

## キャストシャドウ存在下の照明錐モデルに関する考察

岡部孝弘 佐藤洋一

東京大学生産技術研究所  
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1  
E-mail:{takahiro, ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp

**あらまし** : ある物体が任意の照明下でとり得る画像の集合は照明錐と呼ばれる凸錐を形成することから、照明のみが変化する場合の物体認識問題は照明錐構築問題に帰着することが知られている。凸物体かつ拡散反射を仮定した場合の照明錐は、仮想照明画像ベクトルの凸結合により張られることが示されているが、非凸物体の場合には、キャストシャドウを考慮して照明錐を構築する必要がある。本報告では、これまでに提案されているキャストシャドウ存在下の照明錐構築手法に原理的な問題があることを、具体例を挙げて指摘する。特に、非凸物体の照明錐を構築するには、物体表面の直接照射の状態だけでなく遮蔽状態を変える方向に光源を置いたときの仮想照明画像ベクトルも必要であることを指摘する。

**キーワード** : 物体認識, 照明変化, 照明錐, キャストシャドウ

## Issues in the Illumination Cone Model with Cast Shadows

Takahiro OKABE Yoichi SATO

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan  
E-mail:{takahiro, ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** : It has been shown that all possible variations in object's appearance under changing illumination can be represented based on the illumination cone model. Thus the problem of object recognition under changing illumination becomes the question of how to construct an illumination cone for a given object. In the case of a convex and Lambertian object, it has been reported that an illumination cone is given as a convex combination of the object's extreme images defined for distinct surface normals. On the other hand, cast shadows need to be taken into account for concave objects. In this paper, we show that the previously proposed method for constructing an illumination cone with cast shadows has a problem in principle. Especially, we demonstrate that additional illumination directions, as well as those defined for distinct surface normals, have to be considered for constructing an illumination cone with cast shadows correctly.

**Keywords** : Object recognition, Varying illumination, Illumination cone, Cast shadow

# 1 はじめに

物体認識には、物体姿勢、視点位置の変化と照明変化の問題があるが、前者が主に幾何学的性質に依存するのに対して、後者は主に光学的性質に依存するため、これらを分けて考えることができる。本報告では、物体姿勢および視点位置一定の下での照明変化の問題について議論する。

従来、照明変化の問題に対しては、比較的照明変化の影響を受けにくいエッジ等の特徴を利用した、特徴に基づく手法 (feature-based method) が用いられてきた。しかし、特徴が常に安定して抽出できるとは限らないうえに、特徴が識別に有効なすべての情報を含んでいるとは限らないという問題があった。

これに対して、近年、画像全体のグローバルな情報を用いて画像と物体を直接対応づける、見え方に基づく手法 (appearance-based method) が提案された。特に、見え方の変化を固有空間中の低次元多様体で表現するパラメトリック固有空間法は、照明変化や物体姿勢変化を伴う物体認識において有効性が示されている [9]。ところが、見え方に基づく手法には、ある条件下で認識を行なうにはあらかじめ同様の条件下で撮影した画像を用いて学習させなければならないという欠点がある。

照明錐 (illumination cone) モデルは、照明のみが変化する場合に着目した画像認識手法の一つであり、画像全体の情報を用いるという点では見え方に基づく手法と同じであるが、反射モデルを仮定して、任意の照明の下での物体の見え方を少数の学習画像から生成するという点で異なっている。この手法は、照明が学習画像撮影時と大きく異なる場合にも有効であることが示されている [4][5]。

照明変化に伴う見え方の変化については、平行光線を仮定すると、画像が鏡面反射成分や影を含まずに拡散反射成分のみで構成されている場合には、光源方向が一次独立な 3 枚の画像の線形結合を用いて任意の照明の下での画像を表現できることが示されている [6]。つまり、 $n$  個の画素からなる画像を各画素値を並べた  $n$  次元ベクトル  $x$  で表現すると、照明変化に伴って  $x$  が  $R^n$  空間で占める領域は 3 次元部分空間になることを意味し、これは照明部分空間 (illumination subspace) と呼ばれている [2]。また、鏡面反射成分や影を含む画像から照明部分空間を推定する方法として、閾値処理を用いた手法 [5] やランダムサンプリングと外れ値除去による線形化の手法 [8] が提案されている。

一方、画像が鏡面反射成分や影を含む場合には、重ね

合わせの原理が成り立つことを仮定すると、照明が変化したときに  $x$  が  $R^n$  空間で占める領域が凸錐 (convex cone) になることが示されており、これは照明錐と呼ばれている [2]。ここでいう重ね合わせの原理とは、二つの光源から同時に照らされた場合の画像が、個々の光源から照らされた場合の画像の和で表されるとするものである<sup>1</sup>。各物体に対応した照明錐が互いに交わりを持たない場合には、照明をどのように変化させても各物体が同一に見えることがないことを意味し、原理的には、テスト画像がどの照明錐に含まれるかを求めることにより、それらの物体の識別を行なうことができる。したがって、照明のみが変化する場合の物体認識の問題は、学習画像から照明錐を構築する問題に帰着する。

照明錐の構築手法としては、凸物体かつ拡散反射を仮定した場合に、照明部分空間を張る 3 枚の画像を用いて構築できることが知られている [2]。具体的には、照明部分空間を張る 3 枚の画像は各画素に対応した物体表面の法線ベクトルの情報を含んでいることから、各画素に対応した物体表面の直接照射の状態を変えるような光源方向を求めることができ、これらの方向に光源を置いたときの仮想照明画像 (境界画像: extreme image) の凸結合により照明錐が張られることが示されている。

物体形状が凸でない場合には、物体がそれ自身に落とす影 (キャストシャドウ: cast shadow) が存在するため、キャストシャドウを考慮して照明錐を構築する必要がある。Georghiadis らは、この場合の照明錐の構築手法として、境界画像を加工する手法を提案している [5]。具体的には、学習画像から復元した形状に対して光線追跡法を用いてキャストシャドウにあたる画素を決定し、それらの画素値をゼロに修正した境界画像の凸結合を用いて照明錐を構築するものである。

本報告では、上述のキャストシャドウ存在下の照明錐構築手法に、原理的な問題があることを示す。具体的には、2 次元の非凸物体に対して上述の手法を適用して、照明錐を正しく構築できていないことを示す。さらに、キャストシャドウが存在する場合の照明錐は、物体表面の直接照射の状態変化のみを考慮した境界画像ベクトルだけでなく、遮蔽状態の変化を考慮した光源方向に照明を置いたときの仮想照明画像ベクトルも含めた凸結合により張られることを指摘する。

以下では、照明錐モデルにおけるキャストシャドウの取り扱いについて考えるために、照明錐モデルのレ

<sup>1</sup> 但し、カメラの応答関数の非線形性が支配的になるような場合には、この仮定は成り立たない。

ビューをしたのち、キャストシャドウ存在下の構築手法に問題があることを示す。まず、第2章で重ね合わせの原理から導かれる照明錐の性質について述べたのち、第3章で凸物体かつ拡散反射を仮定した場合の照明錐の構築手法について、具体例を挙げながら紹介する。第4章では、非凸物体に対する Georghiades らの提案手法を紹介する。また、キャストシャドウが物体の形状に依存するため、方向が未知の光源に照らされた画像からの形状復元についても触れる。第5章では、直接照射の状態変化に着目した彼らの提案手法では照明錐を正しく構築できないことを例を挙げて示し、その原因について考察する。

## 2 照明錐の性質

まず、物体形状や反射関数に特別な仮定を置かずに、重ね合せの原理のみから導かれる照明錐の性質について述べる。

$\mathcal{C}$  をある物体の作る照明錐とする。その物体を個々の光源の下で撮影した画像を各々  $x_1, x_2 \in \mathcal{C}$  とすると、重ね合わせの原理は、

$$x_1 + x_2 \in \mathcal{C} \quad (1)$$

が成り立つことを意味する。(1)式より、任意の  $x \in \mathcal{C}$ 、 $\alpha \geq 0$  について

$$\alpha x \in \mathcal{C} \quad (2)$$

かつ、任意の  $0 \leq \alpha' \leq 1$  について

$$\alpha' x_1 + (1 - \alpha') x_2 \in \mathcal{C} \quad (3)$$

が成り立つことを示すことができ、照明錐が凸錐であることがわかる [2]。なお、(2)式は、光源の照射強度の変化に対応している。

各物体に対応した照明錐が互いに交わりを持つということは、照明を変化させたときにそれらの物体が同一に見える場合があることを意味しており、識別は原理的に不可能である。一方、互いに交わりを持たない場合には、照明をどのように変化させても各物体が同一に見えることがないことを意味し、原理的には、テスト画像がどの照明錐に含まれるかを求めることにより、実際には、テスト画像との距離が最小となる照明錐を求めることで、それらの物体の識別を行なうことができる。

## 3 凸物体に対する照明錐の構築

前節では重ね合わせの原理のみを仮定して照明錐の性質について述べたが、本節では、凸物体かつ拡散反射を仮定した Belhumeur らの議論 [2] をレビューする。まず、照明錐の構築に必要な表面形状を学習画像から推定する方法について述べる。次に、直接照射の状態分類に基づいた照明錐の構築手法について一般論を述べた後で、具体例を用いて説明する。

### 3.1 表面形状の推定

拡散反射の仮定より、無限遠の点光源(平行光線)に照らされた画像の  $i$  番目の画素の値  $x_i$  は、

$$x_i = \rho_i n_i^T s \equiv b_i^T s, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

で表される。ここで、 $\rho_i$ 、 $n_i$  は  $i$  番目の画素に対応する物体表面の拡散反射率と単位法線ベクトル、 $s$  は光源の向きを表す単位ベクトルにその強度を掛けたものである<sup>2</sup>。 $b_i^T$  を縦に並べた  $n \times 3$  の行列を  $B$  とすると、単光源に照らされた物体の画像は、

$$x = \max(Bs, 0) \quad (5)$$

で与えられる。 $b_i^T s < 0$  の成分は attached shadow と呼ばれ [6]、最大値をとる操作によりゼロに射影される。また、凸物体を仮定しているため、キャストシャドウは存在しない。

画像が attached shadow を含まないと仮定すると、任意の平行光線の下での画像集合は、

$$\mathcal{L} = \{x | x = Bs, \forall s \in \mathbb{R}^3\} \quad (6)$$

で表される。 $\mathcal{L}$  の次元は  $B$  のランクに等しく、物体形状が平面や円柱などの特殊な場合を除けば一般に3次元であり、これは照明部分空間と呼ばれる。

したがって、行列  $B$  は、最少で3枚の一次独立な方向から照らされた画像を用いて推定することができる。すなわち、各画像を  $x^{(j)}$  ( $j = 1 \dots c, c \geq 3$ ) としたとき、

$$X = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(c)}) \quad (7)$$

の特異値分解により、 $B$  を推定することができる<sup>3</sup>。しかし、

$$x = Bs = (BA)(A^{-1}s) = B^*s^* \quad (8)$$

<sup>2</sup> 光源の方向と照射強度に注目した議論を行なうため、ここでは、カメラの分光応答関数や光源のパワースペクトル等への依存性を無視する。

<sup>3</sup> 学習画像が鏡面反射成分や影を含む場合には、単純に特異値分解のみで求めた  $B$  は不安定になる。鏡面反射成分や影を考慮した推定法も提案されているが [4][8]、本報告の主題ではないため省略する。

より，光源の方向が未知の場合の  $B$  の推定には， $3 \times 3$  の正則な行列  $A$  の分だけ自由度が残る．この自由度の取り扱いについては 4.1 節で詳しく述べる．自明ではあるが，attached shadow が (8) 式の変換で不変であることに注意が必要である．

### 3.2 照明錐の構築

照明錐は，無限遠方に存在する光源を仮定した場合に，任意の複数光源下においてとり得るすべての画像の集合である．ところが，重ね合わせの原理から，単光源に照らされた場合にとり得るすべての画像を求めれば，それらの線形補間により，容易に照明錐を構築できることがわかる．

光源の方向は照明球 (illumination sphere) [2] と呼ばれる単位球上の点で表すことができる．ある画素に注目すると，照明球は (4) 式をゼロとするような光源方向 (大円) により 2 つに分割され，一方の半球に含まれる光源方向から照らされた場合は画素の値が正になり，他方の半球から照らされた場合は画素の値がゼロ，すなわち画素が attached shadow 内に存在することがわかる．同様にすべての画素について考えると，照明球は，複数の大円によりセルに分割されることがわかる．また，セルの数は，互いに等しくない法線ベクトルの数を  $m$  としたとき，帰納法によりたかだか  $\{m(m-1)+2\}$  個であることが示されている．

照明球上のあるセル  $S_i$  に注目すると，光源方向をそのセル内で移動しても各画素の値の符号は変化しない．したがって，セル  $S_i$  内で光源方向を任意に動かしたときにとり得るすべての画像の集合は， $\mathcal{L}$  と  $R^n$  空間のある象限との交わりになることがわかり，これを  $\mathcal{L}_i$  とする．

実際の画像は， $\mathcal{L}_i$  の負の成分をゼロに射影した，

$$P_i(\mathcal{L}_i) = \{\alpha \max(Bs, 0) : \forall \alpha \geq 0, \forall s \in S_i\} \quad (9)$$

となる．ここで  $P_i$  は射影演算子である．よって，凸物体かつ拡散反射を仮定した場合に，単光源の方向と照射強度を任意に変化させたときの画像の集合は，すべてのセルを考慮すると，

$$U = \cup_{i=0}^{m(m-1)+1} P_i(\mathcal{L}_i) \quad (10)$$

で与えられることがわかる．したがって，照明錐は (10) 式を複数光源に拡張した，

$$\mathcal{C} = \left\{ \sum_{i=1}^k x_i : x_i \in U, \forall k \in Z^+ \right\} \quad (11)$$

で表される．

(10), (11) 式より，学習画像から照明錐を構築するには， $P_i(\mathcal{L}_i)$  を構築できれば良いことがわかる．各  $P_i(\mathcal{L}_i)$  もまた凸錐であり，それはセル  $S_i$  の頂点方向から照らされた画像の凸結合で張られることに着目して，照明錐が有限個の仮想照明画像

$$e_{ij} = \max(B(b_i \times b_j), 0), \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

の凸結合で張られることが示されている [2]．これらの仮想照明画像は境界画像と呼ばれ，セルの頂点に対応した光源方向  $b_i \times b_j$  からの平行光線は境界光線 (extreme ray) と呼ばれている．

### 3.3 2次元の例

前述の構築手法を，例を用いて解説する．議論を簡単にするため，2次元空間で3つの面 (線分) からなる物体を考え，各面が画素  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) に対応するような画像  $x$  を考える．ここでの議論では，法線ベクトルの方向のみが重要で，そのノルムと拡散反射率は本質的ではないため，それらを考慮せずに， $b_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) を図1のように取る．

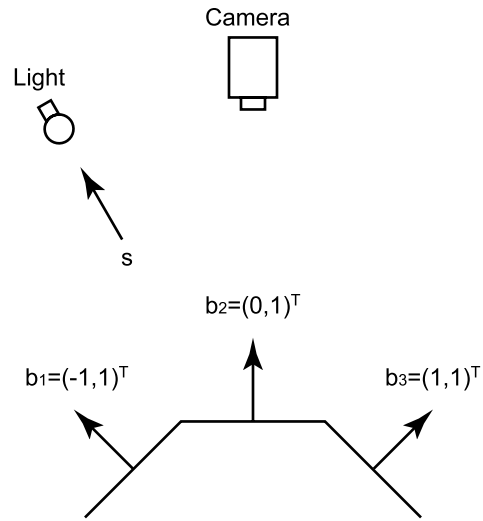


図 1: 2次元凸物体の例

このとき，

$$B = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

と表され，(6) 式より，照明部分空間は  $B$  の列ベクトルで張られる 2次元平面となる．図2に照明部分空間

の一部を示した．ここで影を付けた領域はすべての画素が正の値を取り，実際の画像になり得る．また，ここでは2次元空間を考えているので光源方向は単位円（照明円）上の点で表すことができ，それは物体の形状，すなわち各面の法線ベクトルを考えることにより，図3のように6つの円弧に分割される．ここでは，境界光線の方角をノルムを無視して与えている．図1より各円弧内の方向から照らされたときに， $x$ の各要素の符合が変化しないことがわかる．

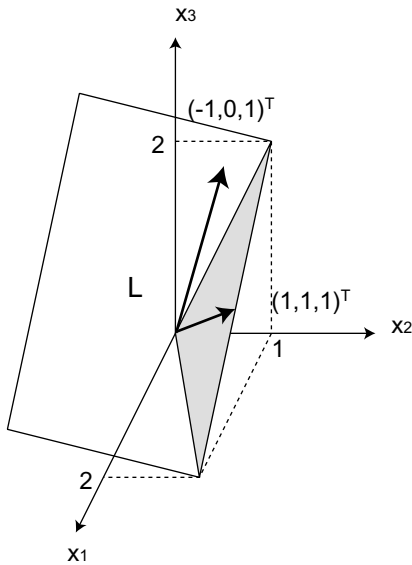


図 2: 照明部分空間

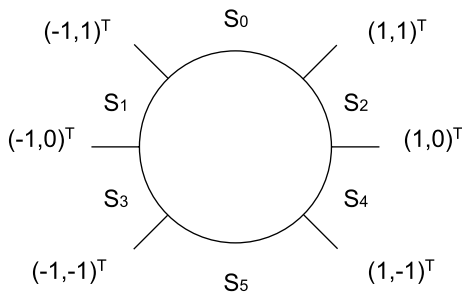


図 3: 照明円

図4に， $\mathcal{L}_i$ の負の成分をゼロに射影した  $P_i(\mathcal{L}_i)$ の一部を示した．これより，各  $P_i(\mathcal{L}_i)$ は凸錐となることを確かめることができ，それらが，図3における単位円を分割する方向に光源がある場合の境界画像の凸結合で表されることがわかる．したがって，単光源の方角と照射強度を任意に変化させたときの画像の集合は，

以下の境界画像

$$\begin{aligned} e_1 &= (1, 0, 0)^T \\ e_2 &= (2, 1, 0)^T \\ e_3 &= (0, 1, 2)^T \\ e_4 &= (0, 0, 1)^T \end{aligned} \quad (14)$$

を用いて表すことができる．

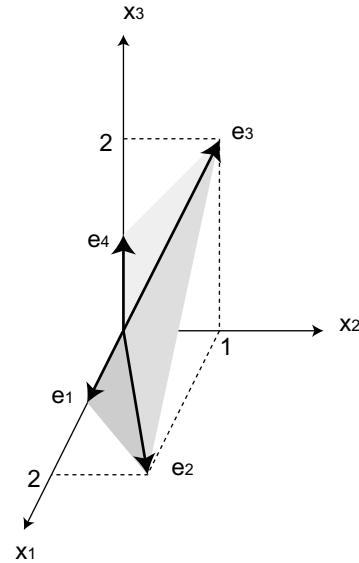


図 4: 照明錐を張る境界画像ベクトル

図4に示した各面上の点は，単光源に照らされた場合の画像ベクトルであるから，それらの線形補間により複数光源下の画像が得られる．したがって，照明錐は図4に示した各面に囲まれる領域であり，上述の4個の境界画像の凸結合

$$\mathcal{C}^{(2)} = \{x | x = \sum_{i=1}^4 \alpha_i e_i, \forall \alpha_i \geq 0\} \quad (15)$$

で表される凸多角錐になることがわかる．

## 4 非凸物体への拡張

前節では物体形状が凸であると仮定して議論したが，ここでは凸でない場合に議論を拡張する．形状が凸でない場合，一般に，キャストシャドウの取り扱いが問題となる．attached shadowが法線ベクトルの方向というローカルな情報から決まるのに対して，キャストシャドウは物体がそれ自身に落とす影であるために，物体形状というグローバルな情報なくして決定することは

できない．そこでまず，学習画像からの形状復元について述べたのち，Georghiades らの提案手法を紹介する．

#### 4.1 形状の復元

カメラの光軸を  $z$  軸とし，それに垂直な平面上に  $x$ ， $y$  軸をとり，物体表面 ( $z$  軸方向の高さ) を  $z(x, y)$  で表す．内向き単位法線ベクトルと拡散反射率の積  $b_i$  は，

$$b_i = \frac{\rho_i(z_x, z_y, -1)^T}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}} \quad (16)$$

と表される．実際の画像から求めた行列  $B^*$  には，(8) 式で表される自由度があるため，復元した  $z(x, y)$  が面を表すとは限らず， $z(x, y)$  が面を表すためには可積分条件

$$z_{xy} = z_{yx} \quad (17)$$

を満たさなくてはならない．(16) 式を用いて上式を書き下すと， $b^* = Ab$  から，

$$\begin{pmatrix} b_1^* \\ b_2^* \\ b_3^* \end{pmatrix}_y = \begin{pmatrix} b_1^* \\ b_2^* \\ b_3^* \end{pmatrix}_x \quad (18)$$

となる．ここで  $b_i^*$  は  $b^*$  の第  $i$  成分である．この条件は  $A$  の成分に関して 5 個の条件を与え， $A$  は正則であることから結局 3 個のパラメータを用いて

$$A = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & -\mu \\ 0 & \lambda & -\nu \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

と書ける．Generalized Bas-Relief 変換と呼ばれるこの変換は，物体の形状が

$$z^*(x, y) = \lambda z(x, y) + \mu x + \nu y \quad (20)$$

までしか復元できないことを表している [3]．

ここで，(19) 式の変換の下でキャストシャドウが不変であることが重要である．よって，物体形状が (20) 式までしか求められないにも関わらず，復元した形状に対して光線追跡法を用いて決定されるキャストシャドウは，実際のキャストシャドウと等しい．

#### 4.2 キャストシャドウの取り扱い

凸物体かつ拡散反射を仮定したときの照明錐は，各画素に対応する物体表面の直接照射の状態を変えるような方向に照明を置いたときの仮想照明画像，つまり，境界画像の凸結合で表されることを述べた．ここでは，

Georghiades らの提案した非凸物体の照明錐の構築手法について述べる．

物体が凸でない場合には，カメラの方向から大きく外れた位置の光源に照らされた画像にはキャストシャドウが生じる．キャストシャドウは物体形状というグローバルな情報から求まるため，照明錐を構築するうえで，この情報を反映させる必要がある．

彼らは，非凸物体の照明錐構築手法として，照明錐を張る境界画像の画素値を，キャストシャドウを考慮して修正する手法を提案している [5]．それは，凸物体を仮定した場合と同様に境界画像を求め，復元した形状に対して光線追跡法を用いてキャストシャドウにあたる画素を特定し，それらの画素の値をゼロに修正した境界画像の凸結合で照明錐を構築するものである．つまり，ローカルな情報のみから決まる境界画像に，グローバルな情報を加味した手法になっている．

### 5 反例と問題点

ここまでの議論を踏まえて，非凸物体の具体例に対して Georghiades らの提案手法を適用し，正確な照明錐を構築できない場合があることを示す．3.3 節の議論と同様に，2 次元空間で 3 つの面からなる物体を考え，各面が画素  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) に対応するものとする．但し，今回は非凸物体を考え，その法線ベクトルを図 5 のように取る．

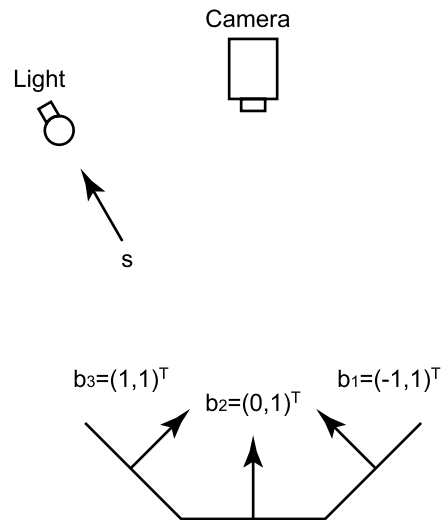


図 5: 2 次元非凸物体の例

まず，キャストシャドウを考慮せずに，法線ベクトルというローカルな情報のみから境界画像を計算する

必要があるが、各法線ベクトルが図1と同じであることに注目すると、(14)式と同じ境界画像が得られることがわかる。

次に、キャストシャドウを考慮して境界画像を修正する。図3、図5より、(14)式の4個の境界画像のうち、 $e_1$ と $e_4$ に対応する境界光線は、キャストシャドウを生じることがわかる。例えば、 $e_1$ に対応する境界光線は、図6のようなキャストシャドウを生じるために、キャストシャドウを考慮した境界画像はゼロベクトルになることがわかる。 $e_4$ に対応する境界光線についても同様であり、 $e_1 = e_4 = 0$ となる。したがって、単光源についてその方向と照射強度を任意に変化させたときの画像の集合は、図7のように $e_2$ と $e_3$ によって張られ、照明錐は

$$C_{\text{Georghiadés}}^{(2)} = \{x | x = \sum_{i=2}^3 \alpha_i e_i, \forall \alpha_i \geq 0\} \quad (21)$$

と表されることが予想される。

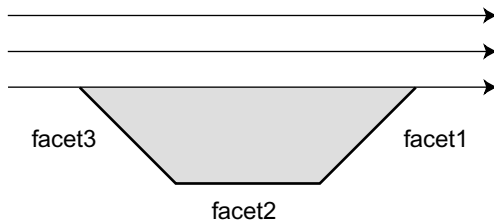


図6:  $e_1$ に対応する境界光線に照らされた非凸物体

ここで、図8の $S_1''$ に示す領域の方向に光源がある場合の画像を考える。このとき、図9より、面2、面3はキャストシャドウにあたるため $x_2 = x_3 = 0$ となる一方で、 $x_1 \neq 0$ となる。ところが、この画像は(21)式の照明錐に含まれていない。これは明らかに矛盾である。

このような矛盾が生じるのは、上述の方法で求めた境界画像が、法線ベクトルからローカルに求まる光源方向のみしか考慮していないためである。つまり、境界光線は、光源の直接照射の状態変化にしか対応していないためである。キャストシャドウを正しく取り扱うには、形状からグローバルに求まる遮蔽状態の変化に対応した光源方向からの仮想照明画像も必要である。

キャストシャドウを考慮した場合の正確な照明錐は、遮蔽状態の変化に対応する図8の $S_1'$ と $S_1''$ の境界、および $S_2'$ と $S_2''$ の境界方向から照らされた画像を境界画像に加えることで求まり、(15)式と等しくなる。

(15)式と(21)式を比較すると、Georghiadésらの提案手法では、遮蔽状態の変化に対応した光源方向を考

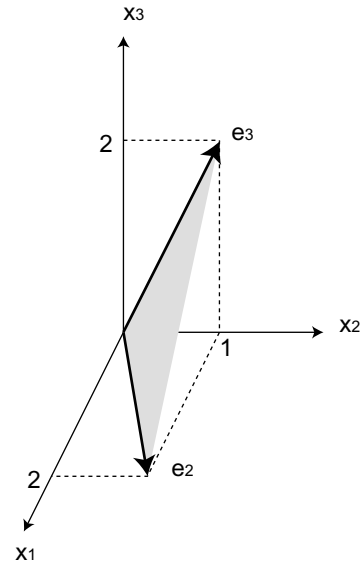


図7: Georghiadésらの提案手法により求めた照明錐を張る境界画像ベクトル

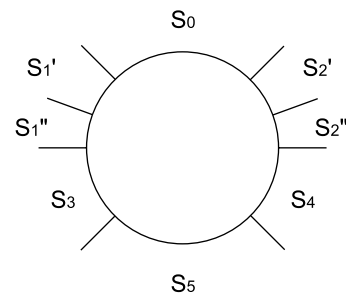


図8: 遮蔽状態の変化も考慮した照明円

えていないために、正確な照明錐の部分集合しか構築できていないことがわかる。これは、照明錐を張るベクトルとして、物体表面の直接照射の状態変化のみを考慮した仮想照明画像ベクトルだけでは不十分であり、遮蔽状態の変化を考慮した光源方向に照明を置いたときの仮想照明画像ベクトルも必要であることを意味している。

したがって、Georghiadésらの提案手法は、キャストシャドウ存在下で正しい照明錐を構築できないために、非凸物体の認識においてうまく働かない可能性がある。実際に、照明錐モデルを利用した顔画像の認識実験[5]において、キャストシャドウが支配的な画像で認識率の低下がみられており、その主な原因として、形状復元に伴う誤差だけでなく、本報告で指摘した照明錐構築手法の問題点が寄与している可能性がある。

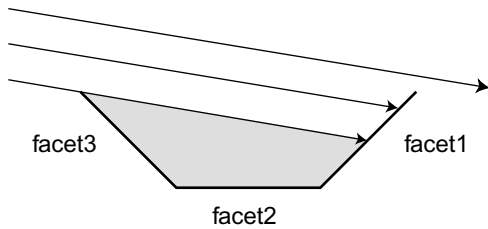


図 9:  $S'_1$  に含まれる方向から照らされた非凸物体

## 6 おわりに

照明のみが変化する場合の画像認識問題に対する有効な手法である照明錐モデルをレビューし、非凸物体の照明錐を構築する手法に原理的な問題があることを例を挙げて示し、キャストシャドウが支配的な画像に対して認識率が低下する可能性があることを示した。特に、非凸物体の照明錐を張るベクトルとして、直接照射の状態変化に対応した光源方向だけでなく、遮蔽状態の変化に対応した光源方向から照らした場合の仮想照明画像ベクトルも必要であることを指摘した。

本報告では、照明錐を構築する手法について原理的側面から議論した。しかし、一般に、境界画像の数は(12)式からわかるように画素数の二乗という莫大な数になるために、照明錐を近似的に構築せざるを得ない。Georghiadèsらは、認識を行なう際に、境界画像の一部のみを用いる方法と、照明球上で一様に選んだ少数の光源方向を境界光線として用いる方法を提案している[5]。前者は、遮蔽状態の変化に対応した光源方向を考えていないという点で、後者は選んだ光源方向が境界光線とは限らないという点で問題がある。最近、凸物体および拡散反射を仮定した場合に、球面調和関数を用いた Reflectance Map の解析から、低次元部分空間で照明錐を効率よく近似できることが報告されており[1]、非凸物体の照明錐についても効率の良い近似方法の検討が必要である。

また、照明錐モデルは反射モデルとして拡散反射を仮定しているために、仮定が成り立たないような物体に適用できないという問題もある。これに対して、見え方に基づく手法の立場で、反射モデルを仮定せずに重ね合わせの原理のみを仮定して、サポートベクターマシンを適用する手法が提案されているが、照明が学習画像撮影時と大きく異なる場合の認識には限界があることが報告されている[7]。したがって、キャストシャドウだけでなく、鏡面反射成分なども含めたより現実的な反射モデルに基づく照明錐構築手法についても検

討が必要がある。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費、創成的基礎研究「人間主体のマルチメディア環境形成のための情報媒介機構の研究」(09NP1401)および、特定領域研究(C)(2)「人間の意図・行動理解に基づく柔軟なヒューマン・マシン・インタラクションの実現」(13224051)の助成により行われた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] R. Basri and D. Jacobs, "Lambertian Reflectance and Linear Subspaces", In *Proc. IEEE ICCV*, pp.383-390, 2001.
- [2] P. N. Belhumeur and D. J. Kriegman, "What is the set of images of an object under all possible lighting conditions?", *Int. J. Computer Vision*, 28(3), pp.245-260, 1998.
- [3] P. N. Belhumeur, D. J. Kriegman, and A. L. Yuille, "The bas-relief ambiguity", *Proc. IEEE Conf. CVPR*, pp.1060-1066, 1997.
- [4] A. S. Georghiadès, P. N. Belhumeur, and D. J. Kriegman, "From few to many: illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose", *IEEE Trans. PAMI*, in press.
- [5] A. S. Georghiadès, D. J. Kriegman, and P. N. Belhumeur, "Illumination cones for recognition under variable lighting: faces", *Proc. IEEE Conf. CVPR*, pp.52-58, 1998.
- [6] A. Shashua, "Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition", PhD thesis, MIT, 1992.
- [7] 岡部孝弘, 佐藤洋一, "照明変化を伴う物体認識へのサポートベクターマシンの適用", 信学技報, PRMU 2002, Jan. 2002.
- [8] 向川康博, 宮木一, 三橋貞彦, 尺長健, "Photometric 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, Vol.41, pp.19-30, 2000.
- [9] 村瀬洋, "固有空間法による画像認識", 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, 14 章, pp.206-218, 1998.