

金属箔人工物メトリクス:レーザー顕微鏡を用いたアプローチ

吉田 直樹†

松本 勉‡

横浜国立大学

†環境情報学府 ‡大学院環境情報研究院/先端科学高等研究院

240-8591 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

yoshida-naoki-dk@ynu.jp, tsutomu@ynu.ac.jp

あらまし アルミ箔などの金属箔が情報機器等のセキュリティ強化に応用できる可能性を求めて、金属箔を個体認証の観点から研究している。アルミ箔断片の表面には、微小な凹凸が存在し、この特徴を利用して、個体識別が可能である。微小な凹凸を測定するセンサの1つとして、高さ情報を得られるレーザー顕微鏡の利用が考えられる。クローンを作製し高さ情報を模擬するためには、微小な3次元の造形が求められるので、クローンの製造は困難であると期待できる。本稿ではレーザー顕微鏡を用いたアルミ箔断片を測定する人工物メトリック認証システムを提案し、その一例を実装し評価する。

An Approach to Metallic-Foil Artifact-Metrics Using Laser Scanning Microscope

Naoki Yoshida†

Tsutomu Matsumoto‡

Yokohama National University

† Graduate School of Environment and Information Sciences

‡ Institute of Advanced Sciences and Faculty of Environment and Information Sciences

79-7 Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama, Kanagawa 240-8591, JAPAN

yoshida-naoki-dk@ynu.jp, tsutomu@ynu.ac.jp

Abstract There is a possibility that metal foils can be applied to enhance security for IT devices. Microscopic irregularities are observed on the surface of fragments of an aluminum foil. This feature implies the possibility of constructing individual authentication/identification systems. We use the laser scanning microscope to obtain height information on the surface of aluminums. The difficulty of reproducing precise height information is the basis of the clone-resistance. This paper proposes and implements an example artifact metric authentication system and evaluates its authentication accuracies.

1 はじめに

人工物メトリクスは、人工物を製造する際に偶然に生成されるランダムな特徴を利用して当該人工物の認証を行う。肉眼による観察ではこのようにランダムな特徴がないように見える人工物であっても、SEM（走査型電子顕微鏡）やレーザー顕

微鏡といったセンサで測定すれば、差異が分かる可能性がある。

金属箔は製造過程で表面に微小な凹凸が生じるので、この特徴を利用して金属箔人工物メトリクスが構成できる可能性がある。金属箔は薄く破れやすいので、情報機器などの物体に貼り付けるなどして一体化させると、安易に貼り換えができず、

すり替えが困難である。その金属箔を認証できれば、物体そのものの認証に応用でき、セキュリティ強化に役立つ。

文献[1]にて、金属箔の1種であるアルミニウム箔（以下、アルミ箔と省略する）の表面を、SEMを利用して撮像し、照合を行った。その結果、高い照合精度が得られ、アルミ箔の人工物メトリクスが構成可能であることを示した。しかし、センサとして利用したSEMは、試料を真空にする必要があり、またそのために撮影に時間がかかること、さらにSEM自体が高価格であることなど、実用性に向けては解決すべき課題がある。

そこで本研究では、実用化に向けてSEMよりも撮影コストが低いレーザー顕微鏡をセンサとするアルミ箔の人工物メトリクスを提案・実装し、実用性のある金属箔人工物メトリクスの構成可能性を高める。

2 人工物メトリクス

2.1 人工物メトリクス

人工物メトリクスとは、人工物がもつ固有な特徴を利用して、当該人工物の判別を行い、認証する技術を指す。人工物メトリクスでは製造者ですら再現が困難である人工物の固有な特徴を利用する。製造者ですら偽造品を作ることが困難になるので、認証システムのセキュリティを高く保つことができる。文献[6]では、ICカードに人工物メトリクスを取り入れることで、既存のICカードシステムにおける対応では保護しきれない攻撃への対応が可能になり、セキュリティ上有効であることが示されている。

これら人工物メトリクスに利用される固有な特徴として、光学特性や磁気特性、電気特性など様々な特性が利用できるとされている。たとえば、文献[2]においては、紙の繊維の絡み具合を利用した紙の人工物メトリクスを提案している。また、文献[3]においてはレジスト倒壊パターンを利用した人工物メトリクスも提案されている。

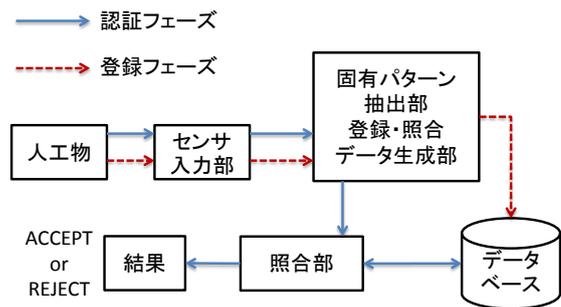


図1 人工物メトリクス方式の流れ

人工物メトリクスに用いられる人工物の特徴を「人工物メトリクス要素」、人工物メトリクス要素の読取りおよび照合を行う機構を「人工物メトリクス方式」と呼び、人工物メトリクス方式が図1のように実装されたシステムを「人工物メトリック・システム」と呼ぶ。

2.2 人工物メトリクスの要件

ある人工物メトリクス要素を利用した人工物メトリック・システムを考える。この人工物メトリック・システムが正しく機能するための要件として4つの性質が挙げられる[1]。

(1) 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性質。

(2) 読取安定性 (Stability)

人工物メトリクス要素の登録後、再度人工物メトリクス要素を読み取ったときに、安定して登録時と同等の情報が読み取れる性質。

(3) 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が読み取れる性質。

(4) 耐クローン性 (Clone Resistance)

読取り装置を欺く偽物を作ることが極めて困難である性質。

2.3 人工物メトリクスの評価

人工物メトリック・システムの評価は、2.2節で示した4要件が満たされているかどうかで行われる。バイオメトリクスや人工物メトリクスなど

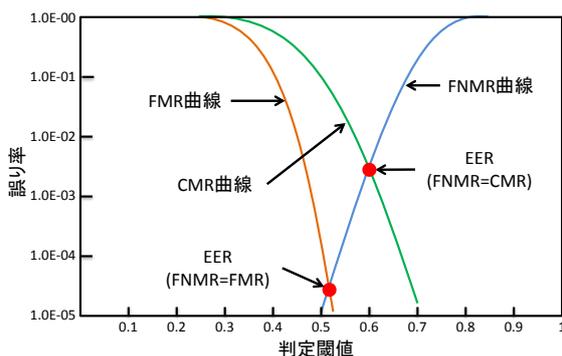


図 2 FNMR/FMR/CMR 曲線

のパターン照合装置の性能評価では、以下の指標が用いられており、これらを用いて上記 4 要件に関する評価が可能である。

(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定する確率。読取安定性の指標である。耐久性の指標としても応用できる。

(2) 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定する確率。個別性の指標である。

(3) 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定する確率。耐クローン性の指標である。

(4) EER (Equal Error Rate: 等誤り率)

FMR (または CMR) と FNMR が等しくなる誤り率。

上記指標は、図 2 のように縦軸を誤り率、横軸を類似度の閾値とした累積分布関数で表すことができる。FNMR と FMR が一致して EER となる点に対応する類似度の閾値を選択すれば、FNMR と FMR を両立することとなるため、人工物メトリック・システム個別性と読取安定性に関する評価は EER の値の低さにより代表される。

3 金属箔人工物メトリクス

3.1 金属箔人工物メトリクスとは

金属箔とは、金属の展性を利用して金属を薄く展ばしたものである。よく用いられる金属には、アルミニウム、金、銀、銅、プラチナ、錫、真鍮

などがある。

金属箔は、金属を薄く展ばすという工程において、その表面形状に個別性が生じるものと考えられる。どの金属箔においても異なる領域で別個の固体と捉えられる個別性が表れている。しかし、一般に肉眼ではその個別性までは識別できない。そのため、高い倍率で測定することが可能なセンサを用いれば、これらの個別性を読み取り、認証への利用が期待できる。

文献[1]において、センサとして SEM を用いて、アルミ箔の表面形状を読み取り、20 μm 角の領域で、高い照合精度が得られることを示した。よって、金属箔の表面形状は個別性を有しているといえる。

金属箔を対象とした人工物メトリクスは、次の物体（情報機器など）のセキュリティ強化への応用が考えられる。すなわち、金属箔を保護対象の物体に貼り付けるなど一体化しておき、金属箔を認証することにより物体の認証を行うといった方法である。金属箔はとても薄く、攻撃者が物体に貼り付いている金属箔を剥がそうとしても破れやすく、張り替えが困難であるという特徴がある。このように金属箔は、金属箔そのものの認証だけでなくそれと一体化した情報機器等のセキュリティ強化に役立てられる可能性を持っている。

3.2 金属箔人工物メトリクスの課題

文献[1]では、SEM で個別性を読み取っていたが、SEM は試料を真空中に置かねばならず、情報機器などに一体化した場合、それが壊れる可能性があるため、保護対象の物体に限られる。また、1 回の撮影で 5 分程度かかり、多くの対象物を測定することが難しい。

そこで本稿では、これらの課題を克服するセンサとして、レーザー顕微鏡の利用を考える。

4 レーザー顕微鏡

4.1 レーザー顕微鏡の構造

レーザー顕微鏡は共焦点レーザー顕微鏡とも呼ばれ、共焦点系を利用して像を得るものである。

共焦点系とは測定面が焦点距離と合致したときに、受光素子の位置が焦点となる構造である。

図3にレーザー顕微鏡の構造を示す。レーザー装置から出たレーザーは、ハーフミラーを通過して対物レンズによって絞られ、ステージ上に置かれた試料に当たり、その反射光はハーフミラーで反射され、ピンホールを通過して受光素子に当たる。試料との距離が焦点距離であれば、反射光すべてがピンホールを通過し、受光素子は最大の光量を得ることになる。試料との距離が焦点距離と異なる場合は、ピンホールによって一部の反射光が遮られ、受光素子の光量は少なくなる。これらから、試料の高さを変えながら何層も断面画像を取得し、その受光素子の光量が最大となったときの高さが、試料の高さと言える。レーザー顕微鏡ではこのように得た各位置の高さ情報をつなぎ合わせることで、三次元の表面形状を構成することが可能である。

SEMとは異なり、レーザー顕微鏡に用いる試料は真空にする必要がなく、また試料表面に膜があった場合でもレーザー光を通すのならば、その原理から測定が可能であり、耐久性のために保護膜を付与するといったことも可能である。また、測定時間も比較的短く、SEMよりも利便性の高い測定装置といえる。ただし、最高倍率は150倍程度であり、細かい特徴までは読み取ることができない。

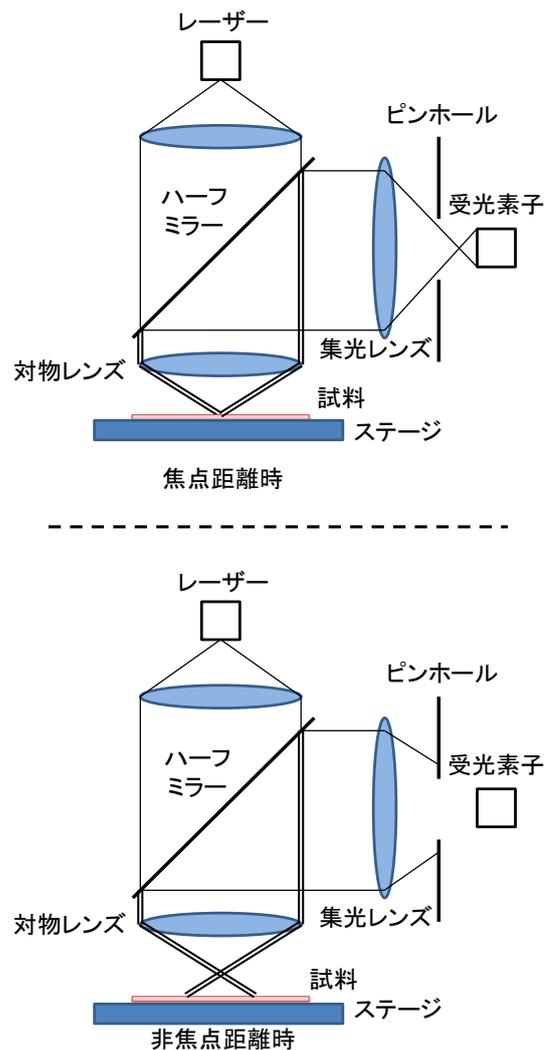


図3 レーザー顕微鏡の構造

4.2 レーザー顕微鏡の読取安定性

取得データは用いるレーザー顕微鏡にもよるが、高さ情報の値としてはnm単位で得ることができる。しかし、実際の性能を踏まえるとその値がどこまで正確な値で出力できるのかは不明である。測定ごとに誤差が含まれるならば、読取安定性に大きく影響する。そこで測定誤差を調査する実験を行った。

4.3 レーザー顕微鏡の測定誤差

本実験では、VK-X250[5]というレーザー顕微鏡で実験を行った。VK-X250の性能は408nmのバイオレットレーザーを用いており、分解能は高さ

方向0.5nm、幅方向は1nmである。高さの測定結果は、0.1nm単位で出力される。対物レンズの倍率が10倍、20倍、50倍、150倍の4種類あり、各倍率の1ピクセルの大きさは、1,400nm角、700nm角、280nm角、93nm角となっている。また、測定モードに自動測定があるので、測定者の測定スキルによって大幅な結果の違いが現れないといった特徴を持つ。

VK-X250の各倍率において、試料を置かずにステージの測定を行った。ステージであるならば、試料を測定するよりも移動や変形などがなく、比較を行う際に影響が少ないと考えられる。ただし、ステージは平坦ではなく多少凹凸がある。10倍の対物レンズで測定した際の光学写真と、その長さ

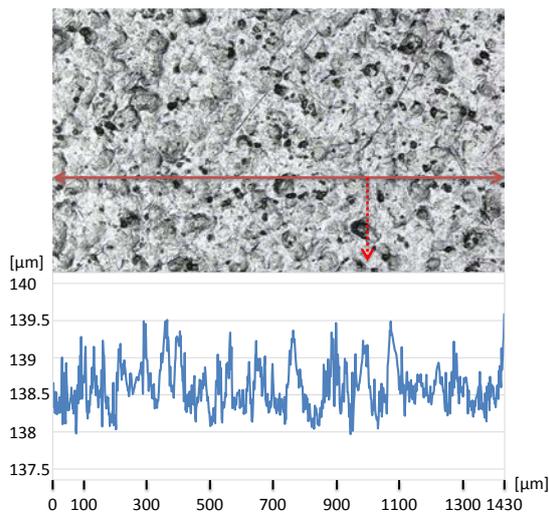


図4 上:ステージの光学写真
下:断面の高さ情報

1,430 μm の高さの断面図を図4に示す。高さの最大と最小の差が15 μm 以上あることが分かる。このステージを2回連続で測定を行い、そのデータを用いる。1回目をテンプレートとし、2回目をそれと照合するサンプルだとすれば、1回目の測定結果から2回目の測定結果を引いたその差分から誤差を導くことができる。

各倍率の視野領域は1024[px]×768[px]の長方形であり、1回の測定でその786,432個のピクセルに高さの値が格納される。その各ピクセルの値の誤差の分布曲線を生成する。なお、1回目の測定結果と2回目の測定結果で相関係数を計算し、各ピクセルの位置関係がずれていないことを確認した。階級間隔は10倍と20倍が10nmであり、50倍と150倍が1nmである。図5の実線が、10倍と20倍の各倍率の階級間隔にある誤差の度数を線で結んだもので、図6の実線が50倍と150倍の各倍率の階級間隔にある誤差の度数を線で結んだものである。縦軸が度数を表し、横軸が階級を表す。

倍率が高くなるほど、誤差の量が小さくなっていることが分かる。各誤差の分布が95%で収まる範囲は、10倍で $\pm 1,400\text{nm}$ 、20倍で $\pm 500\text{nm}$ 、50倍で $\pm 150\text{nm}$ 、150倍で $\pm 70\text{nm}$ であった。各ピクセルにおいてVK-X250は0.1nm単位で結果を出力できることを考えると、この誤差は大きく、読

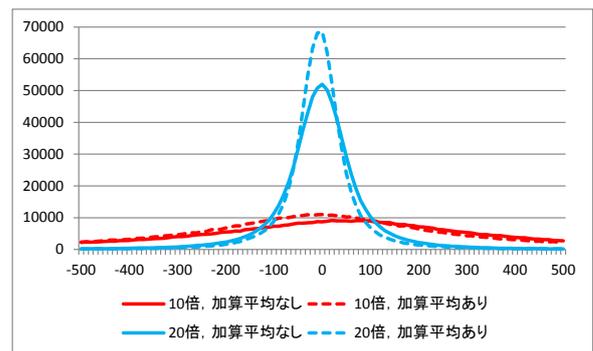


図5 加算平均による誤差の減少(対物レンズ倍率が10倍および20倍の場合)

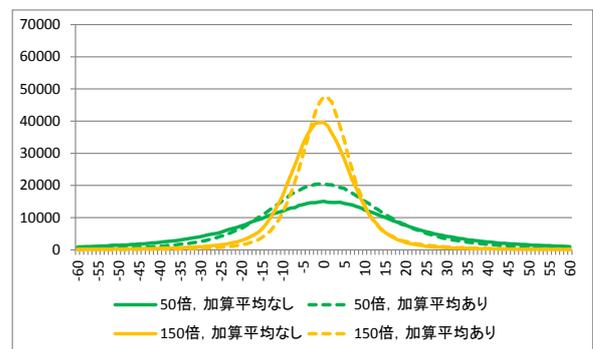


図6 加算平均による誤差の減少(対物レンズ倍率が50倍および150倍の場合)

取安定性に不安が残る。この誤差の分布曲線は正規分布曲線と似た形をしているので、測定の際に発生するホワイトノイズだと仮定できる。

そこで、このホワイトノイズの影響を取り除く方法として、加算平均を取り入れる。一般に、ホワイトノイズは無相関であるので、加算平均を取るデータ数を多くすることでノイズは0に収束する。加算平均を取るデータ数をNとすると、ホワイトノイズの成分は $1/\sqrt{N}$ となり、影響を小さくすることが可能である。同様に、レーザー顕微鏡の測定結果を、複数回測定した際に加算平均を取ることにする。

N = 2の加算平均を取ったデータの差分を求めた結果を、図5と6の破線に示す。N = 1と比べて、中央に度数が寄っており、誤差が小さくなっていることが分かる。そのため、レーザー顕微鏡をセンサとして利用する際には加算平均を取ることで、読取安定性が向上する可能性がある。

5 アルミ箔人工物メトリック・システムの実装

4章の考察を踏まえた上で、センサとしてレーザー顕微鏡を利用したアルミ箔人工物メトリック・システムを実装した。システムの流れは図1に沿うものとする。

5.1 対象とする人工物

小さいアルミ箔断片を対象とする。しかし、実際に μm 単位でアルミ箔を切り出すのは難しい。そこで、200メッシュのグリッドをアルミ箔の上に載せたものを利用する。ここでいうグリッドとは直径3mm厚さ50 μm の金属板であり、等間隔に小さな孔が空いている。メッシュは1インチに含まれる孔の数の単位となっている。200メッシュのグリッドにおいては、1つの孔が85 μm 角である。対象とする人工物の構成を図7に示す。図7中央にある画像は、20倍で撮影した光学画像であり、正方形の孔からアルミ箔を測定が可能である。図7下部にあるのがその高さ情報であり、両端にはグリッドの厚みの分だけ高さがあり、またアルミ箔部分もやや凹凸があることがわかる。これらの凹凸は最大と最小の差が約5 μm 程度である。

実際は1枚のアルミ箔であるが、この孔から見える1つの領域を1枚の85 μm 角のアルミ箔断片と解釈する。2つの85 μm 角のアルミ箔断片を3D表示したものを図8に示す。同じアルミ箔であるが、場所が異なれば、微小な凹凸が異なることが分かる。

5.2 センサ入力部

レーザー顕微鏡として、VK-X250 [5] を用いる。倍率は、20倍を選択した。グリッドの厚さ50 μm が影響し、対物レンズが50倍以上では深度が深すぎて、うまくアルミ箔の像が取得できないためである。20倍における1ピクセル角のサイズは700nm角である。よって、85 μm 角のアルミ箔からは120ピクセル角の画像が得られる。

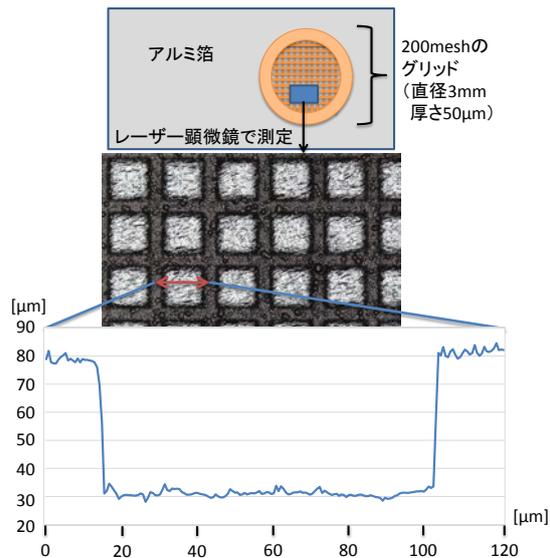


図7 対象とする人工物の構成

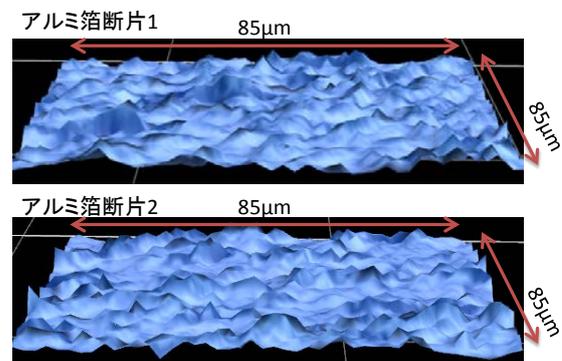


図8 アルミ箔断片の3D像

測定結果は、センサにはパラメータ N を与え、 N 回測定した結果の加算平均を取ったものを出力する。

5.3 固有パターン抽出・データ生成部

固有パターンは、高さ情報である。

固有パターンからデータを生成する際、登録フェーズと認証フェーズとは処理が異なる。

登録フェーズでは、原データの座標 (X [px], Y [px]) から縦 H [px], 横 W [px] の領域 (これをデータピースと呼ぶ) を切り出し、データピースの左上の画素から横方向に走査して成分数 $N = H \times W$ の行列を生成し、登録データ P としてデータベースに保管する。認証フェーズでは、原データの座標 ($X - R$ [px], $Y - R$ [px]) から縦 $H + 2R$

[px], 横 $W + 2R$ [px] のデータピースを切り出す。そして、データピースの左上を基点として、縦 H [px], 横 W [px] の新たなデータピースを切り出し、登録フェーズと同様にして成分数 N の照合データ Q を生成する。基点を縦横に移動させながらこの処理を繰り返し、照合データ群 U を生成する。

本実験では、 $20\mu\text{m}$ 角の領域を用いるために $H = W = 30$ とし、またあらかじめ位置ずれの最大を調査した結果、8 ピクセルずれが最大であったため、 $R = 10$ とした。

5.4 照合部・結果

本稿では、相関係数を利用して類似度を求める。

照合データ群 U から照合データ Q を 1 つ選択し、相関係数式を用いて登録データ P との類似度 $R(P, Q)$ を計算する。この計算 $R(P, Q)$ を全ての Q について行い、最大値を類似度 $S_1(P, U)$ として、閾値 T_1 ($0 \leq T_1 \leq 1$) と比較し、ACCEPT か REJECT かの判定結果を出力する。

$$R(P, Q) = \frac{\sum_i^H \sum_j^W (p_{ij} - \bar{p})(q_{ij} - \bar{q})}{\sqrt{\sum_i^H \sum_j^W (p_{ij} - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_i^H \sum_j^W (q_{ij} - \bar{q})^2}}$$

$$\bar{p} = \sum_i^H \sum_j^W \frac{p_{ij}}{HW}, \quad \bar{q} = \sum_i^H \sum_j^W \frac{q_{ij}}{HW}$$

$$S_1(P, U) = \max_{Q \in U} R(P, Q)$$

6 アルミ箔人工物メトリック・システムの実験

6.1 実験内容

5 章で述べた人工物メトリック・システムを利用して、照合実験を行う。

2.3 節で述べた評価を行うために、図 2 の FMR/FNMR 曲線を結果として出力することを目的とする。

ノイズによる FMR/FNMR 曲線の影響も調査す

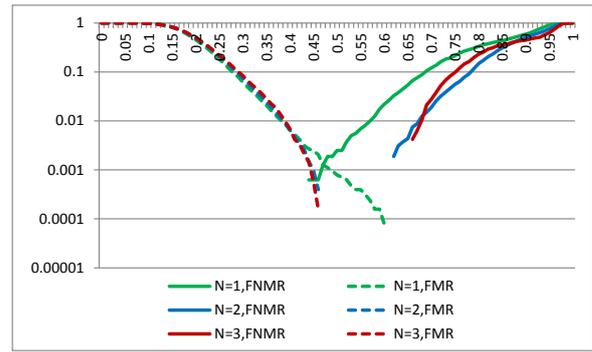


図 9 FMR/FNMR 曲線

るために、センサのパラメータ $N = 1, 2, 3$ の 3 通りで実験を行った。

FMR の導出では、 $85\mu\text{m}$ 角のアルミ箔を 160 枚用意し、それぞれ 1 回の測定結果のデータピースを用いて、 P と Q で選ばれるすべての組合せで類似度を求める。これにより、 ${}_{160}C_2 = 12,720$ 組の類似度が得られる。FNMR の導出では、 $85\mu\text{m}$ 角のアルミ箔を 160 枚用意しそれぞれ $N = 1, 2$ のときは 5 回の測定結果を、 $N = 3$ のときは 3 回の測定結果のデータピース群を用いて、それぞれの群内の組合せで類似度を求める。これにより、前者は ${}_5C_2 * 160 = 1,600$ 組、後者は ${}_3C_2 * 160 = 480$ 組の類似度が得られる。

6.2 実験結果

実験から得られた FMR 曲線と FNMR 曲線を図 9 であり、 $N = 1, 2, 3$ の結果がまとめてある。横軸が類似度の閾値を表し、縦軸が誤り率を表す。

6.3 考察

$N = 1$ においては、FMR と FNMR が交差しており、EER が 0.001 程度であったのに対し、 $N = 2$ では FMR が少し左に寄り、また FNMR が大きく右に寄り、実験データの範囲内では交差しなかった。また、 $N = 3$ では、 $N = 2$ とデータ数が異なるので単純な比較はできないが、照合精度の向上は見られるものの、 $N = 1$ から $N = 2$ にした時ほどの向上は見られなかった。よって、センサの出力結果は、加算平均を取った方が高い照合精度が得られるが $N = 2$ で十分であることがいえる。

N = 1 の場合では、ノイズ成分が乗っている結果、同一物を測定してもノイズの影響により、違った物体に見えることがあり、また逆に異なる物体を測定してもノイズによって同じ物体に見えることがある。そのため、照合精度が悪くなっていると考えられる。対して、N = 2, 3 の場合ノイズ成分が少なくなるので、FMR/FNMR のどちらも良くなり、照合精度が良くなったと考えられる。よって、アルミ箔人工物メトリクスに、レーザー顕微鏡をセンサとして用いる場合は、ノイズ処理を加える必要があるが、その工程さえ踏まえれば、高い照合精度を得ることが可能である。

また、クローンに関して考えると、SEM とは異なり高さ情報を利用しているので、表面形状の微小な凹凸を模倣する必要がある。一般に、ある形状と同じ物体を作ろうとした際、平面的な形よりも、立体的な形を真似るほうが、次元が増えているため難しい。SEM よりも細かな倍率をみることはできないが、その造形の難しさといった点で、耐クローン性はある一定あるといえる。

7 おわりに

本稿では、レーザー顕微鏡を利用したアルミ箔の人工物メトリック・システムが構成可能であるかどうかを照合実験により調査した。

レーザー顕微鏡では、測定時のノイズが大きいことから読取り安定性に難があるので、ノイズの影響を減らすために測定データの加算平均をとるといった対策が求められる。

実際にレーザー顕微鏡を利用して照合実験を行ったが、ある程度の照合精度があろうことがいえ、真空がいらないといった特徴や、高さ情報を見ていることからクローン作製が難しいといったことを踏まえれば、実用の点で可能性があるといえる。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省国立大学改革強化推進事業の支援を受けて行われた。また、レーザー顕微鏡の使用につきご協力いただいた本学工学研究院の中尾 航准教授に感謝する。

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: 卓上型 SEM を用いたアプローチ,” “第 4 回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム, November 2014.
- [2] 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 卷, 別冊 1 号, pp. 61-140, April 2004.
- [3] 山越 学, 田中純一, 古家 眞, 平林昌志, 松本勉, “人工物メトリクスによる紙の個別性の評価,” 情報処理学会, コンピュータセキュリティ研究会 2007-48, pp. 13-18, May 2007.
- [4] Tsutomu Matsumoto, Morihisa Hoga, Yasuyuki Ohyagi, Mikio Ishikawa, Makoto Naruse, Kenta Hanaki, Ryoussuke Suzuki, Daiki Sekiguchi, Naoya Tate & Motoichi Ohtsu, “Nano-artifact metrics based on random collapse of resist,” Scientific Reports 4, No.6142, Aug 2014.
- [5] KEYENCE, “形状解析レーザー顕微鏡 VK-X シ リ ー ズ ” , <http://www.keyence.co.jp/microscope/special/vkx/>, 参照 July.28, 2015.
- [6] 松本 勉, 青柳真紀子, “人工物メトリクスによって IC カードのセキュリティを高める方法,” 情報処理学会論文誌 Vol. 46, No. 8, 2098-2106 (2005).