奥行き情報と画像情報を併用する Cast Shadow 生成

岡 直人　　向川 康博　　尺長 健

岡山大学 工学部 情報工学科

〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
E-mail：{oka,mukaigaw,shaku}@chino.it.okayama-u.ac.jp

あらまし　本稿では，レンジファインダによって得られたシーンの奥行き情報と，光源位置を変えながら撮影した複数の画像を併用し，任意光源下における cast shadow を生成する方法について述べる．まず，各画像上で観測される cast shadow の位置を手がかりにして，レンジファインダだけでは得られないシーン全体の３次元形状を推定する．次に，得られた３次元形状を手がかりにして，各画像上で観測される cast shadow の輪郭を対応付け，モーフィングを行なう．これにより，任意に与えられた光源位置に対して，床の３次元形状を考慮した正確な位置に，間接光の影響を考慮した自然な cast shadow を生成することができる．提案手法を，実世界のシーンに適用し，任意光源位置からの cast shadow を生成する実験を行ない，有効性を確認した．

キーワード：コンピュータグラフィクス，モーフィング，影，照明シミュレーション

Cast Shadow Generation
from a Depth Map and Images of the Scene

Naoto OKA　　Yasuhiro MUKAIGAWA　　Takeshi SHAKUNAGA

Department of Information Technology, Okayama University

Tsushima-naka 3-1-1, Okayama, 700-8530, Japan
E-mail：{oka,mukaigaw,shaku}@chino.it.okayama-u.ac.jp

Abstract　This paper proposes a method for generating cast shadows in any lighting condition from a set of images of target scene along with its depth map. We assume that the images are taken from a fixed camera in several lighting conditions, and the depth map is taken from a range finder. A 3D shape model of the scene is roughly constructed from the depth map, and it is reformed by considering the cast shadows in the images. Using the reformed 3D shape, cast shadow contours are corresponded between different lighting conditions. Finally, a cast shadow can be generated in any lighting condition by the image morphing of the cast shadow contours. Experimental results show that shadows can be successfully generated even when the floor is not a flat plane.

Keywords：CG，morphing, shadow, lighting simulation

1　はじめに

コンピュータグラフィクス (CG) において, 自然な陰影の生成は主要なテーマの一つである. 近年, この技術を仮想物体だけでなく実世界のシーンへ適用する研究が幅広く行なわれており, 商品カタログや映画等の様々な分野への応用が期待されている. 実世界を対象とした CG では, 実画像と区別の付かない高品質な画像の生成が強く求められる.

光源位置の移動に伴って見え方が変化する陰影の一つに cast shadow がある. これは光が遮られることにより生じる影であり, 人間が対象物体の存在感や質感, 3 次元形状及び位置を知覚する上で非常に重要な役割を果たす.

従来から, 対象とするシーンの 3 次元形状をモデル化し, この形状情報を基に cast shadow を生成する手法が用いられている. この手法は, 任意に与えられた光源位置に対して幾何学的に正確な位置に cast shadow を生成することができる. しかし, 自然な cast shadow を生成するためには間接光の影響を考慮する必要があり, 実世界から反射特性や光源特性等もモデル化する必要がある.

一方, シーンの形状情報を利用せず, カメラで撮影した画像のみを用いて cast shadow を生成する研究も報告されている [1][2]. これらの手法は自然な cast shadow を生成できるという利点がある. しかし, 床の 3 次元形状を考慮していないため, 単一平面の床に限定されるという問題がある.

これらの問題に対して, 本研究ではシーンの形状情報と画像情報を併用することにより, 任意光源位置からの cast shadow を生成する手法を提案する. 形状情報にはレンジファインダで得られるシーンの奥行き情報を表す 2.5 次元距離データを利用する. また, 画像情報には光源位置の異なる複数枚の画像間のモーフィングを利用する. これらを併用することで, 床の 3 次元形状を考慮して幾何学的に正確な位置に自然な cast shadow を生成することを目指す.

2　cast shadow 生成の基本原理

2.1　cast shadow の性質

シーンに生じる影は図 1 に示すように attached shadow と cast shadow の二つに分類することができる [3]. attached shadow は光源方向と物体表面の法線方向のなす角が 90° 以上の領域に生じる影であるため, attached shadow が生じる領域は物体表面の法線方向に依存する. 一方, cast shadow は光源からの光が遮られる領域に生じる影であるため, cast shadow が生じる領域は光を遮る物体の 3 次元形状だけでなく床の 3 次元形状を含むシーン全体の 3 次元形状に依存する.

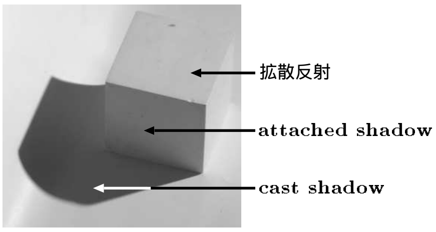


図 1: 反射と影

2.2　形状情報に基づく生成法

シーンの 3 次元形状を獲得する方法として, レンジファインダが利用できる. 対象物体と床の 3 次元形状を正確に獲得できれば, 幾何学的に正確な位置に cast shadow を生成することができる. しかし, レンジファインダから得られる形状は基本的にはカメラから見た 2.5 次元距離データのみであるため, カメラで撮影できないシーンの裏側の形状がわからないという問題がある. そのため, レンジファインダから得られる形状情報をそのまま用いたのでは, 任意光源位置の cast shadow を正確には表現できない. また, 自然な cast shadow を生成するためには実世界から反射特性や光源特性もモデル化する必要がある.

2.3　画像情報に基づく生成法

床表面は模様がなく反射率が一様と仮定すると, 光源位置の異なる複数枚の実画像を基にモーフィングを利用して, cast shadow の生成が行なえる. 二つの入力画像中の cast shadow の対応関係を求めることができれば, その対応関係を基に線形補間を行なうことで, 入力画像にはない光源位置における cast shadow の生成を行なえる. この方法では, 入力画像中の cast shadow のテクスチャを利用するため, 反射特性等を陽にモデル化することなく比較的自然な cast shadow を生成できる. しかし, シーンの 3 次元形状を考慮していないため, 幾何学的に正確な位置に cast shadow の生成が行なえないという

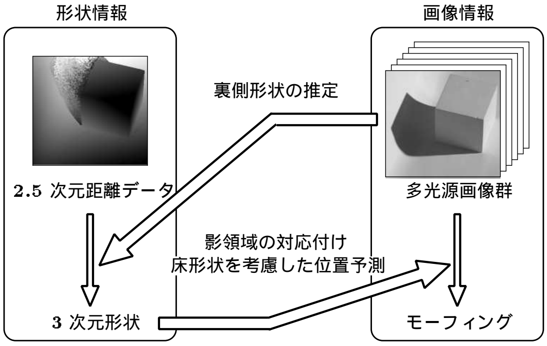


図 2: 形状情報と画像情報の併用

問題がある．また，cast shadow は床の 3 次元形状の影響を受けるため，cast shadow どうしの対応付けは容易でない．

2.4 形状情報と画像情報の併用

本研究では，反射率は一様であるが単一平面では表せない床を持つシーンを対象とし，形状情報と画像情報に基づく cast shadow 生成法の双方を併用した cast shadow の生成法を提案する．形状情報には，レンジファインダにより得られる距離データを利用する．一方，画像情報には，光源位置が既知である複数枚の実画像 (以下，多光源画像群と呼ぶ) 間のモーフィングを利用する．まず，図 2 に示すように多光源画像群を手がかりに距離データで得られないシーンの裏側の形状推定を行なう．これにより，シーンの 3 次元形状を大まかに獲得することが可能となる．次に，シーンの 3 次元形状を手がかりに入力画像中の cast shadow の輪郭どうしの対応付けと，任意光源位置における cast shadow の位置を予測する．これにより，床の 3 次元形状の影響を考慮して cast shadow を生成することが可能となる．最後に予測位置へモーフィングを行なうことにより，多光源画像群から得られる cast shadow のテクスチャを補間する．このように，形状情報と画像情報の双方を併用することで，幾何学的に正確な位置に自然な cast shadow の生成が行なえる．

3 画像情報による形状情報の修正

3.1 距離データの獲得

本研究では，シーンの形状を獲得するために図 3 に示すような参照光を用いたレンジファインダ [4] を使用する．カメラは多光源画像群を撮影するものと同一であり，プロジェクタからスリット状のパターンを投影し，三角測量の原理によってカメラから見た奥行きを推定する．ここで，シーンのワールド座標に対するカメラとプロジェクタの位置は予めキャリブレーションされているものとする．また，シーン全体の形状だけではなく対象物体を取り除いた床の形状も獲得しておく．これにより，画像中での対象物体の領域を容易に抽出できる．

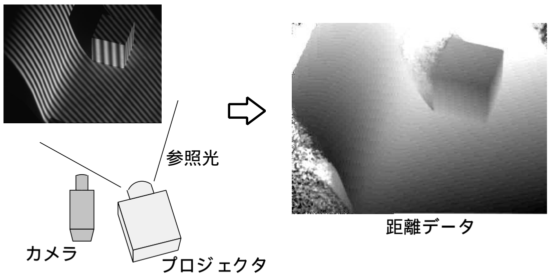


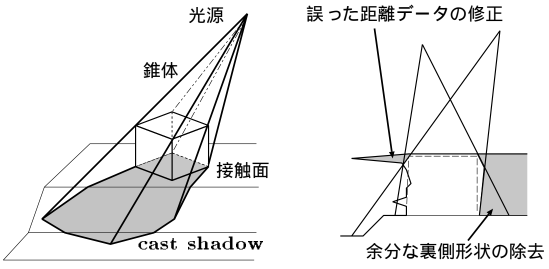
図 3: レンジファインダによる距離データの獲得

3.2 画像情報を用いた裏側形状の推定

cast shadow を正しく表現するためには，2.5 次元距離データではなくシーンの 3 次元形状が必要である．そこで，本研究では多光源画像群を利用する．

cast shadow は光源からの光が対象物体に遮られることにより生じる．対象物体と床の接触面にも cast shadow が生じているものと考えると，図 4(a) に示すように，cast shadow を底面，光源位置を頂点とした錐体の内部に対象物体が必ず存在する．この錐体を利用すれば，図 4(b) に示すように，カメラから見えないシーンの裏側形状の推定をすると同時に，錐体の外部に存在する誤った距離データの修正も行なうことができる．

錐体の形状を算出するために，本研究では実測により光源位置を与え，向川ら [5] の提案する画像の線形化を利用して画像中から cast shadow を抽出する．画像の線形化を利用することで，任意光源位置における拡散反射成分と attached shadow 成分のみの画像を生成できる．この生成された画像と実画像を比較することで cast shadow 成分のみを抽出できる．なお，画像中で対象物体に隠された床にも cast shadow が存在する可能性があり，対象物体と床の接触面は対象物体に隠された床の領域に含まれる．従って，この床の領域を錐体の底面と見なすことで，本来は対象物体が存在する領域を誤って除去



(a) 対象物体の存在範囲　(b) 横から見た距離データ

図 4: 対象物体を含む錐体による 3 次元形状の推定

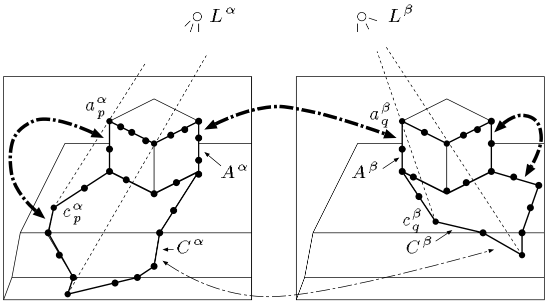


図 5: attached shadow 境界を介した cast shadow 輪郭の対応付け

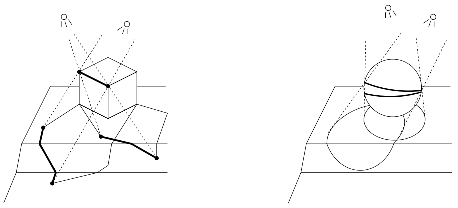
する危険性がなくなる．なお，対象物体に隠されている床の領域は対象物体領域と一致するため，シーン全体の距離データと対象物体を取り除いた床の距離データの差分により抽出できる．

4　形状情報による cast shadow の対応付けと位置予測

4.1　cast shadow 輪郭と attached shadow 境界

cast shadow の輪郭は，輪郭上の点と光源を結ぶ直線が物体表面と接することにより生じる．この接点は物体表面に生じる拡散反射と attached shadow の境界上の点に相当する．従って，cast shadow の輪郭とこの境界には対応関係がある．

本稿では，cast shadow の輪郭 C 上をサンプリングした 3 次元点列 $c_1, c_2, \ldots, c_m$ を単に輪郭点と呼ぶ．また，cast shadow 輪郭 C に対応する attached shadow 境界 A 上の 3 次元点列 $a_1, a_2, \ldots, a_m$ を単に境界点と呼ぶ．



(a) エッジがある場合　(b) エッジがない場合

図 6: attached shadow 境界の 3 次元位置

4.2　cast shadow 輪郭の対応付け

4.2.1　attached shadow 境界に基づく対応付け

cast shadow のモーフィングを行なうためには，予め輪郭点どうしを対応付けておく必要がある．異なる二つの光源位置 L^{α}, L^{β} に対する cast shadow 輪郭 C^{α}, C^{β} を対応付けようとする場合，これらの輪郭形状は床の 3 次元形状の影響を強く受け，床の形状によっては見え方が大きく異なるため，対応付けが安定に行なえない．そこで，本研究では輪郭点と境界点に対応関係があることを利用し，図 5 に示すように境界 A^{α}, A^{β} を対応付けることで，間接的に輪郭 C^{α}, C^{β} を対応付ける方法を提案する．

境界 A^{α}, A^{β} は対象物体上に存在するため，床の 3 次元形状の影響を受けないという利点がある．また，図 6(a) に示すように，物体上に明確なエッジがあれば，境界は 3 次元空間中で一致することが多い．球のような明確なエッジのない物体においても，図 6(b) に示すように，二つの光源位置がある程度近距離にあれば，境界は 3 次元空間中で近い位置にある．このように，cast shadow 輪郭どうしの対応付けに比べて，attached shadow 境界どうしの対応付けは比較的安定に行なうことができると考えられる．

4.2.2　attached shadow 境界の抽出

境界どうしを対応付けるためには，画像から輪郭点を抽出し，各輪郭点に対応する境界点を求める必要がある．輪郭点は，画像の線形化を利用して抽出された cast shadow 領域の外周を適当な間隔でサンプリングすることで得られる．また，輪郭点に対応する境界点の抽出には，3 章で述べた方法で推定したシーンの 3 次元形状を用いる．

光源位置 L における輪郭 C 上の輪郭点を c_p とする．輪郭点 c_p と光源位置 L を結ぶ直線を輪郭点側から追跡し，シーンの 3 次元形状と交差する点を探索する．探索の結果，交点が見つかれば，その交点

を輪郭点 c_p に対応する境界点 a_p とする．複数の交点が存在する場合は，輪郭点 c_p との距離が近い点を境界点 a_p とする．また，シーンの 3 次元形状の誤差の影響により交点が見つからない場合は，輪郭点 c_p と光源位置を結ぶ直線に最も近距離にある点を境界点 a_p とする．以上の方法により，全ての輪郭点に対応する境界点を求める．

4.2.3 動的計画法による対応付け

光源位置 L^α, L^β に対応する境界点 a^α, a^β どうしを対応付けるためには，境界の 3 次元空間中での形状を考慮して各点の対応関係を求める必要がある．ただし，境界点は離散的な 3 次元点列であり，境界点の全点が一対一に対応付くとは限らない．そのため，境界点を端点とする区間の相違度に基づいて対応付けを行なう．区間の特徴として，3 次元位置・長さ・向きを考慮すると，二つの境界 A^α, A^β 上の境界点 $a_i^\alpha \sim a_j^\alpha$, $a_k^\beta \sim a_l^\beta$ の区間の相違度は式 (1)～(4) のように定義することができる．

$$D_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)} = w_1 p_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)} + w_2 l_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)} + w_3 d_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)} \quad (1)$$

$$p_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)} = \left\| \frac{a_i^\alpha + a_j^\alpha}{2} - \frac{a_k^\beta + a_l^\beta}{2} \right\| \quad (2)$$

$$l_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)} = \left| \|a_i^\alpha - a_j^\alpha\| - \|a_k^\beta - a_l^\beta\| \right| \quad (3)$$

$$d_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)} = \cos^{-1} \frac{(a_i^\alpha - a_j^\alpha) \cdot (a_k^\beta - a_l^\beta)}{\|a_i^\alpha - a_j^\alpha\| \, \|a_k^\beta - a_l^\beta\|} \quad (4)$$

ただし，$p_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}, l_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}, d_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}$ は，図 7 に示すように，それぞれ区間 $a_i^\alpha \sim a_j^\alpha$, $a_k^\beta \sim a_l^\beta$ を線分として見た場合の 3 次元位置・長さ・向きの相違度を表しており，w_1, w_2, w_3 は重み係数である．この相違度 $D_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}$ の値が小さいほど，二つの線分 $a_i^\alpha a_j^\alpha$, $a_k^\beta a_l^\beta$ は類似性を持つ．従って，境界 A^α, A^β の対応付けは境界の全周について式 (1) の総和 $\sum D_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}$ を最小にするコスト最小化問題に帰着することができる．本研究では，これを動的計画法を用いて解くことで，効率良く対応点を求める．

4.2.4 光源方向の曖昧性の除去

シーンの 3 次元形状を利用することで輪郭点に対応する境界点を求めることができるが，シーンの 3 次元形状の誤差のため，実際には境界点を一意に決定することは容易でない．この曖昧性の問題は，特に図 8(a) に示すように，球などの曲面から境界点を抽出する場合に生じるため，相違度の算出に悪影響を及ぼす．しかし，境界点は光源と輪郭点を結ぶ直線に存在するため，誤差は光源方向のみに生じる．このことを利用して，光源方向の成分だけを無視するように区間の相違度を再定義する．

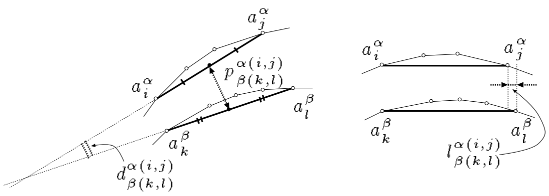
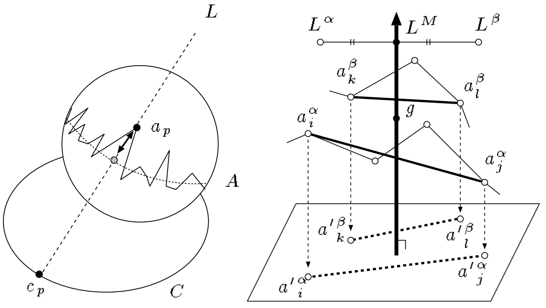


図 7: 区間の相違度



(a) 光源方向の曖昧性　(b) 平面への投影

図 8: 光源方向のみに生じる曖昧性の除去

光源位置 L^α, L^β に対応する境界点の線分 $a_i^\alpha a_j^\alpha$, $a_k^\beta a_l^\beta$ の相違度を算出する場合を考える．光源位置 L^α, L^β の中点を $L^M = (L^\alpha + L^\beta)/2$ とし，境界点 a_i^α, a_j^α, a_k^β, a_l^β の重心を g とする時，図 8(b) に示すように，ベクトル $L^M - g$ を法線とする平面を定義する．この平面に境界点 a_i^α, a_j^α, a_k^β, a_l^β を正射影し，平面に投影された境界点をそれぞれ a'^α_i, a'^α_j, a'^β_k, a'^β_l とし，境界点の代わりにこれらの投影点を式 (2)〜(4) に適用することで，光源方向のみに生じる誤差の影響を受けずに安定に境界 A^α, A^β の対応付けを行なえる．境界点 a と輪郭点 c はすでに対応付いているため，輪郭 C^α, C^β の対応付けを行なうことができる．

4.3 cast shadow の位置予測

任意に与えられた光源位置において幾何学的に正確な位置に cast shadow を生成するためには，床の 3 次元形状を考慮して輪郭の位置を予測する必要がある．そこで，境界間の対応関係を利用する．

まず，図 9 に示すように，入力画像に含まれる光源位置 L^α, L^β と生成したい画像に対する光源位置

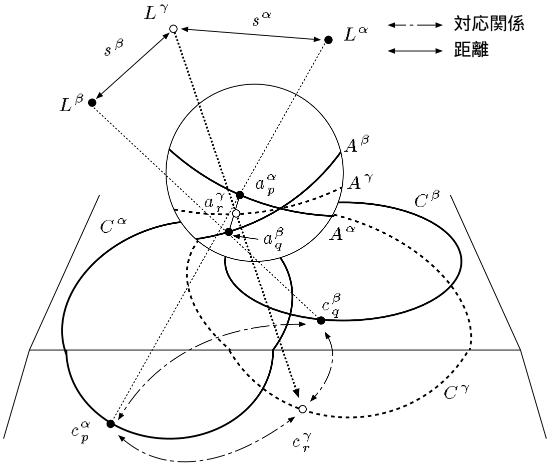


図 9: 輪郭の位置予測

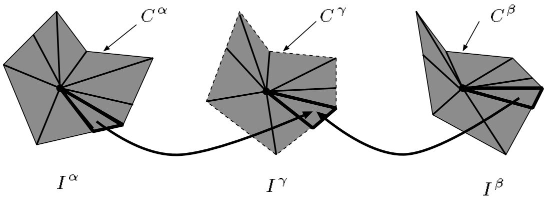


図 10: モーフィングによる cast shadow の生成

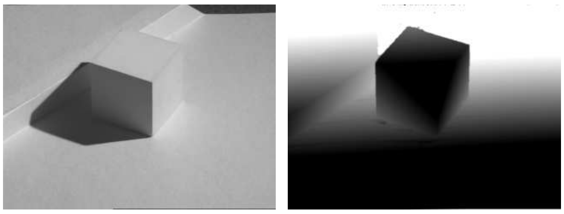
L^γ の各距離 s^α, s^β に応じて境界 A^α, A^β の対応点 a_p^α, a_q^β を線形内挿することで, 光源 L^γ の境界 A^γ 上の対応点 a_r^γ を算出する. 次に, 生成光源 L^γ から境界点 a_r^γ を床へ投影することにより, 輪郭点 c_r^γ の位置を予測する. 輪郭点と境界点の対応関係から, c_p^α, c_q^β と対応する c_r^γ の対応関係も求めることができる. これにより, 床の 3 次元形状を考慮して生成画像中で cast shadow の生じる場所を予測できる.

4.4 cast shadow のモーフィング

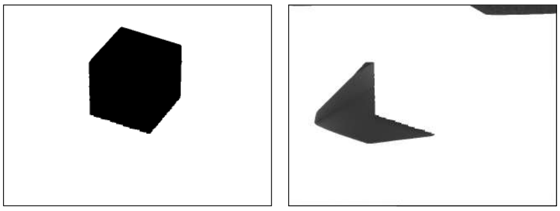
本節では, 対応関係を基に画像間の cast shadow のモーフィングを行なう方法を述べる. 図 10 に示すように, 入力画像 I^α, I^β 中の輪郭 C^α, C^β は閉じた単一領域で, cast shadow の内部には孔が存在しないと仮定し, 輪郭 C^α, C^β を多角形近似する. その際, 各頂点は輪郭点 c^α, c^β のうち対応付いているもののみを用いる. この多角形の重心を求め, 隣合う 2 頂点と重心とで構成される三角形に分割する. そして, この 2 枚の画像 I^α, I^β から得られる各三角形ごとのテクスチャを入力光源位置と生成光源位置の距離 s^α, s^β に応じて線形内挿する. このようにすることで, 自然な cast shadow の生成が行なえる.

表 1: 多光源画像群の仕様

対象物体	石膏の立方体, 球
床の形状	段差あり, 反射率一定
光源	ハロゲンランプ 物体を中心として 20 ° 刻みで 18 方向
画像	640×480pixel, 8bit 濃淡, 18 枚



(a) 多光源画像群　(b) 距離データ



(c) 対象物体領域　(d) cast shadow 成分

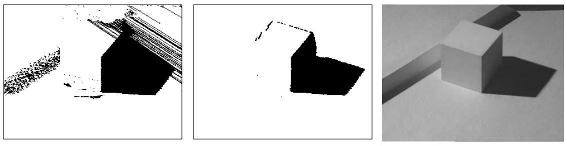
図 11: 入力として用いた画像

5 実験

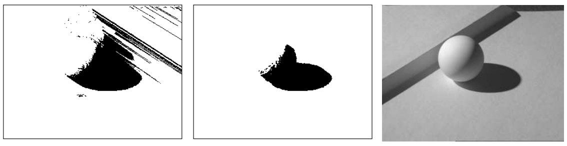
提案手法によって任意光源位置における cast shadow を生成する実験を行なった. 表 1 に示すように, 光源位置を変えながら撮影した 18 枚の画像と, レンジファインダによって獲得した距離データを入力として用いた. 入力として用いた画像の一部を図 11 に示す. 図中の (a) は多光源画像群の一部であり, (b) は距離データ, (c) は背景との差分により抽出された対象物体領域, (d) は多光源画像群から抽出された cast shadow 成分である.

まず, シーンの 3 次元形状から生成した cast shadow の結果を図 12 に示す. 図中の左端はレンジファインダによって得られた 2.5 次元距離データを用いて生成した結果であり, 中央は推定したシーンの 3 次元形状を用いて生成した結果, 右端は正解画像である. この結果から, 形状の誤差が減少し, 物体の裏側の 3 次元形状も推定できていることが確認できる. しかし, 間接光の影響を考慮していないため, 不自然な画像となっている.

次に, 本論文で提案する形状情報と画像情報を併用した手法により, cast shadow を生成する実験を行なった. まず, cast shadow 輪郭により抽出され



(a) 立方体



(b) 球

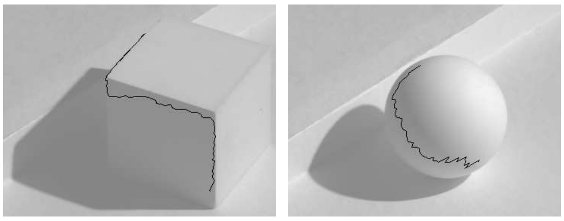
図 12: 形状情報による cast shadow 生成

た attached shadow 境界の一例を図 13 に示す．抽出された境界がやや不安定になっているが，これは光源位置を実測する際の誤差やシーンの 3 次元形状の誤差のためと考えられる．しかし，この誤差は主に光源方向のみに生じているため，4.2.4 節で述べたように対応付けへの悪影響は少ないと考えられる．

次に，4 章で述べた方法により，2 枚の入力画像中の輪郭どうしを対応付けた例を図 14 に示す．図中の左側は対応付けに用いた入力画像を表し，右側はその対応付けの結果を表す．この結果から，立方体では頂点どうしがほぼ正しく対応付いていることが確認できる．一方，球においても，二つの輪郭の角度は大きく異なるが，境界どうしでは近い位置にあるため，安定に対応付けることができる．

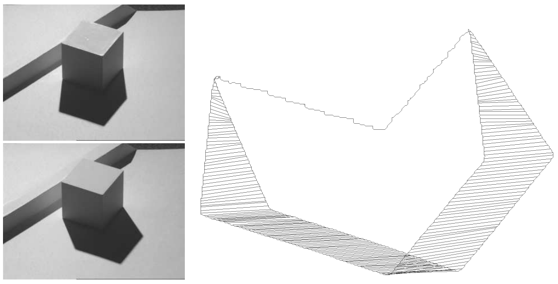
また，対応関係を基に位置予測した結果を図 15 に示す．図中の (a) は床形状を考慮せずに単に線形補間を行なった結果であり，(b) は本手法により位置予測した時の輪郭の変化を表したものである．attached shadow 境界を探索する際の誤差のため，輪郭形状が滑らかとなっていないが，床形状を考慮して位置を予測できていることが確認できる．

最後に，入力画像に含まれない光源位置に対する cast shadow を生成した結果を図 16, 17 に示す．図中の (a) はモーフィングにより生成した cast shadow 領域であり，(b) は従来法 [5] と組み合わせることで拡散反射も付加した結果である．また，(c) は入力画像とは別に用意した正解画像である．この結果から，床の 3 次元形状を考慮して，段差のあるところで正しく cast shadow が曲がっていることが確認できる．また，入力画像中のテクスチャを利用しているため，ある程度違和感のない自然な cast shadow の生成を行なえているのが確認できる．本手法では，画像情報を利用してシーンの 3 次元形状の獲得と画像間のモーフィングを行なっているため，入力画像枚数を増加すれば，更に自然な画像を生成することも可能である．

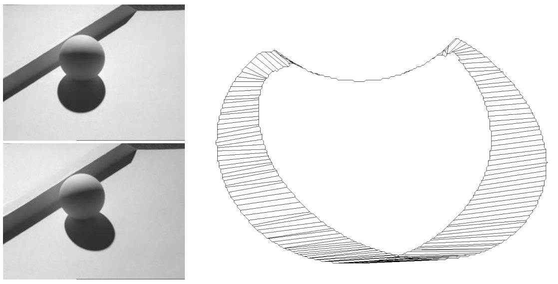


(a) 立方体　(b) 球

図 13: 抽出した attached shadow 境界



(a) 立方体



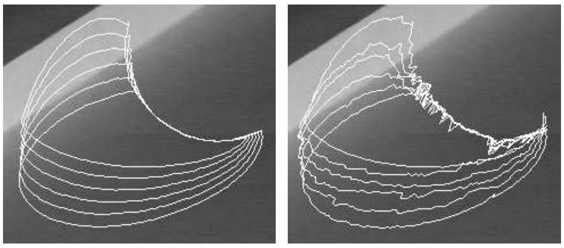
(b) 球

図 14: 輪郭の対応付け結果 (左:入力画像，右:対応関係)

6　終わりに

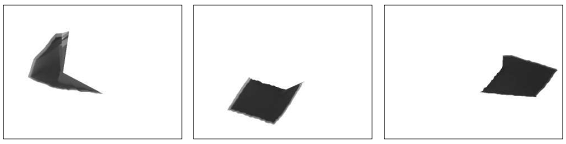
本稿では，形状情報と画像情報を併用することで，任意光源位置からの cast shadow を生成する手法を論じた．形状情報あるいは画像情報のどちらか片方のみを用いて生成される cast shadow の問題点を明らかにし，双方を併用することで幾何学的に正確な位置に自然な cast shadow を生成する手法を提案した．

実画像を用いた実験により，床の 3 次元形状の影響を考慮して幾何学的にほぼ正確な位置へ cast

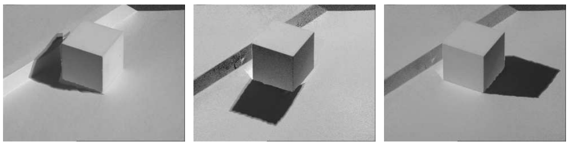


(a) 画像間の線形補間　(b) 本手法による位置予測

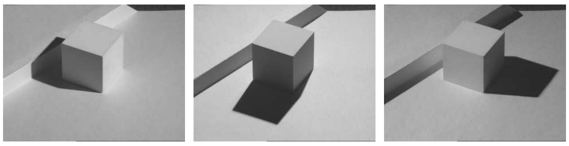
図 15: cast shadow 輪郭の位置予測



(a) cast shadow 領域

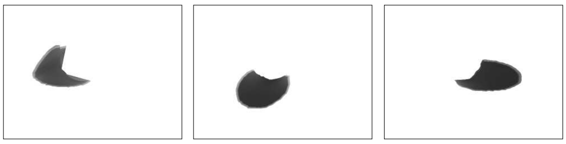


(b) 生成した cast shadow 領域に拡散反射を付加した結果

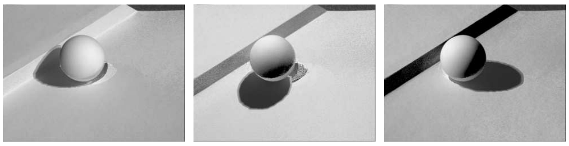


(c) 正解画像

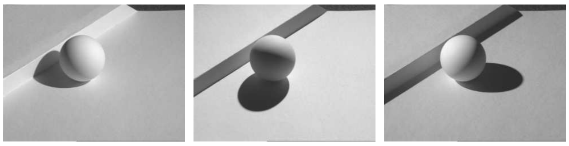
図 16: 提案手法による cast shadow 生成 (立方体)



(a) cast shadow 領域



(b) 生成した cast shadow 領域に拡散反射を付加した結果



(c) 正解画像

図 17: 提案手法による cast shadow の生成 (球)

shadow を生成できることを確認した. また, cast shadow 輪郭の形状に若干不自然さは感じるものの, 全体的に見て, 違和感のない自然な cast shadow の生成を行なえることを確認した. 今後の課題として, より複雑なシーンでの検証が挙げられる.

参考文献

[1] A.Katayama, Y.Sakagawa and H.Tamura : “A Method of Shading and Shadowing in Image-Based Rendering”, ICIP’99, vol.3, pp.26-30, 1999.

[2] 寺薗浩平, 眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士 : “IBR における影の表現”, MIRU2000, vol.1, pp.101-106, 2000.

[3] A. Shashua : “Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition”, Ph. D thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT, 1992.

[4] 井口征士, 佐藤宏介 : “三次元画像計測”, 昭晃堂, 1990.

[5] 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, no.SIG10(CVIM1), pp.19-30, 2000.