

本報告ではドットゲインのモデルに基づいたハーフトーン画像の色再現予測モデルを提案する。これまで、我々はハーフトーン画像の透過画像は光学的ドットゲインの影響を受けないということを報告してきた。この結果に基づき、本報告では同一領域の透過画像・反射画像を取得できる光学顕微鏡を用いてメカニカルドットゲインと光学的ドットゲインを解析・モデル化した。対象領域の 6 枚の透過画像を 6 バンドカメラ付きの光学顕微鏡を用いて取得し、重回帰推定法により分光透過率分布を推定した。推定した分光透過率分布を CMY インクの色材量分布に変換した。色材量分布からインクの形状を多項式近似でモデル化する。1 次色の CMY 色票の透過率分布を提案手法により予測した。その結果、提案手法はインクジェット画像の色材量分布を十分に推定できることがわかった。

キーワード：ドットゲイン，色材量，インク分離，インクジェット，ハーフトーン

We propose a new model to predict the color reproduction of digital halftone image based on the physical model of dot gain. In the previous papers, we reported that the transparency image of halftone is not influenced by optical dot gain. On the basis of this experimental result, in this paper we analyze the optical and mechanical dot gain separately by using the optical microscopes which can take the transparency and reflectance images of the same area. Transparency images of an ink dot are taken with an optical microscope with a six-band camera and the spectral transmittance of each pixel in an ink dot is estimated by the multiple regression estimation method. This obtained spectral transmittance is converted into the amount of cyan, magenta, and yellow (c,m,y) inks in each pixel. Then we can estimate the shape of ink dot by polynomial fitting of ink amount. The transmittance of c,m,y inks of printed images is estimated by using the proposed method and compared with that of practical printed images. This results show that the proposed method is significant to predict the density of ink-jet images.

Keyword : dot gain, ink amount, ink separation, ink-jet, halftone

1. はじめに

近年，パーソナルコンピュータやデジタルカメラの普及に伴い，一般家庭でも手軽にプリントできる安価なインクジェットプリンタが普及している．インクジェットプリンタ市場の拡大に伴い，インクジェット画像の画質も大幅に向上している．しかし，インクジェット画像の見えはプリンタの機種，インク，ハーフトーンアルゴリズム，紙などによって大きく変化する．たとえば，光沢紙に印刷した画像の画質は非コート紙よりも一般的に良好である．そこで，インクや紙を開発する際には，印刷環境によって画像の見えがどのように変化するかを予測することが重要である．

印刷，ハードコピーの色予測に関しては古くから Murray-Davies 方程式や Neugebauer 方程式などの研究がなされてきたり．しかし，ドットゲインの影響のため，これらのモデルから正確に色予測を行うことは困難であった．ドットゲインとは実際に印刷した画像が理想よりも暗く見える現象である．ドットゲインはその原因によりメカニカルドットゲインと光学的ドットゲインの2種類に分類できる．メカニカルドットゲインはインクの拡散によりインクドットの面

積が物理的に増大する現象である。一方，光学的ドットゲインは紙内における光散乱によりインクドットが見かけ上増大する現象である。

ドットゲインの解析・モデル化に関しては様々な研究がなされてきた。D. R. Wybleらはドットゲインに関するモデルを経験的モデルと物理的モデルに分類した²⁾。

経験的モデルは，数多くのサンプルのデータから統計的にドットゲインのモデル化を行うもので，例えば，Yule-Nielsenの方程式や改良版のNeugebauer方程式などが提案されている^{1,2)}。しかし，これらのモデルを用いて色予測を行うためには一般に数多くの色票サンプルを必要とする。また，これらの手法でモデル化を行う際，紙・インク・ハーフトーンアルゴリズムなどの条件が変化すればすべてのサンプルを再度印刷・測定することが必要である。

一方，物理的モデルは光学的ドットゲイン，メカニカルドットゲインを物理パラメータに基づいてモデル化し，色予測を行うモデルである。すなわち，紙・インク・ハーフトーンアルゴリズムなどの特性をモデルに組み込むことにより，これらの印刷条件が変化したときの色予測を少ない色票の測定から行うことができる。

S. Gustavson は点拡がり関数を用いた光学的ドットゲインのシミュレーションを行った^{3,4)}。P. Emmel らは紙と同じ印刷特性を持つ特殊なフィルムを用いてメカニカルドットゲインと光学的ドットゲインのモデル化を行った⁵⁻¹⁴⁾。井上らはインクを付着させたリバーサルフィルムを紙に密着させて光学的ドットゲインの解析・モデル化を行った¹⁵⁻¹⁷⁾。しかし、これらの研究では紙ではなくフィルムに対して印刷を行っており、通常の印刷状況を十分に反映していない。

筆者らは前報告においてモノクロ画像において光学のおよびメカニカルドットゲインを分離する手法を提案した^{18,19)}。この手法は、ハーフトーン画像を透過測定し、光学的ドットゲインの影響を取り除くというものである。しかし、前報告で提案した測定手法の適用範囲はモノクロ画像に限定されていた。

本報告では、紙やインクなどのプリント条件の変化に対応でき、特殊なフィルムを用いずに色再現予測を行う手法を提案する。すなわちハーフトーン画像のマルチバンド撮影と重回帰分析による、C,M,Y インクの分光透過率推定とインク重なるの分離を通してカラープリント画像における

色予測を行った。ただし本研究では第一ステップとして、インク形状の解析には経験的なモデルを用い、色再現予測は透過画像に対してのみ行った。

2. 透過画像と反射画像

2.1 透過・反射画像モデル

井上らは反射画像モデルと呼ばれるハーフトーン画像の色予測モデルを提案した¹⁵⁾。反射画像モデルでは、Fig. 1に示すように印刷画像が光学的にインク層と紙層に分離できると仮定する。まず、入射する光が透過率 $t_{ink}(x,y)$ のインク層を通過する。ここで、 (x,y) は画像の座標を表す。次に、インク層を通過した光は紙内で散乱される。このモデルでは紙内の光散乱を紙の点拡がり関数 $psf_{paper}(x,y)$ として表す。さらに、散乱された光は反射率 r_{paper} の紙によって反射される。最後に、反射した光は再度インク層を通過する。以上の4ステップより総合的な反射率分布 $r(x,y)$ は以下のように計算される。ここで * はコンボリューション演算を表す。 Fig. 1 挿入

$$r(x,y) = [t_{ink}(x,y) * psf_{paper}(x,y)] r_{paper} t_{ink}(x,y) \quad (1)$$

このモデルでは，メカニカルドットゲインの影響のみがインク層の透過率 $t_{ink}(x,y)$ に含まれていると考え，透明なフィルムに印刷した画像を用いて透過率の測定を行っている．一方，光学的ドットゲインの影響は紙の点拡がり関数 $psf_{paper}(x,y)$ に含まれていると考え，紙のMTF測定からPSFを求めている．従って，(1)式における $r(x,y)$ にはメカニカルおよび光学的ドットゲインの影響が含まれている．

Fig. 2 挿入

一方，Fig. 2に示すように透過画像について考えると，紙の裏側から入射した光が透過率 t_{paper} の紙層を通過する．このとき，紙内で光の散乱が生じるが，紙の透過率分布がほぼ一様であると仮定すれば，光の散乱が引き起こす光学的ドットゲインの影響は無視できる．次に，紙層を通過した光が透過率 $t_{ink}(x,y)$ のインク層を通過する．従って，総合的な透過率分布 $t(x,y)$ は式(2)により予測される¹⁹⁾．

$$t(x,y) = t_{paper} t_{ink}(x,y) \quad (2)$$

すなわち，透過画像はメカニカルドットゲインの影響は受けるが，光学的ドットゲインの影響を受けない．従って，反射画像および透過画像を撮影し，解析することによ

りメカニカルドットゲインと光学的ドットゲインを分離することが可能である。

2. 2 透過・反射顕微鏡

前節で述べた反射率分布 $r(x,y)$ および透過率分布 $t(x,y)$ を測定するための光学顕微鏡の構成を Fig. 3 に示す。この装置は顕微鏡にモノクロデジタルカメラ（Kodak DCS420）を取り付けたものである。CCDカメラの画素数は 1012×1524 pixel であり、1 pixel のサイズは $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ である。また、光学系の倍率は10倍で、鏡面反射成分を除去するために Fig. 3 に示す位置に偏光板を挿入して測定を行った。

Fig. 3 挿入

Fig. 3 に示すように、反射率画像 $r(x,y)$ は光源 A からの照明により、透過率画像 $t(x,y)$ は光源 B からの照明により取得できる。

3. インク形状の解析およびそのモデル化

前節で説明した透過・反射顕微鏡を用い、以下の手順によりインク形状の解析およびモデル化を行った。

(1) Fig. 4 に示す分光透過率を持つ6枚のフィルタを透過顕微鏡に挿入してマルチバンド撮影を行い、重回帰推定法

Fig. 4 挿入

により各画素における分光透過率を推定する。

- (2) 竹谷らの提案した方法²⁰⁾を用いて分光透過率をシアン、マゼンタ、イエロー (C,M,Y) のインク量に変換する。
- (3) インク形状およびインク量分布をモデル化する。

3.1 重回帰推定を用いた分光透過率推定

自然色の分光情報は5から8バンドのマルチバンド画像から推定できることが知られている²¹⁾。そこで、本研究では各画素における分光透過率分布 \mathbf{o}_{xy} を求めるため、Fig 4に示す分光透過率を持つ6枚のカラーフィルタをFig.3のように顕微鏡に挿入し、6バンドのマルチバンド画像 \mathbf{v}_{xy} を取得する。分光透過率分布 \mathbf{o}_{xy} は重回帰推定により次式で計算できる。

$$\mathbf{o}_{xy} = \mathbf{G}\mathbf{v}_{xy} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{G} は推定行列で、一般に \mathbf{G} は以下のように計算される²¹⁾。

$$\mathbf{G} = \langle \mathbf{o}\mathbf{v}^T \rangle \langle \mathbf{v}\mathbf{v}^T \rangle^{-1} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{o} は分光透過率ベクトル、 \mathbf{v} はセンサ応答ベクトルである。また、 T は転置、 -1 は逆行列、 $\langle \cdot \rangle$ はアンサンブル平均を表す。Table 1 に示す 30 枚の色票を光沢紙、マ Table 1 挿入
ット紙、普通紙に印刷したものをを用い、推定行列 \mathbf{G} を求めた。

光沢紙 (glossy) , マット紙 (matte) , 普通紙 (normal) に対して印刷した 30 色票の分光透過率の推定値と実測値の ΔE_{94} 色差を Table 2 に示す。平均色差は 1.51 から 1.83 の範囲であり、 Table 2 挿入
十分な精度で分光透過率が推定できることがわかる。

3 . 2 分光透過率画像からのインク分離

ドット形状のモデル化を行う最も単純な方法は C,M,Y インクを別々にプリントし、各インクのドット形状をモデル化することである。しかし、この方法ではドットの重なりによる形状の変化に対応することができない。そこで本研究では、C,M,Y インクで印刷されたサンプルから C,M,Y インクによる重なりを竹谷らの提案した手法²⁰⁾に従って分離し、それぞれのインク量を推定した。

Lambert-Beer の法則を仮定した場合、C,M,Y インクの重な

りによって生じる分光積分濃度 $D(\lambda)$ は一般に

$$D(\lambda) = a_c D_c(\lambda) + a_m D_m(\lambda) + a_y D_y(\lambda) \quad (5)$$

と表される．ここで， a_c ， a_m ， a_y はそれぞれ C, M, Y の相対インク量， $D_c(\lambda)$ ， $D_m(\lambda)$ ， $D_y(\lambda)$ はそれぞれ C, M, Y のベタの分光解析濃度である．式(5)を位置 (x, y) の関数として拡張すると，

$$D(x, y, \lambda) = a_c(x, y) D_c(x_0, y_0, \lambda) + a_m(x, y) D_m(x_0, y_0, \lambda) + a_y(x, y) D_y(x_0, y_0, \lambda) \quad (6)$$

と書ける．Fig. 5 に示す通り， $a_c(x, y)$ ， $a_m(x, y)$ ， $a_y(x, y)$ はそれぞれ位置 (x, y) における相対インク量であり，

$D_c(x_0, y_0, \lambda)$ ， $D_m(x_0, y_0, \lambda)$ ， $D_y(x_0, y_0, \lambda)$ は基準となる位置 (x_0, y_0) における分光解析濃度である．

各位置における相対インク量 $a_c(x, y)$ ， $a_m(x, y)$ ， $a_y(x, y)$ は元画像と再現画像の分光濃度の RMSE が最小になるように最適化し²⁰⁾，式(9)により，分光透過率から CMY インクのインク量分布を推定することができる．元画像と分離画像の一例を Fig. 6 に示す．

Fig. 6 挿入

3.3 ドットゲインの分析およびモデル化

CMY インク画像から Fig.7 に示すような個々のドットを切り出すことができる。前述した通り、ドットの形状はインクの重なりによって変化する可能性があるが、本研究では切り出したドットの形状は以下の楕円形でモデル化した。 Fig.7 挿入

$$ax^2 + by^2 = r^2 \quad (7)$$

ここで、 a, b, r は正の係数である。また、インク量分布は以下の4次の多項式近似によりモデル化した。多項式の次数は実測データに基づき経験的に定めた。

$$d = c_1 r^4 + c_2 \quad (8)$$

ここで、 d は各位置におけるインクの相対量であり、 c_1, c_2 は係数である。

現実のドットの輪郭線は理想的な楕円形とは異なり、半径方向に変化する。そこで、ドットの形状をモデル化した後、 r （半径）方向に正規分布のノイズを加えることによ

り，その形状をランダムに変化させる．モデル化したドットおよび透過顕微鏡で測定したドットの形状を Fig. 7 に示す．

4．画像の透過率予測シミュレーション

ドットの形状がモデル化できれば，反射画像モデルに従ってインクジェットプリント画像の色予測を行うことができる．しかし，光学的ドットゲインの影響を受ける反射画像の色予測精度を確認するためには，事前に光学的ドットゲインの影響を受けない透過画像の色予測精度を検証する必要がある．

そこで，モデル化したドットを用いて透過画像の透過率を予測した．予測の手順を Fig. 8 に示す．まず，ドットの記

Fig. 8 挿入

録される中心位置を計算した．次に，現実のインクジェットプリンタの特性を反映して中心位置をランダムにずらした．中心位置がずれる度合いは正規分布を仮定し決定した．最後に，式(2)を用いて透過画像の透過率を計算した．

シアンの網点画像に対する透過画像の透過率の予測値と実測値を Fig. 9 に示す．ただし，透過率は網点面積率が 0%

Fig. 9 挿入

のとき1.0となるように正規化している．また，シミュレー

シオン画像と実測画像を Fig. 10 に示す．色票は網点面積率 Fig. 10 挿入

0, 7, 20, 40, 70, 100% のものを用いた． Fig. 9, Fig. 10 の結果から，網点面積率が低いほど透過率の予測精度が高く，網点面積率が高くなるにつれて予測精度が低下することがわかる．

この原因は前述した通り，インクが重なるとモデル化したドットと現実のドットの形状が一致しなくなるからと考えられる．インクは粘性を持つ物質であり，紙上のインクの形状とインクが重なった時の形状は異なる．そのため，インクが重なった時のインクの形状は単一のインクの形状と別にモデル化する必要がある．

5 . まとめ

本研究では 6 バンドカメラ付きの光学顕微鏡を用いて透過画像の分光透過率を予測し，CMY インクの分離を行った．CMY インク画像から個々のドットを切り出し，モデル化を行った．

また，モデル化したドットを用いてシアンのハーフトーン色票の透過率を予測した．網点面積率が低いほど，透過率の予測精度が向上するという結果が得られた．しかし，

網点面積率が大きいときには予測精度が下がるという結果が得られた。この原因として、インクの重なりによってドットの形状が変化するということがあげられる。

今後、インクの重なりによるドット形状の変化を提案手法に組み込み、色再現の予測精度を向上させ、さらに、提案モデルをインクジェット画像の階調再現・色再現予測に応用する予定である。

Fig. 1 Reflection Image Model

Fig. 2 Transparency Image Model

Fig. 3 Transmittance/reflectance optical microscope

Fig. 4 The spectral transmittance of six color filters

Fig. 5 Schematic diagram of two-dimensional distribution of relative amount of ink

Fig. 6 Original image consisting CMY ink (upper) and separated CMY ink image (lower)

Fig. 7 Modeled ink dot (upper) and measured ink dot (lower)

Fig. 8 Flowchart of print simulation

Fig. 9 Relationship between transmittance and dot area of halftone for cyan patches

Fig. 10 Simulated and Measured images of cyan ink. The number represents the dot area of patches.

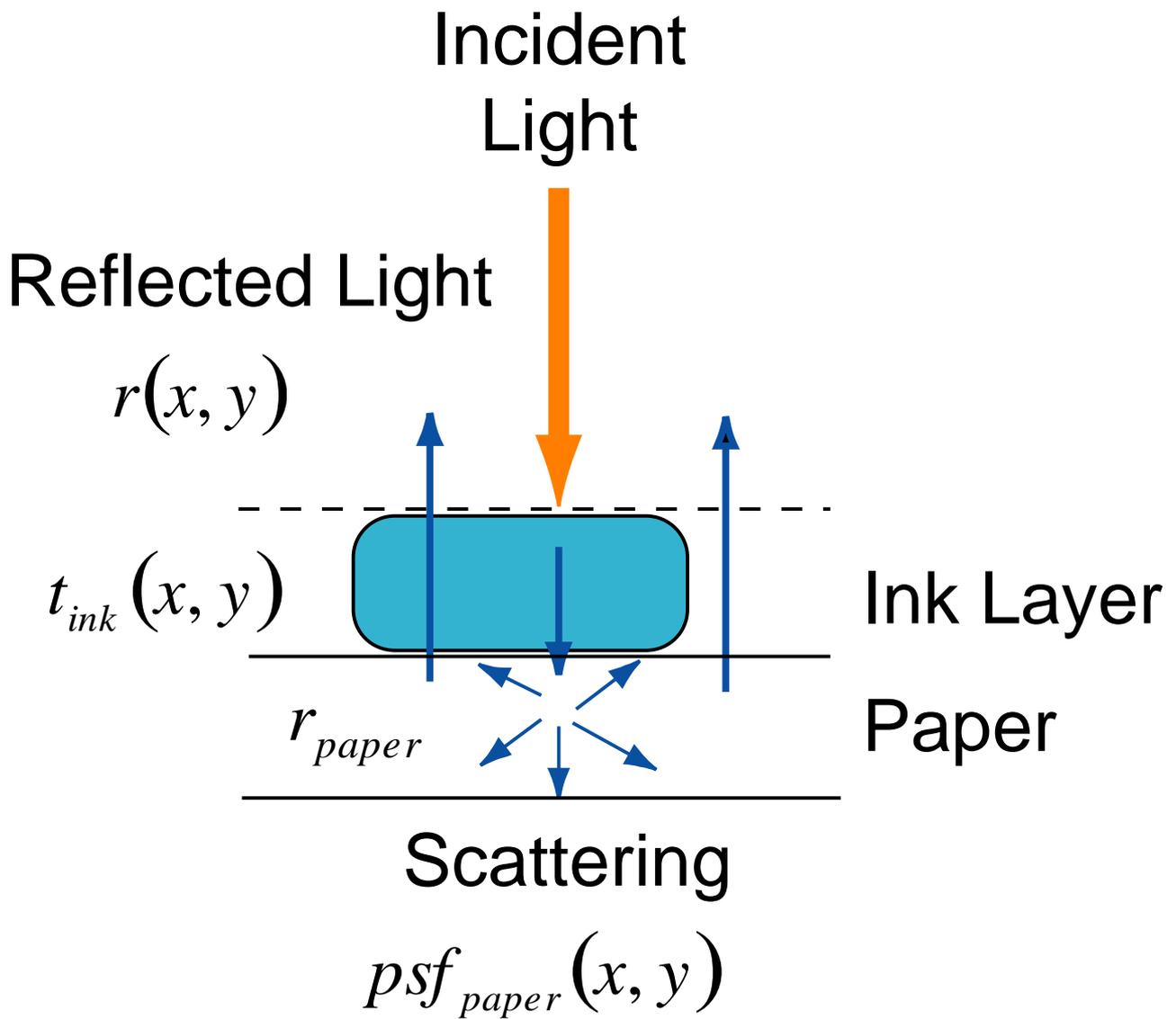


Fig. 1

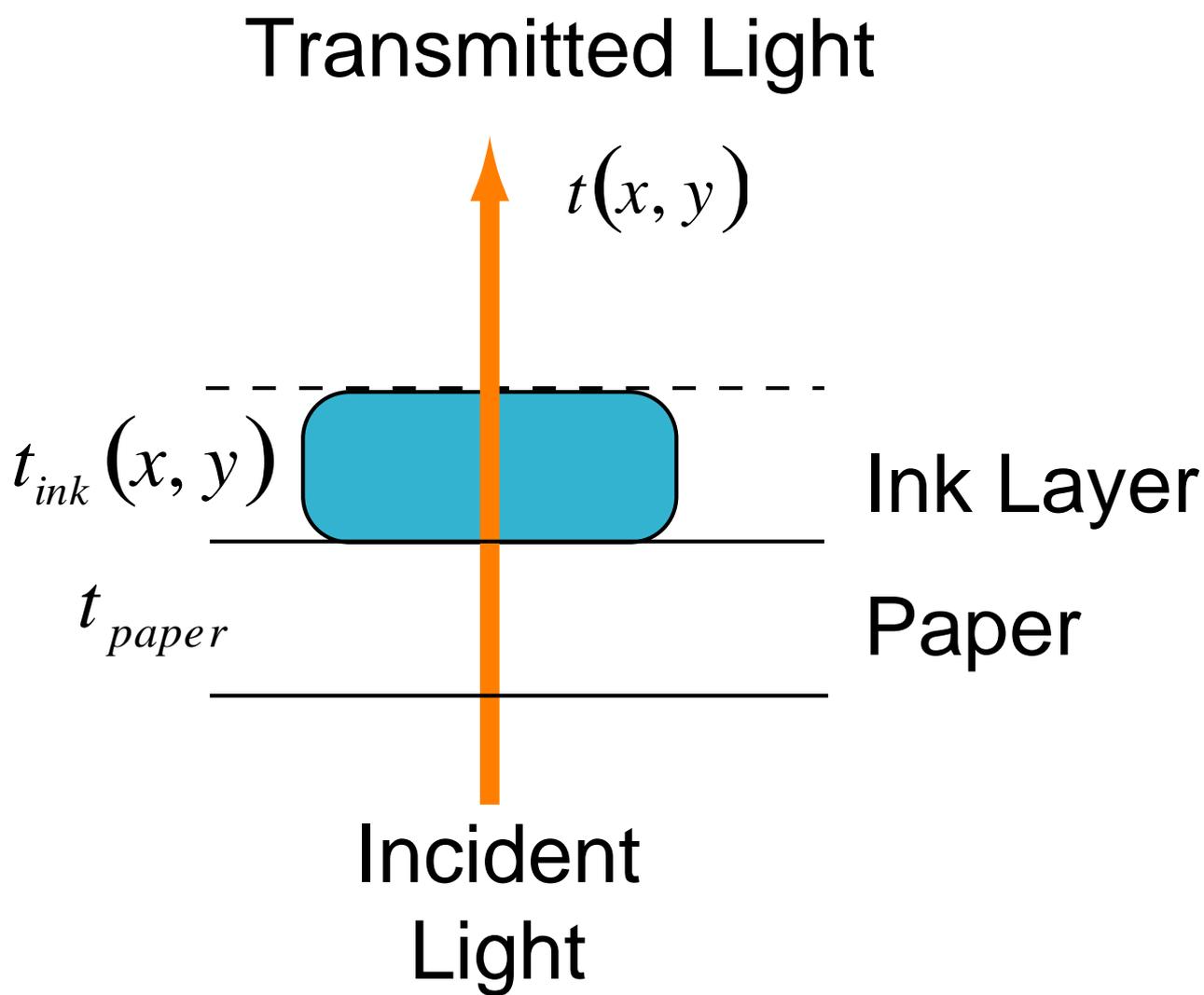


Fig. 2

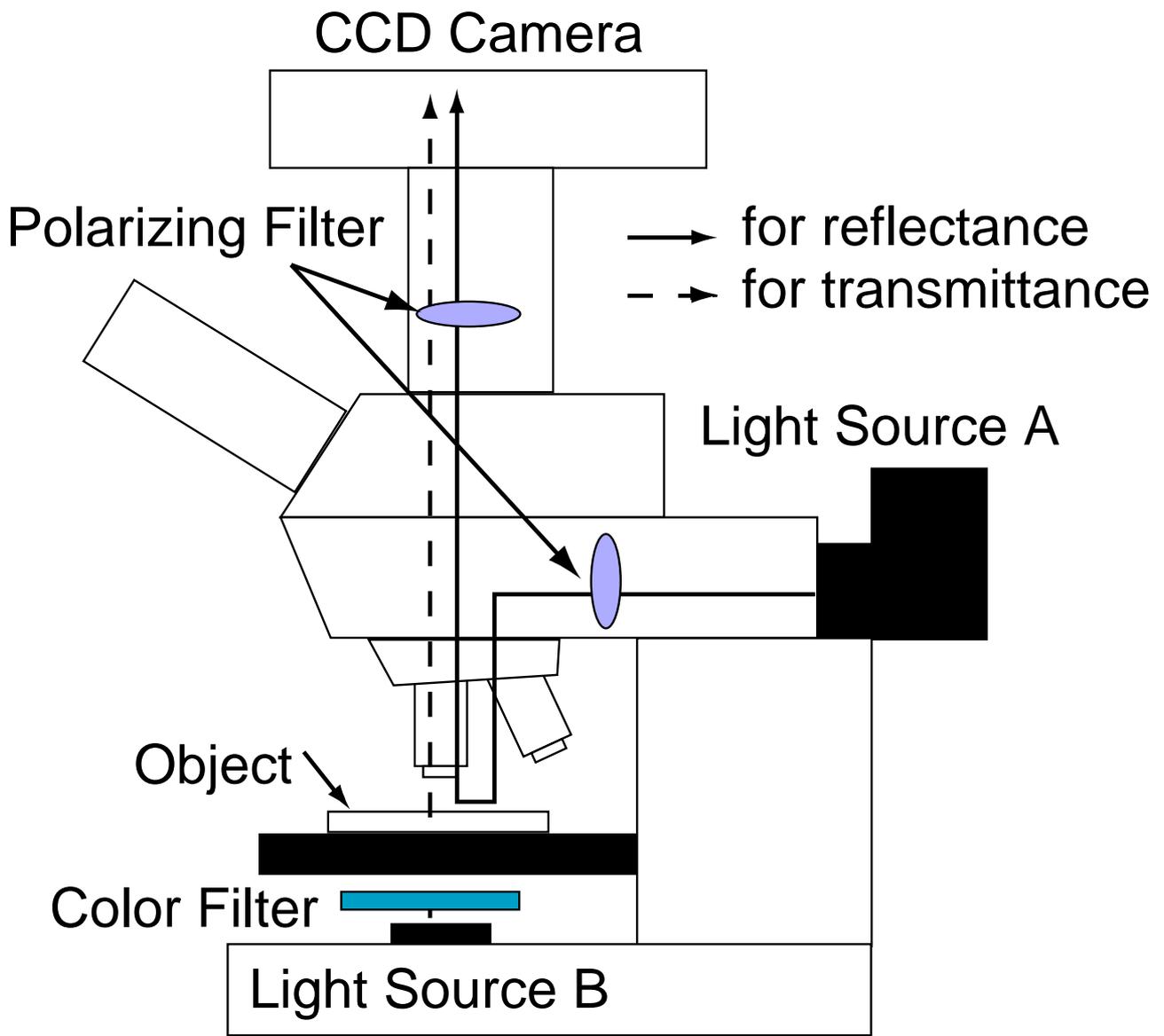


Fig. 3

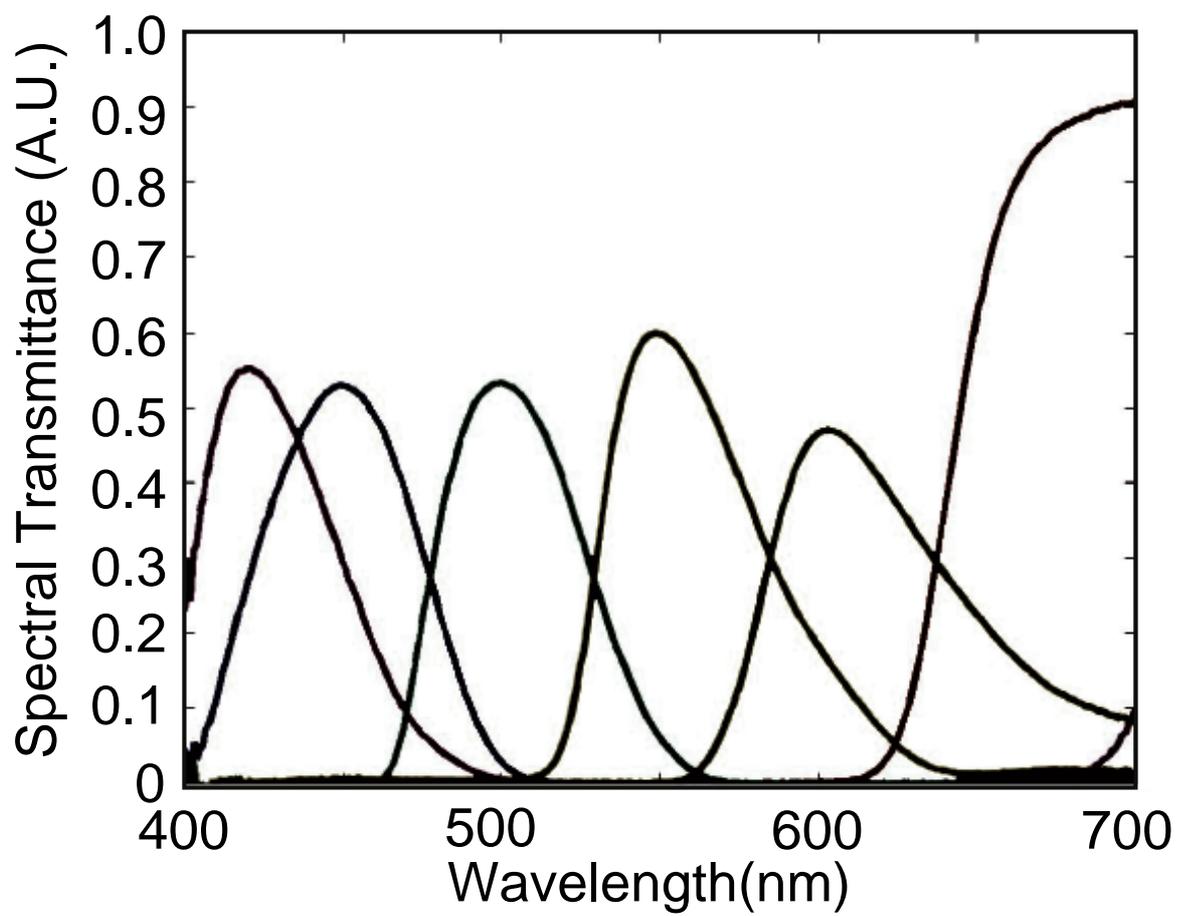


Fig. 4

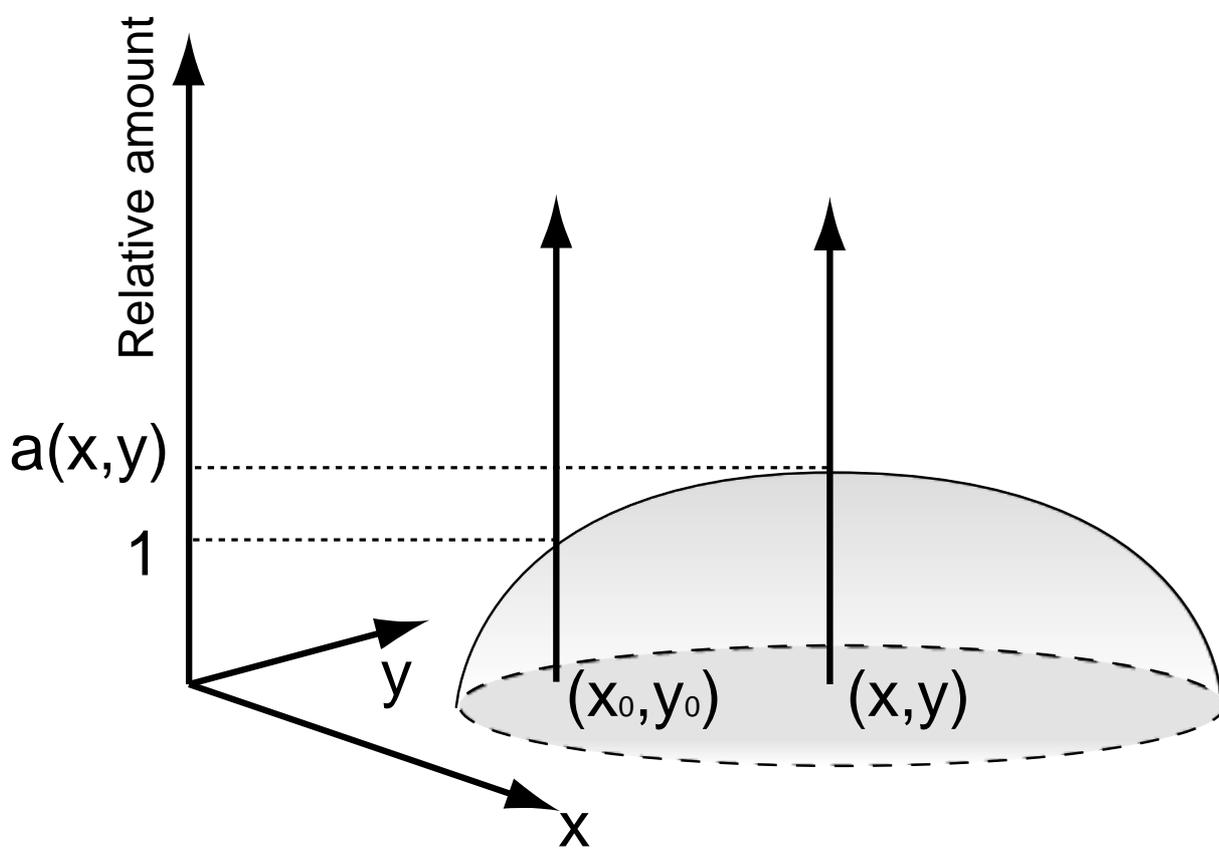
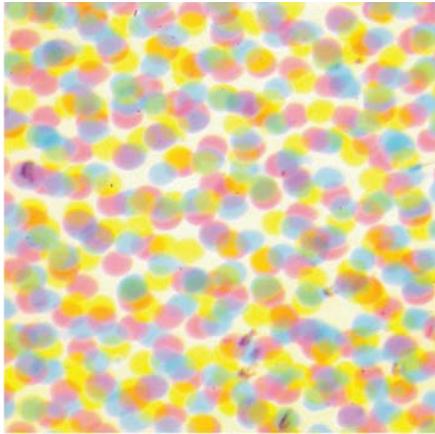
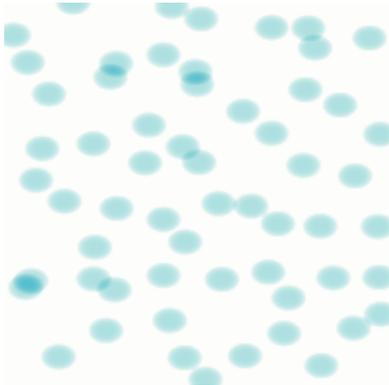


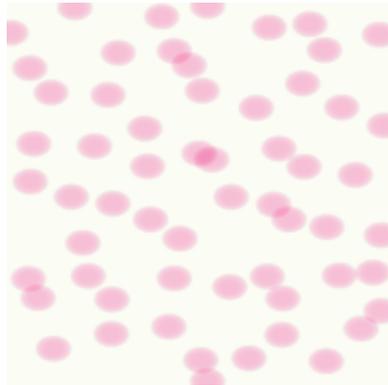
Fig. 5



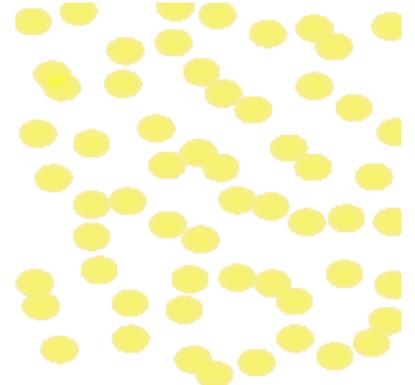
CMY



C



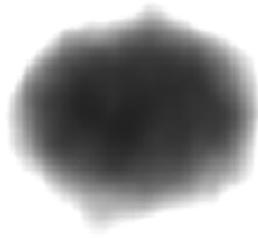
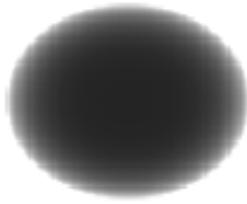
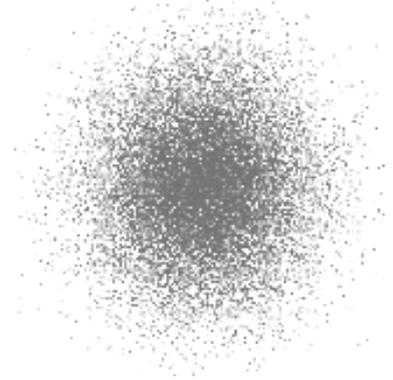
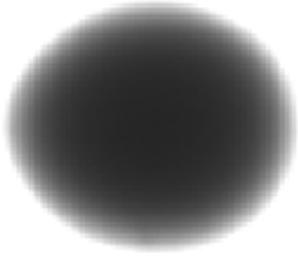
M



Y

Fig. 6

measured simulated

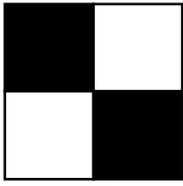


glossy

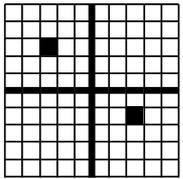
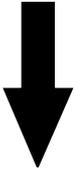
matte

normal

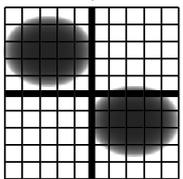
Fig. 7



Prepare the binary image



calculate the center of an ink dot with a high resolution grid



Impact the modeled dot on the center of the ink dot

Fig. 8

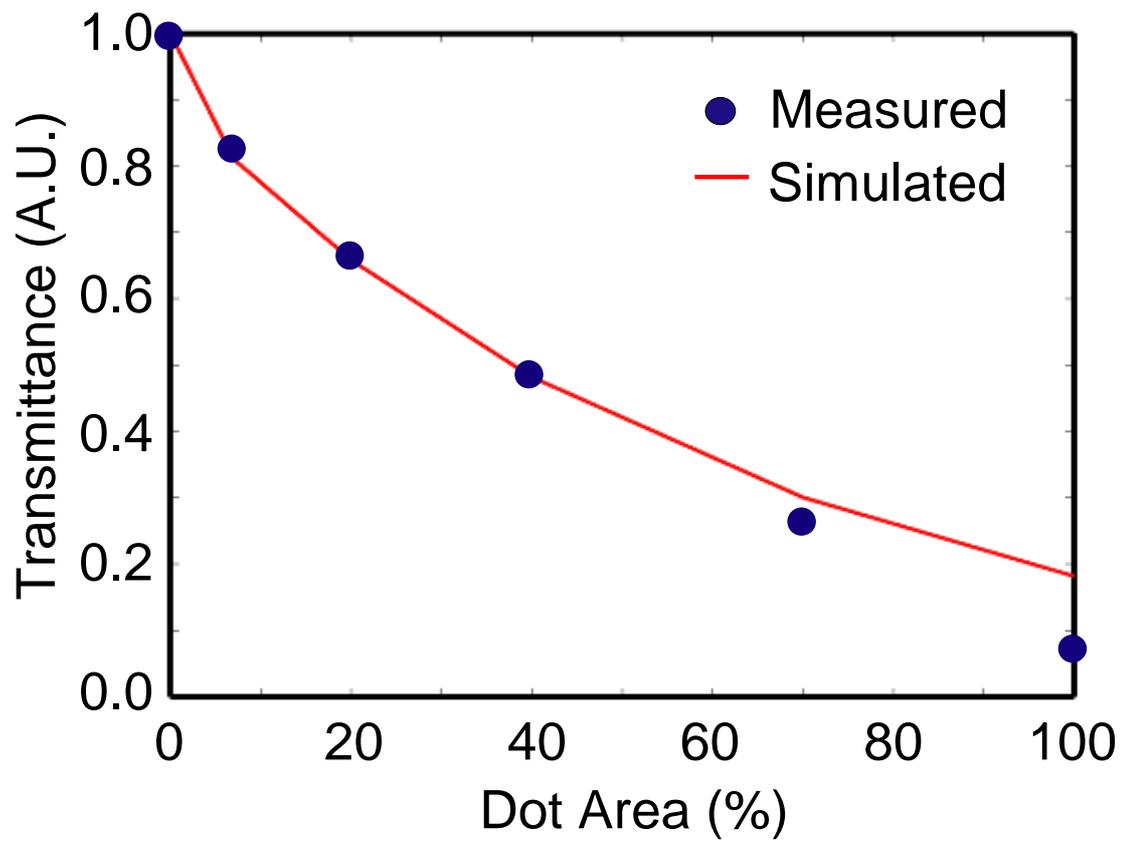
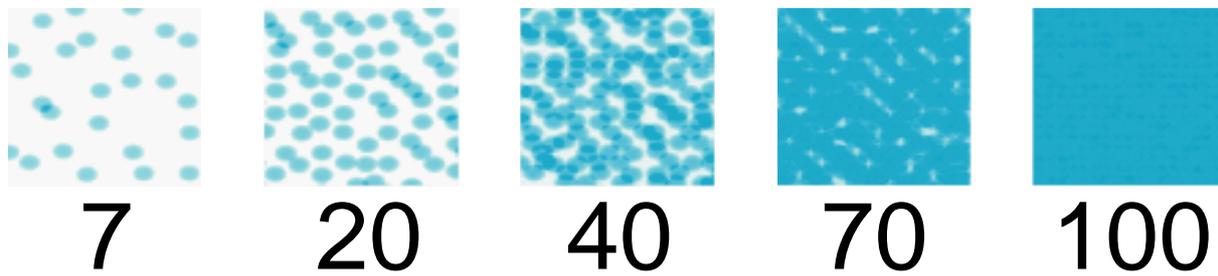


Fig. 9

Simulated Images



Measured Images

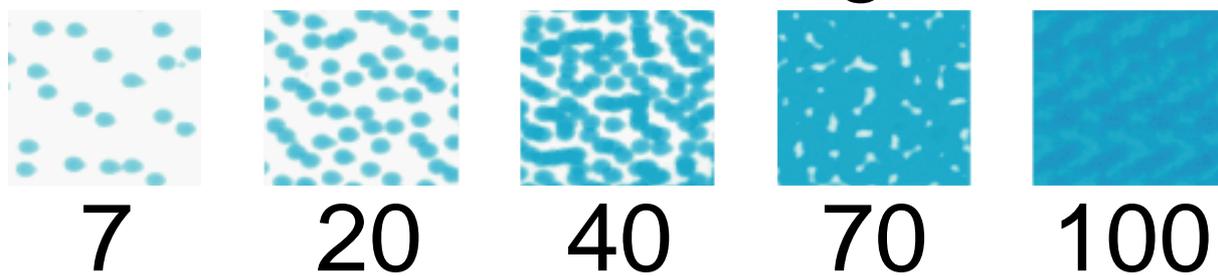


Fig. 10

Table 1 Dot area of 30 sample color patches

Sample Number	Dot Area(%)			
	Cyan	Magenta	Yellow	Black
1	100	0	0	0
2	0	100	0	0
3	0	0	100	0
4	100	100	0	0
5	100	0	100	0
6	0	100	100	0
7	70	70	70	0
8	70	70	0	0
9	70	0	70	0
10	0	70	70	0
11	40	40	0	0
12	0	40	40	0
13	20	20	20	0
14	40	0	40	0
15	20	20	0	0
16	20	0	20	0
17	0	20	20	0
18	0	0	0	100
19	70	0	0	0
20	40	0	0	0
21	20	0	0	0
22	0	70	0	0
23	0	40	0	0
24	0	20	0	0
25	0	0	70	0
26	0	0	40	0
27	0	0	20	0
28	0	0	0	70
29	0	0	0	40
30	0	0	0	20

Table 2 The average color difference ΔE_{94} between measured and estimated 30 color patches

paper	Max.	Min.	Average
glossy	5.53	0.13	1.83
matte	4.67	0.12	1.51
normal	4.72	0.11	1.52