

多重重み付け計測による反射・散乱光の分解

高谷 剛志[†] 向川 康博[†] 松下 康之^{††} 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所

大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

^{††} マイクロソフトリサーチ アジア

Building 2, No. 5 Dan Ling Street, Haidian District Beijing, P.R. China

E-mail: [†]{takatani,mukaigaw}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{††}yasumat@microsoft.com,

^{†††}yagi@sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 本研究では、シーン中の様々な光学現象によって生じる反射や散乱などの成分を分解するための手法として、多重重み付け計測という統一的な枠組みを提案する。これまでに、撮影方法を工夫することで、特定の成分を弱めて計測し、成分を分離するための多数の方法が考案されてきた。本研究では、これらの個々の計測法を重み付け計測として定式化し、さらにそれらを多重に組み合わせることで、統一的な枠組みの中で線形演算によって成分分解が可能となる。実験により、円偏光板や高周波パターン投影等による計測法を提案する枠組みで組み合わせることで、拡散反射、鏡面反射、単一散乱、多重散乱などの成分に分解できることを示す。

キーワード 重み付け計測, 反射光, 散乱光

1. はじめに

シーンを撮影した画像には、反射や散乱などの様々な光学現象による成分が混在している。これが画像によるシーン解析を難しくしている理由の一つである。実際、多くの画像解析法は、特定の光学現象のみが観測されることを仮定している。例えば、古典的な Shape-from-Shading や Photometric Stereo などは拡散反射のみを仮定し、Shape-from-Specularity は鏡面反射のみを仮定している。しかし、特定の光学現象のみが観測されるという理想的な条件は、研究室レベルの実験でしか成り立たないため、一般的なシーンへの適用は難しい。

複数の成分が混在している場合には、(1) より複雑な現象を考慮したモデルを用いるか、(2) 成分ごとに分解するかのいずれかの解決法が必要となる。例えば拡散反射を例に挙げると、古典的な Photometric Stereo が完全拡散反射を仮定しているのに対して、(1) の立場からはより一般的な BRDF についても適用できるように制限を緩和する試みが提案されている [1] [2]。一方、(2) の立場からは、撮影画像から拡散反射成分のみを取り出す試みが提案されている [3] [4]。ここで、反射光だけではなく散乱光まで考慮すると、そのモデル化は複雑になるため、(2) の各成分への分解が重要となる。

このような背景のもとで、これまでに観測光を分離する方法が数多く提案されてきた。成分を分離するために、光源方向を変えた時の明るさ変化を解析したり [3]、偏光板などの光学機器を利用したり [5]、照明方法を工夫する [4] など、様々な原理が提案されてきた。しかし、これらの各手法はそれぞれ分離できる成分が異なるため、ど

のように組み合わせれば目的とする成分ごとに分解ができるかが不明確であった。

そこで、本研究では、反射光と散乱光を対象とし、これらを各成分ごとに分解するために、多重重み付け計測という統一的な枠組みを提案する。これまでに提案されてきた様々な分離手法を、特定の成分を弱めて計測する手法として再定義し、重み付け計測として定式化する。さらにそれらを多重に組み合わせることで、統一的な枠組みの中で線形演算によって安定的に成分分解する。これにより、既存の分離手法をどのように組み合わせればよいかを考える必要がなく、さらに、重みを記した行列の階数を調べることで、成分ごとに分解できる条件が揃っているかどうかを事前に判断することが可能となる。

本研究分野に対する提案手法の貢献

- 反射・散乱光の成分分解は、シーン解析の前処理として重要なプロセスであり、特定の光学現象に基づいた画像解析が容易になる。

- 既存手法を統一的にまとめられるだけでなく、今後提案され得る新しい手法についても重みが定義できるならば、同様に組み込むことができる大きな枠組みである。

- この枠組みは、反射・散乱光の分解というフォトメトリ分野での利用に限定されない。いくつかの成分が混合して計測される場合に、それらを分解するための枠組みであるという意味で極めて汎用的である。

2. 関連研究

拡散反射と鏡面反射の分離：拡散反射と鏡面反射の分離

は古くから取り組まれ、現在でも活発に研究されている問題である。Shafer [6] によって提案された二色性反射モデルによれば、拡散反射は物体色と光源色の積になるのに対して、鏡面反射は光源色となる。この色の違いに着目して、色空間での観測値の分布を解析することで両成分を分解する様々な手法が提案されてきた [7] [8] [9] [10]。一方、拡散反射と鏡面反射の偏光の違いを利用して両成分を分離する方法もよく知られている。Wolff と Boulton [5] は、直線偏光板を用いて両成分を分離した。また、色の違いと偏光の違いは相補的であることから、両者を併用してより安定に分離する手法も提案されている [11] [12]。さらに、距離画像を併用したり [13]、偏光情報と独立成分分析を利用したり [14]、視線方向の依存性の違いを利用したり [15]、拡散反射成分の線形性を利用したり [3]、色情報と時空間情報を利用する [16] など、様々な試みが提案されている。

散乱光の除去：散乱光はシーンの視認性を低下させる要因の一つとされ、鮮明な画像を得るために、様々な散乱光の除去法が提案されてきた。拡散・鏡面反射の分離と同様に、散乱光の解析でも偏光の性質が利用される。光学の分野では後方散乱が偏光の性質を利用して取り除けることが古くから示されており [17]、濁った水中 [18] やかすんだ大気 [19] の見えの鮮明化に利用されてきた。一方、Narasimhan と Nayar [20] [21] は、大気中での光の散乱をモデル化することで霧やもやを除去している。

最近では、コンピュータショナルフォトグラフィ分野でも、散乱光の除去は主要なテーマの一つとされ、Kim ら [22] は、ピンホールアレイを用いて記録された光線の角度を解析することで散乱光を除去した。また、プロジェクトを用いた散乱成分の除去法として、Fuchs ら [23] は共焦点撮影法を応用し、Gupta ら [24] は偏光とストライプパターンの投影を組み合わせた。

観測成分の分解：特定の成分を除去するのではなく、観測された画像を光学現象ごとに分解する研究が進められている。Seitz ら [25] はインバースライトトランスポート理論を提案し、相互反射を反射回数ごとに分解できることを示した。さらに、Bai ら [26] はこの理論を拡張して相互反射を分解した。Wu と Tan [27] は、Lin と Lee [28] により提案された多重反射を考慮した反射モデルを応用して、鏡面反射成分、拡散反射成分、さらに表面下散乱成分を分解した。

Nayar ら [4] は反射光などの直接成分と、散乱光や相互反射などの大域成分を分離するための高周波パターン投影法を提案した。この手法はシンプルでありながら効果的であるため、様々な成分の分解にも応用されている。例えば、Lamond ら [29] はスクリーンに投影した高周波パターンを照明とすることで拡散反射と鏡面反射の分解に応用し、Mukaigawa ら [30] はストライプ状の高周波パターンとすることで単一散乱と多重散乱の分解に応用

した。これらの手法はそれぞれ分解できる成分が異なるため、統一的に扱える枠組みが必要である。

3. 多重重み付け計測の原理

3.1 重み付け計測

シーンを撮影した画像を s とする。ここで、画像 s は、次式のように m 個の成分 $c_i (1 \leq i \leq m)$ の和として表現できると仮定する。

$$s = \sum_{i=1}^m c_i. \quad (1)$$

ここで、 m を成分数と呼ぶ。我々の目的は、 s を c_i に分解することである。

もし、各成分 c_i を個別に直接計測する方法があれば、各成分を順に計測すれば分解は可能である。しかし、一般的には、そのような計測法は存在しない場合が多い。一方で、直接計測が困難であっても、計測方法を工夫することにより、特定の成分の強度を弱めて計測することは可能である場合が多い。これは、各成分に異なる重みを付けて計測することから、本論文では、このような計測方法を重み付け計測と呼ぶ。

ある重み付け計測の重みを $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ とすると、この計測法による計測データ s' は、次式のように表される。

$$s' = \sum_{i=1}^m w_i c_i. \quad (2)$$

ここで、 C を各成分を表す成分行列とすれば、重み付け計測は次式のように行列で表現できる。

$$C = [c_1 c_2 \dots c_m], \quad (3)$$

$$s' = Cw \quad (4)$$

3.2 多重重み付け計測による成分の分解

異なる重み付け計測法が $n (m \leq n)$ 種類あるとき、それぞれの重み $w^j (1 \leq j \leq n)$ は、

$$w^j = (w_1^j, w_2^j, \dots, w_m^j)^T \quad (5)$$

と表せる。これより、各計測法による計測画像 $s^j (1 \leq j \leq n)$ は、次のように表現できる。

$$s^j = \sum_{i=1}^m w_i^j c_i. \quad (6)$$

これを行列を用いて表現すると、次のようになる。

$$S = [s^1 s^2 \dots s^n], \quad (7)$$

$$W = [w^1 w^2 \dots w^n], \quad (8)$$

$$S = CW, \quad (9)$$

ここで、 S を計測行列、 C を成分行列、 W を重み行列

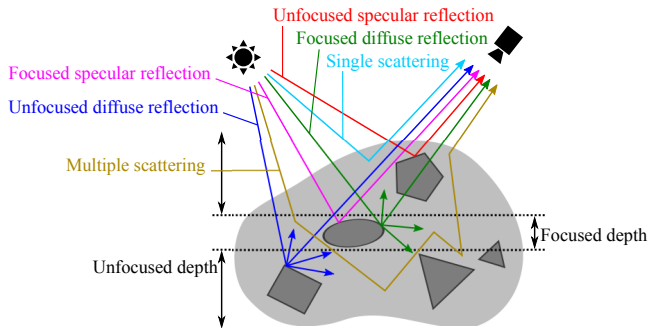


図 1 シーン中の反射・散乱光．

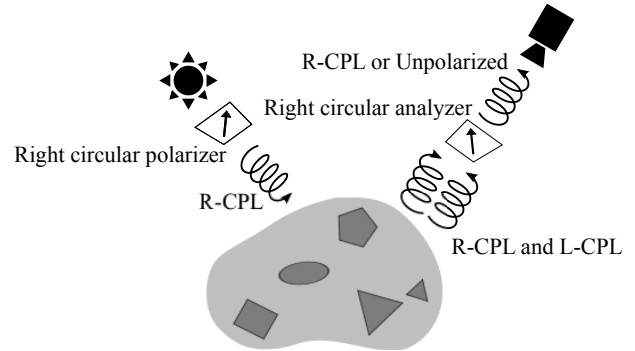


図 2 円偏光の利用．

表 1 シーン中に含まれる成分．

反射光	拡散反射	特定奥行きでの拡散反射 (FDR; Focused Diffuse Reflection)
		その他奥行きでの拡散反射 (UDR; Unfocused Diffuse Reflection)
	鏡面反射	特定奥行きでの鏡面反射 (FSR; Focused Specular Reflection)
		その他奥行きでの鏡面反射 (USR; Unfocused Specular Reflection)
散乱光	単一散乱 (SS; Single Scattering)	
	多重散乱 (MS; Multiple Scattering)	

と呼ぶ．成分行列 C を求めることにより，成分が分解される． $n = m$ のとき， n 元連立方程式となり，各成分 c_i を求めることができる． $n > m$ のとき，最小二乗法を利用することにより，各成分 c_i を求めることができる．ただし，異なる計測法の重みが線形従属関係にあるとき，解が一意に定まらないため，新たに別の計測法を追加する必要が生じる．そこで，成分行列を求めるための条件を満たしているのか，別の計測法が必要なのかを事前に判断するために，重み行列 W の階数を利用する．

$$\text{rank}(W) = m, \quad (10)$$

となるとき，重み行列 W には，線形独立な重みが m 個以上含まれるため，擬似逆行列 W^+ が存在する．したがって，成分行列 C は，以下のような線形演算により求めることができる．

$$C = SW^+. \quad (11)$$

4. 多重重み付け計測による反射・散乱光の分解

4.1 シーン中の反射・散乱光

シーン中では様々な光学現象により反射や散乱などが生じる．本研究では，反射光と散乱光に注目し，これらを成分ごとに分解する．

反射は，拡散反射と鏡面反射の 2 つに分けられる．拡散反射は物体表面において表面層へ入射した光が表面層で乱反射した後，再び大気中に現れた光であり，視線方向に依存せず一定の強度で観測される．一方，鏡面反射

は物体表面へ入射した光が大気と表面層との境界において反射した光であり，正反射方向付近で最も強く観測される．

散乱は，物体内部や濁った水などの散乱媒体中で生じ，単一散乱と多重散乱の 2 つに分けられる．単一散乱は散乱媒体中で 1 度だけ粒子に衝突した後，観測される．一方，多重散乱は散乱媒体中で複数回衝突を繰り返した後，観測される．

本研究では，上記の 4 成分を画像を構成する主要成分とする．なお，反射はシーン中の様々な奥行きに存在する物体の表面において生じる．シーン中の特定奥行きに注目したとき，反射は，さらに，特定奥行きにある物体からの反射光とその他の奥行きにある物体からの反射光に分けられる．したがって，特定奥行きに注目すれば，シーン中の成分は 6 つに細かく分けることもできる (図 1, 表 1)．

4.2 重みの定義

これまで光学系を工夫したり，演算処理を併用するなどの様々なアプローチによってシーン中の特定の成分を分離するための多くの手法が提案されてきた．一見すると，似たようなアプローチであっても条件を変えることで分離できる成分が異なる場合がある．しかし，提案手法では，各手法の重みを定義することにより，これらを統一的に扱える．本節では，シーン中の成分数 $m = 6$ と仮定した場合について，重みの各要素を次式のように定め，代表的な計測手法の重みを定義する．

$$w = (w_{\text{FDR}}, w_{\text{FSR}}, w_{\text{UDR}}, w_{\text{USR}}, w_{\text{SS}}, w_{\text{MS}})^T. \quad (12)$$

(1) 通常照明：通常照明環境において撮影された画像は全成分の単純な総和である．したがって，重みは以下のように定義でき，これが基準となる．

$$w^N = (1, 1, 1, 1, 1, 1)^T. \quad (13)$$

(2) 円偏光：円偏光を用いることにより拡散反射と鏡面反射を分離 [5] したり，後方散乱を除去 [17] [18] できることが知られている．円偏光には，その回転方向によって右円偏光と左円偏光があり，一方の回転方向の円偏光板

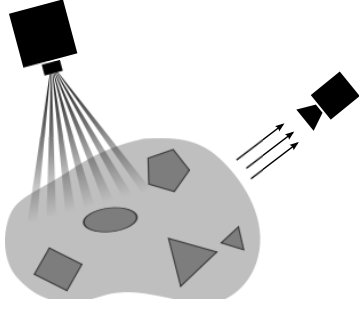


図 3 高周波パターン投影法．

は他方の回転方向の円偏光を透過しない性質を持つ．また，波動は固体や液体による反射で逆位相となるため，照明が円偏光のとき，鏡面反射および単一散乱は逆回転の円偏光となる．一方で，拡散反射や多重散乱では，乱反射や散乱の繰り返しにより偏光の性質が失われ，非偏光となる．この性質より，光源とカメラに同回転の円偏光板を装着することによって鏡面反射成分と単一散乱成分を除去することができる（図 2）．

しかし，実際の円偏光板は完全な透過および遮光の性質を持っておらず，非偏光に対する単体透過率 T_S ，同回転に対する平行透過率 T_P ，逆回転に対する直交透過率 T_C を持つ．光源とカメラに同回転の円偏光板を装着したとき，重み w^{CPL} は以下のように定義できる．

$$w^{\text{CPL}} = (T_S^2, T_S T_C, T_S^2, T_S T_C, T_S T_C, T_S^2)^T. \quad (14)$$

(3) 高周波パターン投影法：Nayar ら [4] により提案された高周波パターン投影法（図 3）はシーン中の直接成分と大域成分を分離できる．直接成分は反射光に対応し，大域成分は散乱光に対応する．したがって，直接成分，大域成分の重み $w_D^{\text{HF}}, w_G^{\text{HF}}$ は以下のように定義できる．

$$\begin{cases} w_D^{\text{HF}} = (1, 1, 1, 1, 0, 0)^T, \\ w_G^{\text{HF}} = (0, 0, 0, 0, 1, 1)^T. \end{cases} \quad (15)$$

(4) 走査型高周波パターン投影法：Mukaigawa ら [30] は高周波パターン投影法 [4] を応用し，ストライプ状のパターンとすることで，散乱媒体中の単一散乱と多重散乱を分離した．我々はさらにこれを応用し，ストライプパターンを走査することで，シーン中の単一散乱と多重散乱を分離できるように拡張し，これを走査型高周波パターン投影法と呼ぶ．

まず，プロジェクタのパターン投影面とカメラの撮像面が平行にならないようにプロジェクタとカメラを配置する．プロジェクタからストライプ状の高周波パターンを位相をずらしながら投影する．これによりシーン中のある断面における直接成分と大域成分を分離できる．このとき，断面における単一散乱は直接成分に含まれる．この手順をワンラインずつシーン全体を走査することでシーン中の直接成分と大域成分を分離する．この手法における直接成分はシーン中の反射と単一散乱，大域成分

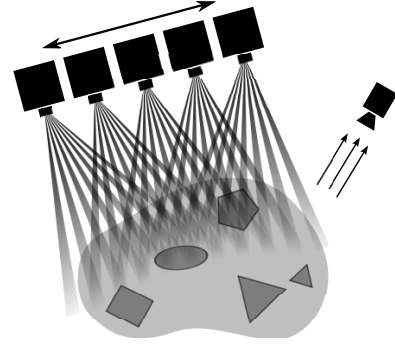


図 4 高周波合焦投影法．

はシーン中の多重散乱となる．したがって，直接成分，大域成分の重み $w_D^{\text{SHF}}, w_G^{\text{SHF}}$ は以下ようになる．

$$\begin{cases} w_D^{\text{SHF}} = (1, 1, 1, 1, 1, 0)^T, \\ w_G^{\text{SHF}} = (0, 0, 0, 0, 0, 1)^T. \end{cases} \quad (16)$$

(5) 高周波合焦投影法：Mukaigawa ら [32] が提案した高周波合焦投影法は Nayar ら [4] の高周波パターン投影法と Levoy ら [31] の合焦投影法を組み合わせた手法であり，特定奥行きを鮮明に可視化することができる．

あるプロジェクタ位置から高周波パターンを投影し，撮影する．次に，特定奥行きでパターンが一致するように投影パターンを変換して，異なるプロジェクタ位置から投影し，撮影する．これを複数回繰り返し，撮影画像の平均画像を作成する．これはプロジェクタの合成開口であり，投影の被写界深度を浅くできる．さらに，先の手順での各プロジェクタ位置から高周波パターンを反転したパターンを投影し，撮影する．その後，同様に，撮影画像から平均画像を作成する．作成された 2 枚の画像から高周波パターン投影法 [4] と同様にして，シーン中の特定奥行きでの直接成分と大域成分を分離することができる．この手法では，直接成分は特定奥行きでの反射となり，大域成分はその他奥行きでの反射とシーン中の散乱となる．よって，直接成分，大域成分の重み $w_D^{\text{FHF}}, w_G^{\text{FHF}}$ は以下のように定まる．

$$\begin{cases} w_D^{\text{FHF}} = (1, 1, 0, 0, 0, 0)^T, \\ w_G^{\text{FHF}} = (0, 0, 1, 1, 1, 1)^T. \end{cases} \quad (17)$$

(6) 円偏光高周波パターン投影法：(2) 円偏光と (3) 高周波パターン投影法を組み合わせることにより，新たな重みを作ることができる．プロジェクタとカメラに円偏光板を装着し，高周波パターン投影法を行うことで，式 (14) と式 (15) を掛け合わせた重みとなる．これを円偏光高周波パターン投影法と呼ぶ．この手法における直接成分，大域成分の重み $w_D^{\text{HFP}}, w_G^{\text{HFP}}$ は以下のように定まる．なお，重みごとの積であるため式 (14), (15) とは線形従属な関係にはならない．

$$\begin{cases} w_D^{\text{HFP}} = (T_S^2, T_S T_C, T_S^2, T_S T_C, 0, 0)^T, \\ w_G^{\text{HFP}} = (0, 0, 0, 0, T_S T_C, T_S^2)^T. \end{cases} \quad (18)$$

(7) 円偏光高周波合焦投影法：(2) 円偏光と (5) 高周波合焦投影法を組み合わせることにより、先と同様、新たな重みを作ることができる。プロジェクタとカメラに円偏光板を装着し、高周波合焦投影法を行うことで、式 (14) と式 (17) を掛け合わせた重みとなる。これを円偏光高周波合焦投影法と呼ぶ。この手法における直接成分、大域成分の重み $w_D^{\text{FHFP}}, w_G^{\text{FHFP}}$ は以下のように定まる。こちらにも同様に、式 (14), (17) とは線形従属な関係にはならない。

$$\begin{cases} w_D^{\text{FHFP}} = (T_S^2, T_S T_C, 0, 0, 0, 0)^T, \\ w_G^{\text{FHFP}} = (0, 0, T_S^2, T_S T_C, T_S T_C, T_S^2)^T. \end{cases} \quad (19)$$

4.3 4成分の分解のための重み行列

まず、シーン中の成分を拡散反射、鏡面反射、単一散乱、多重散乱の主要 4 成分に分解することを考える。このとき、成分数 $m = 4$ であるから重み行列の階数は、 $\text{rank}(W_4) = 4$ となる必要がある。そこで、前節で示した (2) 円偏光、(3) 高周波パターン投影法、(4) 走査型高周波パターン投影法を組み合わせる。各手法による重みを利用し、重み行列を作成すると以下ようになる。

$$W_4 = [w^{\text{CPL}} w_D^{\text{HF}} w_G^{\text{HF}} w_D^{\text{SHF}} w_G^{\text{SHF}}]. \quad (20)$$

このとき、 $\text{rank}(W_4) = 4$ となるため、これらの重みを利用することで分解が可能である。

4.4 5成分の分解のための重み行列

次に、シーン中の成分を特定奥行きでの拡散反射と鏡面反射、その他奥行きでの拡散反射と鏡面反射、シーン中での散乱の 5 成分に分解することを考える。このとき、特定奥行きでの反射とその他の奥行きでの反射を分離する手法が必要となる。そこで、前節で示した重み行列 W_4 に (5) 高周波合焦投影法、(6) 円偏光高周波パターン投影法、(7) 円偏光高周波合焦投影法を追加する。一方、散乱はまとめて取り扱うため、(4) 走査型高周波パターン投影法は除く。したがって、重み行列は、

$$W_5 = [w^{\text{CPL}} w_D^{\text{HF}} w_G^{\text{HF}} w_D^{\text{FHF}} w_G^{\text{FHF}} w_D^{\text{HFP}} w_G^{\text{HFP}} w_D^{\text{FHFP}} w_G^{\text{FHFP}}]. \quad (21)$$

となり、このとき、 $\text{rank}(W_5) = 5$ となるため、分解可能である。

5. 実験結果

5.1 4成分の分解

図 5 に示すシーンを対象として、シーン中の反射・散乱光の分解を行った。(a) トランプでは拡散反射が支配的であり、(b) コインではほぼ鏡面反射のみが生じる。(c) 薄めた牛乳のような濃度の低い散乱媒体では単一散乱が支配的となる。一方、(d) キャンドルのような濃度の高い散乱媒体では多重散乱が支配的となる。したがって、

このシーン中における主な成分は、拡散反射、鏡面反射、単一散乱、多重散乱の 4 成分となり、これらの分解を行った。まず、プロジェクタ (3M MPro110) から白色パターンを投影し、カメラ (Point Grey Chameleon) で撮影を行った。これを通常照明での撮影とする。理論的には、式 (20) に示した重み行列 W_4 を利用すれば成分の分解は可能であるが、最小二乗法を安定にするために式 (13) に示した w^N を追加した。(2) 円偏光による撮影では、プロジェクタ、カメラの両方に円偏光板 (Kenko SQ Circular-PL) を装着し、撮影した。なお、偏光板の特性として、単体透過率 $T_S = 0.399$ 、直交透過率 $T_C = 0.00$ とした。(3) 高周波パターン投影法では、空間的に高周波な 3 画素 $\times$ 3 画素チェッカーボード状のパターンを用いて、1 画素ずつシフトし、合計 18 回撮影を行った。(4) 走査型高周波パターン投影法では、幅が 3 画素で 3 画素おきに白と黒が反転するストライプパターンを用いて、縦方向に 1 画素ずつシフトし、6 回撮影した。これを横方向に 3 画素ずつ走査した。それらの結果を用いて、式 (11) より、4 成分の分解を行った結果を図 6 に示す。

(a) 拡散反射成分として、トランプの絵柄が強く現れている。また、キャンドルの芯も確認できる。(b) 鏡面反射成分として、コインのみが強く現れている。(c) 単一散乱成分では、キャンドルと薄めた牛乳が現れている。(d) 多重散乱成分と比較すると、薄めた牛乳は強く、キャンドルは弱いことがわかり、これより、薄めた牛乳では単一散乱が支配的であることがわかる。(d) 多重散乱成分では、キャンドルが強く現れており、多重散乱が支配的であることがわかる。(c),(d) について、トランプとコイン上に縞模様が見えるが、これは走査型高周波パターン投影法において、プロジェクタの被写界深度を厳密に考慮していないことが原因であると考えられる。また、本来、トランプとコインでは散乱現象はほぼ生じないが、散乱成分に現れている。これは、シーン中での相互反射による影響であり、相互反射を分解できる手法 [25] [26] を組み込む必要があると考えられる。

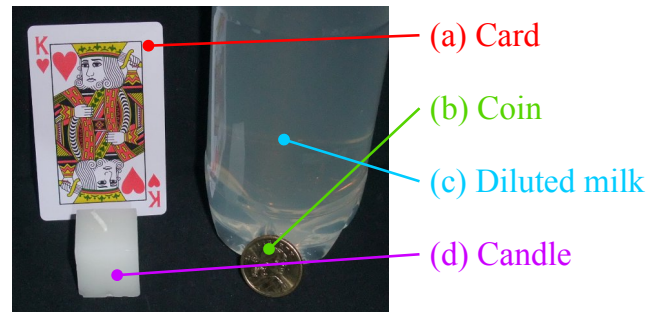


図 5 4成分に分解した対象シーン。シーン中には (a) トランプ、(b) コイン、(c) 薄めた牛乳、(d) キャンドルが置かれている。

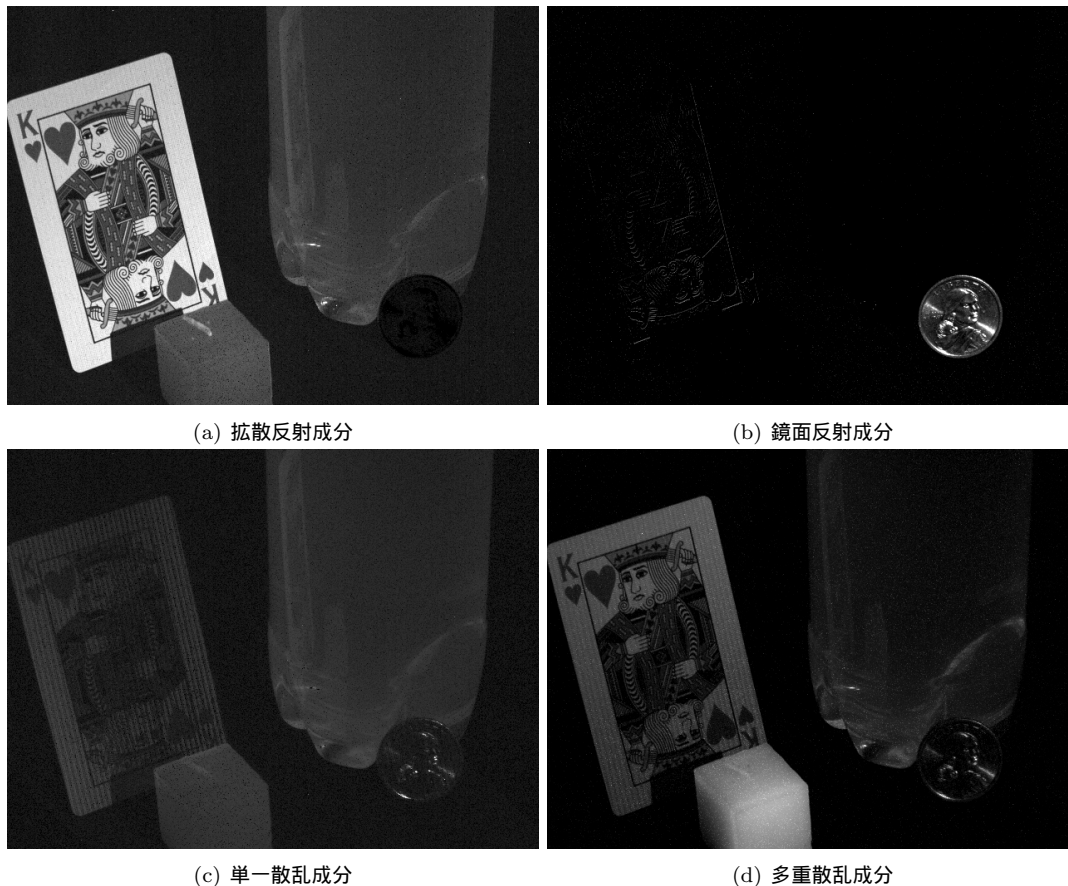


図 6 4 成分の分解の結果 .

5.2 5 成分の分解

図 7 に示すシーンを対象として，シーン中の反射・散乱光の分解を行った．(b) キングと (d) ジャックは (a) アクリルボード上にあり，また，(c) クイーンの上にもアクリルボードがある．(e) コインは (b) キングと (d) ジャックの上に置かれている．ここで，各カードは異なる奥行きにあり，カメラから近い順に (c) クイーン，(b) キン

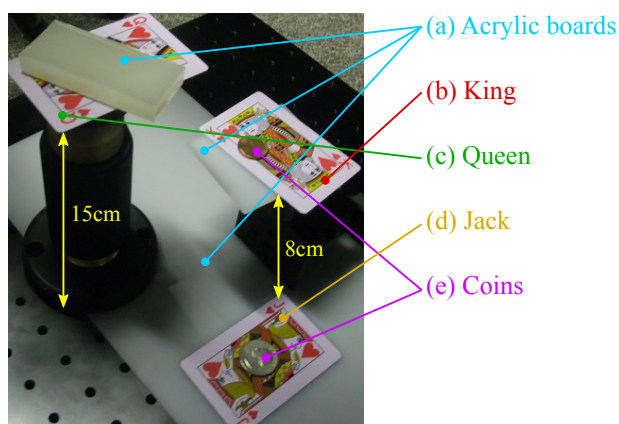
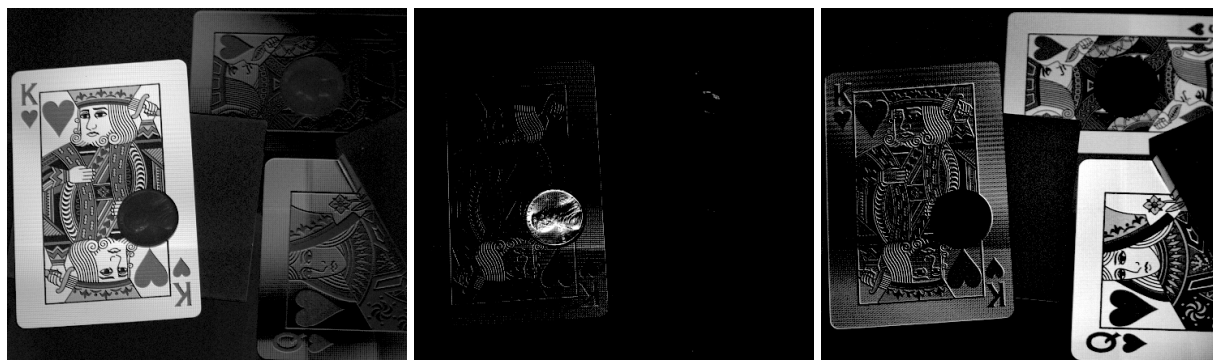


図 7 5 成分に分解した対象シーン．シーン中の対象物体は (a) アクリルボード，(b) キング，(c) クイーン，(d) ジャックのカード，およびキングとジャック上にある (e) コインである．

グ，(d) ジャックである．このシーンにおいて，(b) キングがある奥行きに注目し，成分の分解を行う．したがって，シーン中の成分は，特定奥行きでの拡散反射と鏡面反射，その他奥行きでの拡散反射と鏡面反射，シーン中での散乱の 5 成分となる．プロジェクタをロボットアーム (Mitsubishi RV-1A) に取り付け，前節と同様の手順で成分分離を行った．(5) 高周波合焦投影法では，ロボットアームによりプロジェクタを物理的に移動させ，特定奥行きで投影パターンを合焦させることで合成開口を実現した．プロジェクタの移動領域は，縦 70[mm]×横 100[mm] とし，その領域内でランダムに 30 箇所を選び，各プロジェクタ位置で高周波パターン投影法を行った．移動領域は，各プロジェクタ位置からの投影パターンがキング上で欠けないように決定した．この際に使用した投影パターンは前節と同様の 3 画素×3 画素チェッカーボード状のパターンである．(6) 円偏光高周波パターン投影法，(7) 円偏光高周波合焦投影法では，プロジェクタとカメラに円偏光板を装着した状態で (3) 高周波パターン投影法と (5) 高周波合焦投影法を行った．それらの結果を用いて，式 (11) より，5 成分の分解を行った結果を図 8 に示す．

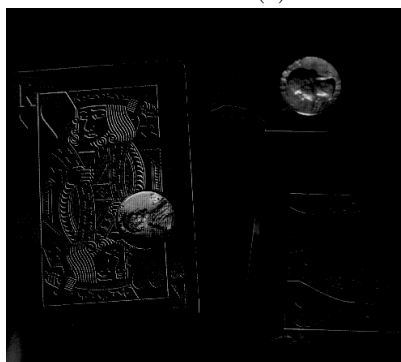
(a) 特定奥行きでの拡散反射成分では，クイーンとジャックが弱く，キングが強く現れている．一方で，(c) その他奥行きでの拡散反射成分では，クイーンとジャッ



(a) 特定奥行きでの拡散反射成分

(b) 特定奥行きでの鏡面反射成分

(c) その他奥行きでの拡散反射成分



(d) その他奥行きでの鏡面反射成分



(e) シーン中での散乱成分

図 8 5 成分の分解の結果 .

クが強く現れている。また，(b) 特定奥行きでの鏡面反射成分にはキング上のコインが，(d) その他奥行きでの鏡面反射成分にはジャック上のコインが確認できる。これより，奥行きごとの反射の分解は一定の効果があることがわかる。鏡面反射成分にはカードの絵柄が見えるが，これは，カードの塗料で鏡面反射が発生するためである。(d) シーン中での散乱成分にはほぼアクリルボードしか現れておらず，散乱光を分解できている。(a),(c),(d) について，本来とは違う奥行きの対象が現れてしまっているが，これは高周波合焦投影法において合成開口が小さいために被写界深度を十分に浅くできていないことが原因である。これはプロジェクタの配置領域を拡大し，被写界深度を浅くすることにより解決できる。

6. 制限

静的シーンに限定：本手法では，複数の分離手法の結果を利用するが，その全てにおいて同じ対象シーンでなければならない。したがって，本手法が扱えるシーンは静的なシーンのみであり，動的なシーンに適用することはできない。

影の取り扱い：物体が照明を遮ることによって生じる影もまた重要な光学現象である。しかし，他の成分の明るさを低下させることから，アルファブレンディングとして乗算でモデル化されることが多い。そのため，影は式(1)で表現できず，重み付け計測の枠組みに入れること

ができない。

7. まとめ

本研究では，シーン中の様々な光学現象によって生じる反射や散乱などの成分を分離する手法を統一的に扱うために，多重重み付け計測という新しい枠組みを提案した。これまでに提案されてきた様々な分離手法を特定の成分を弱める計測とみなすことで，重み付け計測として定式化し，それらを多重に組み合わせることで，統一的な枠組みの中で線形演算による成分の分解を可能とした。実験の結果，4成分の分解について，拡散反射，鏡面反射，単一散乱，多重散乱を比較的安定に分解できた。5成分の分解について，特定奥行きでの反射とその他奥行きでの反射の分解には課題が残るものの，一定の成果は得られた。

一方，本手法では，様々な分離手法を統合する際に，それぞれの信頼性を考慮していない。そのため，精度の低い手法を組み込んでしまうと最終的な分解結果が改悪されてしまう場合がある。

今後の課題として，分解結果の定量的な評価が必要である。また，本手法は，反射・散乱の分解の他にも相互反射の分解などにも適用できる。さらに，フォトメトリ分野のみでなく，成分の分解を扱う様々な計測分野に応用でき，その汎用性を示すことも重要である。

文献

- [1] N.G. Alldrin and D.J. Kriegman, "Toward Re-

- constructing Surfaces With Arbitrary Isotropic Reflectance: A Stratified Photometric Stereo Approach", *Proc. ICCV2007*, pp. 1–8, 2007.
- [2] T. Higo, Y. Matsushita, and K. Ikeuchi, "Consensus Photometric Stereo", *Proc. CVPR2010*, pp. 1157–1164, 2010.
 - [3] Y. Mukaigawa, Y. Ishii, and T. Shakunaga, "Analysis of Photometric Factors based on Photometric Linearization", *JOSA A*, Vol. 24, No. 10, pp. 3326–3334, 2007.
 - [4] 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.
 - [5] L.B. Wolff and T.E. Boult, "Constraining Object Features using a Polarization Reflectance Model", *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 13, No. 7, pp. 635–657, 1991.
 - [6] S.A. Shafer, "Using Color to Separate Reflection Components", *Color Research & Application*, Vol. 10, No. 4, pp. 210–218, 1985.
 - [7] G. Klinker, S. Shafer, and T. Kanade, "The Measurement of Highlights in Color Images", *IJCV*, Vol. 2, No. 1, pp. 7–32, 1988.
 - [8] Y. Sato and K. Ikeuchi, "Temporal-color Space Analysis of Reflection", *JOSA A*, Vol. 11, No. 7, pp. 2990–3002, 1994.
 - [9] Y. Sato, M. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Object Shape and Reflectance Modeling from Observation", *Proc. SIGGRAPH'97*, pp. 379–387, 1997.
 - [10] R.T. Tan and K. Ikeuchi, "Separating Reflection Components of Textured Surfaces using a Single Image", *Proc. ICCV2003*, pp. 870–877, 2003.
 - [11] S.K. Nayar, X.S. Fang, and T. Boult, "Separation of Reflection Components using Color and Polarization", *IJCV*, Vol. 21, No. 3, pp. 163–186, 1997.
 - [12] S. Lin and S.W. Lee, "Detection of Specularity using Stereo in Color and Polarization Space", *CVIU*, Vol. 65, No. 2, pp. 336–346, 1997.
 - [13] K. Ikeuchi and K. Sato, "Determining Reflectance Properties of an Object using Range and Brightness Images", *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 13, No. 11, pp. 1139–1153, 1991.
 - [14] S. Umeyama and G. Godin, "Separation of Diffuse and Specular Components of Surface Reflection by use of Polarization and Statistical Analysis of Images", *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 26, No. 5, pp. 639–647, 2004.
 - [15] K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, "Determining Reflectance Parameters and Illumination Distribution from a Sparse Set of Images for View-dependent Image Synthesis", *Proc. ICCV2001*, pp. 599–606, 2001.
 - [16] S. Mallick, T. Zickler, P. Belhumeur, and D. Kriegman, "Specularity Removal in Images and Videos: A PDE Approach", *Proc. ECCV2006*, pp. 550–563, 2006.
 - [17] G.D. Gilbert and J.C. Pernicka, "Improvement of Underwater Visibility by Reduction of Backscatter with a Circular Polarization Technique", *Applied Optics*, Vol. 6, No. 4, pp. 741–746, 1967.
 - [18] T. Treibitz and Y.Y. Schechner, "Active Polarization Descattering", *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 31, No. 3, pp. 385–399, 2009.
 - [19] Y.Y. Schechner, S.G. Narasimhan, and S.K. Nayar, "Polarization-based Vision through Haze", *Applied Optics*, Vol. 42, No. 3, pp. 511–525, 2003.
 - [20] S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, "Vision and the Atmosphere", *IJCV*, Vol. 48, No. 3, pp. 233–254, 2002.
 - [21] S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, "Contrast Restoration of Weather Degraded Images", *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 25, No. 6, pp. 713–724, 2003.
 - [22] J. Kim, D. Lanman, Y. Mukaigawa, R. Raskar, "Descattering Transmission via Angular Filtering", *Proc. ECCV2010*, pp. 86–99, 2010.
 - [23] C. Fuchs, M. Heinz, M. Levoy, H.P. Seidel, and H.P.A. Lensch, "Combining Confocal Imaging and Descattering", *Computer Graphics Forum*, Vol. 27, No. 4, pp. 1245–1253, 2008.
 - [24] M. Gupta, S.G. Narasimhan, and Y.Y. Schechner, "On Controlling Light Transport in Poor Visibility Environments", *Proc. CVPR2008*, pp. 1–8, 2008.
 - [25] S.M. Seitz, Y. Matsushita, and K.N. Kutulakos, "A Theory of Inverse Light Transport", *Proc. ICCV2005*, pp. 1440–1447, 2005.
 - [26] J. Bai, M. Chandraker, T.T. Ng, and R. Ramamoorthi, "A Dual Theory of Inverse and Forward Light Transport", *Proc. ECCV2010*, pp. 294–307, 2010.
 - [27] T.P. Wu and C.K. Tang, "Separating Specular, Diffuse, and Subsurface Scattering Reflectances from Photometric Images", *Proc. ECCV2004*, pp. 419–433, 2004.
 - [28] S. Lin and S.W. Lee, "An Appearance Representation for Multiple Reflection Components", *Proc. CVPR2000*, pp. 105–110, 2000.
 - [29] B. Lamond, P. Peers, A. Ghosh, and P. Debevec, "Image-based Separation of Diffuse and Specular Reflections using Environmental Structured Illumination", *Proc. ICCP2009*, pp. 1–8, 2009.
 - [30] Y. Mukaigawa, Y. Yagi, and R. Raskar, "Analysis of Light Transport in Scattering Media", *Proc. CVPR2010*, pp. 153–160, 2010.
 - [31] M. Levoy, B. Chen, V. Vaish, M. Horowitz, I. McDowall, and M. Bolas, "Synthetic Aperture Confocal Imaging", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 825–834, 2004.
 - [32] Y. Mukaigawa, S. Tagawa, J. Kim, R. Raskar, Y. Matsushita, and Y. Yagi, "Hemispherical Confocal Imaging using Turtleback Reflector", *Proc. ACCV2010*, pp. 336–349, 2010.