# 亀甲多面鏡を用いた半球状共焦点撮影

田川 聖一<sup>†</sup>向川 康博<sup>†</sup>金宰完<sup>††</sup>ラメシュラスカル<sup>††</sup>松下 康之<sup>†††</sup>八木 康史<sup>†</sup>

## † 大阪大学 産業科学研究所

†† マサチューセッツ工科大学

┼┼┼ マイクロソフト リサーチ アジア

E-mail: †tagawa@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 本研究は,3次元シーンの特定の奥行きだけを鮮明に撮影する半球状共焦点撮影と呼ぶ新しい撮影手法を 提案する.提案手法で重要な役割を果たす光学系は,亀甲多面鏡と呼ぶ楕円体に外接する多面体鏡である.撮影装置 はこの亀甲多面鏡に,光軸を一致させたカメラとプロジェクタを組み合わせたものであり,対象物体を取り囲む半球 上に多数のカメラとプロジェクタの組を仮想的に配置することができる.本装置を用いることで,半球上から特定の 奥行きのみに高周波パターンを投影可能であるため,対象奥行きだけを照明したときの直接反射成分のみを取り出せ る.また,その反射を多視点から計測できることから,マスキング項,減衰項,テクスチャ項に因子分解することで, 部分的に遮蔽されたシーンの観測像を鮮明化できる.試作機を用いた実験により,部分的に遮蔽,散乱を起こす物体 で隠されたシーンにおいて,特定の奥行きのみを照明し,散乱や減衰による影響を除去できることを示した. キーワード 多面体鏡,断面撮影,高周波パターン投影

# Hemispherical Confocal Imaging using Turtleback Reflector Seiichi TAGAWA<sup>†</sup>, Yasuhiro MUKAIGAWA<sup>†</sup>, Jaewon KIM<sup>††</sup>, Ramesh RASKAR<sup>††</sup>, Yasuyuki MATSUSHITA<sup>†††</sup>, and Yasushi YAGI<sup>†</sup>

† The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University †† Massachusetts Institute of Technology ††† Microsoft Research Asia E-mail: †tagawa@am.sanken.osaka-u.ac.jp

**Abstract** We propose a new imaging method called *hemispherical confocal imaging* to clearly visualize a particular depth in a 3-D scene. The key optical component is a *turtleback reflector* which is a specially designed polyhedral mirror circumscribed an ellipsoid. By combining the turtleback reflector with a coaxial camera and a projector, many virtual cameras and projectors are produced on a hemisphere with uniform density to synthesize a hemispherical aperture. In such an optical device, high frequency illumination can be focused at a particular depth in the scene to visualize only the depth with descattering. Then, the observed views are factorized into masking, attenuation, and texture terms to enhance visualization when obstacles are present. Experiments using a prototype system show that only the particular depth is effectively illuminated and hazes by scattering and attenuation can be recovered even when significant obstacles exist.

Key words polyhedral mirror, cross-sectional image, high frequency pattern projection

#### 1. 序 論

撮影シーンの特定の奥行きだけを鮮明に撮影するため に,多くの研究が行われている.撮影シーンには,被写 体以外に不透明な遮蔽物や半透明な散乱物など,さまざ まな要因が含まれている.このようなシーンに対して特 定の奥行きだけを撮影するためには,被写体を不鮮明に する要因を撮影画像から排除する技術が必要とされる.

特定の奥行きを鮮明に撮影するためのもっとも簡単な 方法は、大きな開口のレンズを用いることである.開口 を大きくすることで、被写界深度が狭くなり、合焦面以 外にある物体は撮影画像中でぼけるという性質がある. この性質を利用した合成開口[1]は現実には作成困難な 大きな開口のレンズを、多数の小さな開口を持つレンズ で合成できる.しかし,合成開口では,遮蔽物は像面に 結像されないだけであり,ぼけた状態で撮影画像に含ま れる.顕微鏡での撮影では,共焦点撮影[2]が利用され ている.これは,照明と観測のための2つのピンホール を同時に動かして観測したい奥行きを一点ずつ計測する ことにより,被写体のみをより鮮明に撮影することがで きる.しかし,対象奥行き以外のものは,暗くなり,か つぼけてはいるものの,完全に見えなくなるわけではな い.さらに,計測点をスキャンする必要があるため,撮 影時間が長いという問題がある.

近年, Levoyら [3] は,カメラとプロジェクタを複数の 平面鏡と組み合わせることで,合成開口と共焦点撮影を 合わせた合成開口共焦点撮影を提案した.この手法は, 光線空間の解析に基づいているため,計測点をスキャン する必要がなく,また,対象とする奥行きのみを照明す ることにも成功している.しかし,平面鏡の配置の問題 から,合成する開口を大きくすることができず,また, 遮蔽物の影響も完全には取り除けていなかった.

本論文では,半球状共焦点撮影と呼ぶ新しい撮影手 法を提案する.本手法は,Levoyらの合成開口共焦点撮 影[3]に似た特徴を持つが,亀甲多面鏡と呼ぶ多面体鏡 を用いて半球状の180度開口を合成した.また,この亀 甲多面鏡とプロジェクタを用いた高周波合焦投影により 対象奥行きのみを可視化する.さらに,多視点からの観 測像の因子分解により,光の減衰の影響を軽減する.

#### 本研究分野に対する提案手法の貢献

- 半球状共焦点撮影は、従来の共焦点撮影が持つ問題 を解決している、観測したい奥行き以外をほとんど 見えなくし、散乱を除去することで、目的の奥行き だけを鮮明に可視化する、さらに、計測点のスキャ ンを不要とすることで撮影を高速化した。
- 我々の設計した亀甲多面鏡にカメラとプロジェクタ を組み合わせた撮影装置は,対象を囲む半球面上で 8次元のリフレクタンスフィールドを計測できる唯 ーのシステムである.
- 我々の提案する高周波合焦投影は,3次元空間中の 特定の奥行きに合焦投影できる.これにより,物体 の表面ではなく,3次元空間中で,直接成分と大域 成分を分離できる.
- 2. 関連研究

#### 2.1 光線空間計測

本論文で提案する光学系は,光線空間の計測装置と見 なすこともできる.静的な照明環境での4次元の光線空 間を記録するために,カメラを2自由度で移動させた り[4],2次元アレイ状に配置したり[1],あるいは高解像 度カメラにマイクロレンズアレイ[5]やマイクロミラーア レイ[6],マスク[7]を組み合わせるなどの工夫がなされ てきた.一方,任意照明環境下における8次元のリフレク タンスフィールドを記録するためには,Debevecら[8]は 点光源を被写体の周囲に回転させ,Senら[9]はプロジェ クタを用いて照明の空間分布を変化させた.Masselus ら[10]はプロジェクタを回転し,Matusikら[11]は点光 源とカメラの両方を回転させ,Müllerら[12]は151台 のフラッシュ付きカメラを半球状に配置することで,8 次元リフレクタンスフィールドの6次元スライスを計測 した.

原理的には,プロジェクタとカメラの両方を半球状に 密に配置すれば完全なリフレクタンスフィールドを計測 することは可能であるが,現実には,コストや機器の物 理的な大きさによる干渉からそのような計測装置の実現 は難しい.一組のプロジェクタとカメラを半球面上で回 転することで,これらの問題は解決できるが,機械的な 回転は計測に膨大な時間がかかるため,こちらも現実的 ではない.近年,Gargら[13]やLevoyら[3]は多数の平 面鏡を組合せ,Cossairtら[14]はレンズアレイを組み合 わせることで,リフレクタンスフィールドの一部を計測 している.しかし,光線の照明・観測方向は狭い範囲に 限定されていた.

一方,本研究で提案する計測装置は,楕円体に外接す る多面体鏡の性質を活用しているため,対象物体を中心 とする半球面上に多数の仮想カメラと仮想プロジェクタ を,ほぼ等密度に配置することができる.そのため,解 像度は低いものの,対象物体を囲む半球面上で8次元の リフレクタンスフィールドを計測できる唯一のシステム である.

#### 2.2 鏡を用いた BRDF 計測

双方向反射率分布関数 (BRDF) 計測の分野では,鏡 を利用して機械的な駆動系を排除する試みがなされてき た.1 点から反射する光を効率的に記録するために,半 球面鏡 [15] や放物面鏡 [16] が用いられてきた.近年では, 円筒鏡 [17] や万華鏡のように組み合わされた平面鏡 [18], 楕円体鏡 [19],放物面鏡と独自に設計された形状の鏡の 組合せ [20] など,様々な形状の鏡がカメラ・プロジェク タと組み合わされ, BRDF 計測に用いられている.

本研究で提案する亀甲多面鏡を用いた撮影装置は,上 述の楕円体鏡を用いたBRDF計測システム[19]からヒ ントを得ている.長軸回転対称な楕円体では,一方の焦 点から出た光が楕円体表面で反射し,もう一方の焦点に 到達するまでの光路長は一定となる.この性質により, 仮想カメラと仮想プロジェクタを対象物体から等距離に, すなわち半球面上に配置することが可能となる.ただし, BRDF計測とは異なり,特定奥行きの可視化では,物体 表面上の1点ではなく物体全体を照明・観測する必要が あることから,楕円体に外接する多面体鏡を用いている.



図 1 3次元空間に対する照明と反射.散乱や減衰の影響によ り,特定の奥行きだけの観測は難しい.

	対象外領域	スキャン	散乱光
合成開口法	強照明	不要	残留
共焦点撮影法	弱照明	要	残留
合成開口共焦点撮影法[3]	非照明	不要	残留
<b>共焦点撮影 + 散乱除去</b> [24]	弱照明	要	除去
	非照明	不要	除去

表1 各手法の比較



図 2 反射解析や光線空間計測に用いられた各手法におけるカ メラおよびプロジェクタの数.

#### 2.3 散乱除去

濁った水などの散乱媒体や半透明物体に入射した光は 散乱を生じるため、その内部の見えは不鮮明となる.散 乱光を除去することで、散乱媒体の内部を鮮明化するた めの様々な工夫が試みられている.Treibitz と Schechner [21] は水中での見えを鮮明化するために偏光板を用 いた.また、散乱媒体の濃度が薄いときには単一散乱し か生じないと仮定することで、Narasimhan ら [22] は散 乱光を除去して3次元計測をし、Gu ら [23] は不均一な 散乱媒体の3次元分布を推定した.

近年, Fuchs ら [24] は共焦点撮影に,散乱成分が低周 波となる性質を利用した散乱光除去手法を組み合わせた. 我々の半球状共焦点撮影の原理はこの手法と似ている. しかし,我々は Levoy ら [3] の合焦投影と Nayar ら [25] の高周波投影を組み合せることで,計測時間の短縮と散 乱除去を同時に実現した.

#### 3. 半球状共焦点撮影

3次元シーンを,単一光源で照明し,カメラで撮影す るとき,図1に示すように,さまざまな光学現象が観測 される.特定の奥行きだけに焦点を合わせて撮影したと しても,シーン全体が照明されているため,その奥行き 以外の領域もぼけた状態で撮影画像に含まれてしまう. 特定の奥行きだけを撮影するためには,その奥行きだけ を照明する必要がある.つまり,照明・観測の両方で浅 い被写界深度を持たなければならない.

しかし,仮に特定の奥行きだけを照明できたとしても, 散乱や減衰の影響により,鮮明な撮影画像は得られない. 散乱は,半透明物体に入射された光が物体内部で反射を 繰り返すことで生じる.これにより,観測像はぼけてし まう.一方,減衰は,不透明物体や透明度の低い物体に より光が遮られることで生じる.これにより,照明は与 える方向によって光量が変化し,観測も部分的に暗い像 が撮影される.3次元空間の特定奥行きだけを鮮明に観 察するためには以下の4つの項目を実現する必要がある.

- (a) 極端に浅い被写界深度を持つ開口の合成
- (b) 特定奥行きのみへの照明
- (c) 散乱の影響の除去
- (d) 減衰の解析と補正

これらをすべて実現するために,(1) 半球状の開口を合成できるように独自に設計した亀甲多面鏡と(2) 高周波 合焦投影で構成される半球状共焦点撮影を提案する.

亀甲多面鏡はカメラとプロジェクタを組み合わせることで,照明・観測の両方で非常に浅い被写界深度を実現し,(a)を解決する.高周波合焦投影法は散乱による照明の影響と反射光に含まれて計測される散乱光を除去し,(b)(c)を解決する.また,多視点からの観測像をマスキング項,減衰項,テクスチャ項に因子分解することで,(d)を解決する.これまでに見てきた各手法における利点・欠点と使用されるカメラ・プロジェクタの数の関係をそれぞれ,表1と図2に示す.

#### 4. 亀甲多面鏡の光学設計

#### 4.1 プロジェクタとカメラの半球状配置

我々のシステムでは,特定の奥行きだけを照明するた めに,プロジェクタを光源として用いる.プロジェクタ の開口が十分に大きければ,投影光は浅い被写界深度内 でのみ合焦し,それ以外の部分では投影像がぼける.巨 大な開口を単一のレンズで実現することは困難であるが, 合成開口[1]を用いることで,多くの小さい開口の組合 せで大きな開口を簡単に実現できる.

極端に大きい開口の合成には,観測対象から等距離に, かつ等密度に多数のプロジェクタを配置しなければなら ない.つまり,半球上でできるだけ均一に高い密度で配 置されることが理想である.このようにカメラとプロ ジェクタを配置すれば,照明・観測の両方について,180 度の視野角を持つ半球状の開口を合成できる.

#### 4.2 仮想配置のための亀甲多面鏡

実際には,コストや物理的な干渉などの理由から,多数のカメラとプロジェクタを配置することは難しい.そのため,鏡を用いることで,仮想的に多数のプロジェク



(b) 一対の楕円体を用いた設計

図 3 提案装置の原理.亀甲多面鏡を用いた,仮想プロジェク タと仮想カメラの半球上への均一な配置のための設計.



図4 亀甲多面鏡の設計.

タとカメラを配置する.我々はこれを実現するために, 楕円体の幾何的な性質を利用した.長軸について回転対 称な楕円体は二つの焦点を持ち,一方の焦点から出た光 が楕円体表面で反射し,もう一方の焦点に到達するまで の光路長は一定となる.一方の焦点位置に観測対象を, もう一方の焦点位置にカメラとプロジェクタをビームス プリッタを介して置いた様子を図3(a)に示す.ここで, 平面鏡は楕円体に接するように配置している.これによ り,多数の仮想カメラと仮想プロジェクタを対象から等 距離かつ球面上で等密度に配置できる.

実際には,単一の楕円体を用いた設計では,180度の 画角を持つカメラとプロジェクタが必要になるため,こ の設計通りの作成は困難である.そこで,図3(b)のよう に,半球を2等分し,傾けた二つの楕円体をひとつの焦 点を共有するように配置した.このような配置とするこ とで,一般のレンズで十分な画角に抑えることができる.

#### 4.3 光学系の設計

図4のように,楕円体に外接する多面体鏡である亀甲 多面鏡を設計した.仮想プロジェクタと仮想カメラの配 置は,ジオデシックドームの頂点に置くことで,ほぼ均



(a) **亀甲多面鏡** 



(b) 撮影装置全体 図 5 半球状共焦点撮影のための光学系.

ーな密度での配置を実現した.ここで使用したジオデ シックドームは正二十面体の各面を2回分割して作成し た.撮影装置は面対称な2つの部分から構成されるため, 本研究では,性能評価のために片方だけを試作した.

図 5(a) に示すように,鏡を固定するための枠を光 造形により作成し,50 枚の鏡を貼り付け,亀甲多面鏡 を試作した.これに高解像度カメラ (PointGrey, Grass-50S5C,2448×2048) とプロジェクタ (KAIREN Projector X Pro920,640×480) を組み合わせた.

#### 5. 高周波合焦投影

#### 5.1 撮影シーンにおける照明と反射

光線空間の解析によって,撮影シーンがどのように照 明され,撮影シーンで反射した光がどのように観測され るかを明らかにする必要がある.そのために,3次元空 間を小さいボクセルに分割して考える.ボクセルkを照 明する光線の集合を $L_k$ とし,ボクセルkで反射した光 線の集合を $R(L_k)$ とする.シーン全体を撮影したときに 観測される画像は,すべてのボクセルからの反射光の総 和 $\sum_k R(L_k)$ で表わされる.

照明と反射は直接成分と大域成分の和と見なせる [25]. 図 6 (a) に示すように,ボクセル k が受ける照明は,直 接照明  $L_k^D$  と大域照明  $L_k^G$  に分けられる.同様に反射も, 直接反射  $R^D(L_k)$  と大域反射  $R^G(L_k)$  に分けられる.

$$R(L_k) = R^D(L_k) + R^G(L_k)$$
,  $L_k = L_k^D + L_k^G$ . (1)

よって,観測像は4つの成分の和でモデル化できる.

$$\sum_{k} R(L_{k}) = \sum_{k} (R^{D}(L_{k}^{D}) + R^{G}(L_{k}^{D}) + R^{D}(L_{k}^{G}) + R^{G}(L_{k}^{G})).$$
(2)



図 6 高周波合焦投影.各プロジェクタから一点を集中して照明できるため,この照 明点を平面状に展開し,高周波パターンを特定奥行きにのみ合焦させる.投影 パターンは対象奥行き以外でぼける.

#### 5.2 複数プロジェクタによる合焦投影

撮影シーンの特定奥行きを鮮明に撮影するためには, その奥行きだけが照明される必要がある.さらに,散乱 の影響を除去するために,大域照明や大域反射を除去す る必要がある.つまり,式(2)の $R^D(L_k^D)$ だけを観測像 から抽出できなければならない.

提案装置を用いることで,そのような照明を実現でき る.観測対象を囲む仮想プロジェクタは半球面状の巨大 な開口を合成できるため,被写界深度を十分に浅くでき る.さらに,Levoyらの合焦投影[3]とNayarらの高周波 投影[25]を組み合わせた,高周波合焦投影と呼ぶ提案手 法を組み合わせる.合焦投影では,撮影シーンの任意平 面上に任意のパターンを合焦し,対象奥行き以外ではパ ターンはぼける.高周波投影では,物体表面上での直接 成分と大域成分に分離できる.我々の高周波合焦投影で は,提案装置が半球状の開口を合成できるため,3次元 空間中の任意平面での直接成分と大域成分に分離できる.

高周波合焦投影では,高周波パターンとしてチェッカー パターンを投影する.図6(b)のように,対象奥行きで 白と黒のピクセルが一致するように各プロジェクタから 投影する.これは,高周波パターンを特定の奥行きでの み合焦させる投影に相当する.撮影シーン中のボクセル を,図6(c)のように,合焦位置にないボクセルU,合 焦位置にあり投影されるボクセルF1,合焦位置にあり 投影されないボクセルF2に分類する.

白パターン投影の照明と比較して,高周波合焦投影で は投影パターン中の半分のピクセルが黒であるため,平 均的に照明は暗くなる.それぞれのボクセルでの4種類 の反射成分の強度を比較すると表2に示す通りになる. 大域照明に関しては,すべてのボクセルで最大照度の半 分で照明される.直接照明に関しては,Uでは投影パ ターンはぼけているため,同様に最大照度の半分で照明 される.F1は合焦投影されるため,すべてのプロジェ クタから直接照明され,最大照度で照明される.一方, F2は直接照明を受けない.これらの違いから,観測対 象のボクセルからの直接成分 $\sum_{k \in F1 \cup F2} R^D(L_k^D)$ を分離 できる.

F1 を合焦投影で照明し, F2 を合焦投影で照明しな

表 2 各ボクセルでの反射成分の強度の比較

	$R^D(L^D_k)$	$R^D(L_k^G)$	$R^G(L^D_k)$	$R^G(L_k^G)$
U (合焦面外)	1/2	1/2	1/2	1/2
<b>F1</b> (合焦照明)	1	1/2	1	1/2
<b>F2</b> (合焦非照明)	0	1/2	0	1/2

かったときの撮影画像を  $I_P$  とする,また,投影パターンの白と黒を入れ替えたネガパターンを投影したときの 撮影画像を  $I_N$  とすると,これらの撮影画像は,次式で 表される.

$$I_P = \sum_{i \in F1} R\left(Li^D + \frac{Li^G}{2}\right) + \sum_{i \in F2} R\left(\frac{Li^G}{2}\right) + \sum_{i \in F1} R\left(\frac{Li^D + Li^G}{2}\right), \quad (3)$$
$$I_N = \sum_{i \in F1} R\left(\frac{Li^G}{2}\right) + \sum_{i \in F2} R\left(Li^D + \frac{Li^G}{2}\right) \quad (4)$$

$$+\sum_{i\in U} R\left(\frac{Li^D + Li^G}{2}\right).$$
 (4)

 $I_P \ge I_N$ の同じ位置の輝度を比較し,より大きい輝度の みを選択して作成した画像  $I_{max}$  とより小さい輝度のみ を選択して作成した  $I_{min}$  を作成する.ここで,大域成 分は低周波成分しか持たないことから [24] [25],

$$\sum_{i \in F1} R^G(Li^D) \simeq \sum_{i \in F2} R^G(Li^D).$$
 (5)

したがって,

$$I_{max} - I_{min} = \sum_{i \in F1} R^{D}(Li^{D}) + \sum_{i \in F2} R^{D}(Li^{D})$$
$$\pm (\sum_{i \in F1} R^{G}(Li^{D}) - \sum_{i \in F2} R^{G}(Li^{D}))$$
$$= \sum_{i \in F1} R^{D}(Li^{D}) + \sum_{i \in F2} R^{D}(Li^{D})$$
$$= \sum_{i \in F1 \cup F2} R^{D}(Li^{D}).$$
(6)

これにより,特定の奥行き (F1 ∪ F2) だけを直接照明 し,そのときの直接反射だけを計測できる.表1に示す



図7 因子分解の概念.観測輝度を,マスキング項,減衰項,テクスチャ項に分解する.

ように,本手法では対象の奥行き以外に対して照明を行わない.また,スキャンを行わないため,高速に計測できる.さらに,半透明物体内部で大域成分として多く生じる散乱光も除去できる.

#### 6. 観測画像の因子分解

高周波合焦投影により,特定奥行きだけを照明し,散 乱光を除去できるが,照明光や反射光の減衰の影響が 残っているため,対象奥行きを完全に鮮明な画像として 可視化することはできない.減衰は,図1に示すように, 遮蔽や吸収によって生じる.遮蔽が生じると,照明や反 射光が完全に遮られるため,撮影画像中で完全な影とな る.一方,透明度の低い媒体中では,光の吸収が生じ, 明るさは空間的に滑らかに変化する.

幸いにも,我々の計測システムでは,多視点からの観 測像が得られるので,あるカメラで減衰している光が, 他のカメラでは減衰せずに観測されている場合がある. そこで,減衰の影響を受けない対象奥行きのテクスチャ を,多視点からの観測像に基づいて推定することを試み る.解像度 N ピクセルの仮想カメラが K 個あると仮定 する.j 番目の仮想カメラの i 番目のピクセルを O<sub>ij</sub> とす る.我々は観測された輝度を以下のようにモデル化する.

$$O_{ij} = M_{ij} A_{ij} T_i. \tag{7}$$

ここで, *M<sub>ij</sub>* はマスキング項であり, 値は 0 か 1 を持 つ. 遮蔽されていれば 0 とし, そうでなければ 1 とする. *A<sub>ij</sub>* は減衰項であり, 吸収による明るさの低下を表現す る. *T<sub>i</sub>* はテクスチャ項であり,目的の奥行きでの反射率 を表現している.テクスチャ項はランバート面を仮定し, 観測方向によらず一定であるとしている.図7はこの関 係を示している.因子分解の流れを以下に示す.

STEP-1: 最初にマスキング項を決定する.高周波 合焦投影では合焦面外を照明しないため,遮蔽物は 閾値処理で簡単に除外できる.マスキング項の決定 後は, $M_{ij} = 1$ を満たすピクセルについて以下の処 理を実行する.

STEP-2: 減衰項の初期値を $A_{ij} = 1$ に設定する.

STEP-3: テクスチャ項を計算する.理想的には,異 なる方向から撮影したカメラで同一の反射率が推定 されるべきであるが,観測方向によって異なった輝度 が得られる.この種類の問題はステレオ視[26]でよく 見られる.本研究でも同様に $T_i = \text{Median}(O_{ij}/A_{ij})$ として,メディアンフィルタを用いる. STEP-4: 減衰項を,式(7)を満たすように, $A_{ij} = O_{ij}/T_i$ に更新する.

STEP-5: 減衰項は空間的に滑らかであるので,ガ ウシアン関数を用いて平滑化を行う.テクスチャ項 が収束していなければ STEP-3 に戻る.

これにより,観測像は3つの項に分解され,減衰の影響 を受けない鮮明な特定奥行きのテクスチャが得られる.

#### 7. 実 験

7.1 仮想カメラによる合成開口

まず,試作機による合成開口の性能を評価する.カメ ラのキャリブレーションは設計値を初期値とし,仮想カ メラ画像の中心が撮影シーンの原点と一致するように画 像中で平行移動した.プロジェクタについても同様に, 投影パターンの中心が原点を照明するように平行移動し た.撮影対象は,テクスチャを印刷した紙とし,橙色の メッシュをかぶせた.撮影シーン全体の様子を図 8(a) に 示す.ここでは,白パターンを投影し,撮影シーン全体 に均一な照明を与えた.このとき,実力メラで撮影され た画像を図 8(b) に示す.この画像には,50 個の仮想カメ ラでの撮影画像が含まれる.すべての仮想カメラ画像で, テクスチャはメッシュによって視界をさえぎられ,紙に 印刷されているテクスチャの認識は難しい. 合成開口に 使う仮想カメラを徐々に増加したときの見えの変化を図 8(c) に示す.本装置では,四半球の開口を合成できるた め,メッシュは完全にぼけ,合成開口に使用する仮想力 メラが増加するほど,テクスチャが鮮明になっている.

#### 7.2 高周波合焦投影による散乱除去

次に,高周波合焦投影による3次元領域での散乱除去 の効果を確かめる.ここでは,複数のテクスチャを印刷 した紙を用意し,半透明なプラスチックシートを被せ, 撮影対象とした.これを均一な白パターンで照明したと きのテクスチャの見えを,図9(a)(b)(c)の左側に示す. このとき,観測されるテクスチャは散乱の影響を受け るため,ぼけてしまう.紙の上でチェッカーパターンが 合焦するように仮想プロジェクタから投影する.チェッ カーパターンは投影画像中で3ピクセルごとに白と黒が 入れ替わるように作成する.チェッカーパターンをシフ トしながら投影して撮影すると,合計18枚の撮影画像 が得られる.これらの画像から得られた直接成分を図9 (a)(b)(c)の右側に示す.これにより,3次元領域の散乱 が除去され,テクスチャの見えは鮮明になっている.散



(a) (b) (c)

図 9 高周波合焦投影による散乱除去.左:通常照明下での観測像.右:推定直接成分.

乱除去は完全ではないが,これは試作機の仮想プロジェ クタの解像度の低さによるところが大きい.ここでは, 6mm 各の直方体領域をそれぞれの辺で20等分し,ボク セルを作成した.これにより,ボクセルは0.3mm 各の 直方体となる.

#### 7.3 観測画像の因子分解

高周波合焦投影と因子分解の組合せによって,3次元 シーンの特定の奥行きをどの程度鮮明に可視化できるか を確認した.テクスチャを橙色のメッシュで覆った撮影 シーンを図10(a)に,通常照明下での各仮想カメラで撮 影された画像を(f)に示す<sup>(注1)</sup>.単純に撮影画像の平均を とり,合成開口を行った結果を(b)に示す.ここでは,観 測されるテクスチャに橙色の影響が強く残っている.

高周波合焦投影により,メッシュへの照明の影響は取 り除かれ,(g)に示すように撮影画像中でメッシュは黒 くなる.これらの平均画像を作成すると,(c)のように なり,黒いメッシュはぼけ,橙色が消えている.しかし, この画像は部分的に暗く,減衰の影響が見て取れる.そ こで,多視点からの観測像(g)を因子分解し,マスキン グ項(h),減衰項(i),テクスチャ項(d)を得た.この結 果から,特に赤文字'U'や緑文字'R'の周囲で減衰の影 響が弱められていることがわかる.このことから,メッ シュによる遮蔽がマスクと判断されたことが確認できる.

### 8. 問題 点

- 仮想プロジェクタや仮想カメラは実際のプロジェク
  タやカメラの画像の分割であるため,解像度が低い.
- 撮影範囲は、すべてのカメラとプロジェクタの対象
  範囲に含まれる必要があるため、狭くなる.撮影範囲を広げるためには、巨大な亀甲多面鏡が必要になるが、実際に作成することは困難である.

観測像の因子分解は基本的に不良設定問題である.
 例えば、透明なフィルタに覆われた赤い紙と、赤いフィルタに覆われた白い紙を撮影した画像は区別がつかない.よって、減衰成分が空間的に滑らかであるなどの経験則に基づいた制限を加える必要がある.

## 9. 結 論

本論文では,3次元シーンの特定の奥行きだけを鮮明 に撮影できる半球状共焦点撮影と呼ぶ新しい撮影手法を 提案した.独自に設計した亀甲多面鏡を用いることで, カメラやプロジェクタの画像中に,対象領域を囲む半球 状に存在する仮想カメラや仮想プロジェクタの撮影,投 影画像を作成できる.また,高周波合焦投影と観測像の 因子分解により,特定の奥行きだけを照明し,散乱や減 衰の影響を除去した.試作機を用いた実験により,半球 状開口,散乱除去,因子分解の原理をそれぞれ検証した.

本論文では,試作機を用いて提案手法の原理を個別に 検証した.今後の課題としては,高解像度のプロジェク タを用いたより精密な計測が可能である装置を作成し, 手法全体の評価を行うことがあげられる.また,半透明 物体の任意断面の可視化などの応用技術も開発する必要 がある.今後は,近赤外光の利用による人体内部の可視 化などへ発展させていきたい.

本研究は科研費(21650038)の助成を受けたものである.

#### 文 献

- V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi, and M. Levoy, "Using Plane + Parallax for Calibrate Dense Camera Arrays", Proc. CVPR 2004.
- [2] M. Minsky, "Microscopy apparatus", US Patent 3013467, 1961.
- [3] M. Levoy, B. Chen, V. Vaish, M. Horowitz, I. Mc-Dowall, and M. Bolas, "Synthetic Aperture Confocal Imaging", Proc. SIGGRAPH2004, pp. 825–834, 2004.
- [4] M. Levoy and P. Hanrahan, "Light field rendering", Proc. SIGGRAPH'96, pp. 31–42, 1996.
- [5] E. H. Adelson and J. Y. A. Wang, "Single Lens Stereo

<sup>(</sup>注1):本実験で使用した亀甲多面鏡は 50 枚の鏡面を持つが, 内2枚 の鏡はアライメントがずれていたため 48 枚のみを使用した.



with a Plenoptic Camera", IEEE Tran. on PAMI, pp. 99–106, 1992.

- [6] J. Unger, A. Wenger, T. Hawkins, A. Gardner and P. Debevec "Capturing and Rendering With Incident Light Fields", Proc. EGRW 2003, pp. 141–149, 2003.
- [7] A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, J. Tumblin, "Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing", Proc. SIGGRAPH2007, 2007.
- [8] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H. P. Duiker, W. Sarokin, and M. Sagar, "Acquiring the Reflectance Field of a Human Face", Proc. SIGGRAPH2000, pp.145–156, 2000.
- [9] P. Sen, B. Chen, G. Garg, S. Marschner, M. Horowitz, M. Levoy, H. Lensch, "DualPhotography", Proc. SIG-GRAPH2005, pp.745–755, 2005.
- [10] V. Masselus, P. Peers, and P. Dutré, and Y. D. Willems, "Relighting with 4D incident light fields", Proc. SIGGRAPH2003, pp. 613–620, 2003.
- [11] W. Matusik, H. Pfister, A. Ngan, P. Beardsley, R. Ziegler, L. McMillan, "Image-Based 3D Photography using Opacity Hulls", Proc. SIGGRAPH2002, pp.427–437, 2002.
- [12] G. Müller, G. H. Bendels, and R. Klein, "Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts", Proc. VAST2005, pp. 13–20, 2005.
- [13] G. Garg, E. V. Talvala, M. Levoy, H. P.A. Lensch, "Symmetric Photography : Exploiting Datasparseness in Reflectance Fields", Proc. EGSR2006, 251–262, 2006.
- [14] O. Cossairt, S. K. Nayar, and R. Ramamoorthi, "Light Field Transfer: Global Illumination Between Real and Synthetic Objects", Proc. SIGGRAPH2008, pp. 1–6, 2008.
- [15] G. J. Ward, "Measuring and Modeling anisotropic reflection", Proc. SIGGRAPH'92, pp.255–272, 1992.
- [16] K. J. Dana and J. Wang, "Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional re-

flectance", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.21, Issue 1, pp.1–12, 2004.

- [17] S. Kuthirummal and S. K. Nayar, "Multiview Radial Catadioptric Imaging for Scene Capture", Proc. SIG-GRAPH2006, pp.916–923, 2006.
- [18] J. Y. Han and K. Perlin, "Measuring Bidirectional Texture Reflectance with a Kaleidoscope", ACM Transactions on Graphics, Vol.22, No.3, pp.741–748, 2003.
- [19] Y. Mukaigawa, K. Sumino, Y. Yagi, "Multiplexed Illumination for Measuring BRDF using an Ellipsoidal Mirror and a Projector", Proc. ACCV2007, pp.246– 257, 2007.
- [20] A. Ghosh, S. Achutha, W. Heidrich, and M. O'Toole, "BRDF Acquisition with Basis Illumination", Proc. ICCV2007, 2007.
- [21] T. Treibitz, Y. Y. Schechner, "Active Polarization Descattering", IEEE Tran. on PAMI, Vol 31, Issue 3, pp. 385–399, 2009.
- [22] S. G. Narasimhan, S. K. Nayar, B. Sun, S. J. Koppal, "Structured light in scattering media", Proc. ICCV2005, Vol 1, pp. 420–427, 2005.
- [23] J. Gu, S. K. Nayar, E. Grinspun, P. N. Belhumeur and R. Ramamoorthi, "Compressive Structured Light for Recovering Inhomogeneous Participating Media", Proc. ECCV2008, pp.845–858, 2008.
- [24] C. Fuchs, M. Heinz, M. Levoy, H. Seidel, and H. Lensch, "Combining Confocal Imaging and Descattering", Proc. Computer Graphics Forum, Special Issue for the Eurographics Symposium on Rendering 27, 4, pp.1245–1253, 2008.
- [25] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, "Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination", Proc. SIGGRAPH2006, pp.935–944, 2006.
- [26] V. Vaish, R. Szeliski, C. L. Zitnick, S. B. Kang, M. Levoy, "Reconstructing Occluded Surfaces using Synthetic Apertures: Stereo, Focus and Robust Measures" CVPR2006, Vol.II, pp. 2331–2338, 2006.