

2023 年度修士論文

表面粗さを考慮した薄膜干渉の
スペクトラルレンダリング

上中 喜生

Kaminaka Yoshiki

指導教員	金田 和文	教授
	林 雄介	教授
	檜垣 徹	准教授
	Bisser Raytchev	准教授

2024 年 2 月 6 日

広島大学大学院先進理工系科学研究科
先進理工系科学専攻 情報科学プログラム
ビジュアル情報学研究室

概要

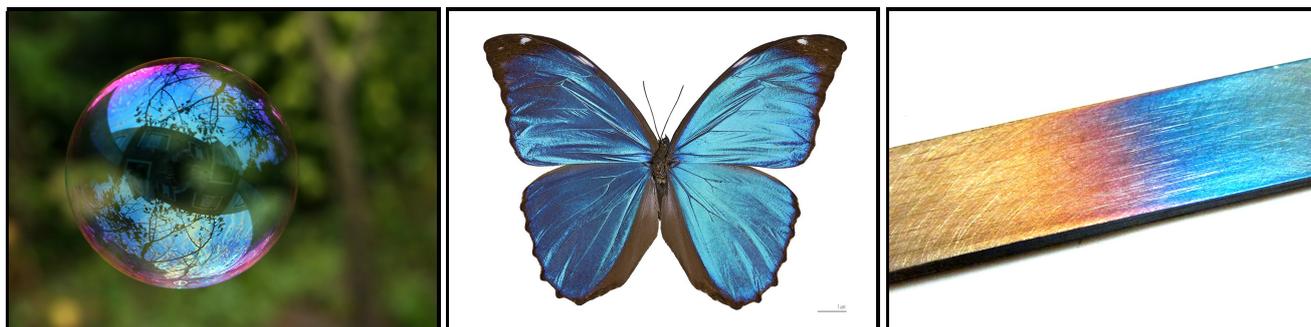
シャボン玉やタマムシなどで観察される薄膜干渉は光の波としての性質により生じる光学現象で、コンピュータグラフィックス (CG) で正確に表示するにはスペクトラルレンダリングと分光反射モデルが必要である。特に、幅広い材質表現に対応することは重要で、表面粗さを考慮した薄膜干渉の分光反射モデルが既に提案されている。しかし、既存のモデルでは物体表面で生じる多重散乱が考慮されておらず、粗い物体表面ではエネルギーの損失が生じる。また、タマムシは 12~20 層程度の多層構造を持つが、既存手法では計算量が層数に依存するため従来の多層膜干渉の表示モデルでは効率が悪い。本研究では、多層膜干渉計算の高速化と多重散乱を考慮した薄膜干渉の分光反射モデルを提案する。まず、生物分野で開発された Huxley の手法を利用することで周期的な多層構造による薄膜干渉を高速に計算する手法を提案する。そして、物体表面が V 型溝の微小面から構成されると仮定し、多重散乱を考慮した反射モデルと薄膜干渉モデルを統合することで、薄膜干渉と多重散乱の両方を考慮する。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の目的と貢献	2
1.2 本論文の構成	3
第 2 章 背景	4
2.1 BRDF	4
2.1.1 完全鏡面 BRDF	5
2.1.2 マイクロファセット BRDF	5
2.2 薄膜干渉	8
第 3 章 多層膜干渉モデル	9
3.1 はじめに	9
3.2 関連研究	10
3.2.1 単層膜モデル	10
3.2.2 多層膜モデル	10
3.3 提案手法	11
3.3.1 周期的多層構造の反射係数	12
3.3.2 全体の反射率の計算	12
3.3.3 計算の高速化	13
3.4 実験と結果	14
3.4.1 薄膜パラメータの変化による表示結果の比較	14
3.4.2 多層膜干渉の計算時間の比較	15
3.5 まとめと今後の課題	16
第 4 章 表面粗さを考慮した薄膜干渉のレンダリング	17
4.1 はじめに	17
4.2 関連研究	18
4.2.1 マイクロファセットモデル	18
4.2.2 表面粗さを考慮した薄膜干渉のレンダリング	19
4.2.3 提案手法と既存手法の相違点	19
4.3 多重散乱マイクログラファセットモデル	19
4.4 提案手法	21
4.4.1 物体表面で生じる光の相互作用	21
4.4.2 多層膜モデル	21

4.4.3	計算の高速化	23
4.5	実験と結果	24
4.5.1	単散乱と多重散乱の比較	24
4.5.2	膜厚の変化による表示結果の比較	24
4.5.3	表面粗さの変化による表示結果の比較	25
4.5.4	多重散乱の色合いへの影響の比較	27
4.6	まとめと今後の課題	29
第5章	結論	30
	謝辞	31

第 1 章 序論



Credit: Brocken Inaglory and Alvesgaspar(CC BY-SA 3.0), Didier Descouens(CC BY-SA 4.0), Zaereth(CC0)

図 1: 干渉現象により発色を示す実世界の物体の写真。左: 非常に薄い膜からなるシャボン玉は薄膜干渉により虹色の発色を示す [1]。中央: 鱗粉に微細な多層構造を持つモルフォチョウは干渉により美しい青色の発色を示す [2]。右: 表面を加熱した鋼は酸化膜が形成され焼戻し色として知られる発色を示す [3]。これらの干渉現象を CG で正確に表示するには波動光学に基づく反射モデルと光の波長ごとに照明計算を行うスペクトラルレンダリングが必要である。

CG (コンピュータグラフィックス) の物理ベースレンダリングは光と物質の相互作用を物理法則に基づいてモデル化することで写実的な画像を生成する手段である。物理ベースレンダリングは自動車などの工業製品の外観シミュレーションや、映画やゲームなどの娯楽産業の写実的な画像生成に利用されている。このような写実的な画像生成において、様々な光学現象に対応することは重要である。

本研究では、光学現象として薄膜干渉に着目する。薄膜干渉は光の波としての性質により生じる光学現象で、可視光域程度の厚さの薄膜構造を持つ物体で観察される。このような薄膜構造を持つ物体では、薄膜内に入射した光が、光の通過経路の違いにより位相差が生じ、それらが重ね合わさり、特定の波長の光が強めあったり弱めあったりする。そのため、しばしば、観察する方向や光の入射方向によって反射光の色合いや強度が変化する独特の発色 (干渉色) を示す。図 1 に干渉現象により発色する実世界の物体を示す。干渉現象による発色はモルフォチョウやタマムシなどの昆虫や酸化膜を持つ金属などの自然物から反射防止膜や光学フィルタなどの工業製品まで様々な物体で観察される。このような発色は光の入射方向によって変化するため、設計図等のデータから外観を予測することは難しく、CG で正確に表示することは重要な課題である。薄膜干渉のような波長依存性の高い光学現象を CG で正確に表示するには、可視光域の波長を密にサンプリングして、波長ごとに照明計算を行うスペクトラルレンダリングと、物体表面の波長ごとの反射特性を記述した分光反射モデルが必要である。そして、幅広い材質に対応するためには表面粗さ・多層構造・薄膜内の光の吸収などの複数要素の考慮が不可欠である。特に、モルフォチョウやタマムシは 12~20 層程度の周期的な多層構造を持つが、既存手法では計算量が層数に依存するため従来の多層膜干渉の表示モデルでは効率が悪い。



Credit: pbrt-v3(model), Bernhard Vogel(HDR texture)

図 2: 金材質の Dragon モデルを単散乱のみを考慮したマイクロファセットモデルを用いてレンダリングした表示結果. 右に行くほど表面粗さが大きくなるように設定した. 表面粗さが大きくなるにつれて薄暗い表示結果になっており, 見た目に一貫性がない. (シーンは文献 [4] に基づく)

物理ベースレンダリングでは, 物体表面の反射特性は双方向反射率分布関数 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function) で表現される. 代表的な BRDF モデルは, 物体表面を微小面の集合として構成するマイクロファセットモデルで, 金属などの表面粗さを持つ材質を表現するモデルとして広く利用されている. しかし, 通常のマイクロファセットモデルでは幾何光学を仮定しているため, 波動光学に基づく光の干渉現象は考慮されていない. マイクロファセットモデルを拡張することで, 表面粗さを考慮した薄膜干渉モデルも提案されているが, 微小面で生じる多重散乱の影響を考慮しておらず, 粗い物体表面ではエネルギーの損失が生じる. 図 2 に異なる表面粗さを持つ金材質の Dragon モデルを単散乱のみを考慮したマイクロファセットモデルを用いてレンダリングした表示結果を示す. 表面粗さは右に行くほど大きくなるように設定した. 表面粗さが小さい場合 (左側) は光沢が観察されるが, 表面粗さが大きくなるにつれて薄暗く鈍い外観になっており, 見た目に一貫性がない. この問題を解決するために, 近年, 多重散乱を考慮したマイクロファセットモデルが研究されている. しかし, 通常のマイクロファセットモデルと同様に波動光学に基づく光の干渉現象はほとんど考慮されていない.

1.1 本研究の目的と貢献

本研究の目的は, 多層膜干渉計算の高速化と表面粗さを考慮した薄膜干渉の分光反射モデルの開発である. 前述のとおり, 既存の多層膜干渉の表示モデルでは計算量が層数に依存しており効率が悪い. 本研究では, モルフォチョウやタマムシなどの多層構造を持つ生物の多くが周期的な構造を持つことに着目し, 生物分野で開発された Huxley の手法 [5] を利用することで, 多層膜干渉を高速に計算できるモデルを開発する. また, 表面粗さを考慮した薄膜干渉モデルは既に開発されているが, 粗い物体表面ではエネルギーの損失が生じるため薄暗い表示結果になってしまう. 本研究では, 物体表面が V 型溝の微小面から構成されると仮定し, 多重散乱を考慮したマイクロファセットモデル [6, 4] と薄膜干渉モデルを統合することで, 粗い物体表面であっても薄膜干渉を物理的に正

しく表示できる分光反射モデルを開発する。さらに、薄膜干渉は光の入射方向によって反射光の色合いや強度が変化するため、多重散乱による色合いの変化が生じると考えられる。金属材質を対象とした従来の多重散乱マイクロファセットモデルと薄膜干渉を考慮するように拡張した提案手法の表示結果を比較することで、薄膜干渉の多重散乱では色合いが変化することを示す。本研究の貢献は次のとおりである。

1. Huxley の手法を CG のレンダリングに導入
2. 多重散乱を考慮したマイクロファセットモデルと薄膜干渉モデルを統合
3. 多重散乱による薄膜干渉の色合いの変化の表示

1.2 本論文の構成

本論文は 5 章から構成される。第 1 章では、序論として本研究の目的を述べた。第 2 章では、本研究を述べる上で重要となるマイクロファセットモデルと薄膜干渉現象について述べる。第 3 章では、Huxley の手法を用いた多層膜モデルについて述べ、第 4 章では薄膜干渉を考慮するように拡張した多重散乱マイクロファセットモデルについて述べる。最後に、第 5 章で本研究についてまとめる。

第 2 章 背景

本章では、本研究を述べる上で重要となる背景知識について述べる。2.1 節では、物体表面の反射特性を記述した双方向反射率分布関数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) について説明する。その後、表面粗さを持つ物体表面の反射をモデル化したマイクロファセット BRDF について説明する。2.2 節では薄膜干渉現象について説明する。なお、特に言及しない場合、光の方向は物体表面から離れる方向を正とする。

2.1 BRDF

物理ベースレンダリングでは、物体表面の反射特性は BRDF で表現される。物体表面上の任意の点 \mathbf{x} における BRDF f_r は、入射方向 \mathbf{i} から入射する放射照度 E_i と出射方向 \mathbf{o} へ出射する放射輝度 L_o の比により定義される。

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{dL_o(\mathbf{o})}{dE_i(\mathbf{i})} = \frac{dL_o(\mathbf{o})}{L_i(\mathbf{i})(\mathbf{i} \cdot \mathbf{n})d\mathbf{i}} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{n} は点 \mathbf{x} での法線である。

物理法則に基づく BRDF は相反性とエネルギー保存則を満たす。相反性とは、入射方向と出射方向のペアを入れ替えても BRDF の値が変わらない性質である。

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = f_r(\mathbf{o}, \mathbf{i}) \quad (2)$$

エネルギー保存則とは、出射光のエネルギーの総和が入射光のエネルギーの総和を超過しない制約である。すなわち、任意の入射方向 \mathbf{i} について、次式が成立する。

$$\int_{\Omega} f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) |\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}| d\mathbf{o} \leq 1 \quad (3)$$

ここで、 Ω は半球で定義されるすべての方向である。

BRDF は物体表面の反射特性を記述した局所的な照明モデルである。レンダリングでは光源が放つ光が物体表面を經由して視線方向まで伝搬する大域的な照明計算を行うことで画像を生成する。法線 \mathbf{n} の物体表面の点 \mathbf{x} から出射方向 \mathbf{o} へ出射する放射輝度 L_o の照明計算は、シーン中のすべての方向 Ω から点 \mathbf{x} に入射する放射輝度 L_i と BSDF 項 $f_r |\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}|$ の積の積分により計算できる。

$$L_o(\mathbf{o}) = \int_{\Omega} L_i(\mathbf{i}) f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) |\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}| d\mathbf{i} \quad (4)$$

CG の写実的な画像生成の主な課題は、式 (4) の積分方程式を効率よく計算することと、式 (1) の BRDF を実世界に忠実にモデル化することである。本研究の目的は薄膜構造を持つ物体による干渉現象を正確に表示することである。そのため、以降は実世界の反射特性のモデル化に焦点を当てて説明する。

2.1.1 完全鏡面 BRDF

水面や研磨された金属など表面が非常に滑らかな物体は鏡のような反射特性を持つ。このような物体表面は、入射方向 \mathbf{i} に対する出射方向 \mathbf{o} が正反射方向 \mathbf{r} に一意に定まる完全鏡面としてモデル化できる。完全鏡面の BRDF は次式で定義される [7]。

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = F(\mathbf{r}) \frac{\delta(\mathbf{o} - \mathbf{r})}{|\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}|}, \quad (5)$$

ここで、正反射方向 \mathbf{r} は、物体表面の法線 \mathbf{n} と入射方向 \mathbf{i} から次式で求まる。

$$\mathbf{r} = -\mathbf{i} + 2(\mathbf{i} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}, \quad (6)$$

$F(\mathbf{r})$ は物体表面の正反射方向 \mathbf{r} への反射率である。また、 δ はディラックのデルタ関数で、出射方向 \mathbf{o} と正反射方向 \mathbf{r} が一致しない場合には BRDF はゼロとなる*¹。

滑らかで均質な境界面では、物体表面の反射率 $F(\mathbf{r})$ は境界面での電磁波の振る舞いを記述するフレネルの式により求まる。屈折率 n_i の媒質と屈折率 n_j の媒質の境界面が与えられると、入射電磁波と反射電磁波の振幅の比を表すフレネル反射係数 r は次式で求まる。

$$r_{\parallel} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}, \quad r_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \quad (7)$$

ここで、 \parallel と \perp はそれぞれ、入射面に平行な成分と垂直な成分を表す。 θ_i と θ_j はそれぞれ、屈折率 n_i の媒質と屈折率 n_j の媒質への屈折角である。

反射係数は振幅の比を表すため、絶対値の二乗をとることでエネルギー比が求まる。一般に自然光には偏光が均等に含まれていることから、光の入射面に平行な成分 (\parallel) と垂直な成分 (\perp) が同一の割合で存在するとみなせる。以上より、境界面での反射率を表すフレネル反射率 $F(\mathbf{r})$ は次式となる。

$$F(\mathbf{r}) = \frac{|r_{\parallel}|^2 + |r_{\perp}|^2}{2} \quad (8)$$

電気を通しにくい誘電体の場合は媒質中で光の吸収が生じないが、電気をよく通す導体 (金属) の場合、媒質中で光の吸収が生じる*²。このような光の吸収の効果は屈折率に虚部を加えることで考慮することができる [8]。吸収成分を持つ媒質の屈折率 n は虚数単位 i を用いて実部 η と虚部 κ による複素屈折率で表される。

$$n = \eta + i\kappa \quad (9)$$

2.1.2 マイクロファセット BRDF

完全鏡面 BRDF は非常に滑らかな物体表面の反射をモデル化できるが、実世界の多くの物体表面は完全鏡面で説明できない反射特性を持つ。金属などの粗い物体表面では、入射方向 \mathbf{i} に対する

*¹ 完全鏡面 BRDF のデルタ関数の厳密な取り扱いについては文献 [7] の 8.2 節や 14.1.3 節が詳しい

*² レンダリングでは電気を通しにくい物質を誘電体と、電気を通しやすい物質を導体と分類することが多い。

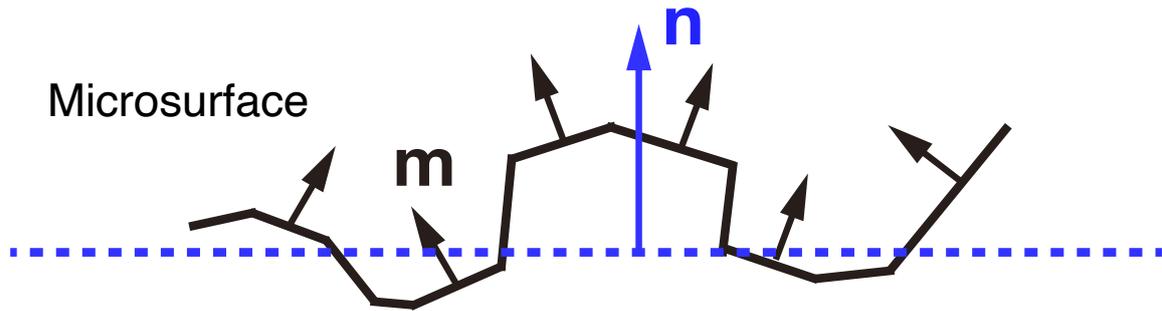


図 3: 物体表面とマイクロサーフェイス (文献 [9] を基に作成). 破線は物体表面, 実線はマイクロサーフェイスを表す. マイクロファセットモデルでは, 物体表面を傾きが異なる微小面の集合としてモデル化する.

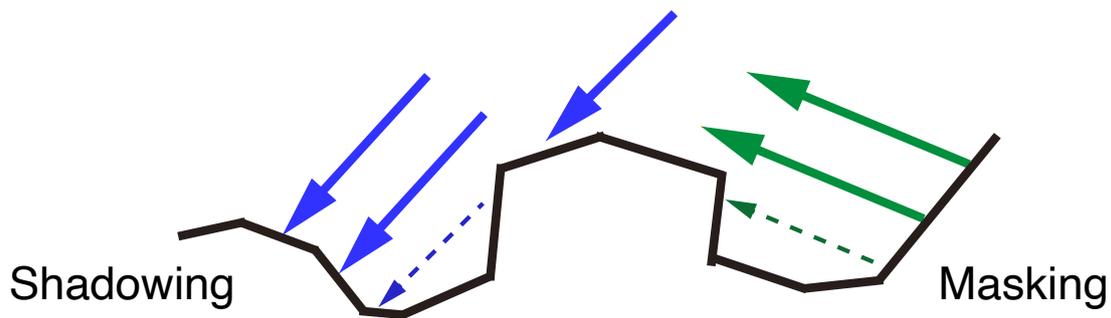


図 4: 微小面のシャドウイングとマスキング (文献 [9] を基に作成).

出射方向 \mathbf{o} が分布を持つ. このような反射特性の記述に, 物体表面をランダムに分布する微小面の集合としてモデル化するマイクロファセットモデルが利用されている.

マイクロファセットモデルに基づく BRDF は鏡面反射光のピークが正反射方向から少しずれるオフスペキュラー効果を記述するモデルとして, 光学分野で提案され, その後, CG 分野に導入された [10, 11, 12]. マイクロファセットモデルでは, 物体表面を法線分布関数に従い分布する微小面から構成されるマイクロサーフェイスとしてモデル化する. 図 3 に物体表面 (破線) とマイクロサーフェイス (実線) の関係を示す. マイクロファセットモデルでは, 法線 \mathbf{n} の物体表面をそれぞれ異なる法線 \mathbf{m} を持つ微小面の集合としてモデル化する. そして, 物体表面で生じるマクロなスケールでの光の散乱は, マイクロサーフェイスからの光の散乱の集まりとして統計的に定義される. 通常, マイクロファセットモデルに基づく BRDF は, 幾何光学のみに基づき, 微小面が完全鏡面であるという仮定と単散乱のみをモデル化するという制約の下, 次式で定義される [13].

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{D(\mathbf{h})G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{h})F(\mathbf{i}, \mathbf{h})}{4|\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}||\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} \quad (10)$$

ここで, \mathbf{h} は入射方向 \mathbf{i} と出射方向 \mathbf{o} のハーフベクトルで, $\mathbf{h} = \frac{\mathbf{i} + \mathbf{o}}{\|\mathbf{i} + \mathbf{o}\|}$ で定義される. D は微小面の法線分布関数で, ハーフベクトルにより評価される. G はシャドウイングマスキング関数で, 図 4

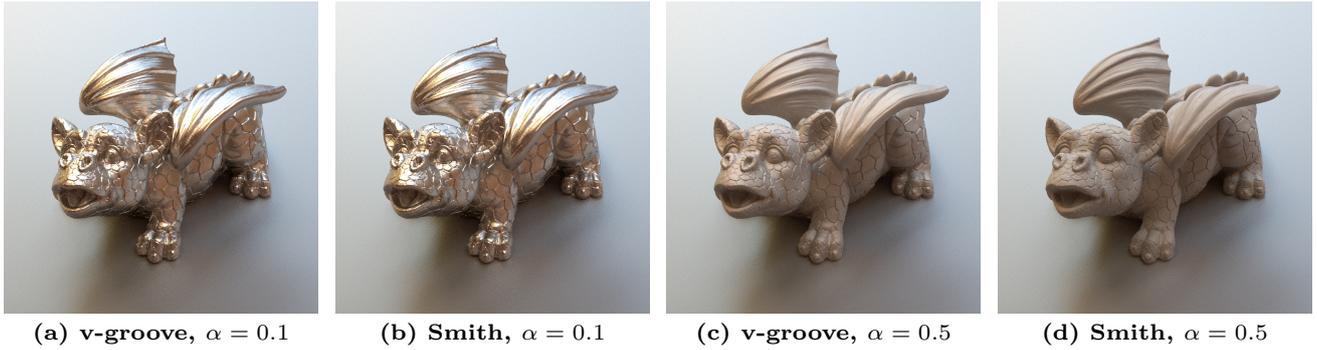


図 5: チタン材質の Dragon モデルを v-groove モデル (a)(c) と Smith モデル (b)(d) を用いてレンダリングした表示結果.

に示すような各微小面による光の遮蔽の影響を表す. F はフレネル項で, 微小面の反射特性を表す.

法線分布関数 法線分布関数 $D(\mathbf{m})$ は法線 \mathbf{m} を持つ微小面の面積分布を表す関数である. 式 (10) では, ハーブベクトル \mathbf{h} の面積分布を評価しているが, これは \mathbf{i} 方向から入射した光を \mathbf{o} 方向に反射する微小面の面積分布を表している. 代表的な法線分布関数は回転楕円体状の分布である Trowbridge-Reitz(GGX) 分布 [14, 13] で, 次式で定義される.

$$D(\mathbf{m}) = \frac{\alpha^2}{\pi \cos^4 \theta_m (\alpha^2 + \tan^2 \theta_m)^2} \quad (11)$$

ここで, θ_m は微小面の法線 \mathbf{m} と物体表面の法線 \mathbf{n} のなす角度で, α は表面粗さを表すパラメータである.

シャドウイングマスキング関数 シャドウイングマスキング関数 G は図 4 に示すような各微小面による光の遮蔽の影響を表す. シャドウイングマスキング関数は法線分布 D からは一意に定まらず, マイクロサーフェイスの形状と関連付けることで定義される. 物理的にもっともらしい性質を満たすマイクロサーフェイスは V 型溝から構成される v-groove モデル [10] と微小面の傾きと高さが独立に分布する Smith モデル [15] で, それぞれ異なる関数 G を定義する [16]. 図 5 に, 各マイクロサーフェイスモデルを用いて表面粗さの異なるチタン材質の Dragon モデルをレンダリングした表示結果を示す. 図 5(a)(b) に示すように表面粗さが小さい場合は, 図 5(a) の v-groove モデルと図 5(b) の Smith モデルの表示結果に大きな違いは観察されない. 一方, 図 5(c)(d) に示すように表面粗さが大きい場合は, 図 5(c) の v-groove モデルの方が, 図 5(d) の Smith モデルよりも明るい表示結果になっている. これは, 表面粗さが大きくなるとシャドウイングマスキング関数による遮蔽の影響が強くなり, 両者の違いが顕著になるためである.

フレネル項 フレネル項 F は, 微小面の反射特性を表す. 通常のマикроファセットモデルでは式 (8) に示すフレネル反射率を用いる. これにより金属などの反射を物理的に正しくモデル化できる. 一方で, 娯楽産業への応用を考えると, 屈折率などの物理パラメータはアーティストによる外観の制御が難しく, 直感的に外観を制御できるモデルも開発されている [17].

2.2 薄膜干渉

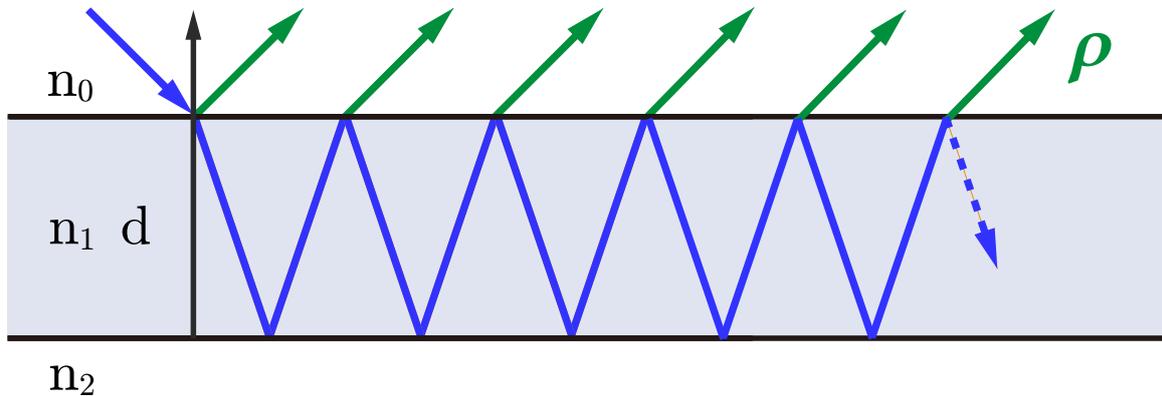


図 6: 単層薄膜系

光は電磁波の一種で波としての性質を持つ。そのため、位相の異なる光が重ね合わさると特定の波長の光が強めあったり弱めあったりする干渉現象が生じる。シャボン玉などの可視光域程度の厚さの薄膜構造を持つ物体に光が入射すると薄膜干渉による発色を示す。図 6 に示す屈折率 n_0 の媒質 (媒質 0) と屈折率 n_2 の媒質 (媒質 2) に囲まれた屈折率 n_1 で膜厚 d の薄膜 (媒質 1) で構成される薄膜系で生じる光の相互作用を考える。このような薄膜系では、入射光が薄膜の表側で反射し、反射しなかった光は薄膜内部に透過 (屈折) する。さらに、透過した光は薄膜の裏側で反射し、再び膜の表側に到達して反射と透過を繰り返す。薄膜内部での反射は無限回行われ、薄膜の外側 (媒質 0) に透過した光の総和が最終的な反射光となる。光が薄膜内部を進行することで位相が変化し、薄膜の外側に透過した光が重ね合わさることで干渉が生じる。

薄膜干渉による光の反射率を考える。媒質 0 から薄膜 (媒質 1) に入射する光の反射係数を r_{01} 、透過係数を t_{01} とする。同様に薄膜から媒質 2 に進む光の反射係数を r_{12} 、薄膜から媒質 0 に進む光の反射係数と透過係数をそれぞれ、 r_{10} と t_{10} とする。この時、薄膜内での反射をすべて足し合わせた反射係数 ρ は無限等比級数の和となる [8]。

$$\begin{aligned} \rho &= r_{01} + t_{01}r_{12}t_{10}e^{2i\Phi} + t_{01}r_{12}r_{10}r_{12}t_{10}e^{4i\Phi} + \dots \\ &= r_{01} + \frac{t_{01}r_{12}t_{10}e^{2i\Phi}}{1 - r_{12}r_{10}e^{2i\Phi}} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $e^{2i\Phi}$ は波の複素数表示である。 Φ は波長 λ の光が薄膜を通過するときに生じる位相差で、次式で表される。

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}n_1d \cos \theta_1, \quad (13)$$

ここで、 θ_1 は薄膜層への光の屈折角である。2.1 節で述べたフレネル反射率と同様に、反射係数は振幅の比を表すため、反射係数 ρ の絶対値の二乗をとることで反射率が求まる。

第 3 章 多層膜干渉モデル

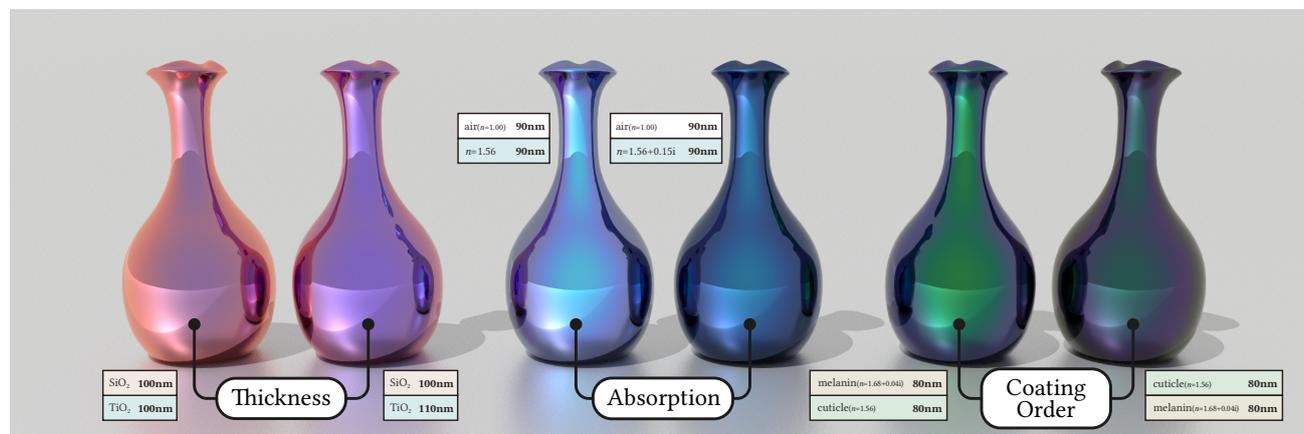


図 7: シリコン材質の Vase モデルに様々な多層膜をコーティングした物体の表示結果. 多層膜のパラメータは左から順に薄膜の膜厚, 吸収成分, コーティングの順序を変更している. 多層膜干渉はわずかなパラメータの違いで表示結果が大きく変化するが, 提案手法では任意の材質の周期的な多層膜構造による多層膜干渉を物理的に正しくかつ効率よくレンダリングすることができる.

本章では, 多層膜系で生じる薄膜干渉 (多層膜干渉) を正確かつ効率よくレンダリングする手法について述べる. 本章の内容は, SIGGRAPH Asia 2023 (Posters) での発表文献 [18] と対応している.

3.1 はじめに

薄膜干渉は光の波としての性質により生じる光学現象で, 観察する方向や光の入射方向で色に変化する美しい虹色の発色を示す. 通常, CG で薄膜干渉を正確に表示するには波動光学に基づいた分光反射モデルと波長ごとに照明計算を行うスペクトラルレンダリングが必要であるため, 一般に計算コストが高くなる. シャボン玉などの単層構造により生じる薄膜干渉を高速にレンダリングする手法は既に提案されている [19]. 一方, 多層構造を持つ物体はモルフォチョウやヤマトタマムシなどの生物から光学フィルタや反射防止膜などの工業製品まで幅広く存在する. その多くは屈折率や膜厚の異なる周期的な構造を持ち多層膜干渉による発色を示す. 特に, タマムシやモルフォチョウは 12~20 層程度の周期的な多層構造を持つが, 既存手法では計算量が層数に依存するため従来の多層膜干渉の表示モデルでは効率が悪い.

本章では生物分野で提案された Huxley の手法 [5] を用いることで, 周期的な多層構造で生じる多層膜干渉を物理的に正確かつ効率よくレンダリングする手法を提案する. そして, 既存手法と提案手法を比較することで, 提案手法では多層膜干渉をより高速に計算できることを示す. 本章の貢献は生物分野の Huxley の手法を CG 分野に導入して, 多層膜干渉をレンダリングしたことである.

3.2 関連研究

従来の CG による画像生成では幾何光学のみに基づいてレンダリングを行う。しかし、薄膜干渉を表示するには波動光学に基づいた分光反射モデルとスペクトラルレンダリングが必要である。本節では、薄膜干渉のレンダリングに関する先行研究について述べる。ただし、表面粗さを考慮するように拡張した薄膜干渉のレンダリング手法については、第 4 章で詳しく述べるため本章では触れない。

3.2.1 単層膜モデル

薄膜干渉による発色 (干渉色) は、薄膜を通過する光の位相差が原因で生じる。初期の薄膜干渉の表示に関する研究では位相差の計算が容易な単層膜を対象としていた。Smits と Meyer は薄膜内で生じる位相差を幾何学的に求めることで干渉色をレンダリングした [20]。しかし、偏光の効果や薄膜内で生じる多重反射の影響を考慮しておらず精度に難がある。同時期に Dias は多重反射を考慮して干渉色を正確にレンダリングする手法を開発した [21]。その後、ニュートンリングをレンダリングしてニュートンの観察結果と一致することが確認された [22]。

前述のとおり、薄膜干渉を表示するにはスペクトラルレンダリングが必要であるため計算コストが高い。Belcour と Barla は分光反射率と等色関数のスペクトル積分を解析的に行うことで、薄膜干渉を RGB レンダリングで高精度に表示する手法を開発した [19]。この手法では、等色関数をガウス分布でフィッティングすることにより薄膜干渉をリアルタイムで表示できる。一方で、金属や酸化膜などの屈折率が波長によって変化する材質を扱う場合は表示精度が悪くなるという問題がある。さらに、RGB レンダリングでは間接照明や波長依存性の高い光源が含まれるシーンを物理的に正しくレンダリングできない。

多層膜干渉は単層膜による薄膜干渉と比べて複雑な光学現象であるため、一般に反射率の分光分布が複雑になる。そのため、制約を設けずに、Belcour と Barla の解析的なスペクトル積分 [19] を多層膜干渉のレンダリングに直接適用することは難しい。本章の目的は、任意の材質による多層膜干渉を物理的に正確かつ効率よくレンダリングすることである。よって、スペクトラルレンダリングに焦点を絞り検討を行う。

3.2.2 多層膜モデル

多層膜干渉を波動光学に基づき、薄膜内の光の多重反射・屈折・干渉・吸収を考慮して物理的に正しく計算する手法は光学分野や構造色に関する研究などで利用されている [8]。CG 分野では再帰的に計算する手法 [23] や行列を用いて計算する転送行列法 (Transfer Matrix Method) [24, 25] がレンダリングに導入されている。これらの手法は任意の多層構造による薄膜干渉を物理的に正しくレンダリングできるが、各層ごとに計算を行うため計算時間が層数に依存する。そのため、層数が多い場合は計算効率が悪い。他にも、生物や鉱物が持つ周期的な多層構造を近似的にレンダリング

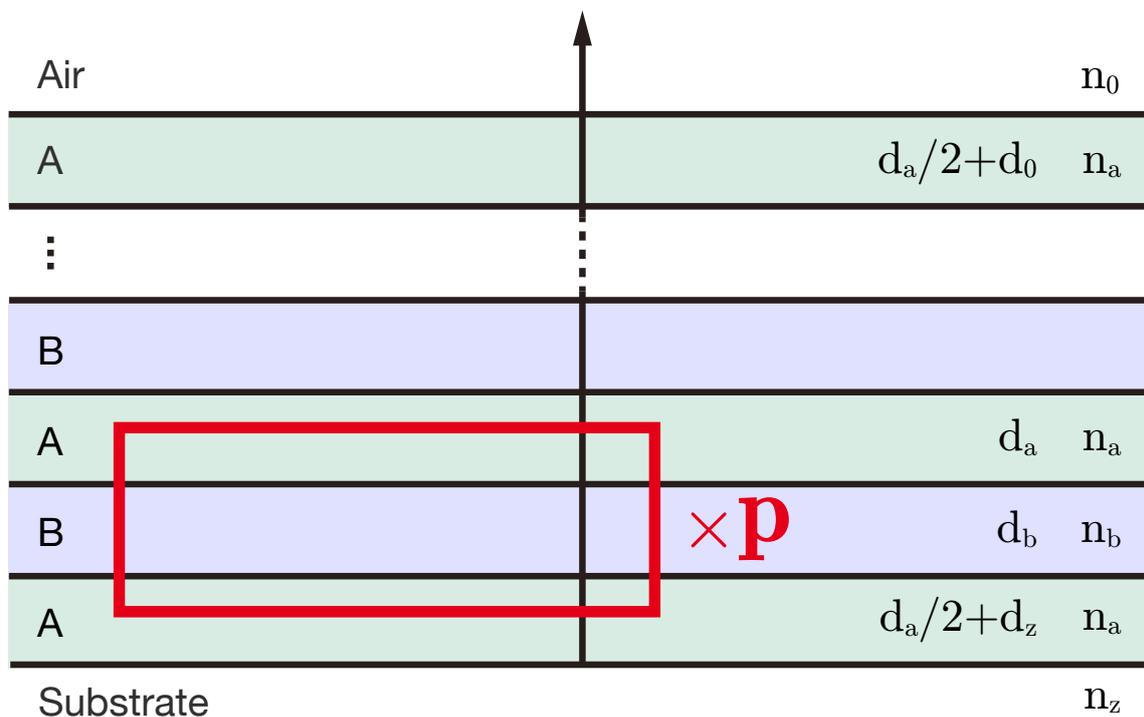


図 8: 周期的な構造を持つ多層膜系. この多層膜系では基板材質に屈折率と膜厚の異なる 2 種類の層 (A 層と B 層) が交互に p 回積層している.

する手法が開発されている [26, 27]. しかし, 薄膜内で生じる光の多重反射を考慮しておらず, 光の入射角度が大きい場合や層の屈折率の差が大きい場合は精度に難がある. さらに, 薄膜で生じる光の吸収も考慮していないため, 扱える材質に制約がある.

提案手法は周期的な構造を仮定しているが, 近似的な手法 [26, 27] と異なり薄膜の材質に制約がない. さらに, 提案手法は薄膜内で生じる多重反射や光の吸収も考慮しているため, 物理的に正しい手法 [23, 24, 25] と同等の結果をより高速にレンダリングすることができる.

3.3 提案手法

本節では Huxley の手法 [5] を利用した多層膜モデルについて述べる. スペクトラルレンダリングでは波長ごとに照明計算を行う必要があるため, 一般に計算コストが高い除算や三角関数を避けることで高速化が期待できる. 本節では, より高速に計算できるように式を整理した多層膜モデルを示す.

図 8 に示す周期的な構造を持つ多層膜系を考える. この多層膜系では基板材質 (屈折率 n_z) に膜厚と屈折率の異なる A 層 (膜厚 d_a , 屈折率 n_a) と B 層 (膜厚 d_b , 屈折率 n_b) が交互に p 回積層しており, その上から A 層が積層されている. そのため, 図 8 の赤枠で示すように膜厚が半分 ($d_a/2$) の A 層に B 層が囲まれた薄膜系 (ABA 層) が p 回繰り返されると考えることができる. また, 基

板材質にコーティングされる A 層と最上部の A 層は膜厚のオフセットとしてそれぞれ, d_z, d_0 を持つ ($d_z = d_0 = d_a/2$ の場合, A 層の膜厚は全て等しくなる). 提案手法では, 多層膜の境界面が完全鏡面で平行, 各層が均質な等方性の媒質であるという仮定の下, まず, ABA 層を p 回繰り返した周期的な多層構造の反射係数と透過係数を計算する. そして, 基板材質と入射媒質 (屈折率 n_0) を考慮して多層膜系全体の反射率を計算する.

3.3.1 周期的多層構造の反射係数

Huxley の手法では, まず, ABA 層を p 回積層した多層構造での反射係数 ρ_p と透過係数 τ_p を計算する.

$$\rho_p = \frac{h(1 - \mu^{2p})}{h^2 - \mu^{2p}}, \quad \tau_p = \frac{\mu^p(h^2 - 1)}{h^2 - \mu^{2p}}, \quad (14)$$

ここで, μ, h は次式で表される.

$$\mu = k - \sqrt{k^2 - 1}, \quad h = \frac{r^2 \sin(\Phi_a - \Phi_b) - \sin(\Phi_a + \Phi_b) - i(1 - r^2)\sqrt{k^2 - 1}}{2r \sin \Phi_b}, \quad (15)$$

ただし, k は次式で表される.

$$k = \frac{-r^2 \cos(\Phi_a - \Phi_b) + \cos(\Phi_a + \Phi_b)}{1 - r^2}, \quad (16)$$

ここで, i は虚数単位, r は B 層と A 層の境界面でのフレネル反射係数である. Φ_a と Φ_b は光が A 層と B 層を通過する時に生じる位相差で, それぞれ次式で表される.

$$\Phi_a = \frac{2\pi}{\lambda} n_a d_a \cos \theta_a, \quad \Phi_b = \frac{2\pi}{\lambda} n_b d_b \cos \theta_b, \quad (17)$$

ここで, λ は真空中の光の波長である. θ_a と θ_b はそれぞれ A 層と B 層の光の屈折角で, スネルの法則により多層系への入射角余弦 $\cos \theta_i$ から求まる.

$$\cos \theta_a = \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_a^2}(1 - \cos^2 \theta_i)}, \quad \cos \theta_b = \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_b^2}(1 - \cos^2 \theta_i)}. \quad (18)$$

3.3.2 全体の反射率の計算

次に, 基板材質からの反射と入射媒質からの入射を考慮することで多層系全体の反射係数 ρ_{total} を計算する. まず, 屈折率の n_z の基板材質による反射を考慮した多層系の反射係数 ρ_z を計算する.

$$\rho_z = \frac{\rho_p + r_z \chi e^{2i\Phi_z}}{1 - r_z \rho_p e^{2i\Phi_z}}, \quad (19)$$

ここで, r_z は基板材質と A 層の境界面でのフレネル反射係数で, Φ_z は光が膜厚 d_z の A 層を通過する場合に生じる位相差である. χ は $\tau_p^2 - \rho_p^2$ で定義され, 式 (14) より次式となる.

$$\chi = \frac{\mu^{2p} h^2 - 1}{h^2 - \mu^{2p}} \quad (20)$$

次に、屈折率 n_0 の入射媒質からの入射を考慮することで、多層系全体の反射係数 ρ_{total} を計算する。

$$\rho_{total} = \frac{r_0 + \rho_z e^{2i\Phi_0}}{1 + r_0 \rho_z e^{2i\Phi_0}}, \quad (21)$$

ここで、 r_0 は入射媒質と A 層の境界面でのフレネル反射係数で、 Φ_0 は光が膜厚 d_0 の A 層を通過する場合に生じる位相差である。

反射係数は入射電磁波と反射電磁波の振幅の比を表すため、絶対値の二乗をとることでエネルギー比が求まる。一般に自然光には偏光が均等に含まれていることから、光の入射面に平行な成分 (\parallel) と垂直な成分 (\perp) が同一の割合で存在するとみなせる。以上より、図 8 に示す多層膜系の反射率 R は次式となる。

$$R = \frac{|\rho_{\parallel total}|^2 + |\rho_{\perp total}|^2}{2} \quad (22)$$

ここで、反射率 R において、層数は μ^{2p} のみに依存する。そのため、提案手法は既存手法と異なり、層数にほとんど依存せずに多層膜干渉を計算できる。

3.3.3 計算の高速化

スペクトラルレンダリングでは可視光域の波長を密にサンプリングして波長ごとに光の強度を計算する必要がある。そのため、一般に計算コストが高い除算や三角関数を避けることで高速化が期待できる。まず、式 (19) を式 (21) に代入して整理することで除算の回数を減らす。

$$\rho_{total} = \frac{r_0(1 - r_z \rho_p e^{2i\Phi_z}) + e^{2i\Phi_0}(\rho_p + r_z \chi e^{2i\Phi_z})}{(1 - r_z \rho_p e^{2i\Phi_z}) + r_0 e^{2i\Phi_0}(\rho_p + r_z \chi e^{2i\Phi_z})} \quad (23)$$

次に、式 (15)(16) の $\Phi_a - \Phi_b$ と $\Phi_a + \Phi_b$ に関する三角関数を加法定理を利用して計算することで、三角関数の評価回数を減らす。

$$\begin{aligned} \sin(\Phi_a \pm \Phi_b) &= \sin \Phi_a \cos \Phi_b \pm \cos \Phi_a \sin \Phi_b, \\ \cos(\Phi_a \pm \Phi_b) &= \cos \Phi_a \cos \Phi_b \mp \sin \Phi_a \sin \Phi_b \end{aligned} \quad (24)$$

これらの操作により、計算コストの高い除算と三角関数の評価回数を 1 回ずつ減らすことができる。さらに、A 層の膜厚が全て等しい場合 ($d_0 = d_z = d_a/2$) は、A 層で生じる光の位相差がすべて等しくなる。

$$2\Phi_0 = 2\Phi_z = \Phi_a \quad (25)$$

オイラーの公式を利用することで指数関数の評価回数も減らすことができる。

$$e^{2i\Phi_0} = e^{2i\Phi_z} = e^{i\Phi_a} = \cos \Phi_a + i \sin \Phi_a \quad (26)$$

3.4 実験と結果

本節ではスペクトラルレンダリングに対応した物理ベースレンダラー [7] を使ってレンダリングした結果を示す。提案手法はレンダラーのプラグインを開発することで実装した。提案手法の有用性を示すために、次の実験を行った。

1. 薄膜パラメータの変化による表示結果の比較
2. 多層膜干渉の計算時間の比較

レンダリングは Intel Core i7-11700 CPU と 16GB メモリを搭載した計算機で 1 ピクセル当たりのレイの本数が 128 のパストレーシングにより行った。波長は [400nm, 700nm) の可視光域を 5nm 間隔の区間でサンプリングした。

3.4.1 薄膜パラメータの変化による表示結果の比較

多層膜系では層の材質、膜厚、層数の組み合わせによって干渉色が大きく変化する。図 7 にシリコン材質の Vase モデルに様々なパラメータの多層膜をコーティングした物体の表示結果を示す。多層膜のパラメータは左から順に薄膜の膜厚、吸収成分、コーティングの順序を変更している。

図 7 左の隣り合った 2 つの Vase モデルは A 層に SiO_2 を B 層に TiO_2 を設定し、片方だけ B 層の膜厚を 10nm 変化させてレンダリングした表示結果である。わずかな膜厚の変化だけで干渉色が大きく変化していることが観察できる。これは、 SiO_2 と TiO_2 の屈折率の差が大きいため (550nm の波長で約 0.97)、わずかな膜厚の変化で光の位相が大きく変化するためである。

図 7 中央の隣り合った 2 つの Vase モデルは A 層に空気 (屈折率 1.00) を B 層にケラチン (屈折率 1.56) を設定し、片方だけ B 層の屈折率に吸収成分 ($0.15i$) を追加してレンダリングした表示結果である。吸収成分がない場合 (左側) では明るい干渉色が観察される一方、吸収成分がある場合 (右側) では干渉色が全体的に暗くなり青色の干渉色が強調されている。これは、吸収成分を入れることにより、発色に寄与しない色の光を効果的に吸収するためである [8]。

図 7 右の隣り合った 2 つの Vase モデルは片方の A 層にメラニン (屈折率 $1.64 + 0.04i$) を B 層にケラチン (屈折率 1.56) を設定し、もう片方はコーティングの順序を変更してレンダリングした表示結果である。これらを比較すると干渉色の明るさが変化していることが観察できる。これは、多層膜のコーティング順序が変化することで、光の強めあったり弱めあったりする干渉条件が変化するためである。

提案手法は周期的な構造を仮定しているが、薄膜の材質に制約がなく、薄膜内で生じる多重反射も考慮しているため物理的に正しく多層膜干渉を計算できる。近似的な手法 [26, 27] では屈折率の差の大きい多層膜や光の吸収が生じる薄膜を扱うことができないので、図 7 に示すようなシーンを正確に表示することができない。

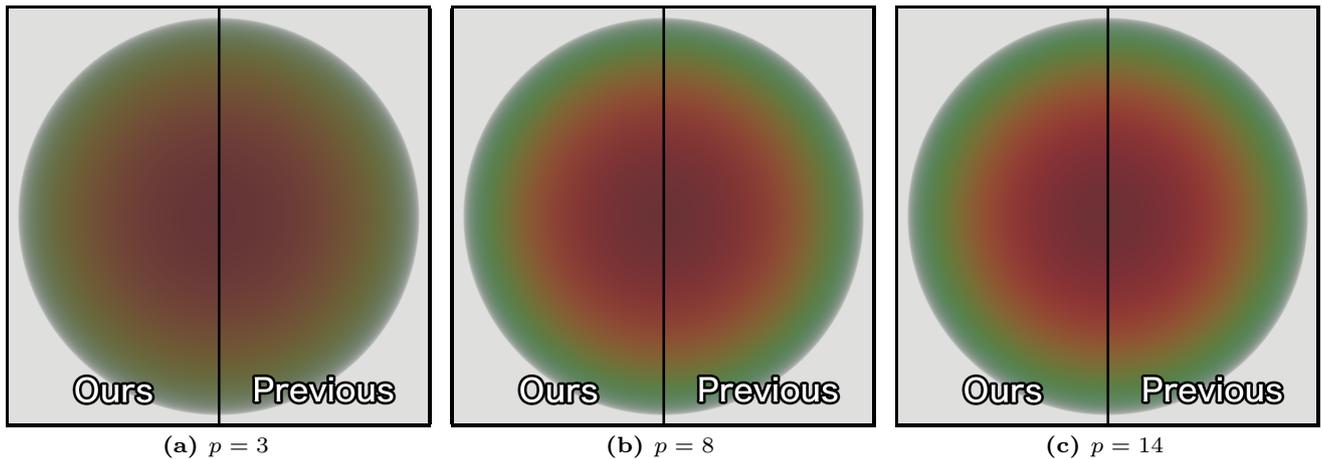


図 9: 提案手法と転送行列法 [24, 25] による表示結果の比較. 提案手法 (左側) では既存手法 (右側) と同等の表示結果をより高速にレンダリングすることができる.

表 1: 多層膜干渉のレンダリング時間の比較

	再帰計算法 [23]	転送行列法 [24, 25]	提案手法
$p = 3$	154.0s	252.4s	204.9s
$p = 8$	232.5s	355.1s	213.0s
$p = 14$	326.6s	471.9s	217.6s

3.4.2 多層膜干渉の計算時間の比較

図 9 に膜厚が 100nm のメラニン層 (屈折率 $1.68 + 0.04i$) とケラチン層 (屈折率 1.56) を交互にコーティングした球をレンダリングした表示結果を示す. 層の繰り返し回数 p について, それぞれ $p = 3, 8, 14$ に設定した. 黒線で区切られた左側が提案手法, 右側が転送行列法 [24, 25] による結果である. レンダリング結果に違いがないことから提案手法が多層膜干渉を正確にレンダリングできることがわかる.

表 1 に各手法の計算時間を示す. 既存手法 [23, 24, 25] では周期的構造について言及されていないが, 比較のため周期的構造に特化して実装を行った. また, 実装を簡単にするために, この比較では各手法で屈折率の波長分散は考慮していない. そのため, 層数が少ない場合 ($p = 3$) においては再帰計算法 [23] が提案手法よりもレンダリング時間が短かった. 一方, 層数の増加に伴い提案手法のほうが高速にレンダリングできる. これは計算量が層数にほとんど依存しないためである. このことから, 提案手法は層数が多くなるほど効率よく多層膜干渉をレンダリングできることがわかる. 周期的な多層膜構造は工業製品にも応用されており, ポリエステルとナイロン 6 からなる 61 層の多層膜構造を組み込んだ繊維が開発されている [8]. このような層数の多い構造であっても, 提案手法は層数が少ない場合とほとんど同一の時間でレンダリングできる.

3.5 まとめと今後の課題

本章では生物分野で提案された Huxley の手法 [5] を用いることで、周期的な多層構造で生じる多層膜干渉を物理的に正確かつ効率よくレンダリングする手法について述べた。多層膜干渉はわずかなパラメータの違いで表示結果が大きく変化するが、提案手法は薄膜内の光の多重反射・屈折・干渉・吸収を考慮しているため、物理的に正しくレンダリングすることができる。さらに、既存手法 [23, 24, 25] と提案手法を比較することで、層数が多い場合に既存手法と同等の表示結果をより高速にレンダリングできることを示した。これらのことから、提案手法は設計図などからでは予測が難しい多層構造を持つ工業製品のビジュアルシミュレーションへの活用が期待できる。

今後の課題としては、モデルをさらに単純化し、Belcour と Barla の解析的スペクトル積分 [19] を適用することで、多層膜干渉をリアルタイムで表示することである。一方、タマムシなどの甲虫の表面は多角形状の凹みで覆われており、多層膜も凹みに沿って湾曲していることが知られている [8]。生物の微細な構造や揺らぎを考慮してモデル化することで、自然界の干渉色をさらに正確に表示することも重要な課題である。

第 4 章 表面粗さを考慮した薄膜干渉のレンダリング



(a) 多重散乱を考慮, $\alpha = 1.0$ (b) 単散乱モデル, $\alpha = 1.0$ (c) 多重散乱を考慮, $\alpha = 1.5$ (d) 単散乱モデル, $\alpha = 1.5$

図 10: アルミニウム材質の Dragon モデルに 140nm の TiO_2 薄膜をコーティングした物体の表示結果. 単散乱と多重散乱について異なる表面粗さ α を設定してレンダリングを行った. 単散乱モデルの場合 (b)(d) では, エネルギーの損失が生じるため Dragon モデルの外観が薄暗く見える. 一方, 提案手法 (a)(c) では, 多重散乱を考慮しているためエネルギーが保存され, 鮮やかな干渉色が観察される. 提案手法では表面粗さ α が大きくなるほど, 干渉色が鮮やかになる.

本章では, 多重散乱を考慮したマイクロファセット BRDF と薄膜干渉モデルを統合することで, 表面粗さを考慮して薄膜干渉をレンダリングする手法について述べる. 本章の内容は, 画像電子学会誌での発表文献 [28] と対応している.

4.1 はじめに

第 3 章で述べた薄膜干渉モデルは物体表面を完全鏡面に限定していた. しかし, 金属や甲虫の表皮などの実世界の物体表面は完全鏡面ではなく表面粗さを持つ. そのため, 酸化膜がコーティングされた金属や多層構造を持つ甲虫などによる薄膜干渉を表示するには表面粗さを考慮したモデル化が必要である. 物理ベースレンダリングでは表面粗さを持つ物体表面の BRDF として, 物体表面を微小面の集合として構成するマイクロファセットモデルが広く利用されている. しかし, 通常のマイクロファセットモデルでは幾何光学を仮定しているため, 波動光学に基づく光の干渉現象は考慮されていない. そこで, マイクロファセットモデルを拡張することで, 薄膜干渉を考慮したモデルが提案されている. しかし, ほとんどのモデルが, 微小面で生じる多重散乱の影響を考慮しておらず, 粗い物体表面ではエネルギーの損失が生じる. そのため, これらのモデルを用いて表面粗さの大きい物体をレンダリングすると, 図 10(b)(d) に示すような薄暗い表示結果になってしまう. さらに, 金属材質と異なり, 薄膜構造を持つ材質は光の入射方向によって反射光の色合いや強度が変化する. 粗い物体表面では多重散乱による色合いの変化が生じると考えられるが, 既存手法ではそのような効果を表示することができない.

本章では, 上述のエネルギー損失と多重散乱による色合いの変化の問題を同時に解決するために多重散乱を考慮した薄膜干渉の分光反射モデルを提案する. 提案手法では物体表面が V 型溝の微小

面から構成されると仮定し，多重散乱を考慮したマイクロファセットモデル [6, 4] と薄膜干渉モデルを統合することで，薄膜干渉と多重散乱の両方を考慮する．そして，粗い物体表面に関して，提案手法と既存手法では表示結果に大きな違いがあることを示す．さらに，金属材質を対象とした多重散乱モデルと，薄膜干渉を考慮するように拡張した提案手法の表示結果を比較することで，薄膜干渉の多重散乱では色合いが変化することを示す．本研究の貢献は，(1) 多重散乱を考慮したマイクロファセットモデルと薄膜干渉モデルを統合と，(2) 薄膜干渉の多重散乱による色合いの変化の表示である．

4.2 関連研究

本節では，第 2 章で説明した単散乱マイクロファセットモデルについて概説し，多重散乱を考慮したマイクロファセットモデルについて説明する．続いて，表面粗さを考慮するように拡張した薄膜干渉のレンダリング手法について述べた後，既存手法と提案手法の相違点を述べる．

4.2.1 マイクロファセットモデル

マイクロファセットモデルでは，物体表面を法線分布関数に従い分布する微小面から構成されるマイクロサーフェイスとしてモデル化する．そして，物体表面で生じるマクロなスケールでの光の散乱は，マイクロサーフェイスからの光の散乱の集まりとして統計的に定義される．通常，マイクロファセットモデルに基づく BRDF は，幾何光学のみに基づき，微小面が完全鏡面であるという仮定と単散乱のみをモデル化するという制約の下，次式で定義される [13]．

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{D(\mathbf{h})G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{h})F(\mathbf{i}, \mathbf{h})}{4|\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}||\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} \quad (27)$$

ここで， \mathbf{h} は入射方向 \mathbf{i} と出射方向 \mathbf{o} のハーフベクトルで， $\mathbf{h} = \frac{\mathbf{i} + \mathbf{o}}{\|\mathbf{i} + \mathbf{o}\|}$ で定義される． D は微小面の法線分布関数で，ハーフベクトルにより評価される． G はシャドウイングマスキング関数で，各微小面による光の遮蔽の影響を表す． F はフレネル項で，微小面の反射特性を表す．

通常のマイクロファセットモデルでは微小面での単散乱のみをモデル化しているため，粗い物体表面においてエネルギーの損失が生じる．この問題を解決するために，近年，微小面での多重散乱を考慮したマイクロファセットモデルが研究されており，多重散乱を物理的に正しく計算する物理ベースの手法 [6, 4, 29, 30, 31, 32] と近似的に計算する手法 [33, 34, 35, 36, 37] が開発されている．物理ベースの手法では v-groove マイクロサーフェイス [10] の多重散乱を解析的に計算する手法 [6, 4] と，Smith マイクロサーフェイス [15] の多重散乱を確率的に計算する手法 [29, 30, 31, 32] がそれぞれ提案されている．これらの手法はそれぞれのマイクロサーフェイスで生じる多重散乱を正確に計算できるが，単散乱モデルと比べて計算コストが高くなる．近似的な手法では式 (27) に示す単散乱マイクロファセット BRDF によるエネルギーの損失を前計算して，レンダリング時に損失エネルギーを補填する手法 [33, 34, 35, 36] や微小面で生じる 2 回目までの散乱をモデル化する

る手法 [37] が提案されている。これらの手法は物理ベースの手法と比べて計算コストが低いですが、物理的に正しく多重散乱をモデル化していないため精度に難がある。他にも機械学習による多重散乱のモデル化 [38] や多重散乱マイクロファセットモデルと BRDF の測定データの比較 [39] も行われている。しかし、これらの研究では通常のマイクロファセットモデルと同様に幾何光学のみに基づいており、薄膜干渉や回折などの光の波としての性質は考慮されていない。そのため、薄膜構造を持つ微小面で生じる多重散乱による色合いの変化は表現されていない。

4.2.2 表面粗さを考慮した薄膜干渉のレンダリング

従来のマイクロファセットモデルは幾何光学のみに基づいてモデル化されている。しかし、薄膜干渉現象を表示するためには波動光学に基づいた分光反射モデルとスペクトラルレンダリングが必要である。Gondek らは、微細構造を明示的にモデル化したジオメトリにモンテカルロレイトレーシングを適用することで、薄膜がコーティングされた物体表面やパール材質の BRDF を計算する手法を開発した [40]。この手法は粗い物体表面での薄膜干渉を高精度にレンダリングできるが、計算コスト高いレイトレーシングによる前計算が必要がある。そこで、マイクロファセットモデルを拡張することで、表面粗さを考慮した薄膜干渉モデルが開発されている [41, 42, 19, 24]。また、粗い物体表面で生じる回折現象と薄膜干渉を組み合わせたモデルも開発されている [43, 44]。しかし、これらの手法では、薄膜内で生じる多重反射を考慮しているが、微小面で生じる多重散乱を考慮していない。そのため、粗い物体表面ではエネルギーの損失が生じる。多重散乱を拡散反射項により近似する方法もあるが、粗い物体表面での反射光は指向性を持つため、単純な拡散反射項の追加によるエネルギーの損失の補填は物理的に正しいとは言えない。さらに、薄膜干渉構造を持つ微小面では、微小面に入射する光の方向によって反射光の色合いや強度が大きく変化する。そのため、微小面間で生じる反射の繰り返し (多重散乱) により最終的な反射光の色合いが変化する。既存の薄膜干渉モデルでは単散乱のみをモデル化しているため、このような多重散乱により生じる色合いの変化を表現できない。

4.2.3 提案手法と既存手法の相違点

提案手法では、薄膜干渉の計算に既存手法と同様の多層膜モデルを採用するが、微小面で生じる多重散乱を考慮している点が既存手法と異なる。多重散乱を考慮することで、粗い物体表面でのエネルギーの損失を低減し、より鮮やかな干渉色の表示と多重散乱による色合いの変化を表現することが可能である。

4.3 多重散乱マイクロファセットモデル

提案手法は多重散乱を考慮したマイクロファセット BRDF である Lee らのモデル [6] に基づく。このモデルは図 11 に示すように、マイクロサーフェイスが V 型溝の微小面である v-groove の集

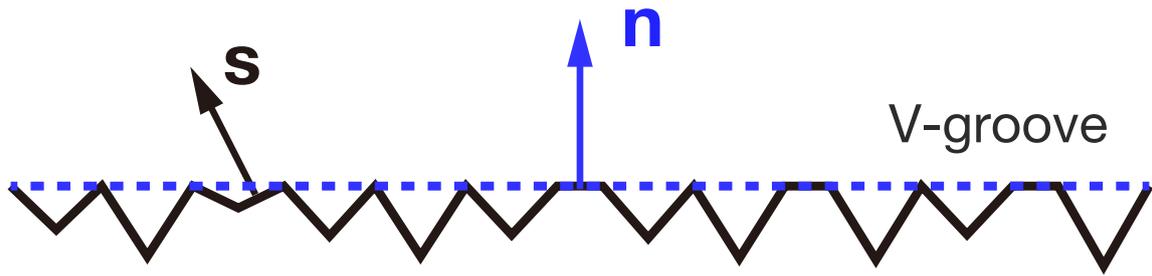


図 11: v-groove マイクロサーフェイス. v-groove を構成する頂点は同一平面上に存在し, 内部での光の散乱は他の微小面からの影響を受けない.

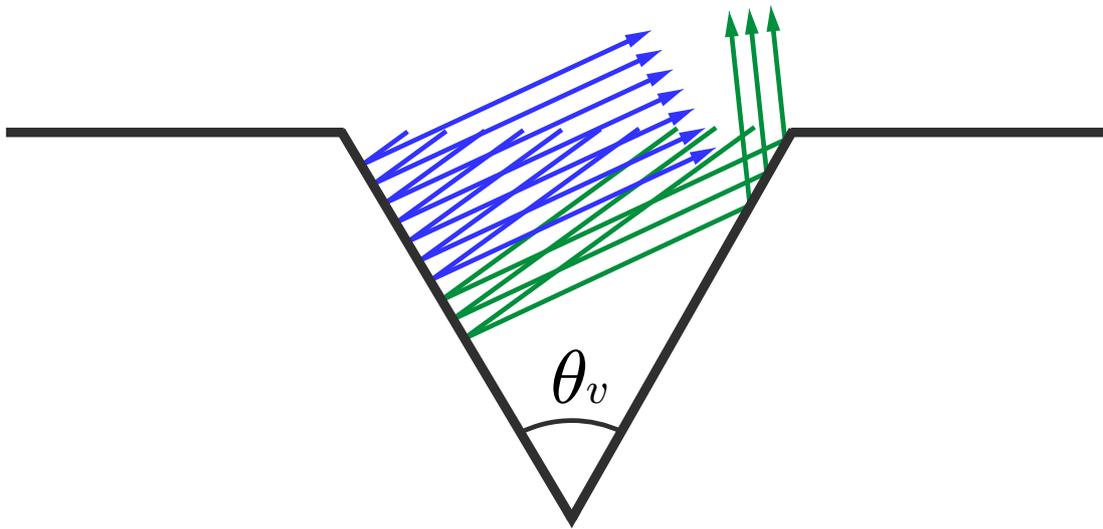


図 12: v-groove での光の散乱. 入射光は v-groove 内で一回以上反射してからマイクロサーフェイスの外に出射する. 同一の入射方向であっても, v-groove 内の多重散乱により出射方向が異なる.

合で構成される. v-groove から構成されるマイクロサーフェイスの頂点は同一平面上に存在し, v-groove 内部での光の散乱は独立に生じ, 他の微小面からの影響を受けない. 図 12 に v-groove 内部での光の散乱を示す. 図 12 に示すように, ミクロなスケールでは, 入射光は各 v-groove の内部で一回以上反射し, その後マイクロサーフェイスの外へ出射する. このような光の経路は, v-groove 内部での反射回数と法線に依存する. 法線 \mathbf{s} を持つ v-groove に入射方向 \mathbf{i} から入射して, k 回反射後に出射方向 \mathbf{o} に出射する BRDF は次式で定義される.

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}; \mathbf{s}, k) = \frac{\sin \theta_s}{k \sin \theta_h} \frac{D(\mathbf{s})G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{s}) \prod_{j=1}^k F(\mathbf{i}, \mathbf{s}_j) |\mathbf{i} \cdot \mathbf{s}|}{4 \cos \theta_d |\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}| |\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} \quad (28)$$

ここで、 θ_s, θ_h はそれぞれ、物体表面の法線 \mathbf{n} と v-groove の法線 \mathbf{s} 、ハーフベクトル \mathbf{h} がなす角度で、 θ_d は \mathbf{i} と \mathbf{h} がなす角度である。 \mathbf{s}_j は j 回目の反射での v-groove の仮想的な法線で、v-groove が伸びる方向の軸に沿って \mathbf{s} を $j - 1$ 回 θ_v ずつ繰り返して回転させることで求まる。ただし、 θ_v は v-groove の開口角で、 $\theta_v = \pi - |\theta_s|$ で求まる。

最終的な BRDF はすべての反射回数での寄与の総和となる。図 12 に示すように、v-groove は二つの微小面を持つため、左側の微小面の法線 \mathbf{s}_l と右側の微小面の法線 \mathbf{s}_r を考慮する必要がある。最大反射回数を k_{max} とすると、最終的な BRDF は次式で定義される。

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m \in l, r} f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}; \mathbf{s}_m, k) \quad (29)$$

4.4 提案手法

前述した Lee らのモデル [6] は幾何光学に基づいており、波動光学の考慮が必要な薄膜干渉はモデル化されていない。そのため、薄膜構造を持つ物体での多重散乱による色合いの変化も表現されていない。提案手法では、3 節で述べた多重散乱マイクロファセット BRDF を拡張することで、多重散乱を考慮した薄膜干渉モデルを開発する。

4.4.1 物体表面で生じる光の相互作用

提案手法では、図 13 に示すように、薄膜がコーティングされた微小面による光の散乱を考える。このとき、微小面の分布が薄膜の膜厚に比べて十分大きく、かつ薄膜が微小面と平行であると仮定することで、ナノスケールで生じる薄膜内での光の相互作用と、マイクロスケールで生じる微小面間の光の相互作用を分離して考えることができる。本章では、薄膜内での光の相互作用のみ波動光学を考慮し、微小面間での光の相互作用は通常のマイクロファセットモデルと同様に幾何光学に基づきモデル化を行う。すなわち、微小面の反射特性を表すフレネル項 F を、薄膜干渉を考慮してモデル化する。

4.4.2 多層膜モデル

前述した条件ではフレネル項 F には任意の薄膜干渉モデルを用いることができる。本章では、モデルの一般性を失わないために、再帰計算を利用して多層膜干渉を計算する手法 (再帰計算手法) [23] を用いる。この手法では図 14 に示す N 層薄膜系全体の分光反射率 R を最下層から逐次的に計算することで導出している。第 3 章で述べた多層膜モデルを利用することも可能であるが、本章では多重散乱を考慮することによる表示結果に焦点を当てて検討する。そのため、周期的でない多層構造に対応して、かつ実装の容易な再帰計算手法を採用する。

再帰計算手法 [23] では、多層膜の境界面が完全鏡面で平行、各層が均質な等方性の媒質であるという仮定の下、次式に示す漸化式を初期条件 $\rho_0 = r_{N+1}$ で逐次計算することで、 N 層膜の反射係

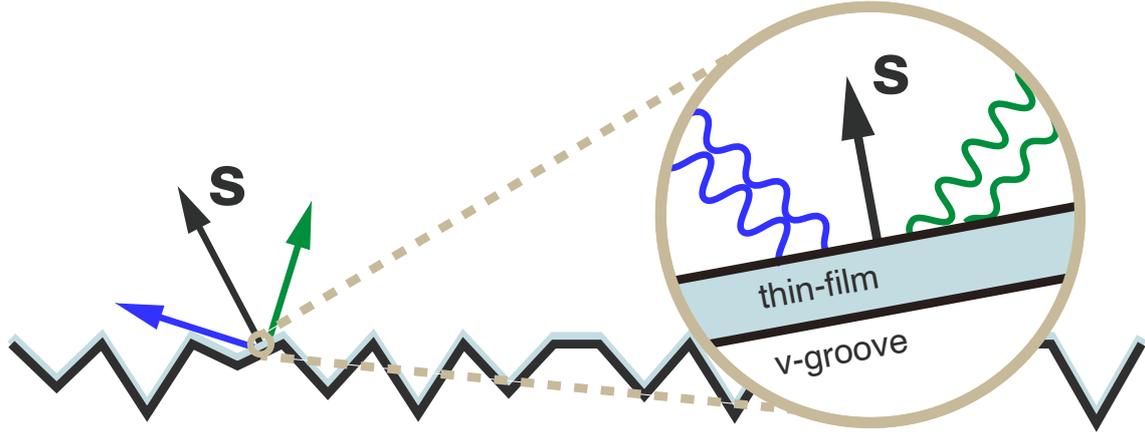


図 13: 薄膜がコーティングされた v-groove マイクロサーフェイス (文献 [19] を基に作成)

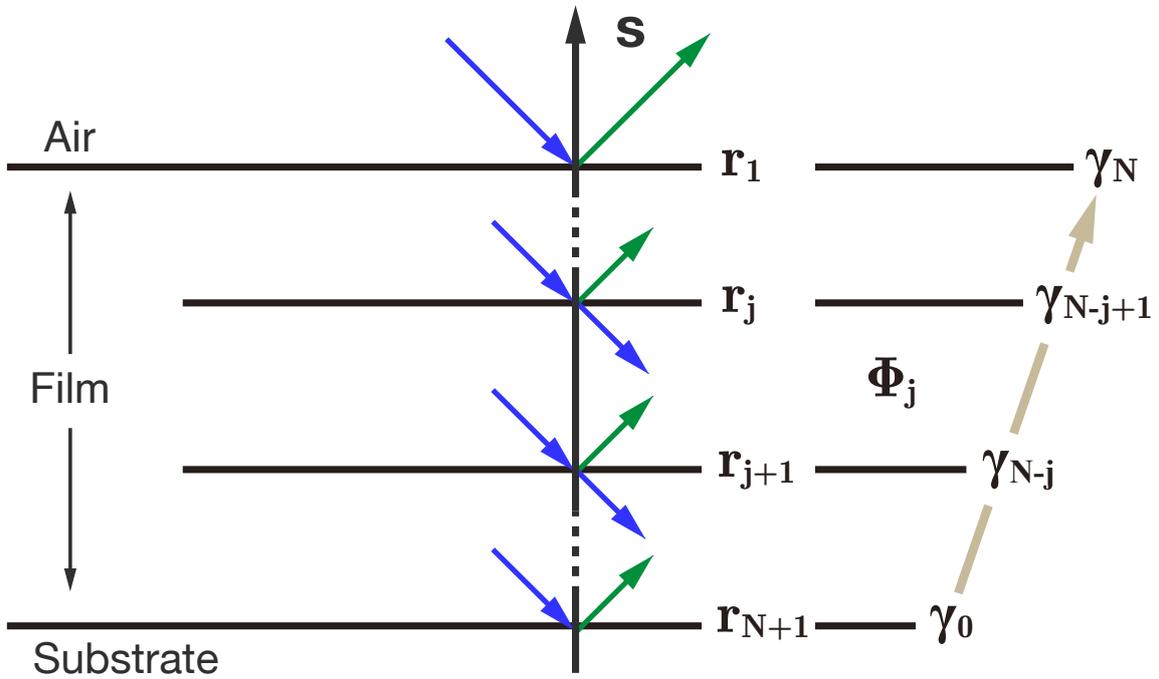


図 14: N 層薄膜系

数 ρ_N を計算する.

$$\rho_{N-j+1} = \frac{r_j + \rho_{N-j} e^{2i\Phi_j}}{1 + r_j \rho_{N-j} e^{2i\Phi_j}} \quad (30)$$

ここで, i は虚数単位, r_j は j 層目の境界面でのフレネル反射係数, Φ_j は光が j 層目を通過するときに生じる位相差で, 次式で表される.

$$\Phi_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j \quad (31)$$

ここで、 λ は真空中の光の波長、 d_j と n_j は j 層目の膜厚と屈折率である。 θ_j は j 層目での光の屈折角である。各層の境界面が平行であると仮定しているため $\cos \theta_j$ は N 層薄膜系への入射角 θ_i と入射媒質 (空気) の屈折率 n_0 からスネルの法則により求まる。式 (30) に最下層 ($j = N$) から順に各層のフレネル反射係数 r_j と位相差 Φ_j を代入して逐次計算を行うことで、 N 層薄膜系の反射係数 ρ_N が求まる。

第 3 章で述べた通り、反射係数は入射電磁波と反射電磁波の振幅の比を表すため、絶対値の二乗をとることでエネルギー比が求まる。一般に自然光には偏光が均等に含まれていることから、光の入射面に平行な成分 (\parallel) と垂直 (\perp) な成分が同一の割合で存在するとみなせる。以上より、 N 層薄膜系の反射率 R は次式となる。

$$R = \frac{|\rho_{\parallel N}|^2 + |\rho_{\perp N}|^2}{2} \quad (32)$$

式 (32) の多層膜の反射率 R はフレネルの式から導出した反射率に相当する。そのため、各層のパラメータ n_j, d_j と N 層薄膜系への入射角余弦 $\cos \theta_i$ が与えられると反射率 R を求めることができる。したがって、図 13 に示すように、マイクロサーフェイスの各微小面が薄膜の膜厚よりも十分大きく、薄膜が一定の厚みで微小面と平行にコーティングされると仮定することで、式 (28) のフレネル項 F を薄膜干渉の分光反射率 R に置き換えることができる。これにより、物体表面の粗さと薄膜干渉を考慮した分光反射モデルが得られる。

$$f_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}; \mathbf{s}, k) = \frac{\sin \theta_s}{k \sin \theta_h} \frac{D(\mathbf{s})G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{s}) \prod_{j=1}^k R(\mathbf{i}, \mathbf{s}_j) |\mathbf{i} \cdot \mathbf{s}|}{4 \cos \theta_d |\mathbf{i} \cdot \mathbf{n}| |\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} \quad (33)$$

4.4.3 計算の高速化

式 (32) に示す多層膜モデルの反射率を評価するには、式 (30) を再帰的に計算する必要があるため、多重散乱の度に新たに計算を行うのは効率が悪い。そこで、レンダリング開始時に式 (32) の分光反射率を前計算しておくことで、高速化をはかる。前計算は 0° から 90° までの入射角を 1° 間隔でサンプリングして、反射率を入射角 θ のテーブルに保存する。そして、分光反射率は入射角 θ を用いてテーブルの値を線形補間することで計算する。

実際に、Intel Core i7-11700 CPU と 16GB メモリを搭載した計算機で、図 16 に示す表面粗さが $\alpha = 1.0$ のシーンをテーブルを用いずにレンダリングしたところ、単散乱の場合は約 5.4 倍の計算時間がかかったのに対して、多重散乱 (7 回散乱) では約 52.1 倍の計算時間がかかった。このことから多重散乱を考慮する場合では分光反射率の前計算が非常に有効であることが確認できる。

多層膜干渉はパラメータの数が多いため、すべてのパラメータの組み合わせに対して分光反射率の前計算を行うことは困難である。そのため、パラメータが物体表面の位置によって変化する場合は前計算による高速化が適用できない。このような場合は、再帰計算法を利用する代わりに、3 章で述べた手法を利用することで効率化が期待できる。

4.5 実験と結果

本節ではスペクトラルレンダリングに対応した物理ベースレンダラー [7] を使ってレンダリングした結果を示す。提案手法はレンダラーのプラグインを開発することで実装した。提案手法の有用性を示すために、次の実験を行った。

1. 単散乱と多重散乱の比較
2. 膜厚の変化による表示結果の比較
3. 表面粗さの変化による表示結果の比較
4. 多重散乱の色合いへの影響の比較

第3章と同様にレンダリングは1ピクセル当たりのサンプル数が128のパスレーシングを用いて、[400nm, 700nm)の波長範囲を5nm間隔の区間でサンプリングしたスペクトラルレンダリングを行った。提案手法では任意のマイクロファセット法線分布関数 D を扱うことが可能であるが、本章では、広く使われている Trowbridge-Reitz(GGX) 分布 [14, 13] を用いた。v-groove 内での最大多重散乱回数 k_{max} は理論上は無限になりうるが、文献 [6, 4] の洞察に基づき7回に設定した。また、比較に使用する単散乱モデルには、広く使われている Walter らのモデル [13] を使用した。

4.5.1 単散乱と多重散乱の比較

図10にアルミニウム材質の Dragon モデルに140nmの TiO_2 薄膜をコーティングした物体を、異なる表面粗さでレンダリングした表示結果を示す。図10(a)(c)は提案手法によりレンダリングした表示結果で、多重散乱を考慮している。図10(b)(d)は、それぞれ、図10(a)(c)と同一の材質に対して、単散乱モデルを用いてレンダリングした表示結果である。既存手法を用いた図10(b)(d)では、多重散乱を考慮していないためエネルギーの損失が生じ、Dragonモデルの外観が薄暗く見える。一方、提案手法を用いた図10(a)(c)では、多重散乱を考慮しているためエネルギーが保存され、鮮やかな干渉色が観察される。さらに、提案手法では表面粗さ α が大きくなるほど、干渉色が鮮やかになる。これは、薄膜干渉により特定の波長領域での反射スペクトルが大きくなり、多重反射を繰り返すことで、薄膜干渉の入射角の違いによる色変化が結果として強調されたためであると考えられる。

4.5.2 膜厚の変化による表示結果の比較

図15に図10(a)(b)に示す表面粗さ $\alpha = 1.0$ の Dragon モデルを、基板材質をチタンに変更して、薄膜の膜厚 D を110nmから170nmまで10nmずつ変化させてレンダリングした表示結果を示す。上段は単散乱のみを考慮した表示結果で、下段は多重散乱を考慮した表示結果である。上段と下段を比較すると、どの膜厚においても図10と同様に、単散乱のみを考慮した場合には、Dragonモデルの外観が薄暗く見え、多重散乱を考慮した場合には、鮮やかな干渉色が観察される。

これは微小面の多重散乱を考慮することで、エネルギーが保存されるのと、多重反射の繰り返しにより特定の波長領域の干渉色が強調されるためである。

また、アルミニウムを基板材質とした図 10(a)(b) とチタンを基板材質とした図 15 (中央) を比較すると、基板材質以外のパラメータはすべて同一であるが反射強度が異なって見える。これはアルミニウムの分光反射率が高いため最終的に全ての波長を反射してしまい、分光分布が平坦になるためである [8]。そのため、工業製品の設計では目的に応じて適度な吸収を持つ基板材質を選択する必要がある。提案手法では金属を含む任意の材質に薄膜をコーティングした物体を物理的に正しく表示することができるため、工業製品の外観シミュレーションなどへの活用が期待される。

4.5.3 表面粗さの変化による表示結果の比較

図 16 にシリコン材質の球に SiO_2 薄膜とその上から 5nm のアルミニウム薄膜をコーティングした物体を表面粗さを変化させてレンダリングした表示結果を示す。 SiO_2 薄膜の膜厚は、上段は 300nm、中段は 400nm、下段は 500nm に設定しており、表面粗さ α は右に行くほど大きくなる。黒線で区切られた左側が提案手法による多重散乱を考慮した表示結果で、右側が単散乱のみをモデル化した既存手法による表示結果である。表面粗さが $\alpha = 0.3$ までは表示結果に大きな違いが観察されないが、表面粗さが $\alpha = 0.5$ 以上の場合は、表面粗さが大きくなるにつれて表示結果に大きな違いが観察される。

既存手法では表面粗さが大きくなるにつれて、表示結果が薄暗くなり干渉色の変化が小さくなる。表示結果が薄暗くなる原因は、表面粗さが大きくなるにつれて、微小面により光が遮蔽される割合が大きくなるためであると考えられる。干渉色の変化が小さくなる原因は、表面粗さが大きくなるにつれて法線分布のランダム性が増して、法線に対して深い角度から入射する光が、微小面により遮られやすくなるためであると考えられる。つまり、図 16 の滑らかな球の縁で観察されるような深い角度からの入射による干渉色が微小面の遮蔽により観察されにくくなり、遮蔽の影響を受けにくい浅い角度からの入射による干渉色が結果的に強調される。

一方、提案手法では多重散乱を考慮しているため、微小面による光の遮蔽の影響が小さくなり、表面粗さが $\alpha = 0.5$ 以上の粗い物体表面でも干渉色が観察される。また、多重散乱によりエネルギーも保存されるため、既存手法のように薄暗い表示結果にはならない。しかし、表面粗さが大きくなると、完全鏡面のような周囲環境の映り込みが観察される。これは v-groove マイクロサーフェイス特有の現象で、Lee らのモデル [6] でも発生する。Lee らは出射方向 \mathbf{o} のマイクロファセット法線 \mathbf{s} への投影が原因であると考察しており、式 (28) の $\frac{1}{\sin \theta_h}$ 項によって数学的に表現される。

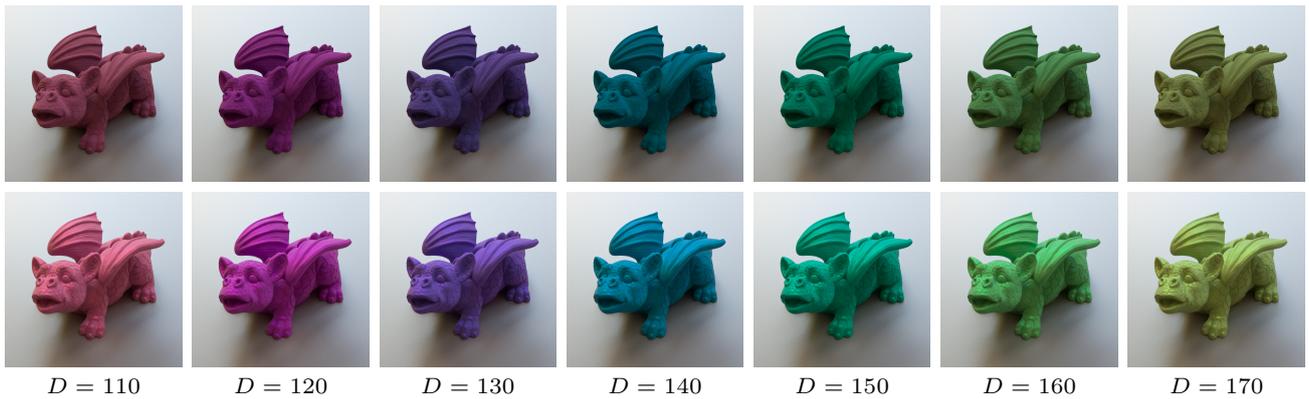


図 15: 薄膜の膜厚を変化させた場合の単散乱モデル (上段) と多重散乱を考慮した提案手法 (下段) の表示結果. 図 10(a)(b) に示す表面粗さ $\alpha = 1.0$ の Dragon モデルを, 基板材質をチタンに変更し, 薄膜の膜厚 D を変化させてレンダリングを行った. どの膜厚においても, 図 10 と同様に, 単散乱モデルではエネルギーの損失が生じるため Dragon モデルの外観が薄暗く見えるが, 提案手法では, 多重散乱を考慮しているためエネルギーが保存され, 鮮やかな干渉色が観察される.

Credit: Bernhard Vogl(HDR texture)

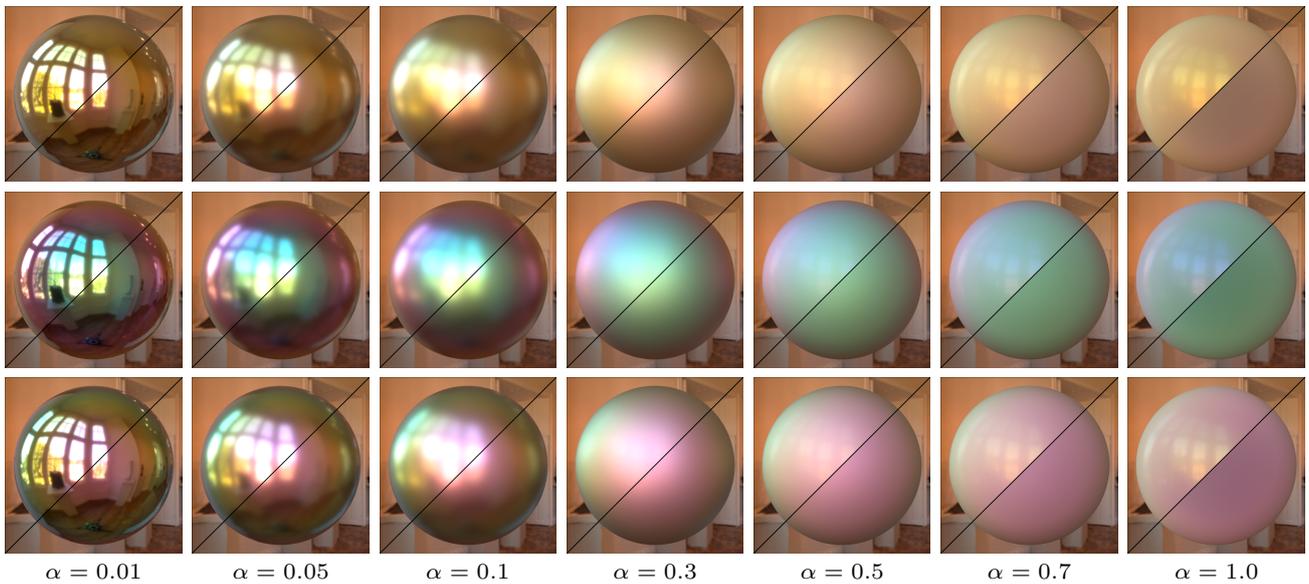


図 16: 表面粗さと薄膜の膜厚を変化させた場合の表示結果. シリコン材質の球に SiO_2 薄膜とその上からアルミニウム薄膜をコーティングした物体を, SiO_2 薄膜の膜厚 (縦並び) と表面粗さ (横並び) を変化させてレンダリングを行った. 黒線で区切られた左側が多重散乱を考慮した提案手法による表示結果で, 右側が単散乱のみを考慮した既存手法による表示結果である. 表面粗さ α が大きくなるほど, 多重散乱の効果が大きくなり既存手法との違いが顕著になる.

4.5.4 多重散乱の色合いへの影響の比較

金属単体の材質と異なり，表面に薄膜構造を持つ物体はしばしば，観察する角度や光の入射方向によって反射光の色合いや強度が変化する．そのため，多重散乱を考慮することで，微小面間で生じる反射の繰り返しにより，最終的な反射光の色合いや強度が変化する．図 17 にシリコン材質の Dragon モデルに 400nm の SiO_2 薄膜とその上から金属膜をコーティングした物体 (左側) と金材質の Dragon モデル (右側) を設置したシーンの表示結果を示す．上段と下段の左側の Dragon モデルは SiO_2 薄膜の上にコーティングした金属膜が異なっており，上段が 5nm のアルミニウム薄膜を下段が 20nm の金薄膜を用いている．図 17(a) は単散乱成分のみの表示結果，図 17(b) は多重散乱を考慮した表示結果であり，図 17(c) は多重散乱成分のみ (すなわち，式 (29) で $k = 1$ を除いた成分) の表示結果である．

上段について，単散乱成分のみの図 17(a) と多重散乱を考慮した図 17(b) を比較すると，金材質 (右側) では明るさに変化はあるものの，色合いにほとんど変化がない．一方，薄膜干渉材質 (左側) では特に Dragon モデルの翼や顔付近が緑色から青色に変化していることが観察される．これは，多重散乱成分のみの図 17(c) において，金材質 (右側) では単散乱と比べて色合いにはほとんど変化がないが，薄膜干渉材質 (左側) ではあきらかに色合いが異なっていることから考察できる．下段についても同様に，金材質 (右側) では色合いには変化がないが，薄膜干渉材質 (左側) では多重散乱を考慮すると全体的に緑色から赤みが加わった黄緑色に変化していることが観察される．これらの色合いの変化は，薄膜干渉材質の多重散乱成分が微小面間で生じる反射の繰り返しにより単散乱成分と異なる分光分布を持つ光の成分が加わったためであると考えられる．

図 18 に各材質の分光反射率分布を示す．図 18(a)，図 18(b)，図 18(c) はそれぞれ金材質，図 17 上段の薄膜干渉材質，図 17 下段の薄膜干渉材質に対応しており，入射角度ごとの分光反射率を異なる色の線でプロットしている．図 18(a) に示す金材質の分光反射率と図 18(b),(c) に示す薄膜干渉材質の分光反射率を比較すると，金材質では入射角が変化しても分光反射率が比較的变化しないのに対して，薄膜干渉材質では分光反射率が入射角に大きく依存していることがわかる．図 18(b),(c) は表面層にコーティングした金属膜の材質を変えただけであるが，分光反射率があきらかに異なっている．そして，図 17 の上段と下段の表示結果の違いからわかるとおり，分光分布の違いが外観の色合いに大きな影響を与える．

このように，薄膜干渉材質は金属単体の材質と異なり，薄膜材質の違いで表示結果が大きく変化する．さらに，図 17 に示すとおり，多重散乱を考慮することで微小面間で生じる反射の繰り返しにより色合いも大きく変化する．これらのことから，薄膜干渉材質は多重散乱の考慮がエネルギー保存による明るさの変化ということ以外にも色合いの変化という重要な要素にも影響を与える．そして，既存の単散乱のみを考慮した薄膜干渉モデルや金属を対象とした多重散乱モデルではこの効果を表示することができないが，提案手法では任意の表現粗さにおいて多重散乱による色合いの変化を物理的に正しくシミュレーションすることができる．さらに，提案モデルは解析的に分光反射率を求めることのできる多重散乱 BRDF モデル [6] と多層膜モデル [23] を統合しているため，表面



図 17: 多重散乱による色合いの違い (左側: 多層薄膜あり, 右側: 金属単体)

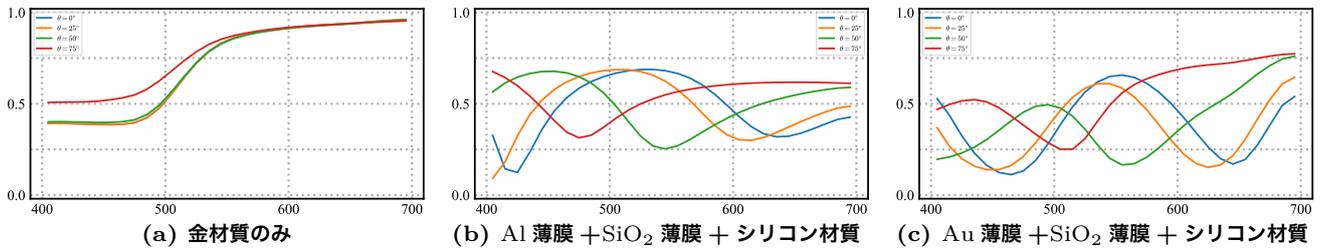


図 18: 異なる材質の入射方向ごとの分光反射率分布

粗さを考慮した薄膜干渉材質の分光反射率を解析的に求めることができる。そのため、複雑な光学現象である多重散乱と薄膜干渉の組合せであっても確率的な計算を用いることなくレンダリングを行うことができる。

4.6 まとめと今後の課題

本章では、V型溝の微小面で生じる多重散乱を考慮したマイクロファセット BRDF を多層膜モデルを用いて拡張することで、表面粗さを考慮した薄膜干渉の分光反射モデルを開発した。微小面からの単散乱のみをモデル化している既存手法と異なり、提案手法では多重散乱によりエネルギーが保存されるため、粗い物体表面であっても鮮やかな干渉色を表示することが可能である。さらに、既存手法では表現できない多重散乱による色合いの変化に関しても物理的に正しく表現することができる。そして、薄膜干渉と多重散乱という複雑な光学現象の組み合わせであっても、提案手法は解析的に分光反射率を求めることができる。これらのことから、提案手法は設計図などからでは予測が難しい多層膜を持つ工業製品などのビジュアルシミュレーションなどへの活用が期待できる。

今後の課題としては、実世界と同等の照明環境・撮影条件での実写画像とレンダリング結果の比較実験や電磁波の数値シミュレーションによりモデルの検証を行うことである。また、本章では薄膜干渉の反射率を前計算したが、パラメータが物体表面の位置によって変化する場合には前計算の計算時間と反射率テーブルのメモリ量が膨大になるという問題がある。省メモリな反射率テーブルの開発や金属材料と同等の時間で薄膜干渉を計算できるようにモデル改良することも重要な課題である。

第5章 結論

本研究では、多層膜干渉を高速に計算する手法と表面粗さを考慮した薄膜干渉の分光反射モデルを提案した。多層膜干渉の計算では、生物分野で開発された Huxley の手法を利用することで、層数が多い場合に既存手法よりも高速に計算できることを示した。分光反射モデルでは、多重散乱を考慮したマイクロファセット BRDF と薄膜干渉モデルを統合することで、粗い物体表面であっても鮮やかな干渉色を表示できることを示した。さらに、金属材質と比較することで、薄膜干渉材質では多重散乱により色合いの変化が生じることを示した。これらのことから、本研究は、設計図などからでは予測が難しい薄膜構造を持つ工業製品などのビジュアルシミュレーションへの活用が期待できる。

今後の課題としては、分光反射モデルをさらに高速に計算できるように改良して、多層膜干渉をインタラクティブに表示することである。また、実世界と同等の照明環境・撮影条件での実写画像とレンダリング結果の比較実験を行うことや、生物の微細な構造や揺らぎを考慮することで、自然界の干渉色をさらに正確に表示することも重要な課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、2年間熱心にご指導、ご助言を頂きました金田和文教授に深く感謝致します。金田和文教授には研究を通して数々の貴重な機会を与えていただきました。また、日々の研究を進めるにあたり様々な視点からのご指導、ご助言を頂きました Bisser Raytchev 准教授、檜垣徹准教授、研究生活において多方面からご支援をして頂きました開内幸治技術職員に深く感謝致します。そして、有益なご指導、ご助言をいただきました林雄介教授に深く感謝致します。また、日々の研究生活で様々なご支援を頂いたビジュアル情報学研究室の皆様にも深く感謝致します。最後に、大学院生活において金銭面、精神面での多大な御支援を頂いた家族と叔父に感謝致します。

参考文献

- [1] B. Inaglory and Alvesgaspar, “Reflection in a soap bubble edit (CC BY-SA 3.0 license),” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflection_in_a_soap_bubble_edit.jpg, 2007, accessed on 2024-02-05.
- [2] D. Descouens, “Morpho menelaus huebneri MHNT Male Dos (CC BY-SA 4.0 license),” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morpho_menelaus_huebneri_MHNT_Male_Dos.jpg, 2011, accessed on 2024-02-05.
- [3] Zaereth, “Tempering colors in steel (CC0 1.0 license),” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tempering_colors_in_steel.jpg, 2011, accessed on 2024-02-05.
- [4] F. Xie and P. Hanrahan, “Multiple scattering from distributions of specular v-grooves,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 37, no. 6, 2018.
- [5] A. F. Huxley, “A theoretical treatment of the reflexion of light by multilayer structures,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 48, no. 2, pp. 227–245, 1968.
- [6] J. H. Lee, A. Jarabo, D. S. Jeon, D. Gutierrez, and M. H. Kim, “Practical multiple scattering for rough surfaces,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 37, no. 6, 2018.
- [7] M. Pharr, W. Jakob, and G. Humphreys, *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*, 3rd ed. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2016.
- [8] S. Kinoshita, *Bionanophotonics-Introduction to Structural Colors*. Asakura Publishing, 2010, [in Japanese].
- [9] Adobe, “THE PBR GUIDE - PART 1,” <https://substance3d.adobe.com/tutorials/courses/the-pbr-guide-part-1>, accessed on 2023-09-08.
- [10] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for off-specular reflection from roughened surfaces*,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57, no. 9, pp. 1105–1114, 1967.
- [11] J. F. Blinn, “Models of light reflection for computer synthesized pictures,” *ACM SIG-GRAPH Computer Graphics*, vol. 11, no. 2, pp. 192–198, 1977.
- [12] R. L. Cook and K. E. Torrance, “A reflectance model for computer graphics,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–24, 1982.
- [13] B. Walter, S. R. Marschner, H. Li, and K. E. Torrance, “Microfacet models for refraction through rough surfaces,” in *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, ser. EGSR’07, 2007, pp. 195–206.
- [14] T. S. Trowbridge and K. P. Reitz, “Average irregularity representation of a rough surface for ray reflection,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 65, no. 5, pp. 531–536, 1975.
- [15] B. Smith, “Geometrical shadowing of a random rough surface,” *IEEE Transactions on*

- Antennas and Propagation*, vol. 15, no. 5, pp. 668–671, 1967.
- [16] E. Heitz, “Understanding the masking-shadowing function in microfacet-based BRDFs,” *Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT)*, vol. 3, no. 2, pp. 48–107, 2014.
- [17] O. Gulbrandsen, “Artist friendly metallic Fresnel,” *Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT)*, vol. 3, no. 4, pp. 64–72, 2014.
- [18] Y. Kaminaka, T. Higaki, B. Raytchev, and K. Kaneda, “Efficient and accurate physically based rendering of periodic multilayer structures with iridescence,” in *SIGGRAPH Asia 2023 Posters*, ser. SA ’23. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023.
- [19] L. Belcour and P. Barla, “A practical extension to microfacet theory for the modeling of varying iridescence,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 36, no. 4, 2017.
- [20] B. E. Smits and G. W. Meyer, *Newton’s Colors: Simulating Interference Phenomena in Realistic Image Synthesis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992, pp. 185–194.
- [21] M. Dias, “Ray tracing interference color,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 54–60, 1991.
- [22] M. Dias, “Ray tracing interference color: visualizing newton’s rings,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 14, no. 3, pp. 17–20, 1994.
- [23] H. Hirayama, K. Kaneda, H. Yamashita, Y. Yamaji, and Y. Monden, “Visualization of optical phenomena caused by multilayer films based on wave optics,” *The Visual Computer*, vol. 17, no. 2, pp. 106–120, 2001.
- [24] A. Benamira and S. Pattanaik, “Application of the transfer matrix method to anti-reflective coating rendering,” in *Advances in Computer Graphics*, ser. CGI 2020. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 83–95.
- [25] I. Guillén, J. Marco, D. Gutierrez, W. Jakob, and A. Jarabo, “A general framework for pearlescent materials,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 39, no. 6, 2020.
- [26] Y. Sun, “Rendering biological iridescences with RGB-based renderers,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 25, no. 1, pp. 100–129, 2006.
- [27] A. Weidlich and A. Wilkie, “Rendering the effect of labradoescence,” in *Proceedings of Graphics Interface 2009*, ser. GI ’09. CAN: Canadian Information Processing Society, 2009, pp. 79–85.
- [28] Y. Kaminaka, T. Higaki, B. Raytchev, and K. Kaneda, “Spectral rendering of thin-film interference on rough surface,” *The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan*, vol. 52, no. 4, pp. 507–515, 2023, [in Japanese].
- [29] E. Heitz, J. Hanika, E. d’Eon, and C. Dachsbacher, “Multiple-scattering microfacet BSDFs

- with the Smith model,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 35, no. 4, 2016.
- [30] B. Wang, W. Jin, J. Fan, J. Yang, N. Holzschuch, and L.-Q. Yan, “Position-free multiple-bounce computations for Smith microfacet BSDFs,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 41, no. 4, 2022.
- [31] B. Bitterli and E. d’Eon, “A position-free path integral for homogeneous slabs and multiple scattering on Smith microfacets,” *Computer Graphics Forum*, vol. 41, no. 4, pp. 93–104, 2022.
- [32] Y. Cui, G. Pan, J. Yang, L. Zhang, L.-Q. Yan, and B. Wang, “Multiple-bounce Smith microfacet BRDFs using the invariance principle,” in *SIGGRAPH Asia 2023 Conference Papers*, ser. SA ’23. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023.
- [33] C. Kelemen and L. Szirmay-Kalos, “A microfacet based coupled specular-matte BRDF model with importance sampling,” in *Eurographics 2001 (short presentations)*. Eurographics Association, 2001.
- [34] W. Jakob, E. d’Eon, O. Jakob, and S. Marschner, “A comprehensive framework for rendering layered materials,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 33, no. 4, 2014.
- [35] C. Kulla and A. Conty, “Revisiting physically based shading at Imageworks,” in *ACM SIGGRAPH 2017 Courses*, ser. SIGGRAPH ’17, 2017.
- [36] E. Turquin, “Practical multiple scattering compensation for microfacet models,” 2018.
- [37] E. Rosales, F. Teimury, J. Horacek, A. Salari, X. Qin, A. Bar-Lev, X. Zhe, and L. Liu, “Fast-MSX: Fast multiple scattering approximation,” in *SIGGRAPH Asia 2023 Conference Papers*, ser. SA ’23. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023.
- [38] F. Xie, A. Kaplanyan, W. Hunt, and P. Hanrahan, “Multiple scattering using machine learning,” in *ACM SIGGRAPH 2019 Talks*, ser. SIGGRAPH ’19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019.
- [39] F. Xie, J. Bieron, P. Peers, and P. Hanrahan, “Experimental analysis of multiple scattering BRDF models,” in *SIGGRAPH Asia 2021 Technical Communications*, ser. SA ’21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [40] J. S. Gondek, G. W. Meyer, and J. G. Newman, “Wavelength dependent reflectance functions,” in *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ser. SIGGRAPH ’94. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1994, pp. 213–220.
- [41] H. Hirayama, K. Kaneda, H. Yamashita, and Y. Monden, “An accurate illumination model for objects coated with multilayer films,” *Computers & Graphics*, vol. 25, no. 3, pp. 391–400, 2001.

- [42] F. kun Wu and C. wen Zheng, “Microfacet-based interference simulation for multilayer films,” *Graphical Models*, vol. 78, pp. 26–35, 2015.
- [43] I. Icart and D. Arquès, “An illumination model for a system of isotropic substrate-isotropic thin film with identical rough boundaries,” in *Rendering Techniques’ 99*. Vienna: Springer Vienna, 1999, pp. 261–272.
- [44] I. Icart and D. Arquès, “A physically-based BRDF model for multilayer systems with uncorrelated rough boundaries,” in *Rendering Techniques 2000*. Vienna: Springer Vienna, 2000, pp. 353–364.