

# 分光画像を用いた薄膜の光学パラメータ推定

小林由枝<sup>1,a)</sup> 森本哲郎<sup>2,b)</sup> 佐藤いまり<sup>3,c)</sup> 向川康博<sup>4,d)</sup> 池内克史<sup>1,e)</sup>

## 1. はじめに

コンピュータグラフィックス分野では物体の質感を再現する様々な手法が提案されている。これらは、映画、ゲーム、文化遺産のデジタル化などに用いられている。しかし、実際の物体は散乱、吸収、回折、屈折や干渉といった様々な反射特性を持つ。これらの複雑な反射特性を持つ物体の質感を再現することは非常に難しい。とりわけ、薄膜干渉は光源・視線方向に対して虹色に色変化を起こすため、扱いが容易でない。

薄膜干渉を起こす物体にはラミネートフィルム、シャボン玉、油膜などがある。薄膜を有する物体の質感推定は、工業、生物学、考古学、薬学などに応用可能である。工業製品においては、デジタルデータとして新商品のリアルな見えを再現し確認することが可能となる。本稿では、薄膜を有する物体の形状と質感の推定を行う。さらに、推定された光学パラメータを用いて、CG による再合成を行う。

コンピュータビジョンにおいて、対象の質感は双方向反射率分布関数 (BRDF) により表現される。薄膜干渉では、入射角、屈折率、膜厚をパラメータとする物理モデルにより BRDF が表現可能である。Dong ら [1] は boosting 技法を用いて、ハンドヘルドカメラによる BRDF 計測装置を開発し、SVBRDF の推定を行った。しかし、この手法は薄膜干渉による虹色の色変化を考慮しておらず、薄膜の BRDF 推定は困難である。Iwasaki ら [2] は薄膜のレンダリング手法を提案し、物理モデルにより薄膜の色変化を十分に表せることを示した。しかし、Iwasaki ら [2] は光学パラメータを手動で設定しており、実物体ではこれらの推定が必要になる。光学パラメータである膜厚を推定する手法として、分光干渉法 [3] やエリブソメトリー [4] がある。これらはポイントベースの計測手法であり、対象全体を計測するには

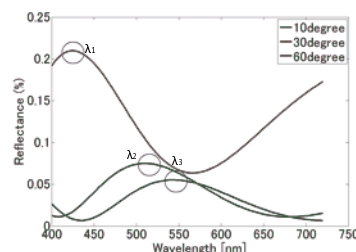


図 1 10 度、30 度、60 度での薄膜干渉反射率スペクトル。図中の丸印が強め合いを起こす波長の輝度値である。屈折率が 1.37、膜厚が 400[nm] として計算した。

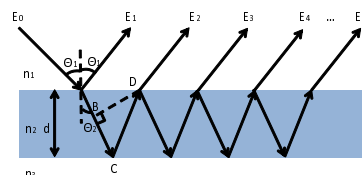


図 2 多重反射を考慮した際の薄膜干渉の模式図。 $E_0$  は入射光、 $E_1, E_2, \dots, E_n$  は薄膜上面の反射光である。 $n_1, n_2, n_3$  は屈折率、 $d$  は膜厚、 $\theta_1$  は入射角、 $\theta_2$  は屈折角である。

膨大な時間を要する。Kitagawa ら [5], [6] は膜厚に沿って RGB 値が変化する特性に基づき、画像ベースの推定手法を提案した。Kobayashi ら [7] は膜厚と屈折率をスペクトル画像により推定する手法を提案した。しかし、これらの手法は対象を平面と仮定しており、入射角が既知の必要があるため、複雑な形状を有する物体への適応は難しい。

本研究では、反射率画像から薄膜の SVBRDF を推定する。薄膜の屈折率が出射媒質の屈折率より小さい場合、強め合いを起こす波長の輝度値は入射角と出射媒質の屈折率にのみ依存する。この現象を用いて、我々は入射角の推定を行う。さらに、我々は図 1 に示す強め合いを起こす波長を用いて、屈折率と膜厚の効率的な推定手法を提案する。

本稿の内容は以下の通りである。2 章では薄膜干渉の反射率モデルの説明を行う。3 章では、入射角、屈折率、膜厚の推定手法について述べる。4 章ではパラメータが既知の対象を用いた提案手法の精度実験について述べる。5 章ではまとめについて述べる。

## 2. 薄膜干渉反射率モデル

光学分野においては、薄膜干渉の反射率モデル [8] が提案されている。薄膜の反射を鏡面反射のみと考え、ナノス

<sup>1</sup> 東京大学大学院 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1

<sup>2</sup> 凸版印刷株式会社 〒11-8531 東京都文京区水道 1-3-3

<sup>3</sup> 国立情報学研究所 〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

<sup>4</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

a) yoshie@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

b) tetsuro.morimoto@toppan.co.jp

c) imarik@nii.ac.jp

d) mukaigawa@is.naist.jp

e) ki@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

ケールにおける多重反射も考慮すると、図 2 における観察スペクトルは式 (1) による表される。

$$\begin{aligned}
 E_n &= E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + \dots \\
 &= E_0(r_{12} + t_{12}t_{21}r_{23}e^{i\Delta} + t_{12}t_{21}r_{23}^2r_{21}e^{2i\Delta} \\
 &\quad + t_{12}t_{21}r_{23}^3r_{21}^2e^{3i\Delta} + \dots) \\
 &= E_0(r_{12} + t_{12}t_{21}r_{23}e^{i\Delta}(1 + r_{23}r_{21}e^{i\Delta} \\
 &\quad + r_{23}^2r_{21}^2e^{2i\Delta} + \dots)) \\
 &= E_0(r_{12} + t_{12}t_{21}r_{23}e^{i\Delta} \frac{1}{1 - r_{23}r_{21}e^{i\Delta}}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

$r_{12}, r_{23}, r_{21}$  はフレネル反射係数,  $t_{12}, t_{21}$  はフレネル透過係数である。φ は図 2 に BC+CD として示されている経路差であり, Δ は式 (3) で示される位相差である。

$$\varphi = 2dn_2 \cos \theta_2 \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{2\pi\varphi}{\lambda} \quad (3)$$

$r_{21} = -r_{12}, t_{21}t_{12} + r_{12}^2 = 1$  を用いると, 反射の振幅係数は式 (4) により表される。

$$\begin{aligned}
 r &\equiv \frac{E}{E_0} \\
 &= r_{12} + t_{12}t_{21}r_{23}e^{i\Delta} \frac{1}{1 - r_{23}r_{21}e^{i\Delta}} \\
 &= \frac{r_{12} - r_{12}r_{23}r_{21}e^{i\Delta} + (1 - r_{12}^2)r_{23}e^{i\Delta}}{1 - r_{23}r_{21}e^{i\Delta}} \\
 &= \frac{r_{12} + r_{23}e^{i\Delta}}{1 + r_{23}r_{12}e^{i\Delta}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

反射率は式 (4) の絶対値の自乗になる。

$$R = \left| \frac{r_{12} + r_{23}e^{i\Delta}}{1 + r_{23}r_{12}e^{i\Delta}} \right|^2 \quad (5)$$

式 (5) のフレネル反射係数は, 垂直・平行偏光に対してそれぞれ入射角, 屈折率を用いて表される。垂直・平行偏光のフレネル反射係数は, 図 2 の入射媒質の屈折率  $n_1$  と薄膜の屈折率  $n_2$  を用いて, 式 (6), (7) となる。 $r_{23}$  は薄膜の屈折率と出射媒質の屈折率により, 式 (6), (7) と同様に表される。

$$r_{12}^s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (6)$$

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

式 (6), (7) を式 (5) に代入すると, 反射率は入射角, 屈折率, 膜厚により定義されることが分かる。したがって, 式 (5) は入射角に沿ったスペクトルの変化を表している。本稿では式 (5) を薄膜干渉の BRDF モデルとして用いる。

### 3. BRDF 推定手法

対象とする薄膜を有する物体の形状が未知の場合, 反射率が入射角に依存することから, まず入射角の推定が必要になる。強め合いを起こす波長の輝度値が出射媒質の屈折

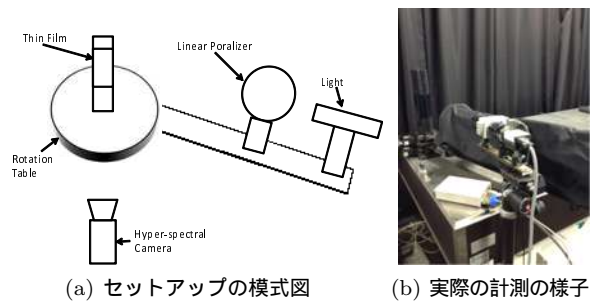


図 3 円筒形状の薄膜曲面の反射率計測のセットアップ。(a) セットアップの模式図。(b) 実際のセットアップ。光源と薄膜の距離は約 0.8[m]。カメラと薄膜の距離は約 0.6[m]。

率と入射角から定義されることから, 入射角の推定が行える。また, 光路差が強め合いを起こす波長の整数倍になることを利用して, 効率的に屈折率と膜厚の推定を行う。

#### 3.1 入射角推定

対象とする薄膜を有する物体の形状が未知の場合, BRDF が入射角に依存するため, 入射角の推定が必要となる。我々は, 強め合いを起こす波長の輝度値が出射媒質の屈折率と入射角にのみ依存することに着目した。この特性を用いて入射角の推定を行う。

強め合いを起こす波長の位相差は式 (3) により表される。

$$\Delta_p = \frac{2\pi\varphi}{\lambda_{peak}} \quad (8)$$

図 2 の出射媒質の屈折率  $n_3$  が薄膜の屈折率  $n_2$  より大きい場合, 位相差は  $2\pi$  となる [9]。したがって,  $e^{i\Delta_p}$  は強め合いを起こす波長において 1 となる。このことから, 強め合いを起こす波長の輝度値は式 (9) で表される。

$$R_p = \left| \frac{r_{12} + r_{23}}{1 + r_{23}r_{12}} \right|^2 \quad (9)$$

式 (6), (7) を式 (9) に代入すると

$$\begin{aligned}
 R_p &= \left| \frac{\cos \theta_1 - n_3 \cos \theta_3}{\cos \theta_1 + n_3 \cos \theta_3} \right|^2 \\
 &= \left| \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{n_3^2 - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{n_3^2 - \sin^2 \theta_1}} \right|^2 \quad (10)
 \end{aligned}$$

となる。以上から, 強め合いを起こす波長の輝度値である式 (10) は出射媒質の屈折率と入射角のみに依存することが分かる。

入射角の推定では, 式 (11) に示すように強め合いを起こす波長の輝度値の二乗誤差最小化により推定を行う。

$$\text{Arg min}_{\theta_1} |R_{pmo} - R_{pme}|^2 \quad (11)$$

$R_{pmo}$  は出射媒質の屈折率から求められる強め合いを起こす波長の輝度値である。 $R_{pme}$  は計測により得られた強め合いを起こす波長の輝度値である。

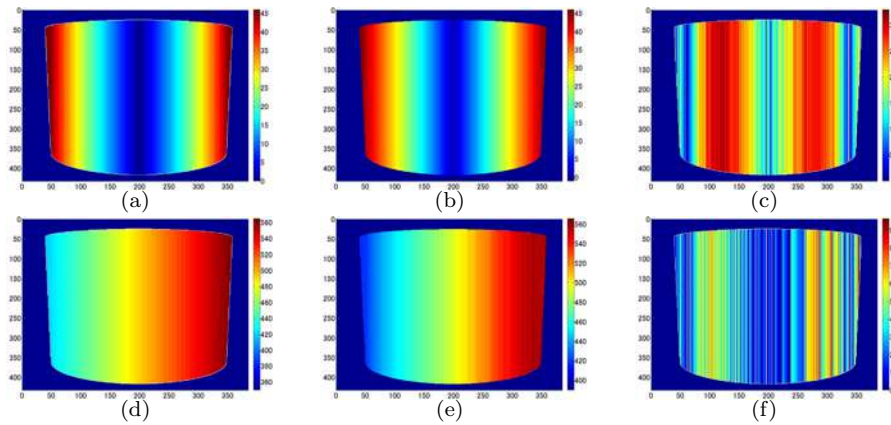


図 4 シミュレーションでの推定結果 . (a), (b), (c) 入射角の推定結果 . (d), (e), (f) 膜厚の推定結果 . (a), (d) は真値 . (b), (e) は推定結果 . (c), (f) は誤差分布 .

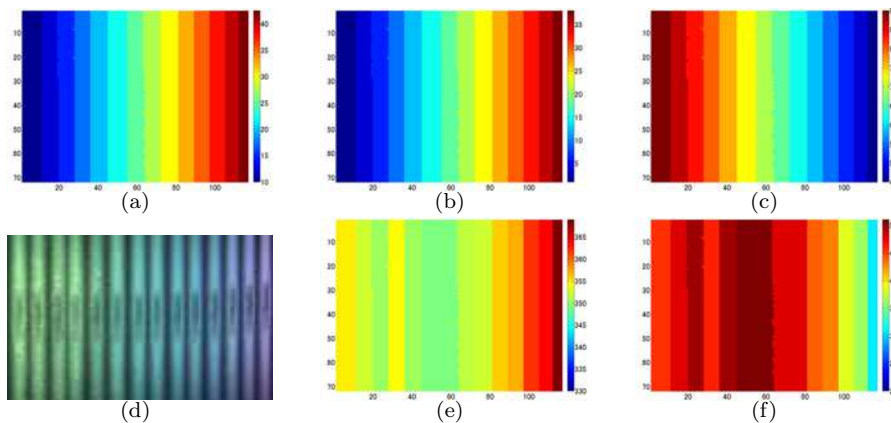


図 5 実計測データでの推定結果 . (a), (b), (c) 入射角の推定結果 . (d), (e), (f) 膜厚の推定結果 . (a), (d) は真値 . (b), (e) は推定結果 . (c), (f) は誤差分布 .

### 3.2 屈折率・膜厚の推定

屈折率・膜厚は薄膜の質感を再現するのに重要なパラメータである . 本節では , これらのパラメータを推定する効率的な手法を提案する .

本手法では , 対象の薄膜を有する物体の材質が均一であり , 屈折率が一樣であるが膜厚が不均一であると仮定する . その場合 , 式 (12) の光路差は以下のように書き換えられる .

$$\varphi = 2d\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta_1} \quad (12)$$

$d$  は膜厚 ,  $\theta_1$  は入射角である . 光路差は強め合いを起こす波長の整数倍になることから

$$m\lambda = 2d\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta_1} \quad (13)$$

となる .  $m$  は整数 ,  $\lambda$  は強め合いを起こす波長である . 式 (14) から膜厚は以下のように定義される .

$$d = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta_1}} \quad (14)$$

光路差である式 (13) では屈折率・膜厚がパラメータとして用いられている . この光路差が強め合いを起こす波長の整数倍になる事から , 最適な屈折率・膜厚を求めるには式

(13) の条件を満たす屈折率・膜厚の組のみ検証すればよい . そのため , 全探索に比べて提案手法の計算コストは大幅に小さくなる .

屈折率・膜厚の最適解の推定には , 計測で得られた反射率と反射率モデルから計算される反射率との二乗誤差最小化を用いる . 式 (14) では , 屈折率  $n_2$  と整数  $m$  が未知であるので , 二乗誤差最小化ではこれらの最適解を求める . 膜厚  $d$  はこれらのパラメータが求まる事で決定できる .

$$\text{Arg min}_{n_2, m} \left| \sum_{\lambda} R_{mo}(\lambda) - R_{me}(\lambda) \right|^2 \quad (15)$$

$R_{mo}(\lambda)$  は反射率モデルにより計算される反射率 ,  $R_{me}(\lambda)$  は計測で得られた反射率である .

前節でも述べたように , 屈折率  $n_2$  は出射媒質の屈折率より小さい . また , 真空の屈折率である 1.0 よりも大きい . Kobayashi ら<sup>7</sup>は 0.01 程度の屈折率の誤差は薄膜の質感再現にほとんど影響を与えないことを示した . そこで , 本手法では , 屈折率を 1.0 から出射媒質の屈折率まで 0.01 刻みで変化させている . また , 膜厚が 1000 [nm] 以下になる範囲で自然数  $m$  を変化させている .

### 4. 実験

実験では , シミュレーションと実計測により提案手法の

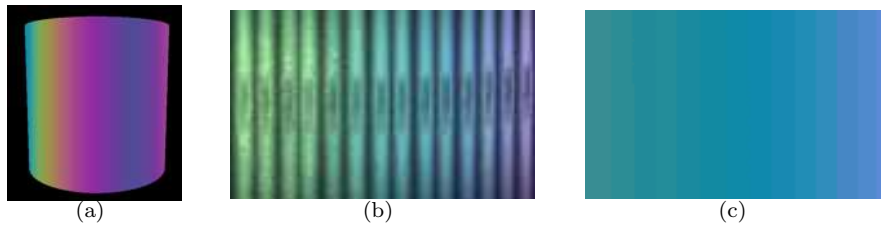


図 6 推定パラメータを用いた CG による再合成画像と実計測反射率画像 . (a) シミュレーションの再合成画像 . (b) 実計測での反射率画像 . (c) 実計測の再合成画像 .

精度検証を行った . シミュレーションでは円筒形状を用い , 屈折率を実物体と同じ 1.37 とし , 膜厚は 420[nm] から 560[nm] まで画像の横軸方向に変化させた .

実計測のセットアップは , 図 3 に示している . 対象となる薄膜を有する物体は円筒であり , 光源は入射角を調整するため回転台に取り付けている . 対象となる薄膜は  $MgF_2$  であり , 屈折率は 1.37 , 膜厚は 400[nm] である . 出射媒質はポリエチレンテレフタレートフィルムで , 屈折率は 1.6 である . 入射角は 10 度から 42.5 度まで 2.5 度ずつ変化させた . スペクトルカメラには液晶チューナブルフィルタ (Vari Spec CRI) がモノクロカメラの前についており , ここで透過波長を調節している . 液晶チューナブルフィルタが直線偏光のみ透過し , 光源前にも偏光板を設置しているため , 観測される反射率は垂直・平行偏光のフレネル反射係数を用いて表される .

図 4 , 5 にシミュレーション , 実計測それぞれの入射角の推定結果をしめしている . この結果から , 20 度までの角度で誤差が大きいことが分かる . この誤差は 20 度以下の入射角において強め合いを起こす波長の輝度値の変化率が 0.01 以下と小さく , 強め合いを起こす波長が近接しているため , シミュレーション , 実計測において検出が難しかったためと考えられる . 屈折率はシミュレーションにおいて 1.37 , 実計測において 1.41 という推定結果になった . 膜厚の平均誤差は 45[nm] 程度となった .

色彩をどの程度再現可能か検証するため , 全ピクセル・入射角に対する RMSE を計算した . その結果 , RMSE は 0.0272 となった . また , 図 6 には推定された入射角 , 屈折率 , 膜厚を用いた CG による再合成結果を示している . 実際に撮影された画像と比較すると , 十分に再現されていることが分かる .

## 5. まとめ

本稿では薄膜曲面の色彩を再現する手法の提案を行った . 入射角の推定においては , 強め合いを起こす波長の輝度値に着目して推定を行った . また , 強め合いを起こす波長が光路差の整数倍になることを利用して , 屈折率・膜厚の推定についてより効率的な手法の提案を行った . 提案手法の精度検証として , シミュレーションと実データを用いた実験を行った . その結果 , 両結果で薄膜の BRDF を再現するのに十分な精度が提案手法にあることが分かった .

しかし , 20 度以下の入射角において誤差が最大で 10 度程度となった . これは , 強め合いを起こす波長の輝度値の変化率が小さいため , 強め合いを起こす波長が近接しているため , 検出が難しかったためと考えられる . その他の入射角においては , 5 度以下の誤差となった . 推定されたパラメータを用いて , シミュレーション , 実計測ともに再合成画像を作成し , 色彩再現の精度が十分であることを示した .

## 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 .

## 参考文献

- [1] Y. Dong, J. Wang, X. Tong, J. Snyder, Y. Lan, M. Ben-Ezra, B. Guo, "Manifold Bootstrapping for SVBRDF Capture," *ACM Transactions on Graphics* Volume 29, Number 4, July 2010.
- [2] K. Iwasaki, K. Matsuzawa, and T. Nishita, "Real-time rendering of soap bubbles taking into account light interference," *Computer Graphics International*, pp. 344-348, 2004.
- [3] K. W. Meissner, "Interference Spectroscopy. Part I," *Journal of Optical Society of America*, Vo; 31 (6), pp. 405-427, 1941.
- [4] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara, "Ellipsometry and Polarized Light," *Elsevier Science Pub Co*, 1987.
- [5] K. Kitagawa, "Thin-film thickness profile measurement by three wavelength interference color analysis", *Applied Optics*, Vol. 52, Iss. 10, pp. 1998-2007, 2013.
- [6] K. Kitagawa, "Transparent film thickness measurement by three-wavelength interference method: An extended application of Global Model Fitting algorithm", *Europe-Asia Congress on and Research and Education in Mechatronics (REM)*, pp.94-100, 2012.
- [7] Y.Kobayashi, T.Morimoto, I.Sato,Y.Mukaigawa, K.Ikeuchi, "BRDF Estimation of the Structural Color Object by Using Hyper Spectral Image", *Proc. ICCV workshop of Color and Photometry in Computer Vision*, 2013.
- [8] S. Kinoshita, "Structural Colors in the Realm of Nature," *World Scientific Pub Co Inc* , 2009.
- [9] J.N Israelachvili, "Thin film studies using multiple-beam interferometry," *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 44, Issue 2, pages 259-272, August 1973.