# 薄膜干渉の画像ベースBRDF推定

小林 由枝<sup>†</sup> 森本 哲郎<sup>††</sup> 佐藤 いまり<sup>†††</sup> 向川 康博<sup>††††</sup> 池内 克史<sup>†††††</sup>

† 東京大学大学院情報理工学系研究科

†† 凸版印刷株式会社

††† 国立情報学研究所

†††† 大阪大学産業科学研究所

+++++ 東京大学 学際情報学環

††††mukaigaw@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし シャボン玉や油膜のように,薄膜干渉現象により見えが変化する物体は世の中に多く存在する.薄膜干渉 を表す物理モデルには屈折率と膜厚の2つのパラメータが必要となる.本研究は,それらのパラメータを推定し薄膜 干渉による見えの再現を行うことを目的とする.CG分野ではこれらのパラメータを手動で与えることで見えの変化 を再現してきたが,物理的に正しいという保証はない.また,光学においてエリプソメトリや分光干渉法のように膜 厚を計測するための手法が提案されてきたが,屈折率が既知でなければならないという制約があった.本研究では, 計測で得られた反射率と物理モデルの反射率との二乗誤差を最小化する屈折率と膜厚の組を求めることで,屈折率未 知でも推定を可能にした.さらに,従来研究のように1点での計測ではなく,スペクトルカメラを用いて画像ベース の計測を実現した.実験では金属蒸着されたフィルムを対象として提案手法のパラメータと反射率の推定精度の評価 を行い,手法の有効性を検証した.

キーワード BRDF, 分光反射率, 屈折率, 膜厚, 薄膜干渉

1. はじめに

シャボン玉や油膜のように薄膜干渉現象により見えが 変化する物体は世の中に多く存在する.それらの物体の 色彩変化は,薄膜中で生じる光路差により干渉が生じ特 定の波長が強め合うために起こる.したがって,光源・ 視線方向によって変化する光路差を記述する際のパラ メータである薄膜の屈折率と膜厚を求めることができれ ば,薄膜干渉による色変化を表現可能である.

本研究では,薄膜の屈折率・膜厚の推定を行うことに より,薄膜干渉現象による色変化の再現を行う.薄膜干 渉現象の色再現が行えると,シャボン玉や油膜といった 物質のリアルな質感再現が可能になる.また,エンター テイメントや忠実な再現が要求される文化遺産のデジタ ル化,生物学への適応も期待される.

コンピュータグラフィックスでは,光源・視線方向で の色を双方向反射率分布関数 (BRDF) を用いて表して きた.BRDF の代表的なモデルには以下のようなものが ある.拡散反射では,Lambert モデルや Oren-Nayar モ デル[1] がある.鏡面反射については,Phong モデル[2], Blinn モデル[3], Ward モデル[4], Torrance-Sparrow モ デル[5],Lafortune モデル[6],Ashikhmhin[7]のモデル など様々なモデルがある.しかし,これらは光路差によ る色変化を考慮していないため,薄膜干渉現象のような 色変化を表現することは難しい. そこで,光源・視線方向に沿った光路差を物理モデ ルから計算しレンダリングする手法が提案されてきた. Iwasakiら [8] は薄膜干渉の物理モデルを用いてシャボン 玉のレンダリングを行った.Hirayamaら [9] [10] やらは 多層膜構造の物理モデルを用いてメガネや真珠のレンダ リングを行った.また,Sunら [11] [12] は CD の微細構 造をモデル化することにより CD のレンダリングを行っ た.しかし,これらの手法は物理モデルのパラメータを 手動で与えているため,これらのパラメータが物理的に 正しいという保証がない.

屈折率や膜厚を推定するために,光学の分野で様々な 手法が提案されてきた.干渉スペクトルの極大極小値を 取る波長から膜厚を推定する分光干渉法[13],S偏光と P偏光のなす振幅比と位相差から膜厚を推定するエリプ ソメトリ[14]がある.しかし,これらは屈折率が既知で ある必要性があり,1点計測であるため各点において膜 厚が異なるような対象の計測が難しい.

したがって,本稿では画像ベースで薄膜干渉のパラ メータである屈折率と膜厚の推定手法の提案を行う.提 案手法では,計測で得られた反射率と物理モデルの反射 率との二乗誤差を最小化するような屈折率・膜厚の組を 求めることで,屈折率未知での推定を行う.さらに,従 来研究のように1点での計測ではなく,マルチスペクト ルカメラを用いて画像ベースの計測を行う.

本稿の内容は以下の通りである.2章では薄膜干渉の



図1 多重反射を考慮した薄膜干渉の模式図

BRDF モデルについて述べる.3章では屈折率・膜厚の 推定手法について述べる.4章では屈折率・膜厚,反射 率の推定精度を検証する実験について述べる.5章でま とめと今後の課題を述べる.

2. 薄膜干渉反射率モデル[15]

薄膜干渉はシャボン玉や油膜で観測され,光源・視線 方向に応じて虹色に色が変化する現象であり,図1のような構造をしている.屈折率の異なる膜内で生じる光路 差によって特定の波長が強め合い虹色の色変化が観測される.図1の $n_2$ は膜の屈折率,dは膜厚, $\theta_1$ は入射角,  $\theta_2$ は屈折角である.

図1のような膜内での多重反射を考慮すると, *E*<sub>1</sub> で 観測される反射光は

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + \cdots$$
  
=  $E_0(e_{12} + t_{12}t_{21}r_{23}e^{i\Delta} + t_{12}t_{21}r_{23}^2r_{21}e^{2i\Delta} + t_{12}t_{21}r_{23}^3r_{21}^2e^{3i\Delta} + \cdots$   
=  $E_0(r_{12} + t_{12}t_{21}r_{23}e^{i\Delta}(1 + r_{23}r_{21}e^{i\Delta} + r_{23}^2r_{21}^2e^{2i\Delta} + \cdots))$   
=  $E_0(r_{12} + t_{12}t_{21}r_{23}e^{i\Delta}frac_{11} - r_{23}r_{21}e^{i\Delta})$  (1)

で表される.ここで, $r_{12}$ , $r_{23}$ ,は反射係数, $t_{12}$ , $t_{21}$ は 透過係数である.また, $\Delta$ は図1のBC+CDで発生す る位相差であり,(2)式で表される.

$$\Delta = \frac{4\pi n_2 d\cos\theta_2}{\lambda} \tag{2}$$

ストークスの定理より次の関係が成り立つ.

$$r_{21} = -r_{12} \tag{3}$$

また,反射強度と透過強度には次の関係が成り立つ.

$$t_{21}t_{12} + r_{12}^2 = 1 \tag{4}$$

したがって,振幅反射係数rは式(1),(3),(4)よりf式 (5)のようになる.

$$r \equiv \frac{E}{E_0} = r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{i\Delta} \frac{1}{1 - r_{23} r_{21} e^{i\Delta}}$$



図 2 屈折率を 1.0 から 3.0, 膜厚を 50[nm] から 5000[nm] ま で変化させた時の入力スペクトルとの二乗誤差.入力ス ペクトルを屈折率 1.45, 膜厚 600[nm] とする.

$$= \frac{r_{12} - r_{12}r_{23}r_{21}e^{i\Delta} + (1 - r_{12}^2)r_{23}e^{i\Delta}}{1 - r_{23}r_{21}e^{i\Delta}}$$
$$= \frac{r_{12} + r_{23}e^{i\Delta}}{1 + r_{23}r_{12}e^{i\Delta}}$$
(5)

反射率は r の二乗として計算できることから,

$$R = |r|^2 \tag{6}$$

と表せる.

垂直偏光 (S 偏光), 平行偏光 (P 偏光)の反射係数は, フレネルの公式から式 (7), (8)のように屈折率と膜厚、 入射角を用いて表すことができる.式(7),(8)はそれぞ れ膜上面で反射する光の S 偏光, P 偏光における反射係 数である.膜下面での反射光も同様に表せる.

$$r_{12}^{s} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$
(7)

$$r_{12}^{p} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$
(8)

S・P 偏光の反射率は式(7),(8)の反射係数を式(6)に 代入して得られる.したがって,S・P 偏光の反射率は入 射角に沿った色変化を記述することができ,式(6)は薄 膜干渉の BRDF モデルであると言える.本稿では式(6) を薄膜干渉の BRDF モデルとして用いる.

## 3. BRDF 推定手法

前章で述べたように薄膜干渉の BRDF モデルは式(6) で表せる.したがって,対象となる薄膜の BRDF を求 めるには,屈折率と膜厚が必要となる.計測により得ら れる反射率を $R_m$ ,式(6)により得られる反射率を $R_c$ とする.複数の異なる入射角において計測された反射率  $R_m^1, R_m^2, \ldots, R_m^M$ が得られた時,各入射角における式 (6)より計算される反射率を $R_c^1, R_c^2, \ldots, R_c^M$ とすると

$$\min\sum_{i=1}^{M} \{R_m^i - R_c^i\}^2$$
(9)

の二乗誤差を最小化するような屈折率と膜厚の組が対象

情報処理学会研究報告 IPSJ SIG Technical Report Vol.2013-CVIM-188 No.34 2013/9/3





の屈折率・膜厚となる.

式(9) は図2に示すように屈折率・膜厚を変化させた 時の二乗誤差がピーク値を持ち,多くの局所解を持つ. そのため,非線形二乗誤差最小化法を用いて推定を行う と,真値に非常に近い初期値を用いない限り推定が上手 くいかない.また,二乗誤差を最小化する屈折率・膜厚 の全探索を行うには,探索範囲が膨大になり計算コスト が非常に高くなる.そこで,屈折率 n<sub>2</sub>と膜厚 d に次の ような制約条件を設ける.

$$1.0 \le n_2 \le 3.0 \tag{10}$$

$$120 \le d \le 5000[nm] \tag{11}$$

一般的な物質の屈折率は式(10)の範囲内である.屈折 率が3.0以上の物質も存在するが非常に特殊なものにな る.また,屈折率は真空中の光速を物質中の光速で割っ た値であるため,1.0より小さくなることはない.した がって,屈折率に関しては式(10)のような制約条件と なる.

式(2)に示す光路差が整数となる波長で強め合いが起 こり,その波長が可視光領域にある場合に色変化もよく 観察される.しかし,以下の2つの場合にはほぼ白色と して観察される.

(1) 光路差が可視光波長より小さい場合

(2) 光路差が大きく強め合う波長が密にある場合 光路差が可視光波長より小さいと,可視光領域ではスペ クトルがほぼフラットになり(図3(a)),白色として知覚 される.また,光路差が十分大きい場合では強め合う波 長が可視光領域で密に観測され,スペクトルが図3(b) に示すように白色ノイズのようになり,同様に白色とし て知覚される.式(11)は屈折率の範囲が式(10)であっ た場合に,この様な現象が起こらない範囲である.

式(10),(11)の制約条件があり入射媒質を空気層とした場合,式(9)は解が一意に定まる.薄膜干渉スペクトルは,式(2)が整数になる波長で観測される周期的な ピークとそのピーク値の振幅によって特徴づけられる. ピーク値の振幅は式(5),(7),(8)から入射媒質と薄膜,



図4 実験の様子

薄膜と出射媒質の屈折率比で表されることが分かる.そのため,屈折率が1.0以上であり入射媒質が空気層である時,ピーク値の振幅を表す屈折率比より屈折率は一意に定まる.また,膜厚は式(2)から求められる.したがって,式(10),(11),入射媒質が空気であるという条件の下で式(9)は一意に解くことが出来る.

## 4. 実 験

本章では,前章で述べた BRDF 推定手法について屈 折率・膜厚,反射率の推定精度の検証実験について述べ る.まず,実験に用いたマルチスペクトルカメラである LCTF カメラなどの計測方法について紹介する.次に推 定精度の検証結果について述べる.

## 4.1 計測方法

図4に計測の様子を示す.計測対象である薄膜と光源 は回転台に取り付けられており,入射角の調整はこの回 転台で行われる.また,薄膜の反射光が図4の白色板に 投影されるようになっている.白色板に投影された反射 光はマルチスペクトルカメラであるLCTF(液晶チュー ナブルフィルタ)カメラで撮影される.計測対象となる 薄膜のサンプルにはMgF<sub>2</sub>(屈折率1.37)を400[nm]で蒸 着したフィルムを用いた.

LCTF は電気的に透過波長を制御可能なフィルタで, そのフィルタをモノクロカメラの前に取り付けることに より特定の波長の画像をキャプチャできる.各波長の画 像を統合することによりスペクトル画像を作成する.本 実験では,400[nm]から720[nm]を4[nm]ごとにキャプ チャを行っている.

#### 4.2 結 果

推定された屈折率は 1.36 となった.推定された各ピク セルの膜厚,推定誤差は図 5,図6 にそれぞれ示してい る.図7 に各ピクセルにおける推定パラメータから求め られた反射率と真値パラメータから得られた反射率との RMSE を示している.膜厚,反射率の推定誤差はそれぞ



図 5 推定された各ピクセルの膜厚分布



図 6 膜厚の推定誤差分布

れ式(12),(13)によって求めた.

 $RMSE_{thickness} = \frac{\sqrt{(d_{true} - d_{estimate})^2}}{d_{true}}$ (12)

$$RMSE_{spectra} = \frac{\sqrt{\sum (R_{true}(\lambda) - R_{estimate}(\lambda))^2}}{\sqrt{\sum R_{true}(\lambda)^2}} (13)$$

 $d_{true}$ ,  $d_{estimate}$ はそれぞれ膜厚の真値と推定値である. また,  $R_{true}(\lambda)$ ,  $R_{estimate}(\lambda)$ )はそれぞれ反射率の真値と推定値である.

膜厚の推定誤差は約6%程度であるが,推定された反 射率は約33%の誤差となった.式(2)から反射率で観測 されるピークは膜厚と屈折率の誤差により△d△n/mだ け誤差を含む.そのため,本実験における約30[nm]の 誤差でも反射率のピーク位置の誤差には強く影響し,反 射率の誤差も膜厚に比べ大きくなった.また,計測に用 いたマルチスペクトルカメラの短波長側の透過率が低い ため,短波長側でノイズの影響が強く,短波長側にピー クを持つ反射率において推定誤差が大きくなったためと

Vol.2013-CVIM-18	8 No.34
2	013/9/3

入射角(°)	20	30	40	50	60	70	
推定誤差 (%)	21.63	15.83	17.19	20.27	21.78	18.21	

表 1 各入射角における平均推定誤差(%)

も考えられる.各入射角における平均推定誤差を示す表 1からもこの傾向が分かる.



図 7 真値のパラメータから得られた反射率と推定パラメータ から得られた反射率の推定誤差分布

計測によって得られた反射率画像,推定パラメータから作成した反射率画像,真値パラメータから作成した反 射率画像を図8に示す.推定パラメータ画像は計測によ り得られた色変化を上手く表せている.しかし,推定パ ラメータ画像は膜厚が変化している辺りで真値パラメー タ画像にはない色変化をしている.この色変化は計測画 像でも観察される.この原因として,用いた光源と対象 の距離が20cmと近かったため全ピクセルにおいて入射 角が均一でなかった点が考えられる.

## 5. まとめと今後の課題

本稿では画像ベースで薄膜干渉のパラメータである屈 折率と膜厚の推定手法の提案を行った.また,実験によ り推定されたパラメータから薄膜干渉現象による色変化 を上手く表現できることを示した.

本稿で計測対象としている薄膜サンプルは平面である ため,回転台で入射角が厳密に制御可能である.しかし, 本手法を平面以外の3次元形状を持つ薄膜サンプルに適 応する場合,入射角を求めるために物体の法線が必要と なる.そこで,薄膜が蒸着された3次元形状を有する物 体の法線・BRDF について今後取り組む予定である.

## 6. 謝辞

本研究の一部は,総合科学技術会議により制度設計された最先端・次世代研究開発支援プログラムにより,日本学術振興会を通して助成されたものである.ここに記して感謝申し上げる.















(f)

図 8 計測によって得られた反射率画像(左),20度から10度 ごとの推定パラメータから作成した反射率画像(真ん中), 真値パラメータから作成した反射率画像(右),(a)入射 角20度,(b)入射角30度,(c)入射角40度,(d)入射 角50度,(e)入射角60度,(f)入射角70度. Vol.2013-CVIM-188 No.34 2013/9/3

## 文 献

- M. Oren and S.K. Nayar, "Generalization of Lambert's Reflectance Model". SIGGRAPH. pp.239-246, Jul, 1994.
- [2] B. T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," *Communications of ACM* 18, no. 6, pp. 311-317, 1975.
- [3] James F. Blinn, "Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures", *Computer Graphics*, Vol. 11, No. 2, pp. 192-198, July, 1977.
- [4] G. Ward. "Measuring and modeling anisotropic reflection," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 26(2):265-272, 1992.
- [5] K. Torrance and E. Sparrow. "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces," *Journal of Opti*cal Society of America, 57(9):1105-1114, 1967.
- [6] E. Lafortune, S. Foo, K. Torrance, and D. Greenberg. Non-linear approximation of re- flectance functions. Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 117-126, 1997.
- [7] M. Ashikhmin and P. Shirley. "An anisotropic phong BRDF model," *Journal of Graphics Tools*, 5(2):25-32, 2000.
- [8] K. Iwasaki, K. Matsuzawa, and T. Nishita. "Realtime rendering of soap bubbles taking into account light interference," *Computer Graphics International* 2004(CGI'04), pp. 344-348, 2004.
- [9] H. Hirayama, K. Haneda, H. Yamashita, and Y. Monden. "An accurate illumination model for objects coated with multilayer films," *Eurographics 2000*, pp. 145-150, 2000.
- [10] H. Hirayama, Y. Yamaji, K. Kaneda, H. Yamashita, and Y. Monden. "Rendering iridescent colors appearing on natural objects," *Pacific Graphics 2000*, p. 15, 2000
- [11] Y. Sun, F. D. Fracchia, M. S. Drew, and T. W. Calvert. "Rendering iridescent colors of optical disks," *Proceedings of the Eurographics Workshop on Render*ing Techniques 2000, pp. 341-352, 2000.
- [12] Y. Sun, F. D. Fracchia, T. W. Calvert, and M. S. Drew. "Deriving spectra from colors and rendering light interference," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 19, pp. 61-66, 1999.
- [13] "入門 分光法による膜厚解析,"大塚電子株式会社.
- [14] 藤原裕之."分光エリプソメトリー,"丸善出版,2011.
- [15] 木下修一."生物ナノフォトニクス-構造色入門-,"朝倉 書店,2010.