

紙の人工物メトリクスにおける分割照合の利用と耐クローン性

小林洋一 坂倉 翔 平良允俊 山越 学 松本 勉

横浜国立大学 大学院環境情報学府/研究院
〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

E-mail: {kobayasi, yamakosi}@mlab.jks.ynu.ac.jp, tsutomu@ynu.ac.jp

あらまし 人工物の偽造対策技術で、偽造者に対する製造者の技術的優位性をセキュリティの根拠としな
いものとして、人工物メトリクス — 人工物個体にランダムに生成された特徴からその人工物個体を認証
する技術 — がある。本稿は、紙に光を照射したときの透過光パターンをその紙の固有な特徴とする人工
物メトリクスにおいて、精度向上のために有益であることが既に示されている分割照合方式が、耐クロー
ン性の向上にも寄与することを示す。

キーワード 人工物メトリクス, 紙の赤外透過光, 耐クローン性, 分割照合

Clone Resistance of Paper Artifact-Metrics with Segmented Matching

Yoichi KOBAYASHI Sho SAKAKURA Mitsutoshi TAIRA
Manabu YAMAKOSHI and Tsutomu MATSUMOTO

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University,
79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

E-mail: {kobayasi, yamakosi}@mlab.jks.ynu.ac.jp, tsutomu@ynu.ac.jp

Abstract It is desired to develop excellent counterfeit deterrence techniques for artifacts such as security documents, credentials, banknotes, payment cards, mobile terminals, etc. Artifact-metrics is a type of such techniques which are not based on the technological advantage of the manufacturers of artifacts but authenticate an individual artifact based on some randomly generated intrinsic unique features of the individual artifact. For a class of artifact-metrics with transmitted light patterns of papers, this article reports that, a segmented matching method developed for improving the individuality of such an artifact-metrics can also enhance the clone-resistance of the same artifact-metrics.

Keyword Artifact-Metrics, Transmitted Infrared Light of Paper, Clone Resistance, Segmented Matching

1. はじめに

銀行券や証書あるいはカードなどの物理媒体（人工物）は社会のあらゆる場面で用いられている。また、ビジネス文書等の電子化が進んでも人間がそれらを取り扱うためにはモバイル端末等の物体（人工物）に頼る必要があり、それらの認証技術が必要とされている。

紙やカードのような人工物の偽造は増加の傾向にある（たとえば <http://www.npa.go.jp/index.htm>）。その背景には、計算機の画像処理能力や印刷技術の向上により、偽造を試みる際の障壁が低くなったことがあると推察される。偽造防止技術が製造者側の偽造者に対する技術的優位性に根拠を置くものであるならば、技術環境

の変化による優位性の低下によりセキュリティの低下を招くことは避けられない。このような従来型の偽造防止技術に対してより高度なレベルでのセキュリティの実現を目指す技術として、本稿がテーマとする「人工物メトリクス」がある。これは、人工物の製造時に生得的にランダムに生成された、その人工物個体に固有な特徴を用いてその人工物個体の認証を行う技術であり、人工物の製造者ですら人工物個体を複製困難とできる可能性を持つ技術である。参考文献[1]は我々が2004年初頭にまとめた人工物メトリクス技術に関する総説である。

人工物メトリクスと位置付けられる技術は多数あ

るが、よく知られているものとしては、紙にレーザービームを照射したときの反射強度(レーザスペックル)^[2]や、紙表面の繊維画像(紙指紋)^[3]などがある。

我々は紙の赤外線透過画像を固有な特徴とする人工物メトリクスの方式について、偽造物(クローン)を作ることの難しさ(耐クローン性)を評価する課題につき2007年はじめに研究発表を行った^[4]。前後して、人工物の個体の個別性を詳しく判断するための分割照合方式の検討が進められ、個別性については優れた性能が達成できる見通しが示されている^{[5][6][8]}。

本稿は、紙の赤外線透過画像による人工物メトリクスにおいて上記分割照合方式を採用した場合の耐クローン性の研究について報告するものであり、分割照合方式は、本稿で試みたクローン作製方法に関する限りは耐クローン性の向上に寄与することを結論とする。

2. 人工物メトリクス

2.1. 人工物メトリクスの概要

従来の偽造防止技術が製造者の技術的優位性をセキュリティの根拠にしているのに対し、人工物メトリクスは製造者でさえ複製困難な人工物に固有な特徴を用いて認証を行う技術であるため、認証に関する情報が公知となってもセキュリティ低下の懸念が少ない。

人工物に固有な特徴として、その人工物が製造されたときから備えている物理特性から得られる特徴を用いることが多い。そのような特徴の例として、紙の証書などに分散させた磁性ファイバから得られる磁気パターンや、ラベルなどに分散させた粒子状物質の光反射パターンなどが知られている。

人工物メトリクスで利用される固有な特徴を『人工物メトリクス要素』と呼ぶ。また、人工物メトリクス要素の読取り、および照合に最低限必要な機構のことを『人工物メトリクス方式』と呼び、ある人工物メトリクス方式が実装されたシステムを『人工物メトリクス・システム』と呼ぶ。

2.2. 人工物メトリクス要素の要件

ある種類の人工物のある物理的特徴が人工物メトリクス要素として有用であるためには、以下の4項目で優れた特性を有することが求められる。

個別性(Individuality)

各個体の人工物メトリクス要素が、互いに十分異なっていると認められること

読取安定性(Stability)

人工物メトリクス要素の登録後に、再度、人工物メトリクス要素を読取ったときに、安定して登録時と同等の情報を読取れること

耐久性(Durability)

人工物の利用に伴う外的要因によって変化・劣化した人工物メトリクス要素から、安定して登録時と同等の情報を読取れること

耐クローン性(Clone Resistance)

人工物メトリクス・システムをあざむく偽物(クローン)を作ることが極めて困難であること

2.3. 人工物メトリクスの精度評価

人工物メトリクスにおける代表的な精度評価指標を以下に示す(図1)。

FNMR (False Non-Match Rate : 誤不一致率)

一致と判断すべき人工物を誤って不一致と判断する確率

FMR (False Match Rate : 誤一致率)

不一致と判断すべき人工物を誤って一致と判断する確率

CMR (Clone Match Rate : クローン一致率)

不一致と判断すべきクローンを誤って一致と判断する確率

EER (Equal Error Rate : 等誤り率)

FMR(またはCMR)とFNMRが等しくなる確率

パターン照合において判定閾値を設定する際には、EERに対応する閾値を用いるケースが多く、EERは照合アルゴリズムを比較する場合に認証制度の代表的な指標として使用される。

また、クローンに対するセキュリティ評価指標としてCMRが用いられる。照合アルゴリズムのパラメータを変えることにより、CMRが変化することが知られている。そのため、クローンに対するセキュリティ評価を行う際にCMRは重要な指標の1つとなる。

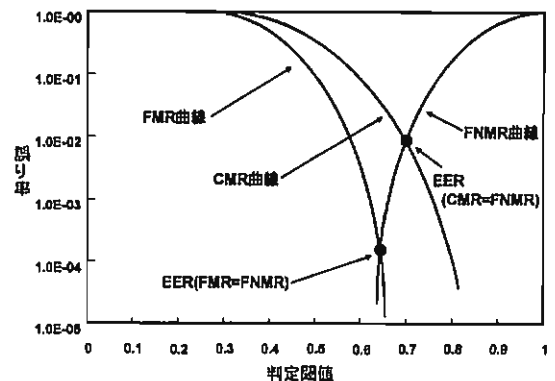


図1 FNMR / FMR / CMR 曲線

3. 紙の人工物メトリクス

3.1. 人工物メトリクス要素

紙の人工物メトリクス要素には、紙にレーザービームを照射したときの反射強度(レーザスペックル)^[2]や、紙表面の繊維画像(紙指紋)^[3]などが提案されている。

本稿では、人工物メトリクス要素として紙の赤外透過光を用いる^[4]。紙に赤外光を照射するとその紙の繊維の絡み具合や凝集部分により、透過光の濃淡分布(透過光パターン)が画像として得られる。同じ原料・同じ方法で製造された紙でも、紙の繊維の絡み具合や凝集部分は各紙によって一様にはならないため、各紙の透過光パターンも異なると考えられる。

3.2. システム構成

次に、認証システムの構成を示す(図2)。

まず、登録フェーズでは、スキャナで紙に赤外光を照射しその紙の透過光画像を取得する。次に、取得した透過光画像からデータ生成部で登録データを生成し、データベースに保存する。

一方、照合フェーズでは、同様に透過光画像を取得し、データ生成部で照合データを生成する。そして、照合部でデータベースに保存された登録データと照合を行い、その結果を出力する。

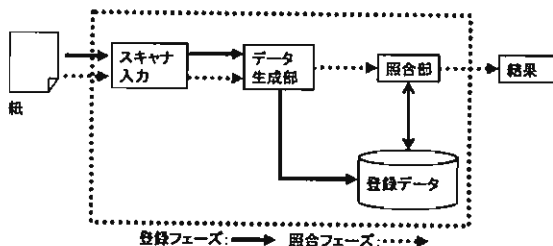


図2 認証システムの構成

3.3. 先行研究

紙の人工物メトリクスの精度評価について、これまでに検討されたことを述べる。

スキャナに紙を提示する際、同じ位置に正確に提示することは難しい。さらに、紙の変形や破損などの影響により、照合時に取得した画像が登録時に取得した画像と異なる部分がある可能性がある。この対策として、取得した画像をいくつかの領域に分割し、分割したそれぞれの領域ごとに照合を行う方法が提案されている^{[5][6][8]}。このような工夫をすることで、個別性の観点からFNMR=FMRの意味でのEERが 10^{-20} 以下とできるという結果が得られている。

また、文献[4]では、登録時に取得した画像に適切な変換を加え、その画像をOHPシートに印刷することに

よりクローンを作成する方法が示され、このクローンを用いて認証システムの耐クローン性を評価する手法が提案されている。

文献[7]では、紙から取得した画像とクローンから取得した画像を区別するため、それぞれの画像の輝度値分布を平均値や標準偏差を用いて比較する方法が提案されている。この方法は、ある画像の照合を行う前にその画像が紙から取得したものであるか、クローンから取得したものであるかを判断するステップを挿入する方法である。文献[7]での結論は、輝度値分布の平均値と標準偏差を共に紙を模擬するクローンを作るとは難しいことがわかり、耐クローン性が向上する可能性が示されている。

これに対し、本稿では、照合方法の工夫により、紙とクローンとを区別するアプローチを検討している。

4. 分割照合方式と耐クローン性

画像をいくつかの領域に分割して照合することにより、効果的に紙の真偽を判別することが可能であるという結果^{[5][6][8]}を参考に、この分割照合を用いて耐クローン性評価実験を行なった。

4.1. 実験媒体・機器

- A4再生紙(30枚) XRPCA4
- OHPシート(30枚) LPCOHP51
- 赤外線イメージスキャナ IR-4000

—製造元: iMeasure Inc.

形式: 卓上型フラットベッドカラー型スキャナ

走査方式: 脱取りヘッド移動型原稿固定読取り

光源: LEDアレイ

発光中心波長: 880[nm]

半値幅: 40[nm]

センサ: CCDラインセンサ

- カラーレーザープリンタ LP-S6500

—製造元: EPSON

形式: デスクトップ型ページプリンタ

プリント方式: 半導体レーザービーム走査

+乾式一成分電子写真方式

解像度: 600[dpi]

4.2. 実験概要

OHPシートに紙の画像を印刷してクローンを作製し、分割照合を行なった。

画像を取得する際、赤外線イメージスキャナの解像度を400[dpi]、光源波長を880[nm]とした。

まず、登録フェーズは以下の手順で行なった。

- ①スキャナで紙の赤外透過光画像を取得する。
- ②取得した画像から2048×1[pixel]の登録データを

- 作成する。作成した登録データを保存する。
- 次に、照合フェーズは以下の手順で行なった。
- ① スキャナで紙（またはクローン）の赤外透過光画像を取得する。
 - ② 取得した画像から 2112×65 [pixel] の照合データを作成する。（上下左右それぞれ 32 [pixel] ずつの範囲を探索するため、このサイズとした）
 - ③ 登録データを分割幅 w [pixel] ($w = 64, 128, 256, 512, 1024, 2048$) で分割数 N 個 ($N = 2048/w$) の領域に分割し、照合データの対応する領域との相関係数を計算して類似度を出力する。

4.3. 実験手順

ここでは、実験の具体的な手順について述べる。はじめに、A4再生紙30枚をスキャナで2回読取り、赤外透過光画像を取得した。

1回目に取得した透過光画像を登録画像とした。登録画像1枚から 2048×1 [pixel] の登録データを50個作成し、計1500個の登録データを得た。

次に、2回目に取得した透過光画像を照合画像とした。照合画像1枚から 2112×65 [pixel] の照合データを50個作成し、計1500個の照合データを得た。そして、登録データと照合データとの照合を行ない、類似度を求めた。その類似度から、FNMR/FMR曲線を求めた。

OHPシートで作成したクローン30枚をスキャナで読取り、赤外透過光画像を取得しクローン画像とした。クローン画像1枚から 2112×65 [pixel] のクローンデータを50個作成し、計1500個のクローンデータを得た。そして、登録データとクローンデータとを照合し、求めた類似度からCMR曲線を求めた。

4.4. クローン作製方法

クローン作製方法の手順について述べる（図3）。まず、登録画像のコントラストを調整するために、次の方法でヒストグラムの線形変換を行なった。

各登録画像の輝度値の平均値 \bar{h} と標準偏差 σ を求めて、登録画像中の任意の輝度値 h を式(1)によって計算した結果である g に変換した。

$$g = (h - \bar{h}) \cdot \frac{\sigma'}{\sigma} + \bar{g} \quad \dots(1)$$

\bar{g} は変換後の輝度値の平均値、 σ' は変換後の標準偏差である。本稿では、文献[4]において最もクローンとして強力なものの作製に対応する $\bar{g} = 50$ 、 $\sigma' = 6$ に設定し各登録画像のコントラストを調整した。

コントラストを調整した画像を画面上の左上を基点にして、横 3307 [pixel]、縦 4677 [pixel] となるよう

にサイズを調整した。

コントラスト・サイズを調整した画像をカラーレーザプリンタでOHPシートに印刷した。ただし、画像はOHPシートの全体には印刷されず、周囲に印刷されない部分がある。そのため、印刷する際は処理した画像が中央に来るように設定した。

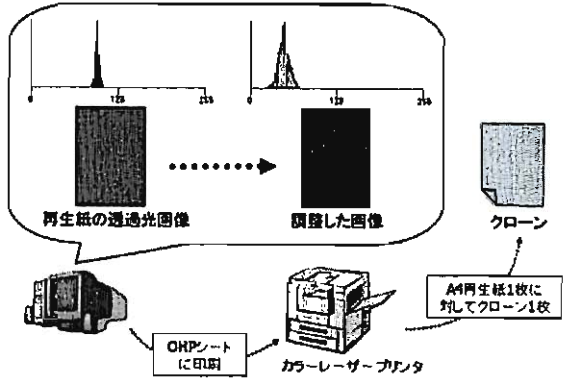


図3 クローン作成方法

4.5. 照合方法

照合方法について述べる（図4）。

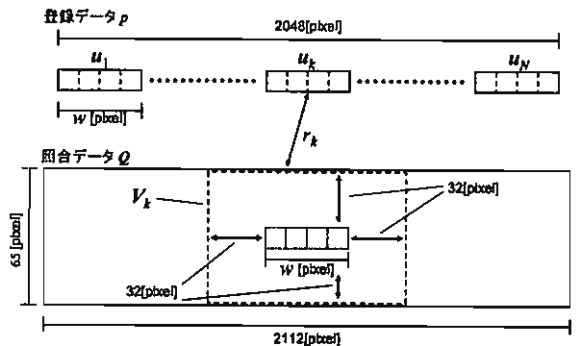


図4 分割照合方法

登録データ p と照合データ Q は、式(2)、(3)で表すことができる。

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_{2048}) \quad \dots(2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_{1,1} & \dots & q_{1,2112} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{65,1} & \dots & q_{65,2112} \end{bmatrix} \quad \dots(3)$$

まず、登録データを分割幅 w [pixel] で N 個 ($N = 2048/w$) に分割する。それぞれのデータ列を u_k ($k = 1, \dots, N$) と定義する。照合データ Q において、登録時の

u_k に対応する位置から上下左右 32[pixel]の範囲のデータを V_k ($k = 1, \dots, N$)と定義する。このとき、 u_k , V_k は以下の式で表すことができる。

$$u_k = (p_{(k-1)w+1}, \dots, p_{kw}) \quad \dots(4)$$

$$V_k = \begin{bmatrix} q_{1,(k-1)w+1} & \dots & q_{1,kw+64} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{65,(k-1)w+1} & \dots & q_{65,kw+64} \end{bmatrix} \quad \dots(5)$$

次に、 u_k と V_k のデータ列の類似性 r_k を相関係数：式(6)を用いて計算した。 V_k の範囲内を探索照合し、その最大値を r_k とした。

$$S(e, f) = \frac{\sum_{i=1}^w (e_i - \bar{e}) \cdot (f_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^w (e_i - \bar{e})^2 \cdot \sum_{i=1}^w (f_i - \bar{f})^2}} \quad \dots(6)$$

$$e = (e_1, \dots, e_w) \quad \dots(7)$$

$$f = (f_1, \dots, f_w) \quad \dots(8)$$

$$\bar{e} = \sum_{i=1}^w \frac{e_i}{w} \quad \dots(9)$$

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^w \frac{f_i}{w} \quad \dots(10)$$

閾値 T_1 (分割後のそれぞれの領域の類似性を判断) を用いて、登録データ p と照合データ Q の類似度を以下のように計算した。

$$S_2(p, Q) = \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{N} \quad \dots(11)$$

$$a_k = \begin{cases} 1 & (T_1 \leq r_k) \\ 0 & (T_1 > r_k) \end{cases} \quad \dots(12)$$

最後に、閾値 T_2 (分割前のデータ列の類似性を判断) に対して、 $S_2(p, Q) \geq T_2$ ならば登録データに対応する紙と照合データに対応する紙は同一の紙であるとみなす。また、 $S_2(p, Q) < T_2$ ならば2つの紙は異なるとみなす。

4.6. 実験結果と考察

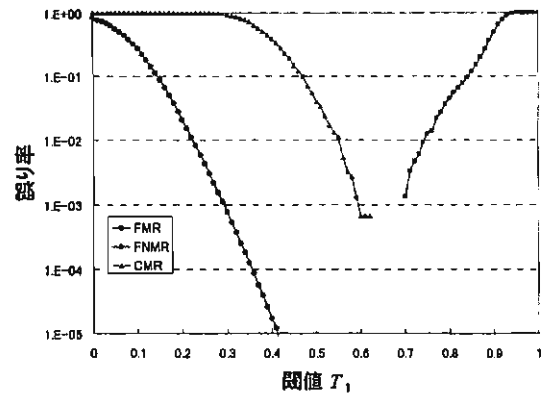
実験結果の例として、図5に分割幅 $w = 2048$ [pixel] (分割なし) と分割幅 $w = 256$ [pixel] ($N = 8$) のときの FMR / CMR / FNMR 曲線を示す。また、分割幅 $w = 256$ [pixel] の場合に、いくつかの T_1 , T_2 の組に対する FMR,

CMR, FNMR の値を、それぞれ表1, 表2, 表3に、試行回数分の該当数の分数の形で示す。

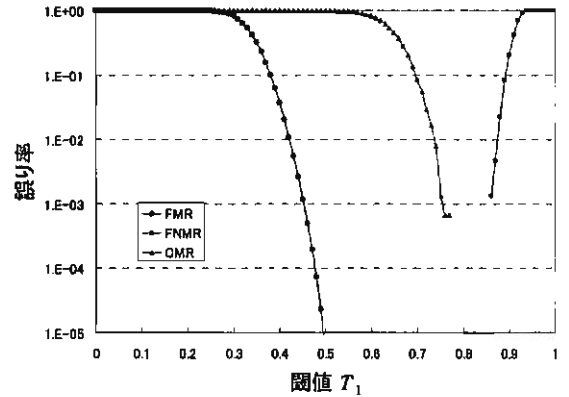
分割照合を行うことにより FMR / CMR / FNMR ともにすべての曲線の傾きが大きくなっていることから、分割することにより類似度のばらつきが小さくなっているものと考えられる。そのため、紙とクローンを区別しやすくなったと考えられる。

表1, 2, 3 から、閾値 $T_1 = 0.8$, 閾値 $T_2 = 0.5$ 程度に設定すれば、FMR, CMR, FNMR はどれもほぼゼロとなり、紙とクローンを区別することができると考えられる。

また、照合にかかる時間は、分割数にかかわらずほぼ一定であった。



(a) $w = 2048$ [pixel]



(b) $w = 256$ [pixel], $T_2 = 0.5$

図5 FMR / CMR / FNMR 曲線

表 1 $w = 256$ [pixel] のときの FMR

		T_1			
		0.8	0.85	0.7	0.75
T_2	0	2248500/2248500	2248500/2248500	2248500/2248500	2248500/2248500
	0.125	8763/2248500	786/2248500	31/2248500	0/2248500
	0.25	22/2248500	0/2248500	0/2248500	0/2248500
	0.375	0/2248500	0/2248500	0/2248500	0/2248500
	0.5	0/2248500	0/2248500	0/2248500	0/2248500
	0.625	0/2248500	0/2248500	0/2248500	0/2248500
	0.75	0/2248500	0/2248500	0/2248500	0/2248500
	0.875	0/2248500	0/2248500	0/2248500	0/2248500
	1	0/2248500	0/2248500	0/2248500	0/2248500

表 2 $w = 256$ [pixel] のときの CMR

		T_1			
		0.7	0.75	0.8	0.85
T_2	0	1500/1500	1500/1500	1500/1500	1500/1500
	0.125	1090/1500	458/1500	78/1500	3/1500
	0.25	698/1500	89/1500	6/1500	0/1500
	0.375	252/1500	12/1500	0/1500	0/1500
	0.5	85/1500	1/1500	0/1500	0/1500
	0.625	18/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	0.75	8/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	0.875	0/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	1	0/1500	0/1500	0/1500	0/1500

表 3 $w = 256$ [pixel] のときの FNMR

		T_1			
		0.7	0.75	0.8	0.85
T_2	0	0/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	0.125	0/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	0.25	0/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	0.375	0/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	0.5	0/1500	0/1500	0/1500	0/1500
	0.625	0/1500	0/1500	0/1500	3/1500
	0.75	0/1500	0/1500	0/1500	12/1500
	0.875	0/1500	0/1500	0/1500	83/1500
	1	0/1500	2/1500	17/1500	99/1500

5. まとめ

本稿では、紙の人工物メトリクスにおいて、分割照合方法を用いた場合の耐クローン性の検討を行なった。

その結果、閾値を適切に設定すれば OHP シートを用いて作製したクローンと紙とを識別することが十分に可能であることが分かった。また、照合にかかる時間は分割数にはほとんど依存しないことも検証した。このことより、分割照合は、紙の透過光画像のすぐれた個別性を引き出すとともに、耐クローン性においてもその強化に役立つ可能性があることを示せたと考える。

ただし、本稿で示したものは OHP シートに画像を印刷するというある一つのタイプのクローンに関する検討であって、あらゆるクローンに対する耐性を論じているわけではない。この点は今後の検討課題である。

文 献

- [1] 松本弘之, 宇根正志, 松本 勉, 岩下直行, 菅原嗣高, “人工物メトリクスの評価における現状と課題,” 金融研究, 第 23 巻, 別冊 1 号, pp.61-140, 2004.
- [2] James D. R. Buchanan, Russell P. Cowburn, Ana-Vanessa Jausovec, Dorothee Petit, Peter Seem, Gang Xiong, Del Atkinson, Kate Fenton, Dan A. Allwood, Matthew T. Bryann, “‘Fingerprinting’ documents and packaging,” Nature, Vol.436, Issue 7050, pp.475, 28 July 2005.
- [3] 伊藤健介, 左右田宏之, 井原富士夫, 木村哲也, 布施マリオ, “紙ドキュメントのセキュリティ,” 富士ゼロックス テクニカルレポート, No.15, pp.32-41, 2005.
- [4] 平良允俊, 山越 学, 松本 勉, “紙の赤外透過光を用いた人工物メトリクスの耐クローン性評価,” 電子情報通信学会 2007 年暗号と情報セキュリティシンポジウム(SCIS2007), 2F4-6, January 2007.
- [5] 山越 学, 田中純一, 古家 眞, 平林昌志, 松本 勉, “透過光画像を用いた紙の認証方法の検討 —人工物メトリクスの観点から—,” 第 99 回日本画像学会年次大会, pp.159-162, June 2007.
- [6] Manabu Yamakoshi, Junichi Tanaka, Makoto Furuie, Masashi Hirabayashi, Tsutomu Matsumoto, “Individuality Evaluation for Paper Based Artifact-Metrics Using Transmitted Light Image,” Proc. of SPIE, Vol.6819, pp.68190H, January 2008.
- [7] 坂倉 翔, 平良允俊, 小林 洋一, 山越 学, 松本 勉, “赤外透過光を用いた人工物メトリクスにおける輝度値分布の活用,” 電子情報通信学会 2008 年暗号と情報セキュリティシンポジウム(SCIS2008), 3B2-1, January 2008.
- [8] 山越 学, 田中純一, 古家 眞, 平林昌志, 松本 勉, “人工物メトリクスを用いた印刷基材の認証,” 日本印刷学会第 120 回春季研究発表会講演予稿集, pp.73-78, June 2008.