

法文書

原著

BRDF モデルによる金蒸着紙の偏角放射輝度特性の近似

赤尾佳則^{*1}, 津村徳道^{*2}, 中口俊哉^{*2}, 三宅洋一^{*2, 3}

科学警察研究所^{*1}, 千葉大学工学部情報画像工学科^{*2},

千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター^{*3}

〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 6-3-1^{*1}

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33^{*2}

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33^{*3}

Approximation of the gonio radiance properties of gold-coated paper sheets by BRDF models

Yoshinori Akao^{*1}, Norimichi Tsumura^{*2}, Toshiya Nakaguchi^{*2} and Yoichi Miyake^{*2, 3}

National Research Institute of Police Science

6-3-1, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-0882, Japan^{*1}

Department of Information and Image Sciences, Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan^{*2}

Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan^{*3}

Running Head:

BRDF モデルによる金蒸着紙の偏角放射輝度特性の近似

Abstract

In this paper, we approximated gonio radiance properties of the surface reflection component of paper sheets by BRDF model, which is required in the digital image archive system recording the specimens of forensic document examination. Surface reflection component was selectively acquired by measuring the paper sheets processed with gold evaporation. Gonio radiance factor of three kinds of gold-coated paper sheets were approximated by TSL model, which is the linear combination of two BRDF models, Torrance-Sparrow model and Lambert model. Relative gonio properties of each sample were well depicted by TSL model, however a large deviation occurred in the specular reflection geometry for glossy paper. The RMSE between the measurement and the approximation by TSL model was under 2% of the range of measured value. The roughness parameter in Torrance-Sparrow model corresponded with the state of surface roughness, and also the ratio between Torrance-Sparrow model and Lambert model showed the difference of material characteristics between samples. Therefore TSL model was considered to be effective as a BRDF model approximating the gonio radiance properties of surface reflected light from paper sheets.

Key words: Document examination, Paper sheets, Gonio photometry, Digital archive, BRDF models

緒言

最近の文書偽造犯罪は、広域化、スピード化という言葉で説明されるように、犯罪の発生場所が一箇所にとどまらず次々と場所を変え、しかも短期間で終結する傾向がある。このような状況に対処するためには、コンピュータネットワークを活用した文書鑑定資料のデジタルアーカイブシステムを構築し、偽造文書の画像情報を遠隔地の文書鑑定担当者に迅速に伝達し、共有する必要がある。

文書鑑定用途のデジタルアーカイブでは、形状はもとより、色と質感を忠実に記録することがきわめて重要である。その理由は、文書鑑定では、資料の形状だけでなく、色や質感をはじめとする多くの情報を観察することにより、印刷の方法、紙や色材の種類、改ざんの有無などの検査をおこなう必要があるためである。

偏角分光画像法¹⁾は、物体の色や質感を忠実に記録できる画像技術であり、文書鑑定資料のデジタルアーカイブ技術としてきわめて適している。この方法では、物体の分光反射特性と偏角反射特性を、画像情報として記録する。分光反射特性は、照明光や撮影デバイスの分光特性に依存しない物体固有の色情報である。また偏角反射特性は、入射方向や観察方向、すなわち測定のジオメトリと反射光強度との関係であり、光沢や粗さなどの物体の質感と関わりがある。

偏角分光画像法では、測定とデータ保存を効率的におこなうため、物体の光学的反射特

性を BRDF モデルで近似する方法が一般的に用いられる。BRDF モデルは、測定ジオメトリと反射光強度との関係をあらわす双方向反射率分布関数(BRDF: Bidirectional Reflection Distribution Function)²⁾を数学モデルで表現したものである。少数のジオメトリでの測定データを BRDF モデルで近似することにより、モデル式からあらゆるジオメトリでの分光放射輝度を算出する。

文書鑑定資料のデジタルアーカイブのためには、その基本要素である紙の偏角分光反射特性を良好に近似する BRDF モデルが必要である。これまでに、近似対象物体の光学的反射特性に応じて、数多くの BRDF モデルが提案されてきた³⁻¹³⁾。しかしながら、紙に特化した BRDF モデルはまだ開発されておらず、また紙への適用についても十分には検討されていない。紙の偏角反射特性を大まかに近似するモデルとして、完全拡散反射モデルである Lambert モデル³⁾が用いられる場合もある。しかしながら、紙の反射光には多少の光沢成分が含まれており、完全拡散反射とは異なる。また紙の光沢の違いは、紙の質感の違いを生み出す重要な要素であり、文書鑑定資料のデジタルアーカイブシステムでは無視することができない。

紙の光学的反射特性の近似に関する研究は、BRDF モデルによる近似以外では歴史が古く、すでに 1930 年代には散乱体中の光伝播をモデル化した Kubelka-Munk 則^{14,15)}が提案されている。その後さまざまな改良が加えられ、物体の光散乱モデルとして幅広く利用されている。最近では画像の調子再現を目的として、紙へのインクの浸透を考慮したモデルが提案

されている¹⁶⁾。しかしながら、ジオメトリ 0/0 の反射率のみが得られるため、散乱光の角度依存性を求めることができない。散乱光の角度依存性を含めたモデル化としては、放射輸送理論¹⁷⁾に基づく方法が提案されており、位相関数に Henyey-Greestein 関数¹⁸⁾などを導入し、各方向で放射輸送方程式を計算する discrete ordinate 法¹⁹⁾により、散乱光の角度依存性を求めている²⁰⁾。しかしながら、モデル式が微分・積分方程式で表現されており、パラメータ数も多いため、そのままの形では偏角分光画像法に適用することが困難である。またモンテカルロシミュレーションを用いる方法²¹⁾も提案されている。しかしながら、モンテカルロ法の性質上、観察結果からモデルパラメータを推定することが容易ではなく、偏角分光画像法には適していない。

紙の偏角分光反射特性を BRDF モデルで近似する場合には、表面反射光成分と内部散乱光成分を考慮する必要がある。表面反射光成分は、紙の表面で反射する成分であり、内部散乱光成分は、光が紙の内部に入り、繊維やコート層の填料などによって複数回反射、屈折、散乱した後に紙の外部に出射する成分である。BRDF モデルには、大きく分けて鏡面反射と拡散反射を表現する二つの要素があり²²⁾、それぞれは、概ね表面反射光成分と内部散乱光成分に対応している。また Shafer の二色性反射モデル²³⁾では、紙などの不均質誘電物体の表面反射光成分と内部散乱光成分を、それぞれ光源色成分と物体色成分に対応させている。

その中でも表面反射光成分は、紙の光沢にかかわる重要な要素であり、近似に用いる

BRDF モデルの検討では、計測結果に基づいて正確におこなう必要がある。これまで紙の表面反射光成分を選択的に計測する方法としては、紙にアルミニウムを蒸着し、内部散乱光成分を抑制する方法が提案されてきた²⁴⁾。しかしながら、測定結果を BRDF モデルで近似することについては、まだ検討されていない。

そこで本研究では、紙の内部散乱成分を抑制した金蒸着紙を作成し、その偏角放射輝度特性の測定結果を、BRDF モデルで近似することにより、紙の表面反射光成分の近似に適用可能な BRDF モデルを求めることを目的とした。

試料および方法

測定試料は、Table 1 に示す 3 種類の白色プリンタ用紙を縦 60mm、横 150mm の大きさに切断し、真空蒸着装置（AKASHI 製）を用いて金を蒸着させたものである。金蒸着の度合いは、素材とする紙の白色が金色に変化し、試料を通して約 2m 離れた屋内の蛍光灯(National, FHF32EX, 32W)を肉眼で観察したときに、透過光が確認されない程度とした。本研究では、蒸着物質として金を用いることにより、従来研究のアルミニウム蒸着で問題となっていた酸化等による反射率低下の影響を回避した。

Fig. 1 に測定試料 PPC（普通コピー紙）の金蒸着加工前後の全景写真を示す。加工前は、紙の白色であるのに対し、加工後は、紙の表面が金で覆われており、金色を呈した。Fig. 2

は、Fig. 1 に示す試料の表面を光学顕微鏡で拡大観察したものである。金蒸着加工後の試料は、紙の繊維の表面が金で薄く覆われた状態になっており、加工前の繊維の凹凸構造が忠実に残されていた。

偏角分光放射輝度率の測定には、偏角分光光度計（村上色研製、GCMS-4）を用い、波長 390nm から 730nm までの分光放射輝度率を 10nm 間隔で測定した。また放射輝度率は、D50 光源、CIE1931 標準観測者（10° 視野）の条件で算出した。測定ジオメトリは、Table 2 に示す入射方向 6 種類、観察方向 161 種類の組み合わせによる 966 種類のジオメトリのうち、入射方向と観察方向が同方向又はほぼ同じ方向であるため、光源と検出器が互いに干渉し、測定することができない $\phi_r = \phi_i, |\theta_r - \theta_i| \leq 8$ の条件を満たす 102 種類のジオメトリ除いた 864 種類のジオメトリとした。また Fig. 3 に測定ジオメトリの定義の説明図を示す。照明光の入射方向を i 、観察方向を r 、試料面の法線方向を n とするとき、入射角度の天頂角 θ_i 、方位角 ϕ_i 、および観察角度の天頂角 θ_r 、方位角 ϕ_r を図中に示すように定義した。測定のジオメトリには、偏角特性の解析において重要である正反射のジオメトリが含まれている。またいずれのジオメトリも、入射方向、観察方向及び法線方向が同一面内に存在している。

本研究で測定する偏角放射輝度率は、BRDF を完全拡散反射面の BRDF で規格化したものである。BRDF は、入射光の放射照度に対する反射光の放射輝度を測定ジオメトリの関数として表現したものである。すなわち、入射方向 $\mathbf{i} = (\theta_i, \phi_i)$ からの光による放射照度 $E(\mathbf{i})$ により、観察方向 $\mathbf{r} = (\theta_r, \phi_r)$ に生じる放射輝度 $L(\mathbf{r}; \mathbf{i})$ とすると、BRDF $f(\mathbf{r}; \mathbf{i})$ は、次式で定義さ

れる．

$$f(\mathbf{r}; \mathbf{i}) = \frac{L(\mathbf{r}; \mathbf{i})}{E(\mathbf{i})}. \quad (1)$$

完全拡散反射面の BRDF は，入射方向，観察方向にかかわらず一定（ $=1/\pi$ ）であることから，偏角放射輝度率は，BRDF の定数倍となる．したがって偏角放射輝度率を BRDF モデルで近似することが可能である．

金蒸着紙の偏角放射輝度率の近似には，Torrance-Sparrow モデル⁵⁾と Lambert モデル³⁾の 2 種類の BRDF モデルの線形結合モデルを用いた．すなわち，Torrance-Sparrow モデルを $f_{TS}(\mathbf{r}; \mathbf{i})$ ，Lambert モデルを $f_L(\mathbf{r}; \mathbf{i})$ とするとき，係数 k_{TS} ， k_L を用いて次式で表現される．

$$f_{TSL}(\mathbf{r}; \mathbf{i}) = k_{TS} f_{TS}(\mathbf{r}; \mathbf{i}) + k_L f_L(\mathbf{r}; \mathbf{i}). \quad (2)$$

以下，このモデルを TSL モデルと呼称する．

Torrance-Sparrow モデル（以下，TS モデル）は，物体表面の凹凸を微小な V 字形の谷の集合として表現し，反射光強度を幾何光学的に導出して求められた BRDF モデルである．TS モデルで仮定する微小な V 字谷は，Fig. 2 に示す金蒸着紙表面の繊維の形状と類似している．また TS モデルは，表面粗さや材質の異なる多様な物体の偏角放射輝度特性を近似できることが知られている．そのため TS モデルは，紙の表面反射光成分に対しても良好な近似結果を与えることが期待される．しかしながら TS モデルは，V 字谷で 1 回反射された光のみを考慮し，2 回以上反射される多重反射光を無視している．そこで完全拡散反射面の偏角反射特性を示す Lambert モデルを併用し，多重反射光成分を表現することにより，近似精

度の向上を図った。

TS モデルには、2 種類のパラメータ σ , ρ_s が用いられる。 σ は V 字谷を構成する微小素面の傾きの標準偏差であり、表面の粗さを表現する。また ρ_s は微小素面の反射率である。

このとき TS モデルは、次式で与えられる。

$$f_{TS}(\mathbf{r}; \mathbf{i}; \rho_s, \sigma) = \frac{\rho_s \cdot GAF}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \exp\left(-\frac{\theta_a^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

ここで θ_a は、表面の法線方向 $\mathbf{n}$ と、入射方向 $\mathbf{i}$ と反射方向 $\mathbf{r}$ の中間ベクトル $\mathbf{a}$ とが成す角度である。また GAF (Geometrical Attenuation Factor) は、V 字谷による照明光の陰影効果、観察側からの遮蔽効果を表現するものであり、次式で与えられる。

$$GAF = \text{Min}\left[1, \frac{2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{a})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r})}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{a}}, \frac{2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{a})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{i})}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{a}}\right]. \quad (4)$$

Lambert モデル (以下、L モデル) には、反射率をあらわす 1 種類のパラメータ ρ_d が用いられており、次式で与えられる。

$$f_L(\mathbf{r}; \mathbf{i}; \rho_d) = \frac{\rho_d}{\pi}. \quad (5)$$

L モデルでは、放射輝度は入射角度、反射率パラメータ ρ_d のみに依存しており、観察方向に対して一定である。

TSL モデルの測定値への近似では、シンプレックス法による非線形最適化 (数値計算ソフトウェア (MathWorks 製、MATLAB 6.0) の関数 fminsearch) を用い、RMSE を最小化する条件で TSL モデルのパラメータを求めた。ここでは、TS モデルと L モデルの各反射率パラメータ ρ_s , ρ_d/π をいずれも 1 とし、(2)式の 3 種類のパラメータ σ , k_{TS} , k_L を最適

化した。

モデルによる近似精度を，測定値とモデル近似値との RMSE，および RMSE を測定値の最大値と最小値の差で規格化した Normalized RMSE で評価した。

結果および考察

光沢紙(G)の偏角分光放射輝度率の測定結果を，Fig. 4 に示す。正反射方向($\theta_r = \theta_i$)には，きわめて強くシャープなピークが認められた。ピークの形状は釣り鐘型であり，正反射方向を中心とし，観察角度 θ_r に対してほぼ対称であった。ピークでの分光放射輝度率は，200 から 800 であるのに対し，それ以外のジオメトリでは 0.08 以下であった。すなわち，入射光の大部分が正反射方向に鏡面反射されており，拡散反射成分がほとんど観測されなかった。

普通コピー紙(PPC)の偏角分光放射輝度率の測定結果を，Fig. 5 に示す。まず，観察角度 θ_r の増加にともない，分光放射輝度率が上昇する傾向が認められた。この傾向は，入射角度 $\theta_i = 30^\circ$ 以上で認められ， θ_i の増加にしたがって顕著となった。入射角度 $\theta_i = 60^\circ$ の場合，観察角度 $\theta_r = 0^\circ$ での分光放射輝度率が 1 以下であるのに対し，観察角度 $\theta_r = 60^\circ$ 以上では，およそ 2 から 4 に達した。また正反射方向には，わずかなピークが認められた。ピークでの分光放射輝度率は，光沢紙に比べてきわめて低く，入射角度 $\theta_i = 45^\circ$ の場合，約 1 から 3

であった。ピークの形状は、観察角度 θ_r に対して非対称であり、少なくとも 20° 程度の広がり認められた。また光沢紙よりも多くの拡散反射成分が認められ、観察角度 $\theta_r = 0^\circ$ の分光放射輝度率は、0.2 から 0.8 であった。

マットコート紙(MC)の偏角分光放射輝度率の測定結果を、Fig. 6 に示す。普通コピー紙と同様に、観察角度 θ_r の増加にともなう分光放射輝度率の上昇傾向が認められ、入射角度 θ_i の増加にしたがって、その傾向が顕著となった。また正反射方向には、わずかなピークが認められた。しかしながら、ピーク強度は普通コピー紙よりも弱く、入射角度 θ_i が 60° 以上では、ほとんど認められなかった。また観察角度 $\theta_r = 0^\circ$ での分光放射輝度率は、0.1 から 1.2 であり、拡散反射成分が多く認められた。

正反射方向と拡散反射方向における各試料の分光放射輝度率を、Fig. 7 に示す。ここで正反射方向は、入射角度 $\theta_i = 45^\circ$ 、観察角度 $\theta_r = 45^\circ$ 、拡散反射方向は、入射角度 $\theta_i = 45^\circ$ 、観察角度 $\theta_r = 0^\circ$ とした。いずれのジオメトリでも、波長 500nm 以下が低く、500nm 以上では長波長になるにしたがって徐々に高くなる金特有の分光特性を示した。すなわち、分光放射輝度率の相対的な特性は、ほぼ一定であった。紙をはじめとする不均質誘電体では、正反射方向において光源色成分が観測されるため、拡散反射方向とは分光分布が異なるのに対し、金属では、正反射方向と拡散反射方向で分光分布がほぼ一定となる。

以上の結果から、試料の表面は、金で十分に覆われており、紙の繊維内部に光が入ることによって生じる内部散乱光成分が抑制されていることが示された。すなわち、今回の試

料は、紙の形状を忠実に保持した金属と考えることができ、測定結果は、紙の表面反射光成分を考察するために有効であると考えられた。この場合、金蒸着紙の分光分布が一定と考えることができることから、以下では強度のみを考慮し、偏角放射輝度率を解析した。

金蒸着紙の偏角放射輝度率を、TSL モデルで近似したときのパラメータ推定結果を Table 3 に示す。

光沢紙(G)では、表面粗さのパラメータ σ が約 1° ときわめて小さかった。これに対応する TS モデルの V 字谷は、微小素面の方向がほぼ揃っている状態であり、光沢紙の滑らかな表面形状と一致した。TS モデルの係数 k_{TS} と L モデルの係数 k_L は、それぞれ約 150、約 3 であり、拡散反射的な L モデルに対して、表面形状による単一反射に起因する TS モデルの影響が支配的であった。

一方、普通コピー紙(PPC)とマットコート紙(MC)では、表面粗さパラメータ σ が約 10° と大きく、V 字谷の微小素面方向のばらつきが大きかった。これは、普通コピー紙とマットコート紙の表面が粗い状態と一致した。一方、TS モデルの係数 k_{TS} と L モデルの係数 k_L は、両試料で異なっており、普通コピー紙では、それぞれ約 0.5、約 0.1 であるのに対し、マットコート紙では、約 0.7、約 0.4 であった。また k_{TS} と k_L の比は、普通コピー紙では、およそ 4:1 であるのに対し、マットコート紙では、およそ 2:1 であった。マットコート紙では、普通コピー紙よりも L モデルの割合が高く、表面反射成分であっても、微細で複雑な形状による多重散乱の影響が高くなったものと考えられた。

放射輝度率の測定値と TSL モデル近似値の比較を，Fig. 8 から Fig. 10 に示す．図では，入射角度 $\theta_i = 20, 30, 45, 60$ ，観察角度の天頂角 $\theta_r = 0 \sim 70$ ，同方位角 $\phi_r = 180$ の範囲を示した．

光沢紙(G)の結果を Fig. 8 に示す．正反射方向にきわめて鋭く強いピークが生じている様子や，ピークの幅など，相対的な偏角特性が良好に近似された．しかしながら，ピーク強度の近似において，大きな誤差が発生した．

普通コピー紙(PPC)の結果を Fig. 9 に示す．観察角度 θ_r の増加にともなう輝度率の上昇が，TSL モデルによって良好に近似されており，測定値とモデル近似値がほぼ一致した，しかしながら，正反射方向の近傍に存在するわずかなピークが再現されなかった．

マットコート紙(MC)の結果を Fig. 10 に示す．普通コピー紙と同様に，観察角度 θ_r の増加にともなう輝度率の上昇が良好に近似されたものの，正反射方向の近傍に存在するわずかなピークが再現されなかった．

TSL モデルの近似精度を Table 4 に示す．絶対値の推定精度の指標である RMSE は，光沢紙(G)では 9.16 にのぼり，完全拡散反射面の放射輝度の約 9 倍もの大きな誤差が生じた．普通コピー紙(PPC)では 0.04，マットコート紙(MC)では 0.06 であり，反射率に換算すると 5% 程度の誤差であり，良好な近似結果が得られた．しかしながら光沢紙と普通コピー紙，マットコート紙とでは，輝度率のレンジに大きな差があるため，誤差の絶対値のみでは近似精度を評価できない．そこで，放射輝度率のレンジで規格化した Normalized RMSE により，

測定ジオメトリに対する放射輝度率の相対的な変化を評価した。放射輝度率のレンジは、光沢紙で約 570、普通コピー紙で約 2.2、マットコート紙で約 3.2 であり、Normalized RMSE は、いずれの資料も 2%以下であった。すなわち、測定ジオメトリに対する放射輝度率の相対的なプロファイルは、いずれの資料も TSL モデルで良好に近似できることが確認された。

以上により、TSL モデルは、紙の表面反射光成分を近似する BRDF モデルとして有効であると考えられた。良好な近似結果が得られた要因としては、まず TS モデルが表面粗さや材質の異なる多様な物体の光学的反射特性を近似可能であり、紙に対しても良好な結果を与えたこと、さらに L モデルを併用することにより、TS モデルでは表現できない多重反射光成分が近似されたことが考えられた。また TSL モデルは、モデル式がシンプルであり、パラメータ数が 3 個と少数であるため、近似の計算コストが低く、保存データ量が少ない。このことは、偏角分光画像法への適用においてきわめて有利である。

しかしながら、以下の問題点があるため、今後検討する必要がある。

まず、光沢紙の近似では、正反射ジオメトリ付近で大きな誤差が生じた。その要因としては、TS モデルにおいてフレネル反射率の測定ジオメトリ依存性を考慮しなかったことが考えられた。フレネル反射率の問題は、特に強い光沢を有する試料において重要である。フレネル反射率を考慮することにより、近似精度の向上が期待されるため、今後検討する必要がある。

また普通コピー紙とマットコート紙の近似では、観察角度 θ_r の増加にともなう輝度率の

上昇が良好に近似されたが、正反射方向のわずかなピーク形状が近似されなかった。その要因としては、TS モデルの一種類の σ では、両方の要素を同時に表現することが困難であることが考えられた。TS モデルで釣り鐘状のピークを表現するためには粗さパラメータ σ が約 5° 以下である必要があるが、その領域の σ では、 θ_r の増加にともなう輝度率の上昇を表現することができない。しかしながら、TS モデルを複数化し、二種類以上の σ を用いることにより、この問題を解決できると考えられた。

今回、モデルの近似精度の評価は、入射方向と観察方向が同一面内に存在するジオメトリのみでおこなった。この中には、偏角特性の解析で重要となる正反射のジオメトリが含まれており、相対的な偏角特性が良好に近似されたことは、TSL モデルの有効性の高さを示すものと考えられた。有効性をさらに確認するためには、方位角を変化させた広範囲のジオメトリにおいても近似精度を評価する必要がある。また TS モデル、L モデル以外の BRDF モデルを利用することにより、さらに良好な結果が得られる可能性があるため、今後、検討する必要がある。

結語

本研究では、紙の表面反射光成分を近似する BRDF モデルを検討することを目的とし、内部散乱光成分を抑制した金蒸着紙の偏角放射輝度特性を測定し、BRDF モデルによる近似

精度を評価した。BRDF モデルとして、TS モデルと L モデルの線形結合モデルである TSL モデルを用いた結果、Normalized RMSE が 2%以下の精度で近似できることが確認された。また TSL モデルは、パラメータ数が少なく、モデル式がシンプルであるため、偏角分光画像法への適用が容易であることから、紙の表面反射光成分の BRDF モデルとして有効と考えられた。

TSL モデルの近似精度は、フレネル反射率を考慮し、TS モデルを複数化することによってさらに向上する可能性があるため、今後検討する必要がある。また TSL モデル以外の BRDF モデルについても、近似精度やモデルパラメータ数などの性能を評価し、適用可能性を調査する必要がある。

今後は、今回検討した表面反射光成分の TSL モデルに加えて、内部散乱光成分を含めた紙全体の偏角分光放射輝度特性を近似することにより、文書鑑定資料のデジタルアーカイブに必要な紙の BRDF モデルについて検討する予定である。

謝辞

紙の金蒸着加工にあたり、ご指導を頂いた元科学警察研究所 小沼弘義先生、科学警察研究所法科学第二部 齊藤直樹先生、同、物理研究室 黒木健郎先生、秋葉教充先生に深謝する。

文献

1. H. Haneishi, T. Iwanami, T. Honma, N. Tsumura and Y. Miyake: Goniospectral imaging of three-dimensional objects, *J. Imaging Sci. Technol.*, **45**, 451-483(2001).
2. F. E. Nicodemus: Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity, *Appl. Opt.*, **9**, 1474-1475(1970).
3. J. Lambert: Photometria sive de mensura de gratibus luminis, colorum umbrae, Eberhard Klett, Augsburg, Germany, 1760.
4. P. Beckmann: Shadowing of random rough surfaces, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **AP-13**, 384-388(1965).
5. K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 1105-1114(1967).
6. M. Oren and S. K. Nayar: Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision, *Intl. J. Comput. Vis.*, **14**, 227-251(1995).
7. P. Poulin and A. Fournier: A model for anisotropic reflection, *Computer Graphics*, **24**, 273-282(1990).
8. B. T. Phong: Illumination for Computer Generated Pictures, *Comm. ACM*, **18**, 311-317(1975).

9. G. J. Ward: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, *Computer Graphics*, **26**, 265-272 (1992).
10. B. Smith: Geometrical shadowing of a random rough surface, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **AP-15**, 668-671(1967).
11. B. van Ginneken, M. Stavridi, J. Koenderink: Diffuse and specular reflection from rough surfaces, *Appl. Opt.*, **37**, 130-139(1998).
12. J. J. Koenderink, A. J. Van Doorn, K. J. Dana, S. K. Nayar: Bidirectional reflection distribution function of thoroughly pitted surfaces, *Int. J. Comput. Vision*, **31**, 129-144(1999).
13. M. Ashikmin, S. Premoze, P. Shirley: A microfacet-based BRDF generator, *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, 65-74(2000).
14. P. Kubelka and F. Munk: Ein Beitrag zur optic der Farbanstriche, *Z. Tech. Phys*, **12**, 593-601(1931).
15. P. Kubelka: New contribution to the optics of intensely light light-scattering materials. Part I, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 448-457(1948).
16. L. Yang, R. Lenz and B. Kruse: Light scattering and ink penetration effects on tone reproduction, *J. Opt. Soc. Am. A*, **18**, 360-366(2001).
17. S. Chandrasekhar: Radiative Transfer, Dover Publications, New York, 1960.
18. L. G. Henyey and J. L. Greenstein: Diffuse radiation in the galaxy, *Astrophys. J.*, **93**,

70-83(1941).

19. P. Mudgett and L. W. Richards: Multiple scattering calculation for technology, *Appl. Opt.*, **10**, 1485-1502(1971).
20. P. Edström: Fast and stable solution method for angular-resolved light scattering simulation, Internal FSCN report: R-02-35, Mid Sweden University, Sweden(2002).
21. H. Granberg, J. Jensen, L. Mattsson: Forward scattering of fiber-containing surfaces studied by 3-D reflectance distribution simulations and measurements, *Opt. Eng.*, **42**, 2384-2390(2003).
22. S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade: Surface reflection: physical and geometrical perspectives, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **13**, 611-634(1991).
23. S. A. Shafer: Using color to separate reflection components, *Color Res. Appl.*, **10** 210-218 (1985).
24. L. Mattsson and R. Usbeck: A technique for analysis of surface and bulk scattering of paper sheets, *Proc. Int. Printing Graphic Arts Conf.*, 131-137(1996).

図の説明

Table 1 Specifications of the samples for analysis.

Table 2 Geometries for gonio photometry.

Table 3 Parameters of the TSL model approximating the gonio radiance factor of gold-coated paper sheets.

Table 4 Deviations of gonio radiance factor between measurements and TSL-model approximations.

Fig. 1 Overview of the sample PPC (paper for plain copy): (a) after gold-evaporation, (b) before the processing.

Fig. 2 Microscopic observation of the sample PPC (paper for plain copy): (a) after gold-evaporation, (b) before the processing.

Fig. 3 Schematic diagram of geometrical parameters defining the direction of incidence and observation.

Fig. 4 Gonio spectral radiance factor of the sample G (glossy paper) in the case of incident angle θ_i : (a) 20 deg, (b) 30 deg, (c) 45 deg, (d) 60 deg, (e) 65 deg and (f) 70 deg.

Fig. 5 Gonio spectral radiance factor of the sample PPC (paper for plain copy) in the case of incident angle θ_i : (a) 20 deg, (b) 30 deg, (c) 45 deg, (d) 60 deg, (e) 65 deg and (f) 70 deg.

Fig. 6 Gonio spectral radiance factor of the sample MC (matte coated paper) in the case of incident

angle θ_i : (a) 20 deg, (b) 30 deg, (c) 45 deg, (d) 60 deg, (e) 65 deg and (f) 70 deg.

Fig. 7 Comparison of spectral radiance factors between the geometry of diffuse reflection 45/0 ((a), (c) and (e)), and specular reflection 45/45 ((b), (d) and (f)) for the sample G (((a) and (b))), the sample PPC ((c) and (d)), and the sample MC ((e) and (f)).

Fig. 8 Comparison of gonio radiance factors of the sample G between measured value (asterisk) and the approximated value by TSL-model (solid line). The incident angle θ_i is (a) 20 deg, (b) 30 deg, (c) 45 deg and (d) 60 deg.

Fig. 9 Comparison of gonio radiance factors of the sample PPC between measured value (asterisk) and the approximated value by TSL-model (solid line). The incident angle θ_i is (a) 20 deg, (b) 30 deg, (c) 45 deg and (d) 60 deg.

Fig. 10 Comparison of gonio radiance factors of the sample MC between measured value (asterisk) and the approximated value by TSL-model (solid line). The incident angle θ_i is (a) 20 deg, (b) 30 deg, (c) 45 deg and (d) 60 deg.