

形状情報と画像情報の併用による Cast Shadow のモーフィング

向川 康博[†] 岡 直人[†] 尺 長 健[†]

本稿では、レンジファインダによって得られたシーンの形状情報と、光源位置を変えながら撮影した複数の画像を併用することで、任意光源下における cast shadow をモーフィングによって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い、有効性を確認した。

Cast Shadow Morphing from a Shape and Images of the Scene

YASUHIRO MUKAIGAWA,[†] NAOTO OKA[†] and TAKESHI SHAKUNAGA[†]

This paper proposes a method for generating cast shadows in any lighting condition by a morphing technique. For this purpose, a set of images of target scene and its depth map are used. 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.

1. はじめに

自然な陰影を持つ画像の生成は、コンピュータグラフィクスにおける主要なテーマの 1 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われており¹⁾、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。実世界を対象とする場合、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。光源位置の移動にともなって見え方が変化する陰影の 1 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 次元形状および位置を知覚するうえ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^{2),3)}。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。

[†] 岡山大学工学部情報工学科

Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University

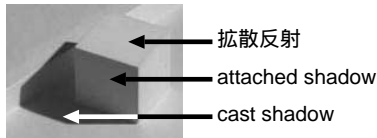


図1 反射と影

Fig.1 Reflections and shadows.

2. cast shadow 生成の基本原則

2.1 問題設定

本稿では、図1に示すように、単一平面でない床の上に対象物体が1つ置かれている状態を考え、床と対象物体をあわせてシーンと呼ぶ。シーンに生じる影は、attached shadow と cast shadow の2つに分類することができる⁴⁾。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り、物体表面の法線方向のみに依存する。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、光を遮る対象物体の3次元形状だけでなく、床も含むシーン全体の3次元形状に依存する。

本研究では、以下の条件のもとで、任意光源位置の cast shadow を生成することを目的とする。

- カメラとシーンは固定とし、光源位置のみが異なる複数の画像を利用できる。
- 単一平面では表せない床の上に対象物体が1つ置かれている。
- 床面にはテクスチャがなく反射率は一定とする。
- 床面に生じる cast shadow は、穴のない単一の領域とする。

対象物体の形状が単純であっても、床が単一の平面でなければ、光源位置によって cast shadow の輪郭形状は多様に変化する。そのため、本稿では、比較的単純なシーンを想定し、光源位置を変化させたときの cast shadow 輪郭形状、および濃淡値を、いかに自然に見えるように生成するかという点に主眼を置き、その原理的な有効性を検証する。より複雑なシーンへの応用は、今後の検討課題とする。

2.2 形状情報に基づく生成法

シーンの形状を獲得する方法として、レンジファインダ⁵⁾が広く利用されている。対象物体と床の3次元形状を正確に獲得できれば、cast shadow の生じる位置を正確に予測することができる。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、対象物体に遮られてカメラで撮影できない領域の形状が分からないという問題がある。そのため、レンジファインダ

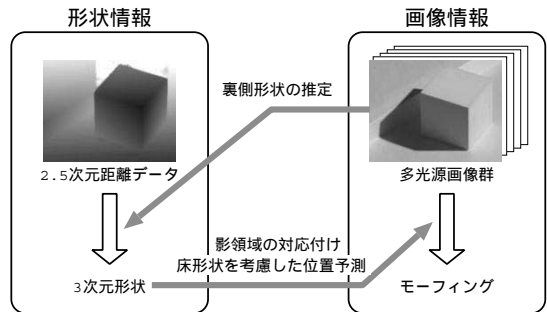


図2 形状情報と画像情報の併用

Fig.2 Combination of a shape and images of the scene.

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樣であれば、対象物体が床表面上に落とす cast shadow は、光源位置が異なる複数枚の実画像の内挿によって生成できる。つまり、2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輪郭形状と内部の画素値を線形補間することで、入力画像にはない光源位置における cast shadow を生成できる。この方法では、入力画像中の cast shadow の濃淡値を利用できるため、反射特性等を陽にモデル化することなく比較的自然的 cast shadow を生成できる。しかし、床の3次元形状を考慮しないと、幾何学的に正確な位置に cast shadow を生成できないという問題がある^{2),3)}。また、cast shadow は床の3次元形状の影響を受けるため、cast shadow どうしの対応付けも問題となる。

2.4 形状情報と画像情報の併用

本研究では、形状情報と画像情報を併用し、双方の長所をあわせ持つ cast shadow 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)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対象物体の裏側の形状推定を行う。これにより、シーン全体の大まかな3次元形状を獲得できる。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 を生成できる。最後に予測位置へモー

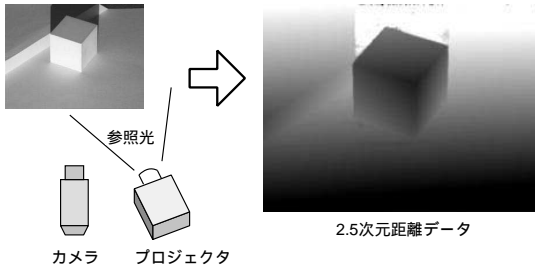


図3 レンジファインダによる距離データの獲得

Fig. 3 Measurement of 2.5D range data by a range finder.

フィングを行うことにより、多光源画像群から得られる cast shadow 内部の濃淡値を補間する。これら一連の処理により、幾何学的に正確な位置に自然な cast shadow を生成できる。

形状情報と画像情報を併用する本手法の特徴として、cast shadow が生じる過程を考慮して、画像間で cast shadow 輪郭を対応付けていることがあげられる。つまり、単に床面上の輪郭形状の類似性のみを手がかりに対応付けを行っても、正しく対応付く保証はなく曖昧性が生じる、しかし、光源位置とシーンの3次元形状を考慮し、cast shadow が生じる物理的な過程を考慮することで、曖昧性は大幅に減少する。たとえば、同一のルーフエッジから生じる cast shadow 輪郭であれば、原理的には曖昧性を残すことなく1対1に対応付けることも可能である。

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⁵⁾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あらかじ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。

3.2 画像情報を用いた3次元形状の推定

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。しかし、cast shadow を正しく表現するためには、3次元形状が必要となる。そこで、本研究では多光源画像群を利用してシーンの3次元形状の精度を高める。

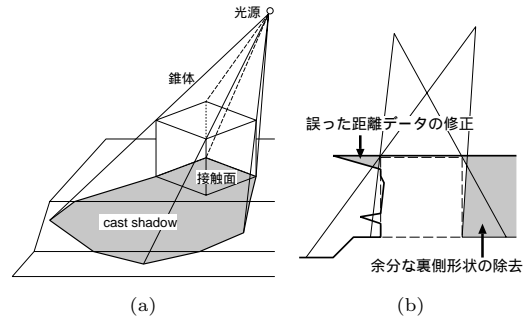


図4 対象物体を含む錐体による3次元形状の推定：(a) 対象物体の存在範囲、(b) 横から見た距離データ

Fig. 4 3D shape estimation based on a cone including the object: (a) a cone in which the object exists, (b) side view of the range data.

画像中の cast shadow 位置を手がかりにシーンの3次元形状を推定する手法として、Shape from Shadow と呼ばれる方法が古くから研究されている^{6),7)}。これは、光源からの光が対象物体に遮られることにより cast shadow が生じることを利用し、対象物体の存在範囲を限定する手法である。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、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。すなわち、光源位置の異なる多数の画像が利用できる場合、各画像ごとに推定される錐体の論理積によって、対象物体の大まかな形状を推定することができる。

本研究では、図4(b)に示すように、レンジファインダによって獲得した形状を基本とし、各画像から推定される錐体の外部にある領域を順に削っていくことで、シーンの3次元形状の精度を高める。これにより、カメラから見えない対象物体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うことができる。錐体の形状は、頂点位置と底面で定義できる。頂点位置は光源位置に相当し、本研究では実測により与える。錐体の底面は、cast shadow の生じている床面と、対象物体と床の接触面のみを錐体の底面とすべきである。しかし、画像中で対象物体に遮られた床面にも cast shadow が存在する可能性があり、この領域も錐体の底面として扱わなければ、対象物体が存在する領域を誤って除去する危険性が生じる。すなわち、以下にあげる3領域を底面と見なす。

- (a) cast shadow が生じている床面
- (b) 対象物体と床の接触面
- (c) 画像中で対象物体に遮られた床面

このうち、(a)は単純な閾値処理で安定に抽出することが容易ではないため、向川ら¹⁾の提案する画像の線

形化を利用する．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 領域を推定できる．一方，(b) と (c) に相当する領域は，画像中で対象物体が存在する領域と一致する．対象物体の領域は，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容易に抽出できる．

一般に，Shape from Shadow によって対象物体の形状を復元するためには，多くの画像を必要とする．しかし，本研究ではレンジファインダと組み合わせて用いることで，比較的少ない画像枚数でも，精度の高い 3 次元形状が得られるという利点がある．

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 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 境界上の点に相当する．したがって，cast shadow 輪郭とこの境界には対応関係がある．本稿では，cast shadow 輪郭 C 上をサンプリングした 3 次元点列 c_1, c_2, \dots, 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, \dots, a_m を単に境界点と呼ぶ．

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うためには，あらかじめ輪郭点どうしを対応付けておく必要がある．異なる 2 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，安定に対応付けができない．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，2 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

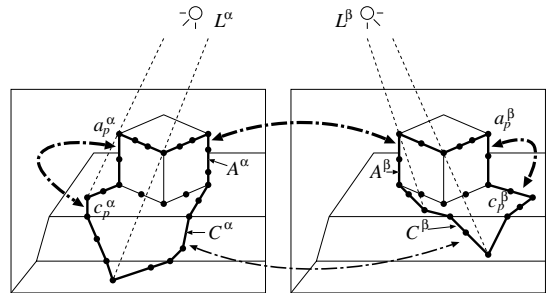


図 5 attached shadow 境界を介した cast shadow 輪郭の対応付け

Fig. 5 Detection of the corresponding cast shadow boundary based on the attached shadow boundary.

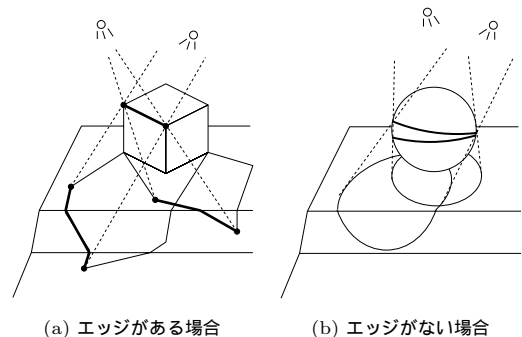


図 6 attached shadow 境界の 3 次元位置

Fig. 6 3D location of the attached shadow boundary.

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，交点が見つければ，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 との距離に近い点を境界点 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，すべての輪郭点に対応する

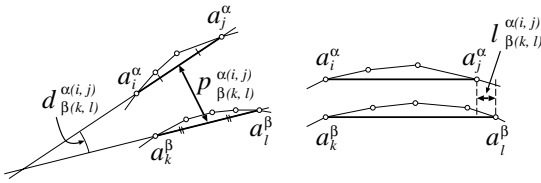


図7 区間の相違度
Fig. 7 Difference between segments.

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1対1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う。区間の特徴として、3次元位置・長さ・向きを考慮すると、2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。

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

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

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

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

ただし、 $p_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}, l_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}, q_{\beta(k,l)}^{\alpha(i,j)}$ 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、2つの線分 $a_i^\alpha a_j^\alpha, a_k^\beta a_l^\beta$ は類似性を持つ。したがって、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、球等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上に存在するた

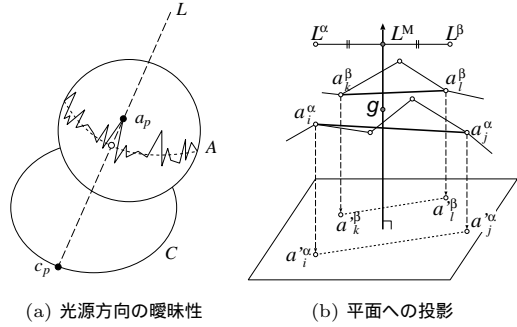


図8 光源方向に生じる曖昧性の除去

Fig. 8 Elimination of ambiguity along the lighting direction.

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。

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 $a_i^\alpha, a_j^\alpha, a_k^\beta, a_l^\beta$ の重心を g とするとき、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 $a_i^\alpha, a_j^\alpha, a_k^\beta, a_l^\beta$ を正射影し、平面に投影された境界点をそれぞれ $a_i^{\alpha'}, a_j^{\alpha'}, a_k^{\beta'}, a_l^{\beta'}$ 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 を対応付けることができる。境界点 a と輪郭点 c はすでに対応付いているため、境界点を介して輪郭 C^α, C^β の対応付けを行うことができる。

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 L^γ との各距離 s^α, s^β を算出する。この距離に応じて境界 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^β, 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。

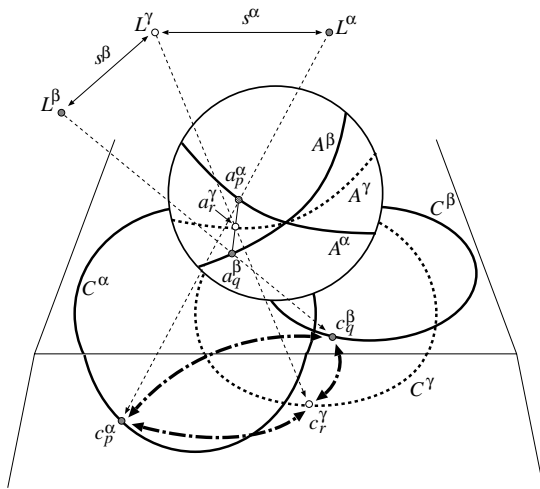


図 9 輪郭位置の予測

Fig. 9 Prediction of the boundary location.

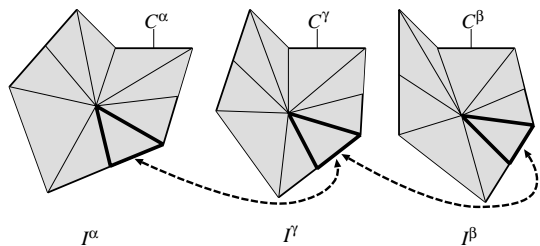


図 10 モーフィングによる cast shadow の生成

Fig. 10 Cast shadow generation by morphing.

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 を多角形で近似する。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、隣り合う 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 が生成できると考えられる。

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った。床の上に載せる対象物体としては、cast shadow 輪郭の形状が異なっても attached shadow 境界は完全に一致する理想的な形状や、光源位置は近くても attached shadow 境界は決して一

表 1 多光源画像群の仕様

Table 1 Specification of the input images.	
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	640×480 pixel, 8 bit 濃淡, 18 枚

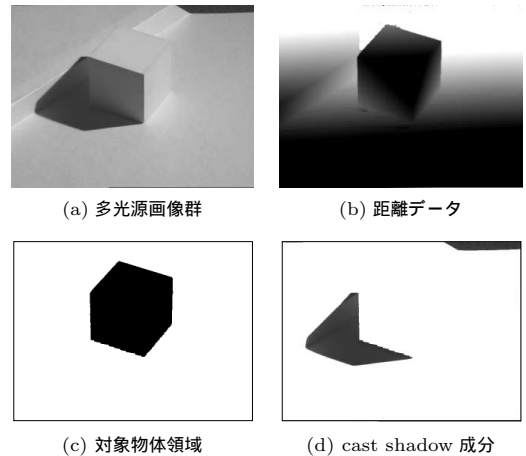


図 11 入力として用いた画像の一部

Fig. 11 Examples of the input images.

致しない最も対応付けの難しい形状が考えられる。本実験では、前者の典型的な例として明確なルーフエッジを持つ立方体を用い、後者の典型的な例として曲面だけで構成される球を用いる。より一般的な形状を持つ物体は、立方体と球の中間の複雑さを持つと考えられる。

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、シーンの形状情報のみを用いて cast shadow を生成した結果を図 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である。右端は実際に同じ位置に光源を配置して撮影された正解画像である。正解画像から抽出した cast shadow 領域を正解とし、生成した cast shadow 領域の何%が正解と一致するかを算出し、正解率とした。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

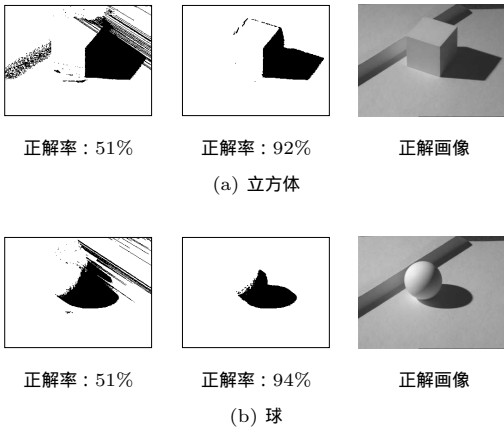


図 12 形状情報による cast shadow 生成
 Fig. 12 Generated cast shadow based on the shape.

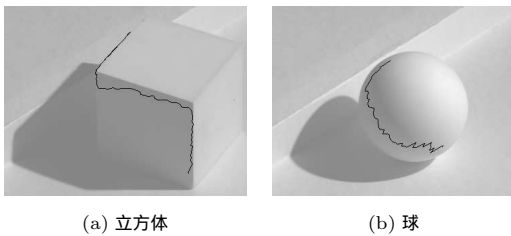


図 13 抽出した attached shadow 境界
 Fig. 13 Extracted attached shadow boundaries.

ことが確認できる。

次に、本稿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った。まず、cast shadow 輪郭により抽出された 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 項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。

さらに、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。図中の左列は対応付けに用いた 2 枚の入力画像を表し、右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、2 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った結果であり、(b) は本手法により位置予測したときの輪郭の変化を表したものである。attached

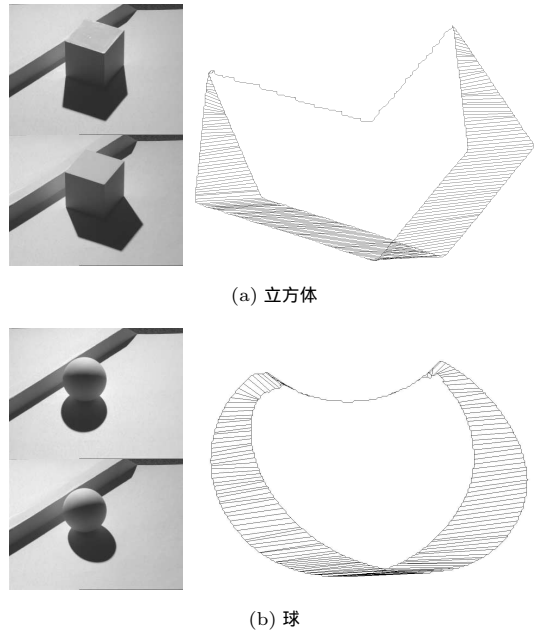


図 14 輪郭の対応付け (左：入力画像，右：対応結果)
 Fig. 14 Corresponding boundaries (left: two input images, right: the result).

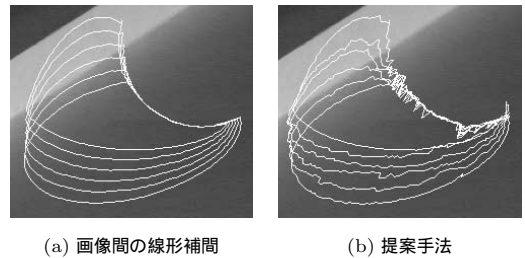


図 15 cast shadow 輪郭の位置予測
 Fig. 15 Predicted location of the cast shadow boundaries.

shadow 境界を探索する際の誤差のため、輪郭形状が滑らかになっていないが、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。各図中の (a) は入力画像には含まれていない正解画像であり、これと同じ光源方向の cast shadow を生成した。(b) は提案手法により生成した cast shadow である。生成結果の目視評価を容易にするために、(b) の生成結果を (a) の正解画像に上書きした結果を (c) に示す。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ほぼ正しく 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、違和感の少ない自然な cast shadow を生成できていることが確認できる。さらに

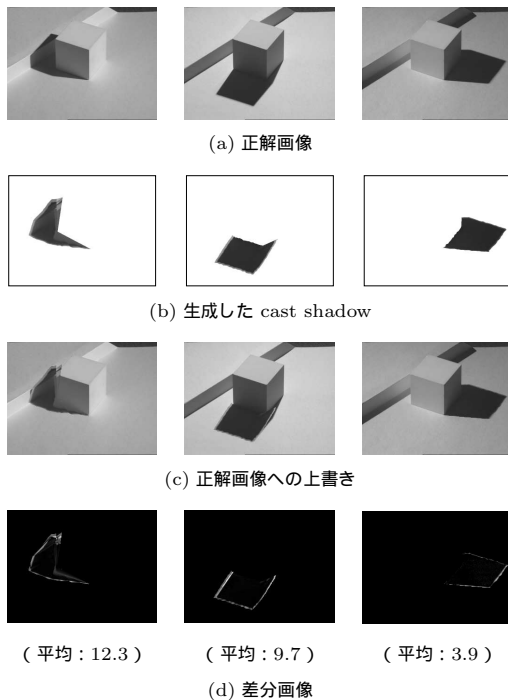


図 16 提案手法による cast shadow 生成 (立方体)
Fig. 16 Generated cast shadow (cube).

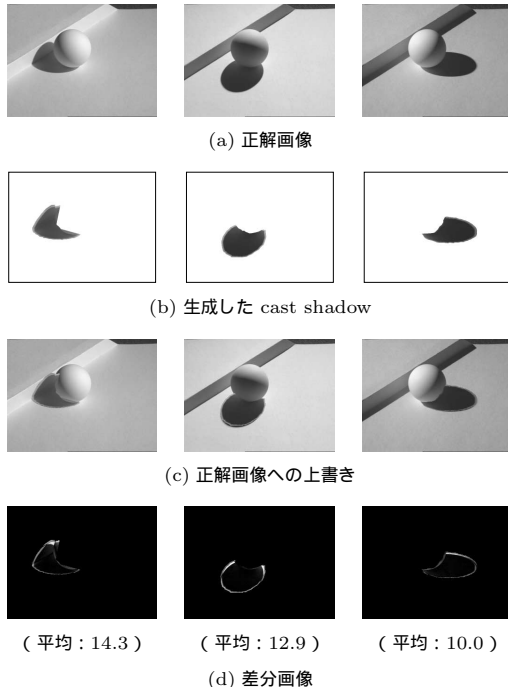


図 17 提案手法による cast shadow の生成 (球)
Fig. 17 Generated cast shadow (sphere).

定量的評価のために、(a)と(c)の差分を算出した。差分画像と、cast shadow 領域内の差分の平均値を (d) に示す。差分画像では、明るい方が差分が大きいのことを示している。この結果より、比較的自然に見えていた (c) も、cast shadow 内部の濃淡値は似ているものの、輪郭の位置が若干ずれていることが分かる。また、球よりも立方体の差分の平均値が小さいことから、attached shadow 境界が一致するルーフエッジを持つ物体が、提案手法に適していることが確認できた。

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 をモーフィングによって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 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、違和感の少ない自然な cast shadow が生成できることを確認した。提案手法では、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っているため、入力画像枚数を増加すれば、さらに自然な画像を生成することも可能であると考えられる。

実験では、提案手法の原理を示すために、明確なエッジを持つ立方体と曲面で構成される球を典型的な 2 例として取り上げ、その有効性を検証した。しかし、より複雑な形状の物体では、cast shadow 輪郭に対応する attached shadow 境界が、3 次元空間中で連続した軌跡にならず、対応付けの精度は低下すると思われる。また、cast shadow の形状にあわせて、モーフィングのための三角形分割法も工夫する必要がある、これらは今後の検討課題である。

なお、本研究の一部は科学技術振興事業団 CREST 池内プロジェクト、および科学研究費補助金 (課題番号 14780290) の補助を受けて行った。

参考文献

- 1) 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, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.41, No.SIG10 (CVIM1), pp.19-30 (2000).

- 2) Katayama, A., Sakagawa, Y. and Tamura, H.: A Method of Shading and Shadowing in Image-Based Rendering, *Proc. ICIP'99*, Vol.3, pp.26-30 (1999).
- 3) 寺園浩平, 眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士: IBRにおける影の表現, *Proc. MIRU2000*, Vol.1, pp.101-106 (2000).
- 4) Shashua, A.: Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition, Ph.D Thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT (1992).
- 5) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).
- 6) Daum, M. and Dudek, G.: On 3-D Surface Reconstruction Using Shape from Shadows, *Proc. CVPR'98*, pp.461-468 (1998).
- 7) Langer, M.S., Dudek, G. and Zucker, S.W.: Space occupancy using multiple shadow images, *Proc. IROS'95*, pp.390-396 (1995).

(平成 14 年 3 月 4 日受付)

(平成 14 年 9 月 12 日採録)

(担当編集委員 日浦 慎作)



向川 康博 (正会員)

平成 9 年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年より岡山大学助手。コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックスの研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。



岡 直人

平成 13 年岡山大学大学院工学研究科修了。同年凸版印刷株式会社入社。現在, 同社 E ビジネス推進本部勤務。



尺長 健 (正会員)

昭和 53 年京都大学大学院修士課程修了。同年 NTT 入社。平成 5~6 年カーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員。平成 8 年より岡山大学教授。画像認識・理解, 人工知能, パターン認識の研究に従事。工学博士。共訳書「ロボットビジョン」(朝倉書店)。電子情報通信学会, IEEE 各会員。