

加飾印刷技術とマルチモーダル人工物メトリクス（第1報）

于圣昆¹ 種崎湧斗¹ 藤川真樹¹ 七井靖²

概要：著者らは、シート状の人工物にマルチモーダル人工物メトリクスを適用するための新しい方法として「加飾印刷技術」に着目した。当該技術は、微細な金属粉末を含むインキを用いてメタリックな図柄や文字を印刷するものであり、金属粉末の種類と混合比を変えることで色合いの異なる金属色（たとえば、光沢のある金色、光沢を抑えた金色など）を印刷できる。金属箔をシート状の人工物に貼り付ける方法よりも多彩な色合いや微細な凹凸を生み出せるだけでなく、インキに含まれる溶剤や樹脂、金属粉末が生み出す3次元形状がランダムさをもつため、真正性の確度と偽造困難性を高める効果があるものと考えられる。

キーワード：マルチモーダル人工物メトリクス、レーザー顕微鏡、真正性、加飾印刷技術

Decorative Printing Technique and Multi-modal Artifact Metrics #1

SHENKUN YU¹ YUTO TANEZAKI¹
MASAKI FUJIKAWA¹ YASUSHI NANAI²

Abstract: We have focused on a "decorative printing technique" as a new method to apply the Multi-modal Artifact Metrics for sheet-like artifacts (e.g., paper, leather). This technique prints metallic letters/patterns onto the artifacts by using an ink with fine metal powder. It can also print different shade of metallic color (e.g., rich gold, pale gold) by changing the type and mixing ratio of the metal powder. Comparing with a method of pasting a piece of metal foil onto the sheet-like artifacts, this technique can not only produce variety of color tone and fine roughness onto the surface of the artifacts, but also form random three-dimensional shape/pattern due to the existence and irregular movement of solvent, resin, and metal powder in the ink. The technique could make the artifacts difficult to counterfeit and improve the accuracy of authentication.

Keywords: Multi-modal Artifact metrics, Laser microscope, Authenticity, Decorative printing technique

1. はじめに

シート状の人工物（印刷物など）の真正性を検証可能にしつつ偽造困難性を高める技術には2つある。1つは紙幣に使用されている偽造・変造防止技術であり、もう1つは人工物メトリクスである。前者は非公開であるが、後者は公開してもクローンの製造が極めて困難であるという特徴をもつ。

文献[1]では、金属箔（2つのローラーにより圧延されたシート状の金属）の表面に形成される微小な凹凸に注目した人工物メトリクスを提案している。「凹凸が観測点ごとに異なる」「凹凸を人為的に再現することが困難である」ことを利用した人工物メトリクスであり、レーザー顕微鏡によって可視化された凹凸（高さ画像）を特徴情報とする。以下に実運用の例を示す：

- (1) 金属箔の小片を人工物 A に貼り付け、小片から得られる特徴情報をセキュアなデータベースに保存したあと A を出荷する。金属箔は破れやすく、A から小片を剥がすと特徴情報が失われる。
- (2) 人工物 X が A であることを検証するには、X から抽出した特徴情報とデータベース内の特徴情報を比較する。類似度が閾値以上であれば A であると判定する。

文献[1]では入手が容易かつ安価なアルミ箔を採用したが、多彩な色合いをもつ金属箔を使用することで人工物に加飾を付与できる。一方で、金属箔には易損性があるため細かな模様（たとえば、表彰状の縁に描かれる雲龍、鳳凰、桐といった図柄）を金属箔で形成するには高度な貼付技術が必要とする。

著者らは、シート状の人工物に人工物メトリクスの機能（真正性の検証可能性、偽造困難性）を持たせつつ、高度な技術が必要とすることなく加飾を付与できる方法として「加飾印刷技術」に着目した。当該技術は、微細な金属粉末を含むインキを用いてメタリックな図柄や文字を印刷するものであり、金属粉末の種類と混合比を変えることで多彩な金属色（光沢のある金色、光沢を抑えた銀色など）を印刷できる[a]。インキが固着した部分には、微細かつユニークな凹凸やパターンが自然偶発的に形成される。

著者らは、凹凸やパターンをレーザー顕微鏡によって可視化した3種類の画像（カラー画像、レーザー画像、高さ画像）を特徴情報とすることで、マルチモーダル人工物メトリクス[2]の一手法になり得る可能性があると考えた。本

¹ 工学院大学
Kogakuin University
² 防衛大学校
National Defense Academy of Japan

a 加飾印刷技術は高級感を醸し出すために使用される。表彰状の縁取りのほか、食品の包装紙や雑誌の表紙などの印刷に使用される。

稿では、理論と実験により可能性があることを示す。

2章では、論述を進める上で必要となる基本的な情報を述べる。3章では、金属粉末等によって形成される微細な凹凸とパターンにはユニーク性と偽造困難性があることを説明する。4章では、シンプルな実験によりユニーク性と偽造困難性を示すとともに、FAR 曲線を描くことでレーザー顕微鏡が人工物メトリック・システムとして機能する可能性があることを述べる。5章で考察を加え、6章で本論文を総括する。

2. 基本的な情報

2.1 人工物メトリクス (概要)

人工物メトリクスとは人工物もつユニークな物理的特性を利用して真正性を検証する技術であり、当該特性を人為的に複製することは技術的に困難であるとされている[1][3][4]。マルチモーダル人工物メトリクスとは、人工物もつ複数の物理的特性に注目し、これを用いて真正性を検証する技術である。人工物から抽出される特徴情報は複数のため、真正性の確度と偽造困難性を高められる[2]。

人工物メトリック・システムとは人工物の真正性を判定するものであり、コンセプトはバイオメトリクス認証システムと同じである(図1参照)。出荷前の人工物から特徴情報Aを抽出し、これをセキュアなデータベースに保存する。真正性を検証する時には、人工物から抽出した特徴情報Bとデータベース内の特徴情報Aを比較し、類似度が閾値以上である場合に真正品と判定する。

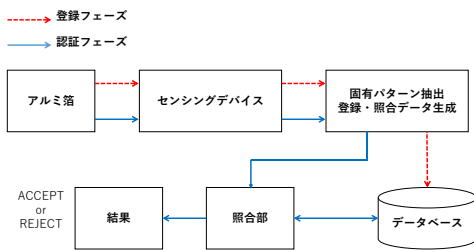


図1 人工物メトリック・システム

Figure 1 Artifact metrics system.

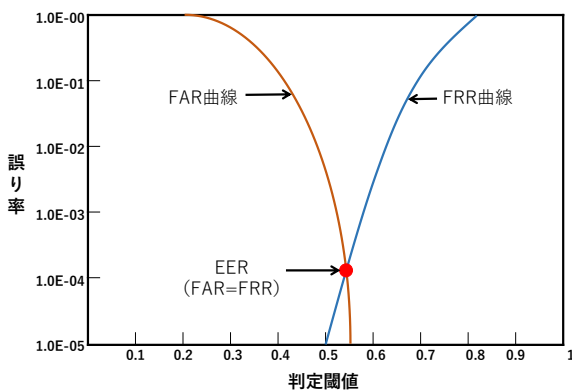


図2 FAR・FRR 曲線と EER

Figure 2 FAR and FRR curve and EER.

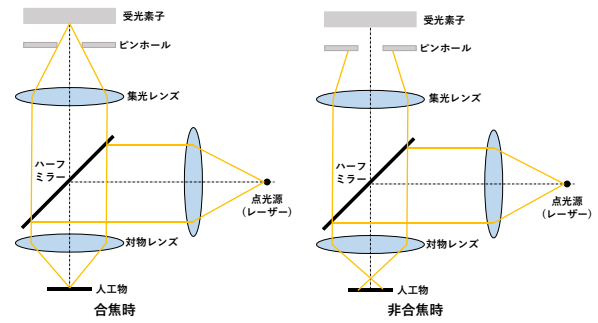


図3 レーザー顕微鏡の構造

Figure 3 Structure of laser microscope.

2.2 人工物メトリック・システムの精度評価指標

バイオメトリクス認証システムに倣い、本稿では以下の指標を用いる(図2参照)[5]。

- (1) **FAR (False Acceptance Rate)** : 真正品 A ではない人工物から抽出された特徴情報 x_info が提示されたときに「真正品 A である」と判定する割合。
- (2) **FRR (False Recognition Rate)** : 真正品 A から抽出された特徴情報 a_info が提示されたときに「真正品 A でない」と判定する割合。
- (3) **EER (Equal Error Rate)** : FAR と FRR が等しくなる値 (この値が低いほど認証精度が高くなる)。

2.3 加飾印刷技術 (概要)

加飾印刷技術とは、微細なフレック状の金属粉末[6] (1粒子の平均粒径 $3\sim 35\ \mu\text{m}$, 平均厚さ $0.15\sim 0.80\ \mu\text{m}$) を含むインキを用いて、メタリックな色合いを持つ文字やパターンを印刷する技術である。広く普及している印刷技術(グラビア印刷, フレキソ印刷, オフセット印刷)が利用できるため、紙・フィルムの加飾(出版物や食品, 医薬品, 化粧品, 玩具のパッケージ)や成形品の加飾(家電, 自動車, 医療・福祉機器のパーツ)に使われている。

印刷に使用されるインキは、金属粉末とビヒクル(樹脂を溶剤に溶かしたもの)の混合物である[7]。樹脂は乾燥すると被膜を形成するが、この働きにより金属粉末は印刷面に固着する。

2.4 レーザー顕微鏡 (概要)

レーザー顕微鏡とは、平らかな人工物表面に存在する微細な凹凸 (nm 単位) を非接触で計測できる顕微鏡であり、凹凸を2次元画像(高さ画像)として可視化する。図3に構造を示す。ピントが合っている(「焦点距離」と「人工物表面との距離」が同じである)場合、光源から発射されたレーザー光は人工物表面に当たり、その反射光はピンホールを通過して受光素子に到達する(図3左側参照)。このとき、受光素子が観測する反射光の強度は最大となり「人

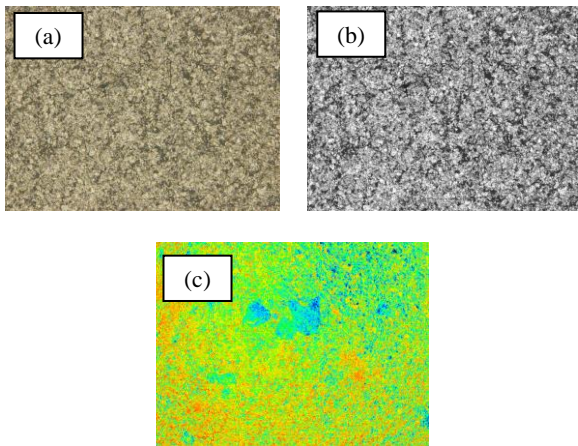


図4 カラー画像, レーザー画像, 高さ画像の例
Figure 4 Color, laser, and rugged image (examples).

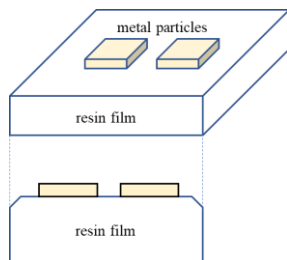


図5 樹脂膜と金属粒子
Figure 5 Resin film and metal particles.

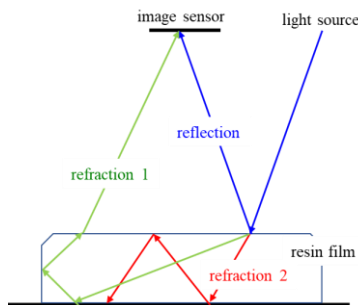


図6 樹脂膜と光のパス
Figure 6 Resin film and light paths.

工物表面との距離」が得られる。

レーザー顕微鏡は、Z 軸（縦）方向において焦点距離を変えながら観測点（ピクセル）ごとの反射光の最大強度を記録したあと、これを高さ情報に変換して可視化（画像化）する。撮影条件の変化（レーザー光の強度、振動の有無など）により取得される高さ情報は一定ではないため、一般的にレーザー顕微鏡は高さ情報を複数回取得し、その平均を可視化する。

レーザー顕微鏡は CCD も備えており光学顕微鏡としても機能する。著者らが使用したレーザー顕微鏡 (VK-X100) は以下の画像を出力する。

- カラー画像（レーザー顕微鏡に組み込まれた CCD が

捉えた画像。凹凸の情報は反映されない）

- レーザー画像（レーザーの受光素子が捉えた光学情報を可視化した画像であり、「焦点距離」と「人工物表面との距離」が同じであった瞬間が反映される。凹凸の情報は反映されない）
- 高さ画像（レーザーの受光素子が捉えた光のうち、最も強い光を画像として表現したもの。凹凸の情報が反映される）

図4に、加飾印刷物を撮影したカラー画像(a), レーザー画像(b), 高さ画像(c)の例を示す（倍率は文献[1]と同じ20倍とした）。

3. 一手法になる可能性

3.1 主張点

シート状の加飾印刷物から得られる3種類の画像（カラー画像, レーザー画像, 高さ画像）を特徴情報とすることで、加飾印刷技術はマルチモーダル人工物メトリクスの一手法になり得る可能性がある。以下に主張点を示す。

- 3種類の画像を用いることでマルチモーダル化[2]されるため、高さ画像のみを用いた文献[1]の手法よりも偽造困難性と真正性の確度が高まる。
- レーザー顕微鏡は、平らかな人工物の表面にある凹凸を測定したり、表面を拡大して観測したりする目的で使用される。加飾印刷物は平らかな状態に静置できるため、真正性の検証が可能である。
- インキに含まれる金属粉末が樹脂の働きにより人工物に固着すると、表面には μm オーダーのユニークな凹凸とパターンが自然偶発的に形成される。真正品がもつ凹凸とパターンを参照しながら人為的にこれらを再現することは、偽造者に対して大きな負荷（時間的・金銭的コスト）をかけることができる。
- 人工物に固着した凹凸とパターンに損傷を加えることなく人工物から剥がすことは、人工物に貼り付けた金属箔を剥がすことと同様に困難であると考えられる。このため、真正品から剥した凹凸とパターンを偽物に貼り付けるという攻撃に耐性がある。

3.2 ユニーク性と偽造困難性（原理）

本節では、金属粉末等によって形成される微細な凹凸とパターンにはユニーク性と偽造困難性があることを示す。

読者の理解を容易にするために、以下に示す理想的な状態を仮定する（図5参照）。

「人工物に固着する樹脂は平坦・平滑な膜を形成する」「個々の金属粒子は平滑な平板とし、樹脂膜の表面に整然と固着する」。

3.2.1 樹脂膜

はじめに樹脂膜に注目する。樹脂膜に照射された光（可視光, レーザー光）は、図6に示すように反射および屈折



図7 樹脂膜に含まれる気泡

Figure 7 Air bubbles contained in resin film.

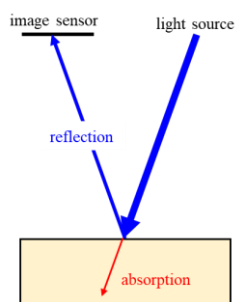


図8 光の反射・吸収

Figure 8 Reflection and absorption of light.

する。屈折光のパスは2種類ある（何度か膜のなかで反射を繰り返したあとに膜外に出るパス（refraction 1）と、膜内に留まるパス（refraction 2）である）。CCDやレーザーの受光素子に入るのは「反射光」と「膜外に出た屈折光」の一部である。

理想的な樹脂膜は平坦・平滑であるが、実際には樹脂に含まれる気泡（図7参照）により膜の厚みが変わるため平坦・平滑ではない【ユニーク性】。また、樹脂内に閉じ込められた気泡は屈折光のパスを変化させる。このため、CCDやレーザーの受光素子に入る光のパスは図6のようにはない。樹脂膜のクローンを作る（＝光のパスを合致させる）には気泡の形や大きさを制御すればよいが、流体であり、徐々に硬化する樹脂を制御しながら、気泡の形や大きさを制御することは困難であると考えられる【偽造困難性】。

3.2.2 金属粒子

つぎに1つの金属粒子に注目する。金属粒子に照射される光（可視光、レーザー光[b]）は図8に示すように反射し、一部は吸収される。CCDやレーザーの受光素子に入るのは「反射光」の一部である。

金属粒子が平板であれば、反射による光のパスと光の吸収度合を知ることができるため、真正品と同じ光のパスをもつクローンを製造できる可能性がある。しかし、実際に

は金属粒子は平滑な平板ではないため、反射による光のパスと光の吸収度合は異なる【ユニーク性】。金属粒子のクローンを作る（＝光のパスと吸収度合を合致させる）には金属粒子の厚さや形状を調整すればよいが、 μm オーダーの微細加工が必要となるため困難であると考えられる【偽造困難性】。

3.2.3 樹脂膜と金属粒子の混合

3.2.1と3.2.2では樹脂膜と金属粒子に分けて偽造困難性を論じたが、実際には金属粒子は流体である樹脂中でランダムに凝集・分散し、人工物の表面に形成された樹脂膜の中または表面に留まる【ユニーク性】。この状態と同じクローンを作るには3.2.1と3.2.2に加えて各金属粒子を制御すればよいが、流体であり、徐々に硬化する樹脂を制御しながら各金属粒子を狙った3次元位置に配置することは困難であると考えられる【偽造困難性】。

4. 実験

本章では、シンプルな実験を通して加飾印刷物が偽造困難性とユニーク性を備えていることを示すとともに、レーザー顕微鏡が人工物メトリック・システムになり得る可能性を示す。

4.1 サンプル

著者らは、アルミ箔のサンプルとして市販のアルミホイルを使用した。一方、加飾印刷物のサンプルとして加飾印刷が施された色見本シート（図9参照）に注目し、粒度記号4LのRich Gold（4L7：図10、表1参照）を使用した。4Lを選定した理由は、微細な濃淡が表現できるグラビア印刷やシャープな表現を再現できるフレキシ印刷向けのインキに含まれる金属粉末の粒度であり、雑誌や包装紙の加飾として広く使用されているためである[c]。

Rich Gold（4L7）を選定した理由は、典型的な加飾色でありPale Gold（4L5）よりも華やかさがあるためである。今回は、アルミホイルと同じ色合いをもつ色見本シートを入手できなかったが、入手が可能となった場合にはRich Goldとの比較のために追実験を行う予定である。



図9 色見本シート（加飾印刷物）

Figure 9 Color sample sheets with decollating printing.

b VK-X100 が使用しているレーザーの波長は 658nm である。

c 4Lよりも粒度が大きいものは塗料用のインキに、粒度が小さいものは包装紙の加飾には向かないオフセット印刷用のインキに使用される。



図 10 色見本シート (4L7) のスキャン画像
Figure 10 Scanned image of the sample sheet (4L7).

表 1 色見本シートの仕様

Table 1 Specification of sample sheets.

粒度記号	商品名		粒径 (micrometer)			厚さ (micrometer)
	Pale Gold	Rich Gold	Max.	Average	Min.	Average
G	G5	G7	110	40	20	0.90
E	E5	E7	100	35	15	0.80
L	L5	L7	90	30	15	0.70
2L	2L5	2L7	70	25	10	0.50
3L	3L5	3L7	60	20	5	0.40
4L	4L5	4L7	50	15	5	0.35
No.10	No.50	No.70	40	10	2	0.25
No.100	No.500	No.700	25	7	2	0.20
No.1000	No.5000	No.7000	15	5	1	0.18
No.1110	No.5550	No.7770	10	3	1	0.15

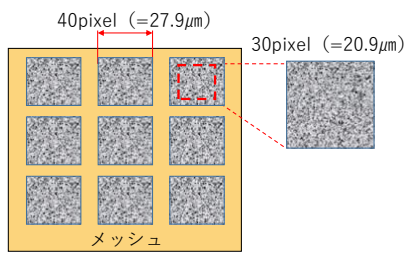


図 11 登録画像と照合画像の切り出し

Figure 11 Cutting out of registration and verification images.

4.2 特徴情報の抽出 (画像の切り出し)

特徴情報のユニーク性を検証するための事前作業として、データベースに登録する画像 (登録画像) と、照合の際に使用する画像 (照合画像) の切り出しがある。この作業を容易にするために、文献[1]では微細な網目を持つ金属製のメッシュをアルミ箔に貼り付けた。メッシュが貼り付けられている部分をレーザー顕微鏡で撮影することで、網目をガイドとして登録画像と照合画像を切り出せる。著者らも同じ方法を使用して、カラー画像、レーザー画像、高さ画像について、登録画像と照合画像を切り出す。

はじめに、レーザー顕微鏡の倍率を 20 倍に設定 (1 pixel ≒ 697.8 nm) し、縦横 30 μm の網目を持つ金属製のメッシュ (VECO グリッド・400 メッシュ) をアルミ箔と加飾印刷物に貼り付ける。つぎに、レーザー顕微鏡によって撮影された 3 種類の画像から、登録画像 (30 pixel 四方 ≒ 20.9 μm 四方) と照合画像 (40 pixel 四方 ≒ 27.9 μm 四方) を切り出

す (図 11 参照)。登録画像が照合画像よりも一回り小さい理由は、文献[1]と同様にテンプレートマッチングに ZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) を使用するためである。

4.3 表面粗さの比較 (偽造困難性の検証)

人工物の表面を微視的に見ると、高さ、深さ、間隔の異なる山と谷が存在する。これを表面粗さという。この度合いが小さいほど表面の凹凸も小さくなるため、偽造者にとっては微細な加工技術が必要となり偽造困難性が増す。

アルミ箔と加飾印刷物の表面粗さを比較するために、算術平均粗さ (Ra) [d] を算出した。手順を以下に示す。

- (1) レーザー顕微鏡を使ってアルミ箔と加飾印刷物の高さ情報を求める。倍率は文献[1]と同じ 20 倍とした。
- (2) 表面の一部を基準長さ ℓ で切り出したあと、切り出した区間の凹凸の平均値 (Ra) を算出する (図 12 参照)。

表 2 にアルミ箔と加飾印刷物の算術平均粗さを示す。アルミ箔は 2.20 μm、加飾印刷物 (4L7) は 1.34 μm となり、後者のほうが (表面粗さの観点から) 偽造困難性が高いといえる。参考までに、他の色見本シートの算術平均粗さを算

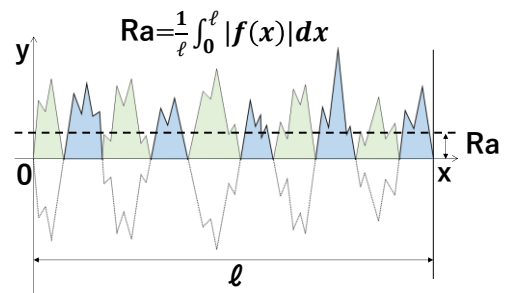


図 12 算術平均粗さ (Ra)

Figure 12 Arithmetic mean roughness (Ra).

表 2 算術平均粗さの測定結果

Table 2 Measurement results of Ra.

サンプル名	平均粒径 [μm]	算術平均粗さ [μm]
アルミ箔	N/A	2.20
E7	35	1.84
L7	30	1.61
2L7	25	1.51
3L7	20	1.39
4L7	15	1.34
NO.70	10	1.28
No.700	7	1.24
NO.7000	5	1.21
NO.7770	3	1.16

d 算術平均粗さ (Ra) は、単一の突出した凹凸の影響を受けにくく、表面粗さを評価するうえで安定した結果が得られるという特徴がある。

出したところ、全てにおいてアルミ箔の値を下回った。

4.4 高さ画像のユニーク性

文献[1]では、高さ情報の読み取り安定性が議論されている(ノイズの影響により、同じ人工物を撮影しても完全に同じ高さ情報は得られないことが述べられている)。ノイズの影響を取り除く(読み取り安定性を向上させる)ために、文献[1]では高さ情報を複数回測定し、その加算平均を取ることを推奨している。このため著者らは、加算平均回数を2回にして1枚の高さ画像を撮影した。

アルミ箔と加飾印刷物(4L7)について、4.2節で述べた方法で登録画像・照合画像ともに352枚の画像を切り出し、登録画像と照合画像とのマッチング(ZNCC)により類似度を算出した。その結果、登録画像が照合画像の中に含まれている場合(つまり、同一の画像同士の比較)では、類似度はどの画像でも0.99以上となった。一方、登録画像が照合画像の中に含まれていない(つまり、別の画像同士の比較)では、類似度は最大でも0.65であった。このことから高さ画像にはユニーク性が見られる。

4.5 カラー画像のユニーク性

アルミ箔と加飾印刷物(4L7)のカラー画像について、登録画像・照合画像ともに352枚の画像を切り出し、登録画像と照合画像とのマッチング(ZNCC)により類似度を算出した。その結果、登録画像が照合画像の中に含まれている場合では、類似度はどの画像でも0.99以上となった。一方、登録画像が照合画像の中に含まれていない場合、類似度は最大でも0.75であった。このことからカラー画像にはユニーク性が見られる。

4.6 レーザー画像のユニーク性

アルミ箔と加飾印刷物(4L7)のレーザー画像について、登録画像・照合画像ともに352枚の画像を切り出し、登録画像と照合画像とのマッチング(ZNCC)により類似度を算出した。その結果、登録画像が照合画像の中に含まれている場合では、類似度はどの画像でも0.99以上となった。一方、登録画像が照合画像の中に含まれていない場合、類似度は最大でも0.75であった。このことからレーザー画像にはユニーク性が見られる。

4.7 FAR/FRR 曲線

FAR/FRR 曲線は認証システムの精度を表現する方法であり、横軸に閾値をとり、FAR/FRR を任意の閾値についてプロットする[e]。以下に、今回作成する FAR/FRR 曲線の描き方を示す。

e FAR/FRR 曲線は、サンプル数が少ない場合において、照合アルゴリズムによる認証精度の概要を把握したいときに使用される。サンプル数が多い場合には ROC カーブが使用される。

- (1) アルミ箔と加飾印刷物(4L7)の登録画像と照合画像はそれぞれ352枚である。はじめにアルミ箔に着目し、登録画像と照合画像とのマッチング(ZNCC)により類似度を算出する(組み合わせ総数は61,776となる)。つぎに加飾印刷物(4L7)に着目し、上記と同様に類似度を算出する(組み合わせ総数は上記と同じ)。
- (2) はじめにアルミ箔の類似度に着目する。任意の閾値のときに、拒否すべき照合画像を誤って受理した割合(FAR)をグラフ上にプロットする。加飾印刷物(4L7)についても同様の処理を行う。
- (3) はじめにアルミ箔の類似度に着目する。任意の閾値のときに、受理すべき照合画像を誤って拒否した割合(FRR)をグラフ上にプロットする。加飾印刷物(4L7)についても同様の処理を行う。

本稿では、FAR 曲線のみを紹介する(FRR 曲線の描画は今後の予定とする)

4.7.1 高さ画像の場合

図13に高さ画像のFAR曲線を示す。アルミ箔と加飾印刷物のFARは、ほぼ同程度であった。

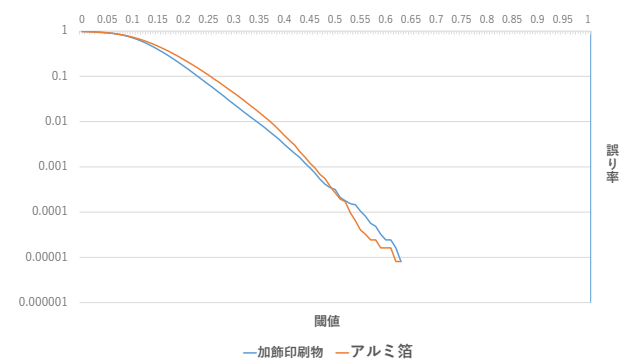


図13 FAR 曲線(高さ画像)

Figure 13 FAR curve.

4.7.2 カラー画像の場合

図14にカラー画像のFAR曲線を示す。加飾印刷物のFARは、アルミ箔のFARより低かった。

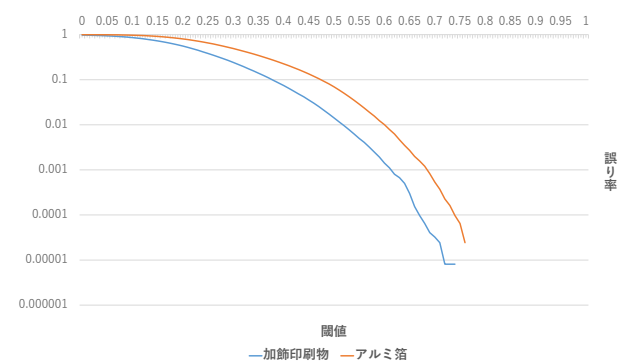


図14 FAR 曲線(カラー画像)

Figure 14 FAR curve.

4.7.3 レーザー画像の場合

図 15 にレーザー画像の FAR 曲線を示す。加飾印刷物の FAR は、アルミ箔の FAR より低かった。

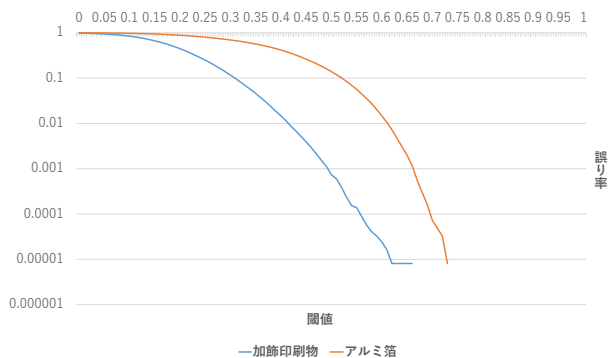


図 15 FAR 曲線 (レーザー画像)

Figure 15 FAR curve.

5. 考察

5.1 金属箔メトリクスとの比較

文献[1]では、金、銀、プラチナ、錫、真鍮、アルミニウムといった金属箔が紹介されているため、加飾を兼ねた人工物メトリクスを実現できる可能性がある。一方で、圧延法による金属箔の作成は大量生産を目的としているため、多彩な色合いの金属箔をオンデマンドかつ小ロット向けに作成することは難しい[f]。また、貴金属（金、銀、プラチナ）の使用は材料費の上昇につながる。

一方、加飾印刷技術では金属粉末の配合を変えるだけで多彩な色合いを出せることから、オンデマンドかつ小ロット向けのインクを作成することは（圧延法によって製造される金属箔と比較すると）容易である。また、貴金属を使用せずに、安価な亜鉛と銅の粉末で貴金属色を表現できることから材料費を安く抑えられる。

5.2 耐久性

文献[8]では、金属箔メトリクスの耐久性を高めるための試みとして、透明のラミネートフィルムで金属箔をカバーする方法が提案されている。耐傷性（紙やすりによりフィルム表面を傷つけること）、耐圧性（ローラーによりフィルム越しに金属箔に圧力をかけること）、耐熱性（熱湯を用いた湯煎によりフィルム越しに金属箔に熱を加えること）を評価したところ、耐傷性において難が見られた（傷がついた部分からは高さ情報が取得できなかった）ものの、耐圧性と耐熱性については照合精度への影響はわずかであった。

元来、加飾印刷物は薄く透明な樹脂フィルムで保護されているが、文献[8]と同じ方法で加飾印刷物を保護した場合、耐傷性については同様の結果が得られるものと考えられる。一方、耐圧性と耐熱性についても同様の結果が得られる可

f 大量生産のための工程：「熔融による合金の作成工程」と「圧延による金属箔の作成工程」を必要とするためである。

能性があるが、これらの評価は今後の予定に含めたい[g]。

耐傷性を高めるために、樹脂フィルムの代わりに腕時計の風防などに使用されているサファイアクリスタル[9]を使用する方法が考えられる。サファイアクリスタルのモース硬度（硬さの指標）は9であり、ダイヤモンド（モース硬度10）に次ぐ硬度である。傷つきにくいいため、薄いサファイアクリスタル板で加飾印刷物を保護すれば良いように思われる。一方で、高硬度ゆえに加工が難しいため金銭的成本が高くなるという課題がある。このため、金銭的なコストを抑制しつつ耐傷性を高めるためには、モース硬度3~6程度の無機ガラス板の使用が適切であると考えられる。

5.3 撮影環境の変化

5.3.1 照明条件

今回の実験では、レーザー顕微鏡を太陽光が入らない室内に静置し、天井に設置されている蛍光灯が点灯しているという環境下で3種類の画像（高さ画像、カラー画像、レーザー画像）を撮影した。カラー画像の場合、レーザー顕微鏡周辺の照度が変化すると色相、彩度、明度に変化が出る可能性がある。

テンプレートマッチングに使用したZNCCは、元来、明るさの変化に影響を受けにくい[10]。今回の実験では、大幅な照度変化をもたらす要因となるもの（補助照明など）は使用しなかったが、安定的にマッチングを行うために、レーザー顕微鏡による撮影中は照度をモニタリングするように努めたい。

5.3.2 位置条件

レーザー顕微鏡は平面方向（xy軸）と高さ方向（z軸）について計測を行う。今回使用したレーザー顕微鏡はモーター駆動により両方向の計測を行うことから、駆動機構の高精度さ（nm精度の分解能）を維持する必要がある。これには定期的な校正が必要不可欠である。

今回使用したレーザー顕微鏡は防振台上に静置されていたため、振動という外乱の影響を受けにくい構造となっている。一方で、光学系のフラットネスが維持されていないと計測精度に影響が出ることから、フラットネスを常時あるいは定期的にモニタリングできる機構を備えておく必要がある。

6. まとめ

6.1 サマリー

本稿では加飾印刷技術に着目し、シート状の加飾印刷物から3つの特徴情報（カラー画像、レーザー画像、高さ画像）を抽出・マッチングすることで、マルチモーダル人工

g 本論文の目的は、加飾印刷物がマルチモーダル人工物メトリクスとしてのポテンシャルを持つことを調査することにあるため、耐久性の実験は本論文のスコープから外れる。

物メトリクスになる可能性があることを理論的に示した。つぎに、シンプルな実験（表面粗さの測定、テンプレートマッチングによる類似度測定）により物理的特性の偽造困難性とユニーク性を示した。加飾印刷物はアルミ箔よりも算術平均粗さが小さいこと、テンプレートマッチングにより3種類の画像にはユニーク性があること、FAR 曲線によりレーザー顕微鏡は人工物メトリック・システムになり得る可能性があることが分かった。

6.2 今後の予定

本稿において「今後の予定」とした項目について、実験により評価を行ってまいりたい。特に、耐久性の評価は実用化に結び付けるためのキーポイントであることから、「サファイアクリスタル薄板や無機ガラス薄板によるカバーの有効性」と「レーザー顕微鏡による特徴情報の読み取り性能（＝それぞれの薄板が、読み取り性能に影響を与えるか否か）」の関係について調査を行ってまいりたい。

謝辞 福田金属箔工業株式会社様には、加飾印刷技術について貴重なコメントと色見本シートをご提供いただいた。東京都立産業技術研究センター様、株式会社キーエンス様には、レーザー顕微鏡に関する情報をご提供頂いた。謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 吉田直樹, 横山雄紀, 西村和夫, 松本勉, 金属箔人工物メトリクス, 電子情報通信学会論文誌, A Vol. J99-A, No. 8, pp.341-350, 2016年
- [2] 藤川真樹, 坂野正宗, 七井靖, 瀧真悟, 新しいガラス蛍光体の開発と評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No.9, pp. 1542-1551, 2020年
- [3] 藤川真樹, 原万里子, 尾崎悠介, 坂野正宗, 七井靖, 瀧真悟, マルチモーダル人工物メトリクスのための機能性材料の開発(その3), マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2019 論文集, pp.1335-1341, 2019年
- [4] 松本勉, 岩下直行, 金融業務と人工物メトリクス, 金融研究, Vol. 23, No. 2, 2004年
- [5] 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, 日本銀行金融研究所金融研究, pp. 61-140, 2004年
- [6] 福田金属箔工業株式会社, 金属粉末に関する研究開発事例, 日本溶射学会誌, Vol. 54, No. 2, 2017年
- [7] 丹田熙人, 出版グラビアおよび包装グラビアインキ, 印刷インキ基礎講座(第V講), 色材, Vol. 70, No. 5, pp. 344-350, 1997年
- [8] 吉田直樹, 松本勉, 金属箔人工物メトリクスにおける耐久性の評価, 電子情報通信学会技術報告, pp. 1-8, 2016年
- [9] JACK ROAD, サファイアガラス(サファイアクリスタル)ってどんな素材? 風防素材について総ざらい, https://www.jackroad.co.jp/blog/post/sapphire_crystal 2021年5月13日アクセス
- [10] 國井康晴, 佐藤友哉, 潮田隆広, 影の投影によるステレオ計測の精度向上とロバスト化, 日本機械学会論文集, Vol. 79, No. 802, pp. 2093-2102, 2013年