

RGB-Dカメラと鏡面球を用いた可視性関数の推定と 人物のRe-lightingへの応用

池田 拓也^{1,a)} フランソワ ドゥ ソルビエ^{1,b)} 杉本 麻樹^{1,c)} 齋藤 英雄^{1,d)}

概要：撮影された対象物体を異なる環境に合成する際、光源環境に合わせて対象物体に再度陰影処理をする Re-lighting を行うことで、光学的整合性のとれた合成画像を得ることが出来る。ここで、Re-lighting するには対象物体の 3 次元形状、撮影時の光源環境、合成する目標の光源環境が必要となる。本研究では、RGB-D カメラを用いることで対象を人物とした Re-lighting を行い、光学的整合性のとれた合成画像を生成する。提案手法では得られた 3 次元点群から可視性関数を推定し、鏡面球を撮影して得られた光源環境を用いて Re-lighting を行う。本実験から、撮影した人物を、目標とする環境に合わせて Re-lighting 出来る事を示した。今後は、提案手法に対する適切な評価及び、高速化による実時間処理を目標とする。

1. はじめに

ある照明条件の元で撮影された人物や物体に対して、別の照明条件に合わせて陰影処理をなおすことを Re-lighting と呼ぶ。このような手法は照明条件によって精度が変化する画像認識の分野や合成画像の生成などに応用できると考えられる。特に合成画像の生成では、映像コンテンツやエンターテインメント性のあるアプリケーションなどに応用ができる。本研究では対象を人物とし、合成する目標の照明条件に合わせて Re-lighting を行う。人物や物体の陰影は、光源環境、対象物体の形状及び反射特性によって算出することができる。

従来の研究では単物体に対して Re-lighting する研究 [1], [2] や人物の顔を対象とした研究 [3], [4], [5], [6], 室内のシーンを対象とした研究 [7] などが存在する。このような研究では、物体の 3 次元形状や反射特性を推定もしくは計測することで Re-lighting を行なっている。また、着目する 3 次元点に対して、撮影時の光源分布と目標の光源分布の範囲を考慮する必要がある。従来の研究では着目点において、その法線ベクトルに対し、仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲を考慮し Re-lighting を行なっている [3]。しかし、複雑な形状をした対象に対しては、その対象自身によ

てできる影が生じる。例えば、凹形状をした物体においては、顕著に影が生じる場合がある。このような影は Self Shadow と呼ばれ、コンピューターグラフィックス分野の研究では可視性関数を計算することで Self Shadow を表現している [8]。可視性関数とは、ある 3 次元点から球面上の全方向を見たときに、各方向が物体によって遮蔽されるかどうかを表す関数である。

本研究では、対象を人物として Re-lighting を行い、光学的整合性を実現した合成画像を作成する。対象の 3 次元情報は RGB-D カメラで撮影した距離情報から得る。光源環境については、鏡面球を観測し球面調和関数で近似して用いる。また、本手法の新規に提案する項目として、対象人物の法線ベクトルだけではなく、可視性関数を計算し Re-lighting を行う。本研究では人物を対象とし、肌だけでなく、衣服も対象として含む。特に衣服は、非剛体であり複雑に変形するため、可視性関数を考慮することで、凹形状をした部分においてより精度よく Re-lighting ができると思われる。また、本研究では位置姿勢が固定された RGB-D カメラを用いて観測するため、対象の表面の距離情報のみが得られる。そこで、物体の全周の形状ではなく表面の距離情報のみを用いて可視性関数を推定する手法について新たに提案する。

2. 関連研究

本章では、Re-lighting に関する研究と本手法と関連した研究について 3 つ述べる。1 つ目は Re-lighting の研究、2 つ目は Re-lighting に必要とされる光源分布の取得方法について、3 つ目に本手法で適応する陰影モデルについて述

¹ 慶応義塾大学院 理工学研究科
〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1
Graduate School of Science and Technology, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Kanagawa 223-8522, Japan
a) ikeda@hvrl.ics.keio.ac.jp
b) fdesorbi@hvrl.ics.keio.ac.jp
c) sugimoto@ics.keio.ac.jp
d) saito@hvrl.ics.keio.ac.jp

べる．最後に，本研究の位置づけを述べる．

物体を対象とした研究として，Marschnerらはレーザー scanner を用いて予め対象の形状を取得し，撮影された対象物体から光源分布を推定し Re-lighting を行なっている [1]．池内らは距離画像から対象物体の 3 次元形状を取得，反射特性を推定し，その後 Re-lighting を行なっている [2]．また，人物の顔を対象とした研究 [3], [4], [5], [6] では，入力画像から Face Morphable Models [9] を用いて顔の形状を推定及び光源推定を行い，任意の光源分布に対して Re-lighting を行っている．特に Zhen らは，顔の形状モデルに対し，法線ベクトルを算出し，光源環境に応じた拡散反射成分を表した radiance environment map [10] を用いて Re-lighting を行っている．しかし，Zhen らの手法では，法線ベクトルに対し，仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲の光源環境を考慮することに相当し，対象の可視性は考慮されていない．対象の形状を測定して Re-lighting を行う研究に対し，Debevec らは Light Stage と呼ばれる全方向から光源を対象に照射可能な装置を用いている [11]．これは，各方向から光源を照射した際の対象の陰影を観測し，それらを用いることで任意の光源環境に合わせた Re-lighting を行っている．しかし，Debevec らの手法では特殊な装置が必要であり，Re-lighting するには膨大な情報を必要とする．

Re-lighting を行う際には，撮影時の光源環境と Re-lighting する目標の光源環境を取得する必要がある．光源環境を取得する直接的な手法としては，魚眼レンズ付きカメラを用いた手法 [12] や鏡面球を観測する手法 [13] が挙げられる．また，光源環境によって対象に影や陰影が生じることから，対象の物体を観測し光源を推定する手法も提案されている．間接的に光源を推定する手法として物体の影から光源を推定する手法 [14] や対象の陰影を観測し光源を推定する手法 [1] が挙げられる．

陰影モデルにおける研究はコンピュータビジョンのみではなくコンピュータグラフィックスの分野でも多く提案されている．本研究では可視性関数を含むモデルとして Sloan らの提案するモデルを用いる [8]．Sloan らは仮想物体における陰影を法線ベクトル，可視性関数，光源分布から算出している．

本研究では，上記の関連研究をふまえるように位置づける．対象を人物に限定し，位置姿勢が固定された RGB-D カメラで観測する事で，人物の距離情報及び陰影を観測する．陰影モデルとして Sloan らの提案するモデルを適用し，観測された人物の距離情報から可視性関数を推定する．Zhen らの手法 [3] を参照し，可視性関数を含まないモデルを従来モデルとして提案手法との比較を行う．また，光源環境については，鏡面球を観測することで取得する．魚眼レンズを用いた手法や影及び陰影から推定する手法では，全方向の光源分布を取得するのは難しいと考えられる．一

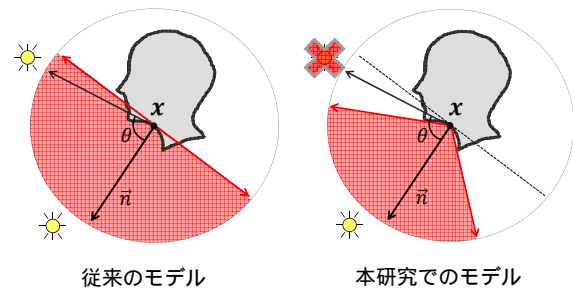


図 1 陰影モデル

方，鏡面球を用いることで，全方向の光源環境を取得できるというメリットがある．

3. 陰影モデル

本章では，Re-lighting における従来モデルと本研究で用いるモデルをそれぞれ述べる．5 章で述べる実験ではこれらのモデルを比較して行う．

全方向からの光源を考慮するために，無限遠の半径を持つ半球上に光源が存在すると考える．実空間における 3 次元点 x から光源方向を仰角 θ と方位角 ϕ で表す． x への光源全体からの照度 $E(x)$ を考えると，可視性関数を含まない従来モデルは，

$$E(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi L(\theta_i, \phi_i) \max(\cos \theta_i, 0) \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

と表される．ここで， $L(\theta_i, \phi_i)$ は (θ_i, ϕ_i) 方向に存在する光源の輝度値， θ_i, ϕ_i は光源方向への仰角と方位角， $\max(\cos \theta_i, 0)$ の項は光源の入射角度による強度， $\sin \theta_i d\theta_i d\phi_i$ は点 $E(x)$ からの微小立体角を表している．

物体による遮蔽関係を考慮した場合，式 (1) は，次のように表現される．

$$E(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi V(x, \theta_i, \phi_i) L(\theta_i, \phi_i) \max(\cos \theta_i, 0) \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (2)$$

可視性関数 $V(x, \theta_i, \phi_i)$ は，点 x から見た (θ_i, ϕ_i) 方向の光源が物体によって遮蔽されているかどうかを表す．遮蔽されている場合は $V(x, \theta_i, \phi_i) = 0$ ，そうでない場合は $V(x, \theta_i, \phi_i) = 1$ とする．図 1 に人物のある 3 次元点 x に対する式 (1) で表されるモデルと式 (2) で表されるモデルをそれぞれ表す．従来モデルでは，法線ベクトル \vec{n} に対して， $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲の光源を考慮することになる．一方，本研究で用いるモデルでは， x に対する可視性を計算することで，考慮する光源の範囲を限定する．

本研究では， $L(\theta, \phi)$ ， $V(x, \theta, \phi)$ ， $\max(\cos \theta, 0)$ の項はそれぞれ球面調和関数 [15] を用いて近似して扱う．ここでは，光源分布 $L(\theta_i, \phi_i)$ を球面調和関数で定式化する． $Y_{lm}(\theta, \phi)$ ($0 \leq l, -l \leq m \leq l$) で，球面上で完備な正規直交系をなす球面調和関数は，

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = K_{lm} P_m^l(\cos(\theta)) e^{im\phi} \quad (3)$$

と表される．ここで， P_m^l は Legendre 陪関数， K_{lm} は正規化定数を表す．この時，球面上で定義された光源分布は，

$$L(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l L_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (4)$$

と表すことができ，球面調和関数の展開係数で光源分布を保持することができる．式 (4) を式 (2) に代入すると，

$$E(x) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l L_{lm} T_{lm}(x) \quad (5)$$

となる．ここで係数 $T_{lm}(x)$ は，対象物体の 3 次元形状から，

$$T_{lm}(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} V(x, \theta_i, \phi_i) \max(\cos \theta_i, 0) Y_{lm}(\theta, \phi) \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (6)$$

で求められる．

ここでは，光源分布を球面調和関数で近似するモデルについて説明した．同様に， $V(x, \theta_i, \phi_i)$ ， $\max(\cos \theta_i, 0)$ の項も球面調和関数によって表現することができる．実空間における 3 次元点 x の照度は各球面調和関数の展開係数の内積によって計算することができる．

4. 提案手法

本章では提案手法について述べる．図 2 に本手法の流れを示す．入力として，対象が撮影されたカラー画像と距離画像及び，鏡面球を観測して得た撮影時の光源分布と目標光源分布，合成する目標背景画像を用いる．まず，距離画像から人物の領域抽出を行い，人物領域の距離情報からカメラ座標系で表現される 3 次元点群を得る．3 次元点群を用いて各点の法線ベクトルを算出する．本研究では，ライブラリー OpenNI [17]，PCL [18] を用いて人物領域抽出，法線ベクトルの算出を行った．次に 3 次元点群から可視性関数を推定し，取得した光源分布を用いて目標とする背景画像に Re-lighting した人物を合成する．次節より，光源分布の取得，可視性関数の推定，比を用いた Re-lighting について説明する．

4.1 鏡面球を用いた光源分布の取得

本手法では，半径が既知の鏡面球を観測することで光源分布を取得する．鏡面球は，周囲の環境を反射するため，広範囲の光源環境を取得することができる．まず，観測された画像に対し，鏡面球の位置を特定するために Canny のエッジ検出 [16] を用いて鏡面球領域の円を検出する．

次に，球上の全方向のサンプリングを行うために cube map [8] を用いる．cube map は図 3 左に示したようなカメラ座標系に対し，立方体によって全方向を表現する．図 3

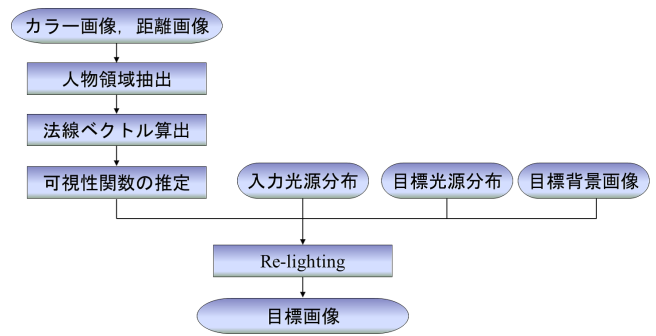


図 2 手法の流れ

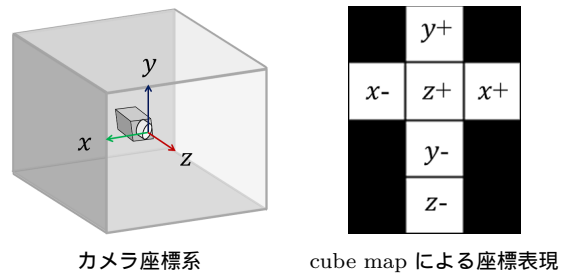


図 3 カメラ座標と cubemap



図 4 光源分布の取得

右に立方体の展開図を示しており，各面の方向を示している．本研究では， $32(\text{画素}) \times 32(\text{画素}) \times 6(\text{面})$ の cube map を採用する．cube map は各画素毎に単位ベクトルを設定しており，これらを用いて全方向のサンプリングを行う．各単位ベクトルに対応する鏡面球の画素は次のように算出する．まず，単位ベクトルと球の中心からカメラへ向かうベクトルの中間ベクトルを算出する．次に，球の法線ベクトルと中間ベクトルが一致する鏡面球の位置を算出する．最後に，算出した位置と画像中の対応する画素を計算し，その点の明度値を参照する．図 4 に観測した鏡面球，cube map でサンプリングを行った結果，サンプリングした光源分布を球面調和関数で近似した結果を示す．なお，本研究では， $0 \leq l \leq 2$ とし，9 つの展開係数によって光源分布を表現する．

4.2 可視性関数の推定

本節では，本研究で用いる可視性関数の推定について，図 5 を用いて説明する．RGB-D カメラで観測した表面の距離情報からカメラ座標系の 3 次元点群を得る．3 次元点 x_k に着目し，緑矢印で示された cube map のある単位ベクトル (θ_i, ϕ_i) に対する可視性関数を $V(x_k, \theta_i, \phi_i)$ とする

と、図 5 より点 x_k から (θ_i, ϕ_i) 方向のベクトルは、カメラに対して物体の背後を通過している。背後を通過したかどうかの判定は次のように行う。点 x_k から単位ベクトル (θ_i, ϕ_i) を足し合わせた点 x'_k に対応する画像面点を算出する。この時、算出された画像面点に存在する物体の 3 次元点群 x_{k-1} と x'_k の z 座標の値を比較する。 x'_k の値が x_{k-1} の値より大きい場合、物体の背後を通過したと判定し、 $V(x_k, \theta_i, \phi_i) = 0$ とする。通過していない場合は、さらに単位ベクトルを足し合わせ同様の処理を繰り返す。本手法では、着目点 x_k に対応する画素から、半径 200 画素の範囲で取得される 3 次元点群に絞り、可視性関数の推定を行う。範囲を超えて物体背後の通過判定が無い場合は、 $V(x_k, \theta_i, \phi_i) = 1$ とする。このような処理を cube map の全方向に対して行い、可視性関数を推定する。

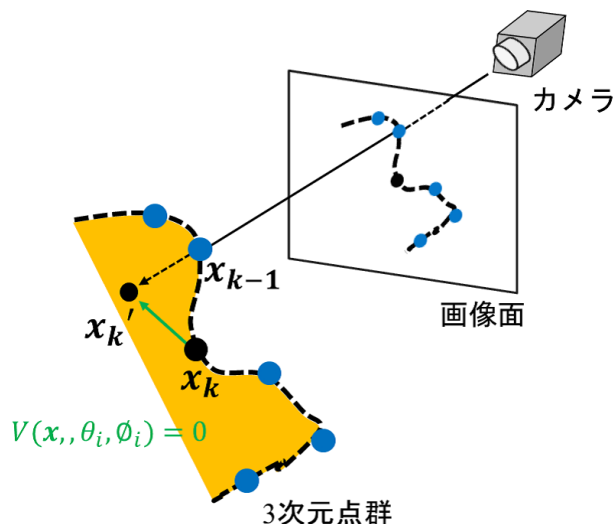


図 5 可視性関数の推定

4.3 比を用いた Re-lighting

本研究では比を用いて、反射係数をキャンセル [14] し、Re-lighting を行う。対象の反射特性を完全 Lambert と仮定し、その反射係数を定数 R_d とすると、画像上の点 u で観測される明度値 $i(u)$ は、

$$i(u) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l R_d L_{lm} T_{lm}(x) \quad (7)$$

となる。次に、撮影した画像での点 u の明度値を $i^{src}(u)$ 、撮影時の光源分布を L_{lm}^{src} 、Re-lighting した目標画像の明度値を $i^{dst}(u)$ 、目標の光源分布を L_{lm}^{dst} とすると、それぞれ式 (7) と同様の式が成り立つ。2 つの式に対して比をとり、 $i^{dst}(u)$ について式変形すると、反射係数 R_d をキャンセルした次の式を得る。

$$i^{dst}(u) = i^{src}(u) \frac{\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l L_{lm}^{src} T_{lm}(x)}{\sum_{l'=0}^{\infty} \sum_{m'=-l'}^{l'} L_{l'm'}^{dst} T_{l'm'}(x)} \quad (8)$$

式 (8) より、撮影した対象画像 $i^{src}(u)$ 、撮影時の光源分布 L_{lm}^{src} 、目標の光源分布 L_{lm}^{dst} 及び対象の 3 次元点群から T_{lm} を用いて目標画像を得ることができる。

本章では、本研究で行った実験について述べる。まず、提案手法で目標の光源環境に合わせて Relighting できているか検証する。そのために、室内や屋内で撮影した環境に合わせて人物に Relighting を行い合成する。次に、式 (1) で表される従来のモデルと式 (2) で表される本研究で用いるモデルを用いて、それぞれ Relighting を行い比較を行う。次節よりデータセット及び実験環境を述べ、実験結果と考察を述べる。

5.1 データセット及び実験環境

本節では実験のデータセットと実験環境を述べる。図 6 に撮影された対象人物 (Room1) と撮影時の光源分布を示

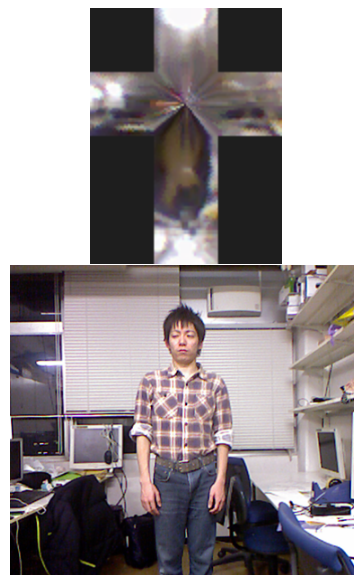


図 6 撮影された対象人物 (Room1)

す。光源分布は鏡面球をサンプリングした cube map を示している。次に、Relighting を行う目標のデータセットは室内で撮影した Room2, Room3, 屋外で撮影した Night, 仮想光源環境として Grace [13] の 4 つを用いる。各データセットは、光源分布を取得するための鏡面球を観測した画像、及び合成するための背景画像で構成される。ただし、Grace においては、光源分布のみを用いる。

次に実験環境について述べる。RGB-D カメラとして Microsoft 社の Kinect を用いた。また、RGB-D カメラに関するライブラリー OpenNI [17] と 3 次元点群を扱うライブラリー PCL [18] を用いて実装した。提案手法の実装環境は以下の通りである。OS:Windows 7, CPU: Intel Core i7-2600 3.40GHz, RAM:3.49GB, 開発環境: Microsoft Visual C++ 2010.

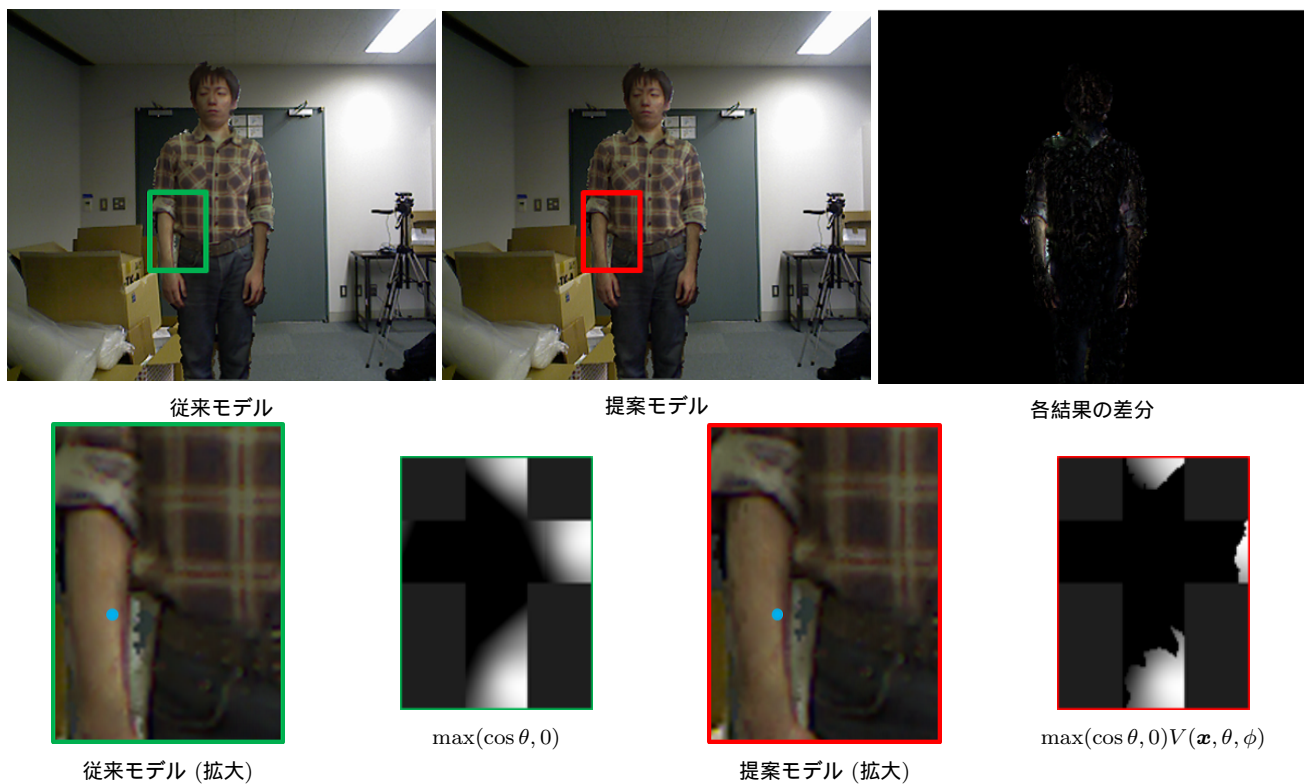


図 8 従来モデルとの比較 (Room2)

5.2 Relighting 結果

図 7 に Room1 の対象人物を Re-lighting した結果を示す．図 6 の人物領域において，目標の環境に合わせ Re-lighting を行い目標の背景画像に合成している．図 6 の cube map から Room1 の環境では，人物に対して， $x-$ 方向， $y+$ 方向， $z-$ 方向に光源が存在していることが分かる．特に， $y+$ 方向は人物の上方向， $z-$ は対象人物からカメラの方向に当たるため，撮影された人物は光源によって明るく照らされている．

図 7 の cube map から Room2 では， $x+$ 方向， $y+$ 方向において顕著に光源が存在している．Room2 では光源の位置により，人物の右側が明るく照らされることが予想される．Room2 の結果を見ると，特に人物の顔の部分において右半分が明るく，逆側は暗く Re-lighting されている．また，Room3 は Room2 と対照的な光源分布となっている．そのため，Re-lighting した結果も，Room2 と対照的に人物の左側が明るく，右側が暗くなっていることが分かる．室内の環境における結果から，鏡面球により全方

向の光源をサンプリングしているため、光源の位置に対応して Re-lighting できていることが分かる。屋外の環境の結果を見ると、周囲の明るさに合わせて Re-lighting できていることが分かる。Night は夜の屋外で撮影したデータであり、cube map や背景画像から全体的に明るさが暗い環境であることが分かる。Re-lighting 結果では、周囲の暗い環境に合わせて人物も暗くなっていることが分かる。仮想的な光源分布の Grace では、周囲の環境の色に合わせて、人物の陰影の色も変更されていることが分かる。このように本手法では、明るさだけでなく、周囲の環境の色合いに合わせて Re-lighting することも可能である。

5.3 従来モデルとの比較

図 8 に、従来のモデルと本手法で用いたモデルの結果をそれぞれ示す。また、図 8 右上に各モデルによって Re-lighting した結果の差分を取った画像を示す。なお、差分画像は明度値の絶対値差 $\times 10$ を明度値としている。主に、人物の腕の部分に差分が大きくみられる。これは人物の体と腕によってできる凹形状部分が要因となっていると考えられる。図 8 の 2 列目はそれぞれ緑枠、赤枠を拡大した画像である。人物の腕の部分を見ると、提案モデルは従来モデルより暗くなっていることが分かる。ここで、拡大画像に青丸で示している座標 (210, 300) の点に着目する。この点の Re-lighting 時に算出する項を cube map で表現した図をそれぞれ示す。それぞれ、式 (1) の $\max(\cos \theta, 0)$ の項、式 (2) の $\max(\cos \theta, 0)V(x, \theta, \phi)$ の項を表しており、各値を 0-255 で表現している。従来モデルでは、仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲を考慮しているのに対し、本手法で用いているモデルでは、さらに考慮されている範囲が限定されていることが分かる。着目点から $x+$ 方向には、人物の体が存在しているため、光源が遮蔽されているはずである。cube map を見ると、可視性関数の推定により、 $x+$ 方向の値がほとんど 0 になっていることが分かる。これにより、Re-lighting 時に考慮される光源の範囲が限定され、結果として従来モデルより腕の部分が暗くなったと考えられる。このように、可視性関数を考慮することで、対象の形状に応じて光源範囲を正しく考慮して Re-lighting できたと言える。

6. おわりに

本研究では、RGB-D カメラと鏡面球を用いた人物の Re-lighting について述べた。距離画像から人物の可視性関数を推定することで、従来のモデルに比べて光源範囲を正しく考慮し Re-lighting を行った。実験から、目標とする光源分布に合わせて Re-lighting を行い、光学的整合性を実現し合成することができた。また、従来モデルとの差分から凹形状をした部分において、可視性関数を考慮したことによる差異を確認した。

今後は、提案モデルの定量評価を行う。可視性関数を考

慮したことによって Re-lighting の精度は向上したと考えられるが、カメラで観測した結果から定量的評価を行うのは難しい。そこで、仮想物体を用いて、本研究で用いたモデルと従来のモデルの精度の定量評価を行う。また、本研究では、人物の Re-lighting の実時間処理を目標とする。そのため、GPU を用いた処理の高速化などを今後の課題とする。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費 基盤研究 (S) 24220004 の補助により行われた。

参考文献

- [1] Stephen R. Marschner and Donald P. Greenberg: *Inverse Lighting for Photography*, IN FIFTH COLOR IMAGING CONFERENCE(1997)
- [2] 池内 克史, 佐藤 洋一, 西野 恒, 佐藤 いまり: 複合現実感における光学的整合性の実現, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 4(4), 623-630, (1999)
- [3] Zhen Wen, Zicheng Liu and Thomas S Huang: *Face Relighting with Radiance Environment Maps*, CVPR(2003)
- [4] Yang Wang, Zicheng Liu, Gang Hua, Zhen Wen, Zhengyou Zhang and Dimitris Samaras.: *Face Relighting from a Single Image under Harsh Lighting Conditions*, CVPR(2007)
- [5] Yang Wang., Lei Zhang, Zicheng Liu, Gang Hua, Zhen Wen, Zhengyou Zhang and Dimitris Samaras: *Face Relighting from a Single Image under Arbitrary Unknown Lighting Conditions*, PAMI (2009)
- [6] Oswald Aldrian and William Smith: *Inverse Rendering with a Morphable Model: A Multilinear Approach*, BMVC (2011)
- [7] Boivin Samuel and Galalowicz Andre.: *Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image*, SIGGRAPH (2001)
- [8] Sloan Peter-Pike, Kautz Jan and Snyder John: *Pre-computed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments*, SIGGRAPH (2002)
- [9] Blanz Volker and Vetter Thomas : *A morphable model for the synthesis of 3D faces*, SIGGRAPH (1999)
- [10] Cabral Brian, Olano Marc, and Nemecek Philip: *Reflection space image based rendering*, SIGGRAPH (1999)
- [11] Paul Debevec, Tim Hawkins, Chris Tchou, and Haarm-Pieter Duiker, Westley Sarokin and Mark Sagar: *Acquiring the reflectance field of a human face*, SIGGRAPH (2000)
- [12] Martin Knecht, Christoph Traxler, Oliver Mattausch, Werner Purgathofer and Michael Wimmer : *Differential Instant Radiosity for Mixed Reality*, ISMAR (2010)
- [13] Paul Debevec : *Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography*, SIGGRAPH (1998)
- [14] Imari Sato, Yoichi Sato and Katsushi Ikeuchi : *Illumination from Shadows*, PAMI (2003)
- [15] Sloan Peter-Pike : *Stupid Spherical Harmonic (SH) Tricks*, Game Developer ' s Conference (2008).
- [16] John Canny : *computational approach to edge detection* PAMI (1986)
- [17] OpenNI, <http://openni.org/>
- [18] PCL, <http://pointclouds.org/>