

複数の特徴情報を用いて人工物の真正性を検証する方法の研究

藤川 真樹^{†1} 實川 康輝^{†1} 淵 真悟^{†2}

概要: 本論文では、マルチモーダル人工物メトリクスを提案する。これは、本人認証システムのひとつであり普及が拡大している「マルチモーダル・バイOMETリック・システム」にヒントを得たものである。著者らは、物理的特性が異なる特徴情報を2つ以上人工物に持たせることで、従来の人工物メトリクスよりも個々の人工物の真正性をより高い精度で検証でき、偽造品の製造を困難にできると考えている。本論文では、当該技術の実現可能性を検証するために、偽造品の存在が確認されている合成樹脂製品（有価カード）にフォーカスを当て、2つの物理的特性（電気特性、光学特性）をもつカード型サンプルを作製した。実験の結果、これらの物理的特性から導出される2つの特徴情報（シート抵抗、可視光画像）はサンプルごとにすべて異なった。これは、個々のサンプルを識別できる特徴情報になり得る可能性があることを意味している。

1. はじめに

1.1 背景と目的

日々製造される人工物の真正性（本物であること）を検証する技術として「人工物メトリクス」があるが、当該技術のコンセプトはバイOMETリックと基本的には同じである。これは、人工物メトリクスでは、個々の人工物も固有の特徴情報を用いて真正性を検証しているが、同様にバイOMETリックでも、個人も固有の生体情報を用いて本人性を検証しているからである。

人工物メトリクスという言葉の語源ともいえるバイOMETリックでは、これまではシングルモーダル認証（1つの生体情報を用いて個人を識別する方法）が一般的であったが、最近では、より高い精度で個人を識別しつつ、特定の個人に成りすますという攻撃への耐性を高めるために、マルチモーダル認証（複数の生体情報を用いて個人を識別する方法）が一般的になりつつある。実際に、日本国内ではマルチモーダル認証システムに関する評価基準の標準化が提案されており[1]、インドではインド国民ID制度プロジェクトにおいて顔、指紋、虹彩が使用されている[2]。

真正品を真似たコピー品が大量に市場に流通している今日では、人工物の真正性を高い精度で判定できるとともに、偽造の困難性を高める技術が必要になっている。このため著者らは、バイOMETリックにおけるマルチモーダル認証にヒントを得て、物理的特性が異なる特徴情報を複数個人人工物に持たせるとともに、当該情報を用いて個々の人工物の真正性を検証する技術（マルチモーダル人工物メトリクス）を提案する。

本論文では、以下のながれで論述を展開する。第2章では、マルチモーダル人工物メトリクスのコンセプト、本論文がフォーカスする人工物、実現のためのアプローチが満たすべき指標と本論文の前提条件を述べる。第3章では、著者らのアプローチを紹介する。第4章では、アプローチの有効性を検証するために行った実験とその結果を述べる。

その後、第5章で実験結果と実用化に関する考察を述べ、第6章で総括する。

1.2 人工物メトリクスの概要

本節では、人工物メトリクスにおいて特徴情報がどのように取り扱われているのかを述べる。人工物メトリクスでは、センシングデバイスを用いて人工物も固有の特徴情報を抽出するが、この特徴情報は「人工物の製造過程で、1つの物理的特性をもつ材料（フィラー）を添加する」というシンプルな方法で人工物中に形成される。添加されたフィラーの粒子は自然偶発的かつランダムに分散して人工物中で安定するが、この分散度合いが特徴情報に反映される。表1に、製造過程で添加されるフィラーも物理的特性と、そこから抽出される特徴情報の例を示す。

図1に、人工物メトリクスを実装したシステム（人工物

表1 物理的特性と抽出される特徴情報

物理的特性	抽出される特徴情報
光学特性	粒子もつ光学特性（反射、透過、屈折、蛍光）とその分散度合いが特徴情報に反映される。当該情報は、光の強度をセンシングできるデバイスによって抽出される。
磁気特性	粒子もつ磁気特性（引力と斥力）とその分散度合いが特徴情報に反映される。当該情報は、磁気の変化をセンシングできるデバイスによって抽出される。
電気特性	粒子もつ電気特性（電荷）とその分散度合いが特徴情報に反映される。当該情報は、電荷量をセンシングできるデバイスによって抽出される。
振動特性	粒子もつ振動特性（音波）とその分散度合いが特徴情報に反映される。当該情報は、音波をセンシングできるデバイスによって抽出される。

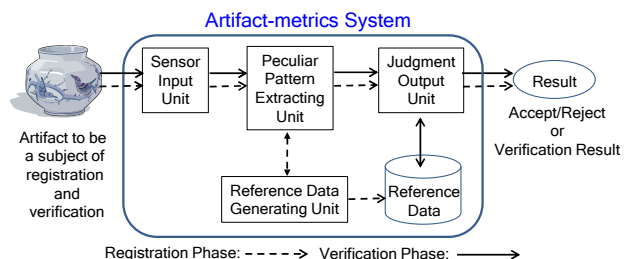


図1 人工物メトリック・システムの概要

†1 工学院大学
Kogakuin University

†2 青山学院大学
Aoyama Gakuin University

メトリック・システム)の概要を示す(示されている2つのフェーズは、バイオメトリック・システムとほぼ同じである)。当該システムでは、人工物の出荷前に特徴情報を抽出し、セキュアなデータベースに格納する。真正性を検証するときには、対象となる人工物から特徴情報を抽出し、データベース上の特徴情報と比較する。

1.3 関連研究

本節では、関連研究を紹介することで本研究の位置づけを明確にする。特徴情報を抽出するときの状況(たとえば、温度、湿度、人工物とセンシングデバイスとの3次元的な距離)は変化するため、いつも同じ特徴情報が抽出されるとは限らない。このような状況でも、真正品の場合には、データベースに登録されている特徴情報と、検証時に抽出された特徴情報との間に強い相関があることを見出せなければ、真正性の検証を安定的に行うことはできない。

両者の間に強い相関を見出す方法として、「着目する特徴情報の数を増やす」というアプローチがある。文献[3]では、1つの物理的特性をもつフィルターから2つの特徴情報を抽出する方法が提案されている。この方法では、光学特性をもつフィルター(ガラス蛍光体の粉末)を絵具や塗料と混ぜて陶磁器表面に付着させておき、高温の炉のなかでフィルターの粒子を陶磁器に溶着させるのだが、溶着した粒子の大きさと分散度合いを観測する場所(特徴情報を抽出する場所)によって「発光イオン濃度」と「粒子の厚さ」に違いが見られる。文献[3]では、これらが「発光スペクトル分布」と「発光強度分布」の違いとして現れることを利用し、2つの分布を特徴情報として利用するというアイデアを提案している。

2. マルチモーダル人工物メトリクス

本節では、著者らが提案するマルチモーダル人工物メトリクスについて述べる。

2.1 コンセプト

著者らが提案するマルチモーダル人工物メトリクスは、文献[3]とは異なり、2つ以上の物理的特性を人工物に持たせ、そこから2つ以上の特徴情報を抽出するというコンセプトをもつ。文献[3]との違い(提案方法の優位性)は、抽出できる特徴情報の数を増やせることである。文献[3]では人工物に1つの物理的特性を持たせるため、著者らの方法のように2つ以上の物理的特性を持たせる場合に比べると、抽出できる特徴情報の数は限られてくる。

著者らの方法は、人工物メトリクスという研究分野に2つの貢献をもたらす。1つは、前節で述べたように、特徴情報を増やすことによってデータベースに登録されている特徴情報と、検証時に抽出された特徴情報との間に強い相関関係を見出すことができるため、真正性の検証を安定的に行えることである。もう1つは、偽造者にとっては真正品からコピーすべき特徴情報の数が増えるため、その分、

表 2 合成樹脂製品の分類

分類 I	定義: 形成された人工物について、その大部分を合成樹脂が占めるもの。
	用途(1): クレジットカード[4]、キャッシュカード[5]、SIMカードなど。 用途(2): プリペイドカード[6]、ポイントカードなど。 用途(3): 家電の外装、ハードウェアトークン(ワンタイムパスワード生成器)など。
	素材: 用途(1)ではPVC樹脂が、用途(2)ではPET樹脂が、用途(3)ではABS樹脂が使用されている。
分類 II	定義: 形成された人工物について、その表面が合成樹脂で塗装またはコーティングされているもの。
	用途(1): 腕時計[7]やメガネフレームなど、ABS樹脂やポリカーボネイトで形成された製品で、焼付塗装(塗装皮膜の樹脂に150度以上の熱をかけることで皮膜を硬化させる塗装)ができないもの。 用途(2): 自動車のアルミホイール[8]など、アルミや真鍮で形成された製品で、焼付塗装ができないもの。
	素材: 用途(1)(2)ともに、アクリル樹脂、ウレタン樹脂、フッ素樹脂、エポキシ樹脂が塗装またはコーティングに使用されている。

偽造の困難性を高められることである。

2.2 合成樹脂製品(有価カード)への適用

著者らは、マルチモーダル人工物メトリクスが適用できる人工物の探索を進めているが、本論文では適用先のひとつとして合成樹脂製品に着目し、当該製品に対するアプローチの適用可能性を検証する。

合成樹脂製品に着目した理由は2つある。1つは、我々の日常生活において身近に存在する人工物であることである。合成樹脂は成形が容易で酸・アルカリに強く、使用目的や用途に合わせた特性や性能を製品に持たせることができるという特長をもつ。一般的に、電気を通しにくく、燃えやすく、生分解しにくいというイメージがあるが、最近では導電性、難燃性、生分解性をもつ合成樹脂が開発されており、資源としても積極的に再生利用されている。

もう1つは、合成樹脂製品のコピー品が存在していることである。表2は、合成樹脂が使用されている製品を分類したものであり、コピー品の存在が確認されているものに下線を付している。これらのことから、近い将来、分類Iにカテゴライズされるセキュリティデバイス(SIMカードやハードウェアトークンなど)のコピー品が市場に流通する可能性が考えられる。本論文では、表2に記載されている製品のうち、世界中で広く利用されている有価カード(クレジットカード、キャッシュカード)にフォーカスを当て、当該製品へのアプローチを提案したあと、その適用可能性を検証する。

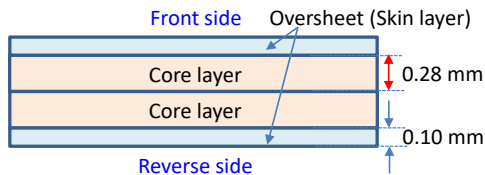


図 2 有価カードの断面

2.3 指標

本節では、有価カードにマルチモーダル人工物メトリクスを適用するための具体的な方法（アプローチ）が満たすべき4つの指標を示す。

指標 1：有価カードの印字面に特徴情報を形成できる。

上記のアプローチは、情報が印字される面に特徴情報を形成できることが望ましい（これにより、カード情報の印字と特徴情報の形成が同じ面で実施できるため、上記2つの情報を同時に読み取ることが可能となるというメリットが生まれる）。有価カードは図2に示すように4つの樹脂層（2つのコア層と2つのスキン層）によって形成されており[9,10]、スキン層によってコア層の表面に印刷された文字や画像が保護される。

指標 2：形成された特徴情報は、温度の影響を受けにくい。

有価カードは幅広い温度環境下で使用されることから、コア層の表面に対して形成される特徴情報は温度の影響を受けにくいことが望ましい。

指標 3：特徴情報は、耐タンパーを持つ。

形成された特徴情報のコピーを作りやすくするために、スキン層が剥がされると特徴情報が容易に破損する「耐タンパー機能」を備えることが望ましい。

指標 4：特徴情報を形成する材料は、安全である。

有価カードを形成する材料（合成樹脂、塗料など）は人間の皮膚に影響を与えるリスクが低いことから、コア層の表面に対して特徴情報を形成するための材料も、同じ特徴をもつことが求められる。

2.4 前提条件

本論文では、議論の対象を明確にするために以下に示す前提条件を設ける。

条件 1：本論文では、有価カードにマルチモーダル人工物メトリクスを適用するための具体的な方法（アプローチ）の有効性を検証することを目標とする。具体的には、コア層に見立てた樹脂板の表面に物理的特性の異なる特徴情報を2つ形成したサンプルを作製すること、サンプルから2つの特徴情報を抽出すること、および抽出された特徴情報がサンプルごとに異なることを確認することである。

条件 2：本論文では、アプローチの実装（人工物メトリック・システムの構築と評価）は議論の対象外である。

3. アプローチ

本章では、著者らのアプローチについて述べる。

3.1 特徴情報の形成

2.3節で述べた4つの指標を満たすために、著者らは「導電性ポリマー塗料」と少量の「赤外線アップコンバージョン蛍光体粉末（以下、IR 蛍光体粉末）」の混合物を使用して、コア層の表面に薄膜を形成するアプローチを試みる。導電性ポリマー塗料（図3参照）は電気抵抗が低い合成樹脂であり、透明電極の材料として使用されている。導電性が温度に依存しにくく[11][a]、人間の皮膚に影響を与えるリスクが低く、同じ透明電極の材料であるITO（酸化インジウムスズ）よりも柔軟で透明度が高いという特徴をもつ。当該ポリマーによって形成された透明電極は屈曲させても破損せず電気抵抗（シート抵抗）は変化しないが、擦るなどの物理的な力を加えると容易に破損する。これは、逆に言えば耐タンパー機能の実現につながる。たとえば図4に示すように、コア層とスキン層の両面に配置した接着剤（高い粘着度をもつもの）を用いて薄膜を接着させることで耐タンパー性を実現できる[b]。

IR 蛍光体粉末（図3参照、粒子径：2~3 μm ）は不導体であり、蛍光特性が温度に依存しにくく、可視光を発光する他の蛍光体（半導体量子ドット蛍光体）と比べて毒性が低い。光励起によって可視光を発光し、波長Aをピークとする赤外線を受光すると波長Bをピークとする可視光を蛍



図 3 導電性ポリマー塗料（左）と IR 蛍光体粉末（右）

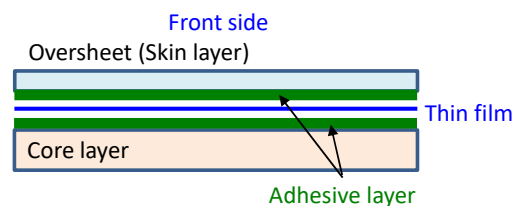


図 4 薄膜と接着剤層

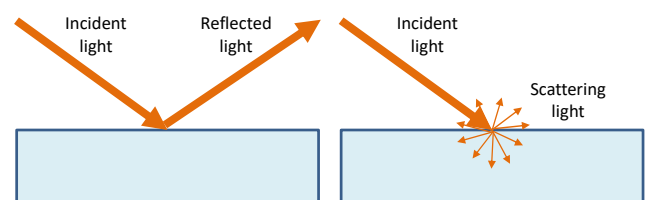


図 5 反射と散乱

a 幅広い温度状況において安定した等価直列抵抗（ESR）とインピーダンスを得るために、導電性ポリマー塗料は電解コンデンサの材料としても使用されている。

b スキン層を剥がしているときに、薄膜に対して2つの方向から引力が加わるため、薄膜は容易に破損する。

光する(これらの波長は IR 蛍光体の組成を調整することで変更できる). 取り扱いが容易なことから, バイオイメージングや商品のトラッキング, 人工物の簡易的な真正性判定の材料として使用されている.

3.2 薄膜を選択した理由

本節では, 特徴情報を形成する場所としてコア層ではなく薄膜を選択した理由を述べる. 有価カードのコア層は PVC (ポリ塩化ビニル) によって形成される. PVC は不導体であり IR 蛍光体粉末のような際立った光学的特性をもたないため, PVC に 2 つの物理的的特性を持ったフィラーを添加する必要がある. ところで, 著者らが行った予備実験では, 不導体である合成樹脂 (エポキシ樹脂) に電気特性を持たせることは可能である. しかし, 観測される抵抗値は高く, $4.0 \sim 6.0 \times 10^{12} \Omega$ の間で安定しないため特徴情報になり得なかった[12]. このことは, PVC についても同じことが起こると考えられる.

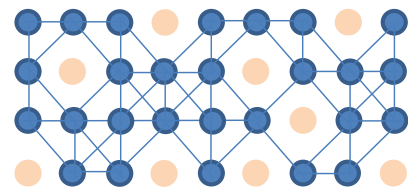
次に, 光学特性について考察する. PVC は光沢度が高いため, コア層に対して照射された光の大部分は当該層の表面で反射し散乱しにくい (図 5 参照). つまり, IR 蛍光体粉末を PVC に添加しても発光は 2 次元平面上であり 3 次元的に観測されないため, 光学的な特徴情報の量は少ない.

一方, 著者らのアプローチを考察する. 形成される薄膜の大部分は導電性ポリマー塗料に含まれる導電性物質が占めるため, 観測される抵抗値は低くなり安定する. 抵抗値が安定すると, 再現性 (同じ観測点では, 常に同じ抵抗値を示すこと) が見られるようになる. このため, 薄膜から抽出される抵抗値は電気的な特徴情報になる可能性がある.

次に, 光学特性について考察する. 導電性ポリマー塗料によって形成された薄膜の光沢度は PVC よりも低いため, 薄膜に対して照射された光は薄膜の表面で散乱する (図 5 参照). これにより, 薄膜表面だけでなく薄膜内部に含まれる IR 蛍光体が励起されるため, 蛍光体の発光を 3 次元的に捉えることができる (つまり, 光学的な特徴情報の量が増す). 以上の理由により, 著者らは特徴情報を形成する場所として薄膜を選択する.

3.3 特徴情報が形成される理由

本節では, 3.1 節で述べた混合物によって特徴情報が 2 つ形成できることを述べる[c]. コア層の表面に混合物を塗布すると水分が蒸発して薄膜が形成される. IR 蛍光体の粒子は薄膜中で自然偶発的に分散するため, 導電性ポリマー塗料の粒子の結合が疎な部分と密な部分が生じる (図 6 参照). これは, 電気的な特徴として特徴情報に反映されるため, 計測される電気抵抗が 1 つ目の特徴情報になる. つぎに, 個々の IR 蛍光体の粒子の大きさ (= 蛍光の強弱), 光



● Conductive polymer particle
● IR phosphor particle

図 6 粒子結合の粗密度イメージ

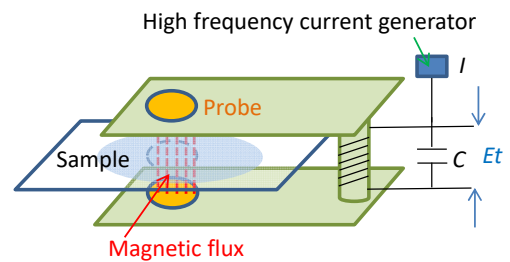


図 7 渦電流測定法と電気回路 (概要)

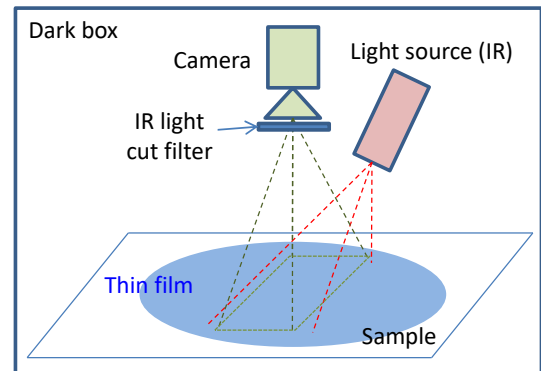


図 8 画像の撮影方法

の反射・透過・屈折の度合い, および薄膜中における上記粒子の分散度合いもまた, 自然偶発的に決定される. これは, 光学的な特徴として特徴情報に反映されるため, 光励起による IR 蛍光体の蛍光をカメラで撮影した画像が 2 つ目の特徴情報となる. 著者らは, 上記 2 つの特徴情報を非接触で抽出するアプローチを試みる. これにより, 特徴情報の抽出時に有価カードの表面を傷つけるというリスクを回避できるというメリットが生まれる.

3.4 特徴情報の抽出

はじめに, 電気抵抗 (シート抵抗) の抽出方法を説明する. 一般的に, 電気抵抗の測定はプローブをサンプルに接触させる方法 (2 端子測定法, 4 端子測定法) が用いられるが, 一様な厚さをもつ薄膜の電気抵抗 (シート抵抗) を計測する方法として, プローブをサンプルに接触させない方法 (渦電流測定法) が使用される. この方法では, 図 7 に示すようにサンプルをプローブの間にセットし, 以下の要領でシート抵抗を測定する.

c この方法は, 導電性ポリマー塗料によって形成される薄膜の厚み (可視光透過率の高低) を変えることで, 電気抵抗 (シート抵抗) の範囲を調整できるという特徴からヒントを得た. つまり, IR 蛍光体粉末の分散の濃淡がシート抵抗に反映されると考えたからである.

- (1) プローブ間に高周波を加えて磁束を発生させる。
- (2) プローブ間にサンプルを挿入すると、サンプルに渦電流が発生する。このとき、サンプルのなかで電流が消費されるため電力損失が発生し、これに比例して電気回路内の電流が減少する。
- (3) 減少した電流値とサンプルの抵抗は反比例するため、これらの値とサンプルの厚さを用いてシート抵抗を計算する。

導電性ポリマー塗料で形成された薄膜は破れやすいため、上記の測定方法は適切である。なお、4章で述べる実験では、サンプルごとに異なるシート抵抗が観測されることを確認する。

つぎに、光励起による IR 蛍光体の蛍光をカメラで撮影する方法を説明する。図 8 に示すように、暗箱の中に撮影機器とサンプルをセットする。これは、蛍光による可視光成分のみがカメラのイメージセンサに入るようにするためである。サンプルとカメラを正対させ、サンプルに対して赤外線を照射する。光励起によって IR 蛍光体の粒子は特定のピーク波長をもつ可視光を発光するため、その様子をカメラで撮影する。なお、4章で述べる実験では、サンプルごとに異なる画像が観測されることを確認する。

3.5 真正性の検証

真正性の検証は、これまでに提案されている人工物メトリクスと同様に、事前にセキュアなデータベースに登録されている特徴情報と、検証時に抽出した特徴情報との類似度を算出し、その値が閾値以上であれば真正品であると判断する。本論文は、コア層に見立てた樹脂板の表面に物理的特性の異なる特徴情報を 2 つ形成したサンプルを作製すること、サンプルから 2 つの特徴情報を抽出すること、および抽出された特徴情報がサンプルごとに異なることを確認することを目標としているため、アプローチの実装は本論文のスコープから外れる。このため、本論文では類似度を算出するための閾値の設定方法は述べないが、実装の際には真正品をコピー品と判断したり、コピー品を真正品と判断したりすることがないように類似度を算出しなければならない[3]。

4. 実験

4.1 IR 蛍光体粉末の量の探索

一般的に、合成樹脂に対するフィラーの量が増えるとき「成形性（人工物を狙い通りの形にすること）」と「強度」が低下する[13,14]。一方、フィラーの量が少ないと特徴情報が十分に抽出できない。このため、導電性ポリマー塗料に対する IR 蛍光体粉末の適切な量を探索するために、当該粉末の重量比が異なる 4 種類の混合液（5%、10%、20%、40%）を作製し、これを使ってコア層に見立てた樹脂板の表面に薄膜が形成されるか否かを確認した。樹脂板には、入手が容易であり親水性があるポリプロピレンを使用した。シリ

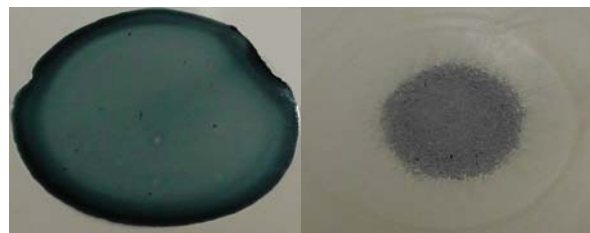


図 9 形成された薄膜（左:5%, 右:20%）

ンジを用いて 5ml の混合液を樹脂板上に滴下すると、親水性と重力によって混合液が円形に広がり薄膜状になる。これを 60 分放置して混合液から水分を蒸発させたところ、5%と 10%の混合液では透明な青色の薄膜が形成されたが、20%と 40%の混合液では薄膜は形成されず、IR 蛍光体粉末の存在が顕著に表れた(図 9 参照)。この現象は、文献[13,14]と一致する。

合成樹脂に対するフィラーの添加量は少量であることが望ましい。このため、本節以降の実験では、導電性ポリマー塗料に対する IR 蛍光体の重量比を 5%に設定する。なお、より薄い薄膜を形成する方法として Spin-coating 法[d]や Dip-coating 法[e]があるが、本論文ではアプローチの有効性を検証することが目的であるため、今回は使用しない。

4.2 サンプルの作製

薄膜のシート抵抗を計測する場合、基板を含めたサンプルの厚さは 0.5~1.5mm であり、薄膜の直径はプローブの直径よりも大きくなければならない。今回著者らが使用するシート抵抗計のプローブは直径が 14mm であるため、実験では、コア層とスキン層に見立てた透明なポリプロピレン板（0.5mm）を使用し、コア層の表面に、前節で述べた方法により直径 14mm 以上の薄膜を形成した。その後、当該薄膜をコア層とスキン層で挟んだサンプルを 20 枚作製した。

4.3 特徴情報の抽出（シート抵抗）

はじめに著者らは、サンプルごとにシート抵抗が異なることを確認するために、図 7 で示した実験を行った。はじめに、サンプルの中心部分のシート抵抗を計測した結果を図 10 に示す。縦軸はシート抵抗 (Ω/square) を、横軸はサンプル番号を示す。サンプルごとに異なるシート抵抗が観測されること、およびシート抵抗の測定値には再現性がある（つまり、サンプルの挿入角度が異なっても同じ測定値が得られる）ことが分かった。参考までに、IR 蛍光体粉末を含まないサンプルの中心部分のシート抵抗を計測した結果を図 11 に示す。サンプルごとのばらつきが図 10 に比べて小さいことがわかる（サンプル番号 1 が高いシート抵抗を示しているが、これは導電性ポリマー塗料に含まれていた固形の塗料小片が抵抗となり、渦電流に影響を与えたものと考えられる）。

d 基板上に溶液を滴下したあと基板を高速で回転させる方法。

e 基板を溶液に浸したあと引き揚げる方法。

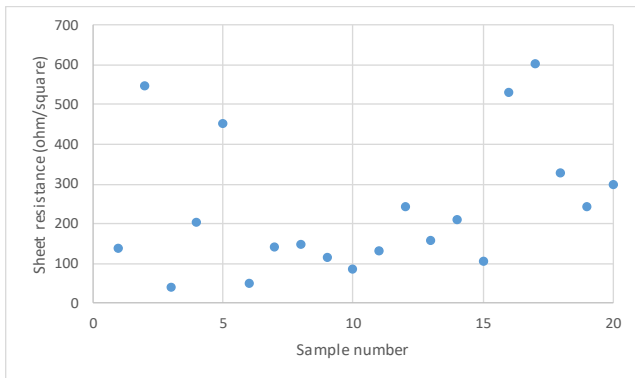


図 10 サンプルのシート抵抗 (重量比 5%)

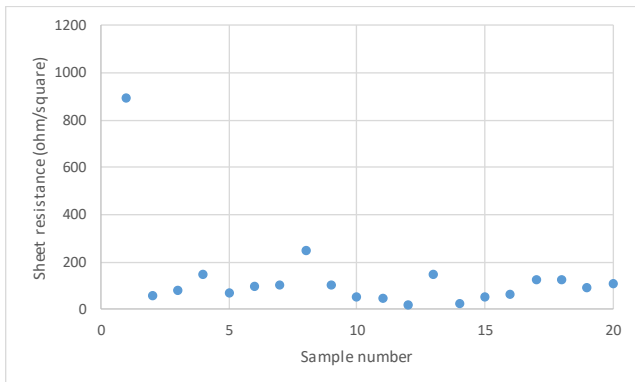


図 11 サンプルのシート抵抗 (IR 蛍光体粉末なし)

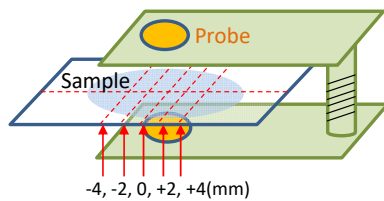


図 12 シート抵抗の計測

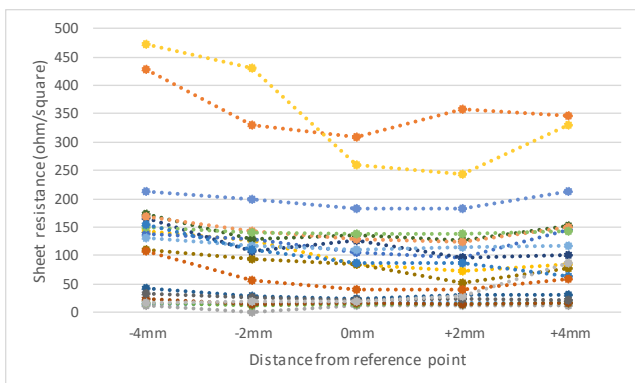


図 13 サンプルのシート抵抗 (重量比 5%)

つぎに、図 12 に示すようにサンプルを基準点から 2mm ずつ平行移動させた部分についてシート抵抗を測定した。図 13 にグラフを示す。縦軸はシート抵抗 (Ω/square) を、横軸は平行移動させた距離を、それぞれの折れ線はサンプルを示す。サンプルごとに異なるシート抵抗が観測されること、およびシート抵抗の測定値には再現性がある (サンプルの挿入角度が異なっても同じ測定値が得られる) こと

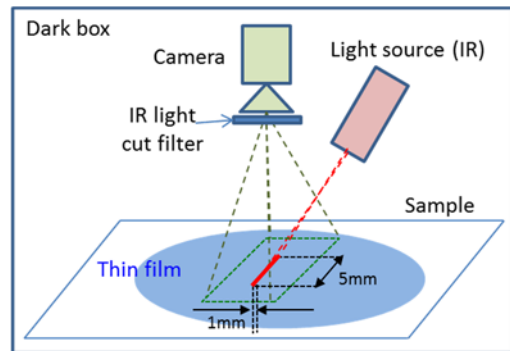


図 14 実験装置

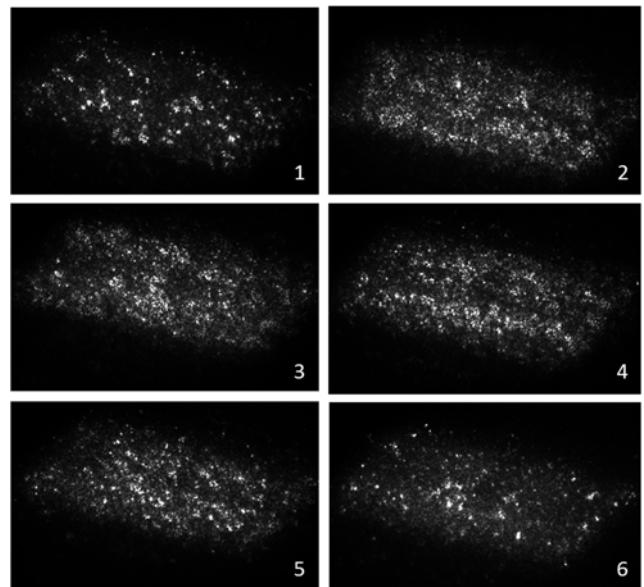


図 15 サンプルの画像 (重量比 5%)

が分かった。また、同じサンプルでも、観測位置によってシート抵抗が異なることが分かった。これらのことから、シート抵抗は特徴情報になる可能性があるといえる。

4.4 特徴情報の抽出 (可視光画像)

つぎに著者らは、サンプルに含まれる IR 蛍光体が赤外線励起 (ピーク波長 980nm) によって発光 (ピーク波長 548nm, 554nm) すること、およびサンプルごとに発光の様子が異なることを確認するために、図 14 に示す実験装置を用いて実験を行った。幅約 1mm、長さ約 5mm の励起光をサンプルの中央付近に照射した。図 15 に、サンプル 20 枚のうちの 6 枚の画像を示す (画像の右下にサンプル番号を示す)。IR 蛍光体粒子の発光が白色の点として表現されており、蛍光体粒子の発光強度と分散度合いに違いがあることがわかる。このことから、撮影された画像は特徴情報になる可能性があるといえる。

5. 考察

本章では、著者らのアプローチが指標を充足していること、および 2 つの特徴情報が偽造困難であることを述べる。その後、実用化に向けた考察を述べる。

5.1 指標の充足

本節では、著者らのアプローチが 2.3 節で述べた指標を

充足していることを述べる。はじめに、指標 1 について考察する。著者らのアプローチは、コア層の表面に薄膜を形成し、これに 2 つの特徴情報を持たせるというものである。今回の実験では、ポリプロピレン板をコア層に見立てて当該層の表面に薄膜を形成し、そこから 2 つの特徴情報を抽出した。ポリプロピレンへの印字は他の合成樹脂（ポリエチレン、ポリ塩化ビニル、ポリスチレン）と同様に可能であることから、指標 1（有価カードの印字面に特徴情報を形成できる）を充足しているといえる。

つぎに、指標 2 について考察する。著者らのアプローチで使用した導電性ポリマー塗料と IR 蛍光体粉末はいずれも温度の影響を受けにくいいため、両者ともに幅広い温度環境下で使用される。また、上記材料の混合によって温度の影響を受けやすくなる物質が生み出されることはない^[f]ことから、著者らのアプローチは指標 2（形成された特徴情報は、温度の影響を受けにくい）を充足している。

つぎに、指標 3 について考察する。導電性ポリマー塗料を使って作製した薄膜は柔軟だが、薄膜の表面を指で擦る程度の物理的な力を加えると破損する。このため図 4 で示したように、コア層とスキン層の両面に配置した接着剤（高い粘着度をもつもの）を用いて薄膜を接着させることで耐タンパー性を実現できると考えられる。以上のことから、指標 3（特徴情報は、耐タンパーを持つ）を充足しているといえる。

最後に、指標 4 について考察する。導電性ポリマー塗料は毒性元素を含まず、安全な溶媒である水とエタノールを使用している。一方、IR 蛍光体粉末は安定した酸化物であるため、毒性が極めて低い（安定した酸化物の例として鉛ガラスがある。鉛には毒性があるが、鉛ガラスには毒性はなく、高級ガラス食器の材料として使用されている）。以上のことから、著者らのアプローチで使用した材料は人間の皮膚に影響を与えるリスクが低く、指標 4（特徴情報を形成する材料は、安全である）を充足している。

5.2 特徴情報の偽造困難性

本節では、2 つの特徴情報の偽造困難性を述べる。はじめに、シート抵抗について考察する。図 10 と図 13 で示したように、各サンプルから抽出されたシート抵抗はそれぞれ異なり、同じサンプルでも観測点によって異なる。この違いが生じた理由は、不導体である IR 蛍光体の粒子が導電性ポリマー塗料中に自然偶発的かつランダムに分散したことによるものであり、粒子の粗密度が一樣にならないことを意味している。

特定のサンプル A と全く同じシート抵抗をもつサンプル B を作製するためには、偽造者は以下のことを行う必要がある。

(1) サンプル A の作製に使用されているポリプロピレン板、

^f IR 蛍光体粉末は安定した酸化物であるため、導電性ポリマー塗料の影響を受けて化学反応を起こすことはない。

IR 蛍光体粉末、導電性ポリマー塗料を入手する。

(2) サンプル A と同じ面積、厚み、濃度をもつ薄膜を作製するために、導電性ポリマー塗料と IR 蛍光体粉末の混合液を作り、ポリプロピレン板上に滴下する。つぎに、混合液が乾燥して薄膜になる前に、サンプル A の薄膜に含まれる粒子と全く同じ 3 次元位置に IR 蛍光体粒子（粒径数 μm ）を動かして固定する。

(1) は、真正品の製造者であれば容易である。しかし、(2) を成功させるためには、限られた時間のなかで「高解像度の顕微鏡」と「少しずつ硬化していく流体中に存在する粒子を、定められた 3 次元位置に動かして固定する技術」を用いる必要がある。このため、偽造の難易度は高いといえる。さらに、個々の粒子の大きさや形状は自然偶発的かつランダムに決定されるため、サンプル A の薄膜に含まれる粒子と全く同じ粒子をもつサンプル B の作製は非常に困難である。

つぎに、可視光画像について考察する。サンプルとカメラは正対しており、サンプルは光学定盤上にセットするため、画像は Z 軸方向から撮影される。IR 蛍光体の発光強度は粒子の分散度合いに関係があり、密度が高いほど強く発光する。また、光励起によって IR 蛍光体の粒子から可視光が出るパスは、図 16（左）に示すように 3 つに大別される（粒子の中央からダイレクトに出るパス、粒子の境界で屈折してから出るパス、粒子の境界で反射を繰り返して可視光が出ないパスである）。たとえば、図 16（左）の(1)に示すパスをもつ粒子のみを集め、図 16（右）に示すように Z 軸方向に粒子を積むことで、特定のサンプルを偽造できるように思われる。しかし、図 17 に示すように、IR 蛍光体の粒子 A から出た可視光は、直上に存在する粒子 B の境界で屈折、透過、反射するため、偽造者の意図通りに Z 軸方向にのみ可視光を発光させることはできない。実際には、粒子の形状は球ではないため、偽造は困難であるといえる。特定のサンプルと同じ可視光画像をもつ偽造品を作製する

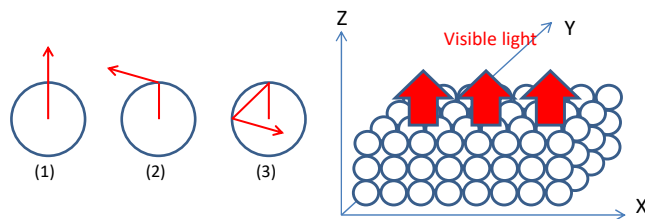


図 16 可視光のパス（左）と偽造方法（右）

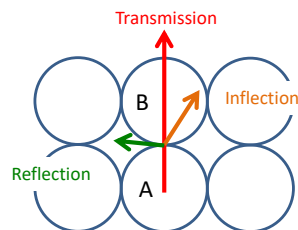


図 17 粒子境界での屈折、透過、反射

ことは、同じシート抵抗をもつ偽造品を作製することと同様に非常に困難であるといえる。以上より、著者らのアプローチは、偽造の困難性を高めることに貢献している。

5.3 実用化に向けた考察 (コア層表面への薄膜の形成)

実験では、シリンジを用いて導電性ポリマー塗料と IR 蛍光体粉末の混合液を樹脂板上に滴下し、重力と樹脂板がもつ親水性を利用して薄膜を作製した。当該薄膜は薄いが導電性ポリマー塗料を用いて作製される透明電極 (100nm 以下) よりも厚みがあるため、図 9 (左) に示すような不透明さがある。

コア層に印刷される文字や絵の視認性に影響を与えないようにするためには、透明電極程度の薄膜をコア層全体に形成することが望ましい。これは、薄膜をコア層の一部に形成した場合、薄膜とコア層の境目に凹凸が生じるため、印刷された文字や絵の視認性に影響を与える可能性があるからである。

4.1 節で述べた Spin-coating 法は、Dip-coating 法とは異なり少量のコーティング液で薄膜を形成することができるというメリットがある[15]。また、コーティング液として導電性ポリマー塗料を使った Spin-coating 法[16]や合成樹脂基板表面への Spin-coating 法[17]が提案されていることから、著者らのアプローチ (コア層表面への薄膜の形成) の実現可能性は高いと考えられる。今後著者らは、今回使用した混合液と Spin-coating 法を使ってコア層表面に薄膜が形成できること、および当該薄膜から非接触で 2 つの特徴情報が抽出できることを確認する予定である。

6. おわりに

本論文では、人工物の真正性を高い精度で判定するとともに、偽造の困難性をさらに高めるためにマルチモーダル人工物メトリクスを提案した。この技術はバイオメトリクスにおけるマルチモーダル認証にヒントを得たものであり、物理的特性が異なる特徴情報を複数人工物に持たせるとともに、当該情報を用いて個々の人工物の真正性を検証する技術である。

著者らは、マルチモーダル人工物メトリクスを適用する人工物として、偽造品の存在が報告されている合成樹脂製の有価カードに着目した。そして、著者らのアプローチ (コア層の表面に特徴情報を形成すること) の有効性を検証するための実験を行った。実験では、はじめに導電性ポリマー塗料と IR 蛍光体粉末を用いてポリプロピレン板上に薄膜を作製した。つぎに、薄膜を別のポリプロピレン板で覆ったサンプルを作製し、非接触で 2 つの特徴情報 (シート抵抗と可視光画像) を抽出した。これらの特徴情報はサンプルおよび観測点ごとにすべて異なり、特徴情報として利用できる可能性が高いことが証明された。また、著者らのアプローチは 4 つの指標を充足し、偽造困難性が高いことを証明した。

今後は、著者らのアプローチを実装するために、位相空間限定法[18]を用いた可視光画像マッチングアルゴリズムを開発するとともに、コア層表面への薄膜の形成の実現可能性を検証する。これにより、マルチモーダル人工物メトリクスをさらに発展させていく予定である。

謝辞 本研究は、日本学術振興会・研究活動スタート支援 (16H07178) の助成を受けた。

参考文献

- [1] 日本自動認識システム協会, 株式会社日立製作所: 平成 25 年度政府戦略分野に係る国際標準化活動 平成 25 年度マルチモーダル生体認証における認証性能評価基準に関する標準化 (フォローアップ) 成果報告書, 平成 26 年 2 月
- [2] 山田茂史, 遠藤利生, 新崎卓: マルチモーダル生体認証に向けた手のひら静脈認証と指紋認証の独立性評価, 電子情報通信学会バイオメトリクス研究会資料, pp. 59/64
- [3] 藤川真樹, 小田史彦, 森安研吾, 瀧真悟, 竹田美和: 有価陶磁器製品に対する人工物メトリクス適用のための研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 9, pp. 1992/2007
- [4] Newsweek 日本版, コンビニ ATM14 億円不正引き出し, 管理甘い日本が狙われる, <http://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2016/05/atm14.php> (2016 年 5 月アクセス)
- [5] 一般社団法人全国銀行協会, 「偽造キャッシュカードによる預金等の不正払戻し」等に関するアンケート結果 (平成 18~25 年度), http://www.zenginkyo.or.jp/fileadmin/res/hanzai/statistics/news280226_4.pdf (2016 年 5 月アクセス)
- [6] 偽造通貨対策研究所, 偽造チケット鑑定マニュアル NET バージョン 第 5 編 交通チケット編, <http://www.cdrjapan.co.jp/gtk2/ticketmanual1/koutu%20tetudou/haika%20syurijou%20omote.htm> (2016 年 5 月アクセス)
- [7] 小山雅夫, 「G-SHOCK」模倣品対策への取組み, 特技懇 2005 年 1 月 28 日号, No. 236, pp. 50/55
- [8] 株式会社ウエッズ, “ニセモノ” ホイールにご注意!!, <http://www.weds.co.jp/nisemono/> (2016 年 5 月アクセス)
- [9] 株式会社富士通キメラ総研: カード市場マーケティング要覧 2008 年版
- [10] ISO: ISO/IEC 7810:2003, Identification cards -- Physical characteristics
- [11] 谷口彬雄: 有機半導体の展開, CMC テクニカルライブラリー No. 297, pp. 100/101, シーエムシー出版
- [12] 藤川真樹, 實川康輝, 瀧真悟: マルチモーダル人工物メトリクスの提案と合成樹脂製品への適用に関する研究, コンピュータセキュリティシンポジウム 2016, pp. 343/348
- [13] 篠原久典: ナノカーボンの材料開発と応用, 株式会社シーエムシー出版, pp. 294/295 (2008)
- [14] 石川浩, 富岡芳弘: 腐食と劣化(4): 合成樹脂材料の劣化, 空気調和・衛生工学, 第 79 巻, 第 10 号, pp.961/968 (2005 年)
- [15] 幸塚広光: 「ゾルーゲルコーティング技術の基礎」, New Glass, Vol. 25, No. 3, pp. 40-45 (2010)
- [16] 白川英樹, 廣木一亮: 導電性高分子の基礎, シグマアルドリッチジャパン
- [17] 清水能夫: 合成樹脂基材表面へのスピンコーティング方法, 特許公開番号 H07-213989
- [18] 伊藤康一, 青木孝文, 中島寛, 小林孝次, 樋口龍雄: 位相空間限定相関法を用いた掌紋認証アルゴリズム, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp. 370-375 (2006).