評価してもらった。各画像において、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。この結果を図 9 に示す。この図において、横軸は 2 人の人物の顔の平均画像輝度差、縦軸は 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示す。横軸に対してデータが必ずしも 20 ごとでないのは、目標画像輝度に対して実際の平均画像輝度に多少のずれがあるためである。平均は -2.8、標準偏差は 15.2

であった。この実験結果は出力するモニタの種類やコントラストの設定によって左右されるが、標準偏差が15.2であるのに対し、本研究の照明制御の平均絶対誤差は6.7である。よって、本研究の照明制御による誤差は、十分に小さく、人が認知することが難しいと考えられる。

本実験では、目標画像輝度が明るい人物と暗い人物の絶対誤差を比較すると、目標画像輝度の明るい人物の方が絶対誤差が大きい傾向が見られた。これは目標画像輝度の明るい人物に対する照明の光量が大きいため、4.2.2で測定した結果における誤差の影響が大きく現れたためであると考えられる。

本論文で提案した照明の光量の計算の処理時間は、約1.5ミリ秒であった。本実験において、ポジションセンサによって人物の位置を取得し、照明の光量を計算して、これらを制御し終わるまでの1回のループに必要な時間は約1.0秒であったが、これはポジションセンサによる位置の取得、照明制御装置による制御に費やされているためである。より高速な位置取得、照明制御装置を用いれば、ループ全体に要する時間は、大幅な短縮が可能であると考えられる。

5. む す び

本論文では、各照明の光量と人物の顔の平均画像輝度との関係を事前測定し、複数人物に対して、各人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるように照明の光量を動的制御する手法を提案した。この手法を実装して実験し、各人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるように、照明を動的に制御できることを実証した。

本手法の特徴として、次の点が挙げられる。各照明の光量と人物の平均画像輝度との関係を求めるために、照明の光量変化関数、カメラの反応関数、各照明が人物の明るさに与える影響といった未知の関数や変数を、事前測定することができるよう定式化を行っている。これらを事前測定するにあたり、モデル物体を用いて測定しているために、撮影される人物に負担を与えることなく測定することができる。更に、各人物の顔の平均画像輝度が目標画像輝度になるような照明の光量が、線形な制約式を解くだけで求められるよう定式化されており、人物のいる位置の変化や目標画像輝度の変更に対して、高速に照明制御することができる。

実験結果から、本手法の照明制御によって、256階調の画像に対して目標画像輝度との絶対誤差の平均が

6.7という精度で、複数人物の顔の平均画像輝度を調節することができることが示された。また、照明の光量の計算に必要な処理時間が約1.5ミリ秒であり、非常に高速であることが示された。これにより、講義や公演、会議のように複数人物がコミュニケーションを行っている状況を撮影するにあたり、各人物のいる位置や目標画像輝度が頻繁に変化する場合でも、本手法の照明制御が十分に利用可能であると考えられる。

今後の研究課題としては、人物同士によって及ぼされる明るさの相互干渉への対策が挙げられる。この相互干渉のうち、最も人物の顔の明るさへの影響が大きいと考えられるのは、ある人物の影が他の人物の顔にかかってしまう場合である。この対策としては、照明と各人物の位置情報を用いて、ある人物の影が他の人物の顔にかかってしまうような位置関係にある照明を求め、このような照明を消灯して用いずに照明制御することができる。本論文では、人物の明るさのみを照明制御の対象としたが、静止した物体に対しても、各照明が物体の明るさに与える影響を測定することで、同様に照明制御を行うことができる。しかしこの場合も人物による影の影響が問題となり、これを考慮した照明制御を行わなければならない。また本論文では、人物の明るさとしてグレースケールを用いた。2.1で定式化した照明光量と物体の画像輝度との関係は、グレースケールだけでなくカラー画像におけるRGB各色において、それぞれ独立に成立する。よって、本手法で提案した測定、制御手法をRGB各色で独立に用いることで、人物の顔の平均色を目標とする色にすることが可能であると考えられる。

文 献

- [1] P.E. Debevec and J. Malik, "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," SIGGRAPH97, pp.369–378, 1997.
- [2] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Illumination distribution from shadows," Proc. 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,” 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.5, pp.861–871, May 1998.
- [4] P.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] 神原誠之、横矢直和, “光源環境マップの実時間推定による光学的整合性を考慮したビジョンベース拡張現実感,” 情

- 報科学技術フォーラム（FIT）情報技術レターズ，vol.1, pp.127-128, 2002.
- [6] 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,” 情報学論, vol.41, no.SIG10(CVIM1), pp.19-30, 2000.
- [7] P.E. Debevec, A. Wenger, C. Tchou, A. Gardner, J. Waese, and T. Hawkins, “A lighting reproduction approach to live-action compositing,” SIGGRAPH 2002, pp.547-556, 2002.
- [8] Y. Sato, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi, “Object shape and reflectance modeling from observation,” SIGGRAPH97 Proceedings, pp.379-387, 1997.
- [9] 西野恒, 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史, “Eigen-Texture法:複合現実感のための3次元モデルに基づく見えの圧縮と合成,” 信学論(D-II), vol.J82-D-II, no.10, pp.1793-1803, Oct. 1999.
- [10] 町田貴史, 竹村治雄, 横矢直和, “複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定,” 信学論(D-II), vol.J84-D-II, no.8, pp.1873-1881, Aug. 2001.
- [11] 富田浩司, 廣安知之, 三木光範, “知的ネットワークシステムへの強化学習の適用 (Q-Learningによる知的照明システムの構築),” 計測自動制御学会第13回自律分散システム・シンポジウム, pp.27-32, 2001.
- [12] 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, 2002.
- [13] B. Horn, “Understanding image intensities,” Artificial Intelligence 8, pp.201-231, 1977.
- [14] コンピュータビジョン, 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳編, 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- [15] B. Horn, ロボットビジョン, 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, 朝倉書店, 1993.
- [16] 木下栄蔵, オペレーションズ・リサーチ, 工学図書, 1995.

(平成15年3月31日受付, 8月10日再受付)



亀田 能成 (正員)

平3京大・工・情報工学卒, 平8同大大学院工学研究科博士後期研究指導認定退学。同年同大学工学部助手, 平10同大学総合情報メディアセンター助手。平13~14マサチューセッツ工科大学客員研究員。平14同大学学術情報メディアセンター助手。平15より筑波大学機能工学系講師。モデルベースドビジョン, 画像認識とその応用, 人間を対象とするコンピュータビジョン・マルチメディア処理, 遠隔講義におけるITシステムの研究に従事。工博, 情報処理学会, IEEE各会員。



西口 敏司 (正員)

平8京大・工・情報工学卒。平13同大大学院情報学研究科博士後期研究指導認定退学。同年同大学法学部助手。現在複数のセンサ情報を利用した講義室空間の状況把握, 講義の自動撮影及びアカイブ化に関する研究に従事。人工知能学会会員。



美濃 導彦 (正員)

昭53京大・工・情報工学卒。昭58同大大学院博士課程了。同年工学部助手, 昭62~63マサチューセッツ州立大学客員研究員, 平元京都大学工学部附属高度情報開発実験施設助教授, 平7同教授, 平9京都大学総合情報メディアセンター教授, 平14京都大学学術情報メディアセンター教授。画像処理, 人工知能, 知的コミュニケーション関係の研究に従事。工博, IEEE, ACM, 情報処理学会, 画像電子学会, 日本ロボット学会各会員。



新宮 淳 (正員)

平13京大・工・情報卒。平15同大大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程了。同年より富士ゼロックス(株)に勤務。在学中に照明制御, 講義の撮影及びマルチメディア処理の研究に従事。

（以下略）