
電子写真画像の鏡面光沢度数値シミュレーション

Numerical Simulation of Specular Glossiness for Electrophotographic Images

近藤 宏*

Hiroshi KONDOH

要 旨

電子写真画像はフルカラー化が進んでおり、文字と異なって光沢性が注目されるため、鏡面光沢度の数値シミュレーションを試みた。計算における反射モデルとしてBeckmann-Kirchhoffの散乱理論に基づくBidirectional reflectance distribution function (BRDF)を採用し、サンプル面からの反射光の計算に適用することで、鏡面光沢度が定量的に求まる。テストサンプルとして、紙やトナー内部での散乱の影響が無視できる黒（単色またはプロセス）のソリッド画像を用い、紙種・機種（トナー）・出力条件などの条件を変化させた。各光沢サンプルについて画像表面の3次元構造を測定して得られた高さ分布データから表面形状パラメータを抽出し、60度鏡面光沢度を算出したところ、実測光沢度に対して高い相関係数0.98 が得られた。

ABSTRACT

Numerical simulation of specular glossiness for electrophotographic images is attempted. For bidirectional reflectance distribution function(BRDF) depending on a pair of surface structure parameters, wavelength of illumination and surface refractive index, a reflectance model based on Beckmann-Kirchhoff scattering theory is adopted. Applying the BRDF to solve reflection flux from sample under geometric condition in terms of JIS about measuring specular glossiness, specular glossiness is obtained quantitatively. For the test sample, black solid images are prepared so that complex reflection caused in toner layer and paper can be neglect. The samples in proper range and level of glossiness are obtained under various condition: type of printer(toner) , paper, output mode and so on. As a result of calculating 60 degrees specular glossiness, using extracted surface structure parameters from the height distribution data by mesuring 3D structure of samples, high correlation coefficient 0.98 with measured glossiness is obtained.

* 画像技術開発本部 ST-PG
System Technology Project Group, Imaging Technology Division

1. 背景と目的

電子写真画像の顕微鏡観察などにより、定着条件により決まる画像表面の構造が光沢と相関があることが定性的に理解されてきた。紙や製版印刷においては、表面粗さなどの特徴量と光沢度の相関が実験的に確認されている[1][2]が、電子写真については明確ではなかった。一般に光沢を有する物体からの反射光は入射角度に依存し、正反射方向の周りで非等方的に拡散する反射角度依存性を有している。このような反射特性はリモートセンシング技術分野等ではBRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)と呼ばれ、地表面などのランダムな面を境界条件とする電磁波の散乱係数として導出したBeckmann [3]やBass-Fuks[4]の理論、粗面を鏡面の集合体とみなして導かれた Torrance-Sparrowモデル [5]などが提唱されている。また、コンピュータグラフィクスにおけるリアルな光沢感を表現するための手法として物理的根拠から導かれたものにはCook-Torrance[6]モデルや、前述のBeckmann [3]の理論を応用したHe-Torrance-Sillion-Greenberg[7]モデルがある。以上のような理論やモデルにより反射特性が計算できるので、定量的に鏡面光沢度を算出することは可能ではあるが、実際に表面構造から鏡面光沢度を算出したという報告例は見当たらない。そこで、物理的に忠実なBeckmann [3]の理論をCGに応用したHeら[7]のモデルを用いて、鏡面光沢度計算に応用することを試み、電子写真画像における光沢度の実測値と、画像表面の形状データを元に算出された光沢度を比較した結果について紹介する。

2. 方法

2-1 計算方法

2-1-1 BRDF

反射率分布の角度依存性を表す BRDF (ρ) は、Fig.1に示す幾何学的条件において、入射光 I_i ・反射光 I_r に対して

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\delta I_r}{I_i \cos \theta_i \delta \Omega_i} \quad (1)$$

により定義されている。Beckmann [3]の理論では、 ρ は鏡面反射成分 ρ_{sp} と、異方的拡散反射成分 ρ_{ad} の和になっており、

それぞれが、RMS表面粗さ σ 、自己相関長 τ 、屈折率 n 、光源の波長 λ の関数となっている。より一般的には波長にのみ依存する等方的拡散反射成分 (分光反射率) ρ_{ad} も加わり

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \sigma, \tau, n, \lambda) \\ &= \rho_{sp} + \rho_{ad} + \rho_{id} \end{aligned} \quad (2)$$

となる[7]。ここでは高さ分布にはガウス分布、自己相関関数にはガウス関数型が仮定されており、この条件下では、RMS勾配 μ とは、

$$\mu = \sqrt{2} \frac{\sigma}{\tau} \quad (3)$$

なる関係があるので、高さ分布データからの抽出が容易な μ から τ に変換することで、計算処理が簡素化される。このときの勾配分布はレイリー分布が仮定されている。次に、屈折率 n はフレネル係数に寄与し、反射光量を定量的に計算するために必要不可欠なパラメータであるが、トナー画像では測定が困難であるため、複数の光沢サンプルについての予測値と計算値の誤差を最小とするような合わせこみパラメータとした。ただし、様々な誤差の要因を吸収するため実際の屈折率とは異なる可能性があること、さらに今回は複数種類のトナーを使用することから (2-2節)、ここでは実効屈折率と呼ぶことにする。極端に高い光沢度でなければ鏡面反射成分 ρ_{sp} は無視することができ、また、黒のソリッド画像など明度の低い画像では等方的拡散反射成分 ρ_{id} も無視することができる。

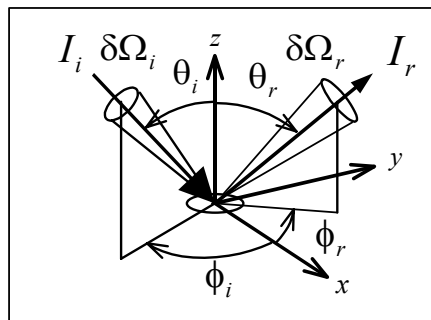


Fig.1 Geometry of illumination and reflection.

2-1-2 鏡面光沢度の計算原理

鏡面光沢度の計算は、JIS規格Z-8741[8]で規定された鏡面光沢度測定方法に基づいて、適当な近似により鏡面光沢度計をシミュレートすることである。鏡面光沢度計をモデル化した図をFig.2に示す。光源側の開口AIを通過した光束がサンプル

ル面における場所Rに入射し、反射する光を受光器側開口ARがなす立体角範囲で積分して、場所Rに対する受光光束 φ_r を求める。試料面の光沢度 G_s は、試料面からの受光光束が φ_r 、光沢度が G_{S0} の基準試料面からの受光光束が φ_0 のとき、

$$G_s = \frac{\varphi_r}{\varphi_0} G_{S0} \quad (4)$$

により算出される[8]。ここで入射光の光束は光軸上の光線で代表し、波長550nmの非偏光単色光により近似する。また実際には光沢度計に組み込まれているレンズの光学特性については考慮しない。実際には試料面の反射特性が一様ではないことを考慮し、場所によって変化する受光光束 φ_r を測定面積範囲で積分することにより鏡面光沢度を得る。

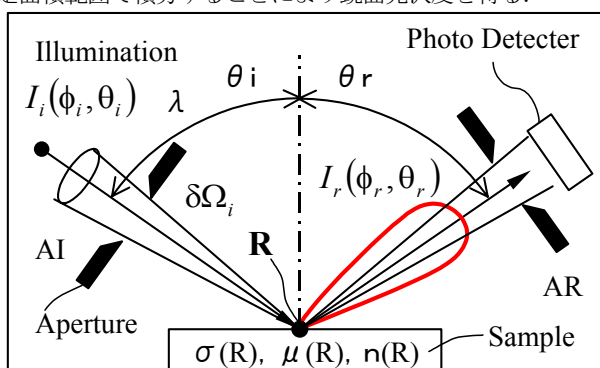


Fig.2 Diagram of geometry for specular glossiness calculation.

2-1-3 形状パラメータ抽出

形状パラメータ σ および μ を高さデータから抽出する際、サンプル面内での構造上のばらつきを考慮して、Fig.3で示すように、高さデータを適当なサイズのブロックに分割し、それぞれのブロック毎に抽出した形状パラメータを元に光沢度を算出して、平均することを考える。これは、高さ分布データの帯域、すなわちサンプリング間隔（空間周波数の上限）およびサンプリング面積（空間周波数の下限）を考慮することで、光源の波長に対して有効な表面形状パラメータを得るという意味もある。RMS表面粗さ σ は各分割ブロックにおける高さ分布の標準偏差とする。RMS勾配 μ については、分割ブロック $B(i)$ 内の各ポイント (x,y) についての勾配を求める際に、その正方形近傍領域（サイズ S_N ）の高さデータにフィットするような平面の勾配とする。

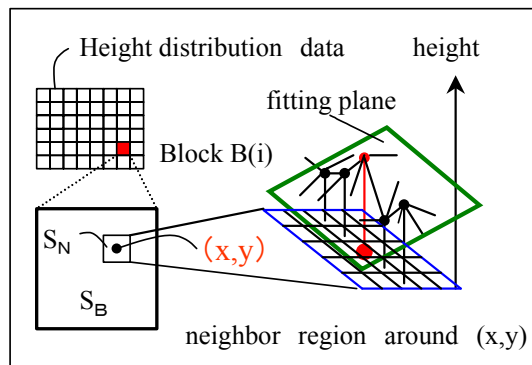


Fig.3 Schema of acquisition of gradient by fitting a plane to neighboring height distribution data around (x,y) .

2-1-4 鏡面光沢度の計算式

試料面の場所Rからの受光光束は、入射光光束

$$\varphi_i = I_i \delta\Omega_i \quad (5)$$

に対する式(1)の関係から、

$$\varphi_r = \int_{AR} \delta I_r d\Omega_r = \int_{AR} \varphi_i \rho(\mathbf{R}) \cos \theta_r d\Omega_r \quad (6)$$

により算出する。基準面に対する受光光束は、 ρ_0 を基準面の鏡面反射率とするときに、場所によらず均一として

$$\varphi_0 = \int_{AR} \rho_0 d\Omega_r \approx \rho_0 \varphi_i \quad (7)$$

により近似する。60度鏡面光沢度の場合には、基準面（屈折率 $n=1.567$ ）の反射率は $\rho_0 \approx 0.1$ でこのとき $G_{S0} = 100[\%]$ であるから、場所Rでの光沢度は、

$$G_s(\mathbf{R}) = \frac{\varphi_r(\mathbf{R})}{\varphi_0} G_{S0} = \frac{100[\%]}{0.1} \int_{AR} \rho(\mathbf{R}) \cos \theta_r d\Omega_r \quad (8)$$

となる。ここでは、積分の代わりに分割された各ブロック B_i について抽出された形状パラメータ（ σ_i 、 μ_i ）をもとに鏡面光沢度 $G_s(B_i)$ を算出し、最後に算術平均することで鏡面光沢度

$$G_s = \int_S G_s(\mathbf{R}) d\mathbf{R} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_s(B_i) \quad (9)$$

を得る。

2-2 光沢サンプル作製および光沢度測定

光が透過する波長成分があるカラー画像では、紙表面の形状やトナー層・紙内部での複雑な散乱の影響が無視できない。近似的に、式(2)における異方的拡散反射成分 ρ_{ad} の項のみで計算が行えるようにするため、光沢サンプルとしては、

画像のごく表面のみが反射特性に寄与すると考えられる黒のソリッド画像（Bk単色またはプロセスブラック）とした。光沢の場合には一貫した条件の下で適度な間隔と範囲のサンプルを取り揃えることが容易ではないため、次に示すような条件の組み合わせにより画像を作製した。

- ・機種（トナー）：モノクロレーザープリンター(1機種)、カラーレーザープリンター（2機種）、カラー複写機（2機種）（*）
- ・紙種：普通紙（複数種類）、塗工紙
- ・原稿モード：文字／写真
- ・出力モード（カラー機）：白黒／フルカラー（**）
- ・出力後ホットプレート加熱、磨き加工（高光沢化）

（*）プリンター出力または複写出力。

（**）黒ベタ原稿を複写する際、写真原稿モードでフルカラー出力とすることでプロセスブラックとなり、高光沢となる複写機を使用。

作成したベタ画像は、 $20 \times 60[\text{mm}^2]$ のサイズに切り出してスライドガラスに貼りつけ、60度鏡面光沢度（村上色彩製デジタル光沢計 GM-26D型 20° 、 60° 、測定面積 $5\text{mm} \square$ 仕様）をおよそ5mm間隔で 3×5 ヶ所測定した。その結果、光沢度が2%~90%の範囲でサンプルを得ることができた。

2-3 表面形状測定

表面形状測定は、共焦点レーザー走査顕微鏡（Keyence社製 VK-8500）を使用し、測定条件は、

- ・高さ方向分解能： $0.01 \mu\text{m}$ 、
- ・面方向分解能： $0.3 \mu\text{m}$ 、
- ・測定領域：約 $300 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 、

高さデータは、サイズ 1024×768 、256階調（8bit精度データ）のモノクロ画像として得る。

高さデータを元に、可視化処理した画像の例をFig.4に示す（高低を白黒で表し、勾配の緩急を明暗で変調）。各図に対応する60度鏡面光沢度をTable 1に示す。ここに示した例は紙種（普通紙）が同一の場合である。

高光沢度(最下行)のサンプルでは、トナー層の下にある紙繊維の構造が白い筋となって見え、繊維の網目に溶融したトナーが入り込んでピット（黒い領域）を形成している様子を表す。低光沢度サンプルでは紙繊維の網目よりも細かい多数の小さなピットが見られる。

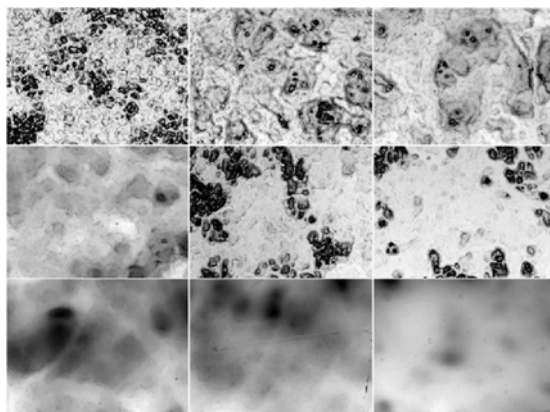


Fig.4 Height distribution maps of surface structure of gloss sample image. Horizontal dimension of individual map is $300 \mu\text{m}$.

Table 1 60 degrees specular glossiness correspond to the map position in Fig.4.

3.4%	4.8%	7.5%
10.7%	11.9%	18.2%
22.8%	30.8%	44.9%

3. 結果

3-1 光沢度計算結果

作製した光沢サンプルから適当に選択した21サンプルについて、それぞれ1ヶ所づつ形状測定を行い、得られた高さデータに基づいて60度鏡面光沢度を計算した。その際、実効屈折率、分割ブロックのサイズ S_B および正方形近傍領域のサイズ S_N （Fig.3）は未知のパラメータとして、実測値と計算値の二乗平均誤差を最小にする条件を求めた。

最適条件での結果をFig.5に示す。 S_B および S_N は共に 32×32 （ $9.6 \mu\text{m} \square$ 相当、ブロック数は 32×24 ）、実効屈折率は1.65で、この条件で誤差がほぼ収束する。

直線回帰ではほぼ原点を通り、相関係数は0.98である。低光沢度領域では比率誤差が大きい、主に形状測定時の面積（ $300 \times 200 \mu\text{m}^2$ ）よりも大きなスケールでの光沢ムラが原因であると考えられる。比率誤差 $\pm 20\%$ 以内には21サンプル中11サンプルクリアし、 $\pm 25\%$ 以内では17サンプルクリアしている。

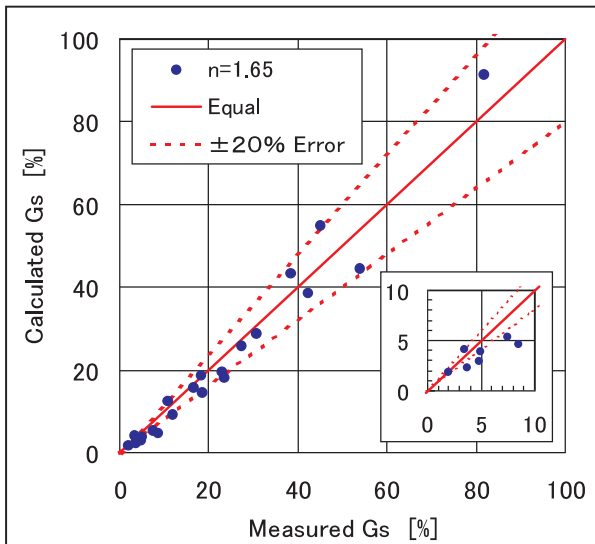


Fig.5 Measured vs Predicted 60 deg. Specular Glossiness.

3-2 形状パラメータと光沢度の相関

各サンプルで抽出された形状パラメータを、分割ブロック間で相加平均した $\langle \sigma \rangle$ および $\langle \mu \rangle$ と、実測光沢度の関係をFig.6に示す。べき乗（両対数目盛で直線）に回帰させた場合のべき指数が -1 に近く、ほぼ逆比例関係が成立している。相関係数は共に $R=0.91$ となった。これは片方のパラメータ毎に相関を見たものである。一方、シミュレーション結果(Fig.5)は両方のパラメータ (σ および μ) に依存するモデルを用いた場合の相関を見たものである。この時の相関係数は $R=0.98$ とより高いことから、光沢度は同時に両方のパラメータに依存することを表し、今回の結果は相関が高い光沢度の計算が行われたと考えられる。表面粗さと光沢度の間における相関の有無は、測定方法・抽出方法・平均化操作などに依存し、たとえば、 μm オーダーの測定では相関はなく、 nm オーダーでは相関が見られたという報告例もある[2]。

Fig.7に形状パラメータ間 ($\langle \sigma \rangle$ および $\langle \mu \rangle$) の関係を示す。右上が低光沢度、左下が高光沢度に対応する。クロスオーバーが生じているが部分区間ではべき乗依存性が見られる。屈折個所は光沢度が約30%に相当し、何らかの構造的特徴の変化を示唆しているが、詳細は不明である。

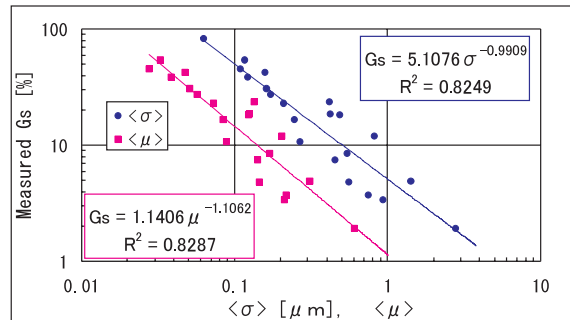


Fig.6 Correlation of surface structure parameter and measured glossiness.

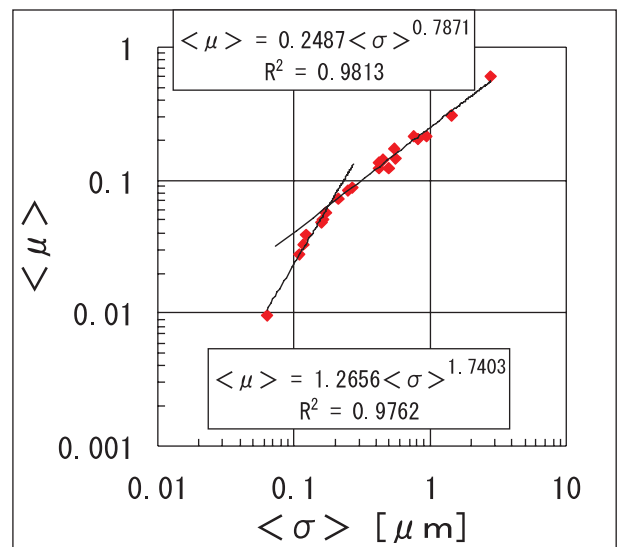


Fig.7 Correlation between $\langle \sigma \rangle$ and $\langle \mu \rangle$.

4. まとめ

表面形状から反射率の角度依存性が決定可能なモデルを鏡面光沢度の計算に適用し、黒ソリッド画像で計測した高さデータから形状パラメータとしてRMS表面粗さおよびRMS勾配を抽出し光沢度を計算した結果、実測値との相関係数は0.98であった。屈折率は合わせこみによるものであるが、少なくとも比例関係については相関が高く、今回試みた形状パラメータの抽出方法と光沢度計算方法が適切に行われたと考えている。

5. 今後の展開

各サンプルの形状測定は1ポイントのみであるため、特に低光沢度領域では光沢ムラと思われる原因により誤差が大きくなった。実用上は多ポイントでの測定が必要である。特定

の機種またはトナーで一旦正確な実効屈折率が得られれば、与えられた形状データまたは形状パラメータに対して光沢度の予測が可能になる。応用としては、実際の光沢度計では計測ができないような小面積での光沢度を、本手法により形状データから推定することが可能なので、例えば1mm以下のスケールにおける光沢ムラの解析に利用したり、定着条件と反射特性を関連付けるための手法としても期待される。鏡面光沢度は材質としての指標であるが、心理的な光沢感[9,10]との関係を解析する上でも有用であると考えられる。また、本手法はプリント画像以外にも広範囲に応用が可能である。

参考文献

- [1] H. Lipshitz, M. Bridger, G. Derman: On the relationships between topography and gloss, *Tappi Journal* 73(1990), pp237-245.
- [2] 山本里恵,日吉公男,遠藤恭延:塗工紙の塗工層構造と印刷適性について,富士工業技術センター研究報告, Vol.8 (1998), pp37-43,
- [3] P. Beckmann and A. Spizzichino: *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon Press (1963) .
- [4] F.G. Bass and I.M.Fuks: *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces*, Pergamon Press, 1979.
- [5] K.E. Torrance and E.M. Sparrow: Theory of Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces, *J. Opt. Soc. Am.* 57(1967),pp1105-1114.
- [6] R.L. Cook and K.E. Torrance: A Reflection Model for Computer Graphics, *ACM Transactions on Graphics*, 1(1982), pp7-24.
- [7] X.D. He et al.: A comprehensive physical model for light reflection, *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, 25(1991), pp175-186.
- [8] JISハンドブック 色彩, 日本規格協会.
- [9] S. Serikawa and T. Shimomura: Extraction of Glossiness of Curved Surfaces by the Use of Spatial Filter Simulating Retina Function, *IEICE Trans. Inf. & Syst.* E77-D(1994), pp335-342.
- [10] 芹川聖一,下村輝夫: 視覚特性を考慮した光沢度測定, *応用物理学会誌*, 第66巻, 第10号 (1997), pp1067-1072.