

コンシューマ・システム論文

有価陶磁器製品に不可視な2次元コードを 焼き付ける方法の提案とその評価

藤川 真樹^{1,a)} 西村 英伍² 瀧 真悟³

受付日 2016年2月28日, 採録日 2016年7月7日

概要: 本論文では、窯元や作家によって日々製造される有価陶磁器製品について、製造プロセスにおいて個々の製品に不可視な情報を焼き付ける方法と、当該製品から情報を非接触で抽出する方法を提案する。前者は、透明なガラス蛍光体によって形成された薄い厚さの2次元コードを、陶土層（素焼き後）と釉薬層との間に配置してから焼成することで実現できる。後者は、励起光を製品に照射した状況下で、ガラス蛍光体による発光の様子をカメラで撮影したあと、得られた画像を処理することで実現できる。著者らは、製品に焼き付けられた2次元コードが視認困難であることと、OpenCVを使った画像処理により、当該コードに格納された情報を抽出できることを実験により証明する。考察では、提案手法が4つの要件（色への影響、視認困難性、情報の抽出、特徴情報としての利用可能性）を充足していること、転写紙の製造コストがリーズナブルであること、および、インクジェット印刷を用いることにより製品ごとに異なる情報を焼き付けられる可能性があることを示した。

キーワード：2次元コード, ガラス蛍光体, 光励起, 画像処理, ステガノグラフィ

Proposal and Evaluation of the Baking Method to Apply Visually Unrecognizable Two-dimensional Code onto Valuable Ceramic Products

MASAKI FUJIKAWA^{1,a)} EIGO NISHIMURA² SHINGO FUCHI³

Received: February 28, 2016, Accepted: July 7, 2016

Abstract: We propose two technologies for valuable ceramic products produced daily by renowned artists and manufacturers. The former technology can bake invisible two-dimensional code onto each product in manufacturing process. This very thin code is made from transparent glass phosphor and allocated between the clay and the glaze layer of the ceramic product. The latter technology can extract the information from each product with the said code in a non-contact state by using photo shooting and image processing. The photo image of QR code is taken by the infrared camera and the optical excitation by laser light as the glass phosphor emits near-infrared light when it receives the said light. We proved the feasibility of these technologies based on the experiments and found the fact that the baked QR code onto the ceramic could not be seen by naked eyes and the said information could be extracted correctly. We also described the following considerations: (1) Our technologies satisfied four requirements, namely, Effects on colors, Difficulty in visibility, Information extraction, and Availability for the artifact-metrics. (2) Manufacturing cost of the transfer paper was reasonable price. (3) Each product could have different content of QR code by using inkjet printing.

Keywords: two-dimensional code, glass phosphor, optical excitation, image processing, steganography

¹ 工学院大学
Kogakuin University, Shinjyuku, Tokyo 163-8677, Japan
² サイエンスパーク株式会社
SCIENCE PARK Corporation, Zama, Kanagawa 252-0024, Japan
³ 青山学院大学
Aoyama Gakuin University, Sagami-hara, Kanagawa 252-5258, Japan
^{a)} markie-special-agent@nifty.com

1. はじめに

1.1 背景と目的

日常生活で使用される器物のうち、意匠や美しさが重要視され、知的・美的趣味として用いられることがあり、コストをかけて製作されるものを工芸品と呼び、その一例として織物、陶磁器（陶器と磁器の総称）、漆器、木工品があ

る。なかでも、名高い窯元や作家によって製作された陶磁器には高い金銭的価値がつくことから、一般家庭では、日常的に使用される陶磁器よりも大切に扱われ、子や孫といった次の世代に引き継がれていくことが多い。

日本では、上記のような陶磁器は、それとペアになった木箱に入れて保存されることが多い [1]。木箱の表面には、陶磁器の題名 (名称)、作家・窯元名、製造日などといった情報 (いわゆる「箱書き」) が記載されることから、陶磁器にまつわる情報を知るうえで有効である [2]。

陶磁器と木箱は物理的に分離可能であり、木箱は陶磁器 (無機物) と異なり有機物であるため、木箱の紛失や経年劣化・汚損により、木箱の新調と箱書きの依頼が作家・窯元に寄せられることがある。依頼を受けた作家・窯元は、陶磁器の真正性 (本物であること) を確認したあとに木箱を新調して箱書きをするのだが、木箱が紛失あるいは著しく劣化・汚損している場合、オリジナルの木箱に書かれていた箱書きに関する情報を正確に得ることは困難であると考えられる。

このような問題の発生を将来的に回避するために、現代の作家・窯元によって日々製造される「陶磁器」とその「情報」を一体化する (つまり、陶磁器に情報を記録する) とともに、情報を陶磁器から正確に抽出できる手段を設けることは、解決方法の1つであると著者らは考えている。当該方法が実現すれば、後世において陶磁器の鑑定や木箱の新調を行うときに助けになる。

上記のアイデアを実現する際には、2つのことを技術的にクリアする必要がある。1つは、陶磁器には意匠 (粘土や釉薬・絵の具がもたらす色や絵付けされた図柄) があるため、当該情報を記録しても意匠が損なわれない技術を確認することである。もう1つは、陶磁器に対する物理的なダメージ (傷や汚れの付着など) を避けるために、情報を非接触かつ正確に抽出できる技術を確認することである。

本論文では、上記の技術を具体化する方法の1つとして、透明かつ厚さの薄い不可視な2次元コードを陶磁器に焼き付ける方法と、撮影と画像処理によって当該コードから情報を抽出できる方法を提案する (本論文では、QRコードの存在を隠すための方法を提案するが、この存在を隠すことが、本論文のキーワードで掲げた「ステガノグラフィ」に相当する)。著者らは、以下の流れで論述を展開する。2章では、議論を展開するために必要となる情報を示す。3章では、著者らのアイデアを紹介する。4章では、実験によってアイデアの実現可能性を示す。その後、5章で提案手法に対して考察を加え、6章で本論文を総括する。

1.2 関連技術 (有価陶磁器製品の真正性を判定する技術)

我々は、有価陶磁器製品の真正性を機械的に判定できる技術を提案している [3]。この技術では、製品の製造プロセスにおいて自然偶発的に発生した特徴情報をあらかじめ

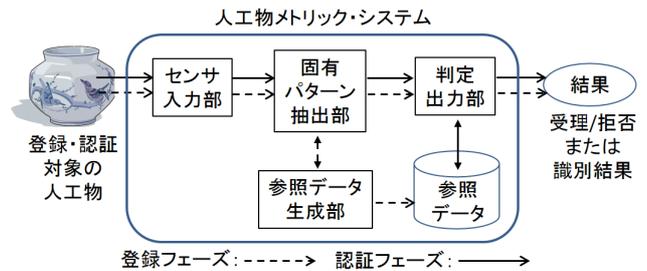


図 1 人工物メトリック・システムの概要
Fig. 1 An outline of artifact-metric system.

セキュアなデータベースに保存しておく。真正性を判定するときには、対象となる製品から特徴情報を抽出し、データベース上の特徴情報とマッチするか否かを検証する。このような技術を人工物メトリクスと呼び、これをシステム化したものを人工物メトリック・システムと呼ぶ (図 1 参照)。人工物メトリクスでは、特徴情報を抽出しやすくするために光学的・電気的・磁気の特徴を持つ材料を添加する。

我々が提案した技術 [3] では、光学的特徴を持つ材料 (光励起によって赤外線を発光するガラス蛍光体) の粉末を釉薬や絵の具に混ぜ合わせ、高温の炉のなかで釉薬や絵の具の成分とともに陶磁器表面に溶着させた。ガラス蛍光体を選定した理由は、その透明度の高さから陶磁器が持つ意匠を損なうリスクがきわめて低く、製造過程における高温や製造後の時間的経過によって材料が持つ特徴が失われたり変化したりしないからである。

ガラス蛍光体の粒子は、釉薬や絵の具の成分とともに陶磁器表面に溶着するが、このとき、「粒子の位置と粒子どうしの結合の度合い」が偶発的かつ無作為に決まり、製品ごとに異なる値になる。著者らは、これらを陶磁器の特徴情報として用いた。具体的には、照射範囲が広い励起光を陶磁器の表面に照射し、ガラス蛍光体が赤外線を発光している様子を撮影するものであり、赤外線の強度分布が赤外線画像として得られる。人工物メトリック・システムに実装する際には、赤外線画像のマッチングによって真正性を判定する。

著者らが考案した上記の方法を含め、人工物メトリクスで取り扱われる特徴情報は、文字情報とは異なり、自然偶発的に形成された非規則的・非規則的な情報である。一方、本研究では、人工物に特徴情報と文字情報の両方を持たせること、そして、これらの情報をデータベースにアクセスすることなく「その場 (オフライン環境下)」で得ることを目的としている。具体的には、以下の2つを実現する。

- (1) 文字情報を2次元コードに変換し、ガラス蛍光体粒子を用いて形成した当該コードを陶磁器に焼き付ける。
- (2) (1) によって形成された2次元コードは、上述の理由によって赤外線の強度分布が異なる。これを陶磁器の特徴情報とする。

1.3 2次元コードの必要性

人工物メトリクスでは、人工物から特徴情報が抽出できるため、これを固有の識別コードに変換し、人工物に関する情報があらかじめ格納されているデータベースを参照すれば、個々の人工物に関する文字情報を得るといった目的は達成される。

これに対して本研究では、特徴情報を得るタイミングで文字情報を同時に抽出し、データベースを参照することなしに「その場で文字情報を得る」ことの可能性の追求を意図している。前節で述べたように、2次元コードを陶磁器に焼き付けることができるならば、特徴情報と文字情報の2つを陶磁器に持たせることができる。

2次元コードに記録される文字情報は1つの光学系を用いて非接触で抽出でき、当該コード自身が高い誤り訂正技術を持つ。また、陶磁器に焼き付ける2次元コードの形成に用いるガラス蛍光体は焼成時の高温（最大1,300度）に耐え、光励起による赤外線発光機能が失われることがない[3]ことから、2次元コードは、文字情報を陶磁器に記録し、かつこれを抽出する方法として適切であるといえる。

1.4 人工物メトリクスとの違いと優位性

1.2節で述べたように、特徴情報は非規則的・非規則的であり、それ自体は人間にとって意味をなさない情報である。このため、人工物メトリクス（文献[3]を含む）の場合、人間にとって意味をなす（人工物に関する）情報を得るためには、1.3節で述べたように特徴情報を固有の識別情報に変換し、データベースを参照するという処理が必要となる。

著者らのアイデアは、人工物から特徴情報を抽出する際に、人間にとって意味をなす（人工物に関する）情報を同時に得るというものであり、人工物メトリクスにはない考え方である。我々の手法は、人工物の製造過程において特徴情報と文字情報の2つを持たせるため、特徴情報を固有の識別情報に変換し、データベースを参照するという処理を必要とせず、特徴情報を抽出する際に文字情報を同時に得ることができる。

1.5 コピーの製造困難性

本節では、「粒子どうしの結合の度合い」と「ガラス蛍光体表面での屈折の度合い」との関係性を述べることで、真正品を観測しながらそのコピーを製造することが困難であることを述べる。

光励起されたガラス蛍光体は赤外線を発光するが、屈折率が1より大きいガラス蛍光体の中から、屈折率がほぼ1である空気中に赤外線が出るパスには、以下の3つがある（図2では粒子を丸く描いているが、実際にはランダムな凹凸を持つ形状が観測される。また、粒子は3つのうちの1つまたはそれぞれを組み合わせたパスを持つ）。

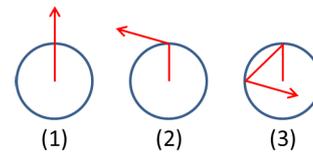


図2 赤外線のパス

Fig. 2 Infrared light path.

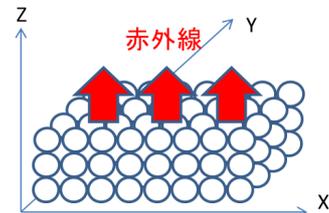


図3 Z軸方向への発光の試み

Fig. 3 Approach of IR emission to Z axis.

- (1) 粒子の界面で屈折せずに粒子から出るパス
- (2) 粒子の界面で屈折したあとに粒子から出るパス
- (3) 粒子の界面で屈折を続け、粒子から出ないパス

ガラス蛍光体の粒子は、高温の炉の中で偶発的かつ無作為に結合して大きな粒子を形成するが、これによってガラス蛍光体粒子の実効的な厚さとその表面の形状（屈折の度合い）が偶発的かつ無作為に決まる。これらは、2次元コードの赤外線画像を撮影するカメラのイメージセンサに到達するまでの赤外線のパスに影響をもたらすことから、観測される2次元コードの赤外線画像は観測点によって異なる。

このため、真正品を入手して複数の角度から2次元コードの赤外線画像を撮影したあと、得られた画像を参考にしながら不正に入手したガラス蛍光体の粒子を（炉で焼成させずに常温の環境下で）偽造品の表面に付着させるという方法によりコピーの製造を試みたとしても、撮影された複数の画像と完全に一致するように光のパスを考慮しながら、平均粒径が2.0~3.0 μmの粒子の1つ1つを操作して偽造品の表面に付着させることは物理的に困難である。たとえば、X軸、Y軸、Z軸からなる3次元空間において、偽造者はZ軸方向にのみ赤外線を発光させ、当該軸における赤外線の発光強度を制御したいと考えていると仮定する。この場合、一見すると図2の(1)に示すような光のパスを持つ粒子を探し出し、図3に示すようにZ軸方向に粒子を積み重ねていき（つまり、大きな粒子に見立てる）、その個数を調整することにより赤外線の発光強度を制御できるように思われる。

確かに、Z軸の下位に位置する粒子から出た赤外線は、当該粒子の上位に位置する粒子を透過してZ軸方向に進むが、図4に示すようにその量は一部にとどまり、残りの赤外線は上位に位置する粒子の表面で反射または屈折するため、Z軸方向以外にも赤外線が放射される。

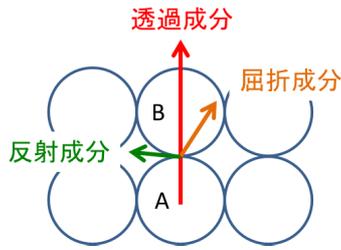


図 4 赤外線の透過・反射・屈折

Fig. 4 Transmission, reflection, and inflection of IR.

実際には、「粒子中を赤外線が透過する割合」や「粒子表面における反射または屈折の度合い」は粒子ごとに異なるため、積み重ねる粒子の位置や個数を調整しても偽造者の目的を達成することはできない。

また、高温の炉の中で、溶解している粒子を操作すること（流体の制御）は、上記の制御（固体の制御）よりも困難である。なぜならば、図 3 のように Z 軸方向に粒子を積み重ねても、熱と重力によって粒子の形状は変化するため、粒子を規則正しく積み重ねることができないからである。

2. 基本情報、前提条件と要件

本章では、陶磁器の製造に関する基本情報を紹介したあと、本論文の前提条件および著者らが提案する 2 つの技術（情報の焼付けとその抽出）が満たすべき要件を示す。

2.1 基本情報

陶器・磁器は、8 つの製造工程を経て製造される。具体的には、(1) 原材料の粉碎（陶器は粘土を、磁器は陶石を原材料とする）、(2) 粉碎した粉の精製と陶土生成、(3) 成形、(4) 素焼き、(5) 釉薬の塗布、(6) 焼成、(7) 絵付け、(8) 焼成である。

図 5 は、(4) から (8) までのプロセスを、皿を用いて示している。素焼きの皿は、釉薬に浸して乾燥させたあと焼成する。焼成により釉薬はガラス化して皿全体をカバーし、絵付けに最適な平滑面を形成する。絵付けの工程では、筆を用いて皿に図柄を描いたり、転写紙 [4] を用いて図柄を皿に貼り付けたりする。その後、低めの焼成温度で図柄を焼き固めることで製品が完成する。

転写紙を使った絵付けのメリットは、図柄を高速・高精彩かつ低コストで焼き付けられることである。図 6 に、図柄の転写方法を示す。はじめに、スクリーン印刷技術と絵付け用のインクを用いて、図柄を転写紙に印刷する。次に、転写紙を水に浸して透明な樹脂層（表面に図柄が印刷されている層）を剥離させ、これを 1 回目の焼成が終わった皿に貼り付けて乾燥させる。その後、2 回目の焼成を行うことで絵付け用のインクのみが残り、これがガラス化することで釉薬層上に図柄が形成される。なお、この方法で陶磁器に焼き付けられる図柄の厚みは約 10 μm である。



図 5 (4) から (8) の製造プロセス

Fig. 5 Fabrication process from (4) to (8).

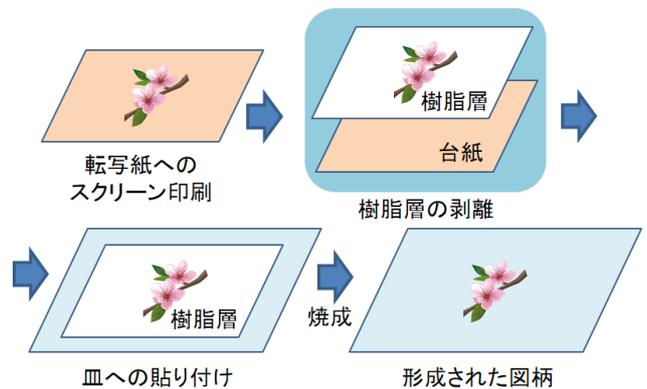


図 6 転写紙を使用した図柄の焼き付け

Fig. 6 The pattern baking method by using transfer paper.

2.2 前提条件

本節では、議論の範囲を明確にするために、本論文の前提条件を設定する。

条件 1: 本論文では、1 章で述べた問題の発生を将来的に回避するために、作家や窯元によって日々製造されている製品を議論の対象とする。

条件 2: 著者らは、提案方法を陶磁器に適用することを考えているが、今回は磁器の皿を用いて有効性を検証する。

条件 3: 皿に焼き付ける 2 次元コードとして、今回は QR コード*1を使用する（著者らの提案は、QR コードに使用を限定するものではなく、以下に示すように QR コードと同等の性能を持つ 2 次元コードであれば、その種別を問わない。なお、1 次元コードは下記の性能を満たすことができないため除外する）。

- (1) 国際標準規格 (ISO/IEC) となっており、世界的な使用が期待できる、
- (2) 2 次元コードを XY 平面に配置し、これを Z 軸方向から読み取るとき、Z 軸の回転角度に定めがない (360 度どこからでも読み取ることができる)、
- (3) 高い誤り訂正技術を持つ、
- (4) 文字情報を秘匿化したいというニーズに対応するために、文字情報を暗号化できる。

*1 「QR コード」は、株式会社デンソーウェーブの登録商標である。

他の2次元コードと同様に、QRコードは撮影というシンプルな方法で情報を抽出でき、電氣的・磁氣的な情報の抽出方法に比べて、情報抽出時における製品への物理的なダメージ（傷や汚れの付着など）を避けることができる。

条件4：著者らは、厚さの薄いQRコードを高速・高精細かつ低コストで皿に焼き付けるために、転写紙を使用する。通常、転写紙は量産される陶磁器の絵付けに使用されるが、提案手法を有価陶磁器に適用する場合、転写紙は絵付けのためには使用せず、「真正性の判定」と「製品情報の記録」、すなわち不可視なQRコードの焼き付けのために使用することが望ましい（当該コードを焼き付ける場所は、窯元や作家の判断に委ねる）。

2.3 要件

本節では、提案手法が満たすべき要件を示す。

要件1（色への影響）：

「QRコードを皿に焼き付けたときに、陶土や釉薬・絵の具がもたらす色に影響を与えるリスクが低い」。

これは、QRコードを焼き付けたことによって、製品が本来持つべき色を損なうことがあってはならないためである。

要件2（視認困難性）：

「QRコードが焼き付けられた皿とそうでない皿を見比べたときに、その違いを容易に区別することが難しい」。

これは、QRコードの存在が容易に視認できることによって、製品が持つ意匠を損なうことがあってはならないためである。

要件3（情報の抽出）：

「QRコードが焼き付けられた皿から、情報を正確に読み取ることができる」。

これは、製造プロセスにおいてQRコードの形状が崩れないことと、撮影によって得られたQRコードの画像から情報を正確に抽出できることの2点が求められるためである。

要件4（特徴情報としての利用可能性）：

「撮影によって得られたQRコードの画像は、人工物メトリクスにおける特徴情報としても利用できる」。

これは、本研究が人工物に特徴情報と文字情報の両方を持たせることを目的としているためである。

3. 提案方法

本章では、1章で述べたアイデアを実現しつつ、2.3節で述べた要件を満たす方法を提案する。

3.1 転写紙へのQRコードの印刷

著者らは、透明かつ厚さの薄いQRコードを焼き付ける

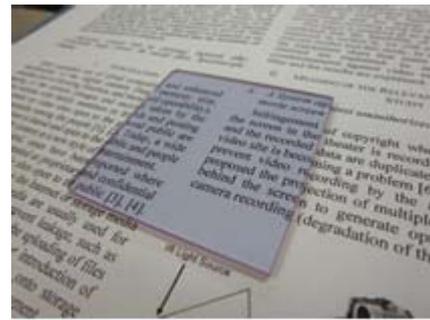


図7 光励起により近赤外線を発光するガラス蛍光体

Fig. 7 Glass phosphor emits near infrared light by optical excitation.

ことができ、撮影によって当該コードの画像を取得できる技術を確立するために、ガラス蛍光体と呼ばれる、透明かつ光励起によって近赤外線を発光する素材をインクの顔料に見立ててインクを作成し、これを使って転写紙にQRコードを印刷する方法を提案する。

今回著者らが使用するガラス蛍光体（図7参照）は、透明かつ高い赤外線変換効率を有しているが、薄い青色を呈している。この点について、白い陶器と透明釉薬（焼成すると透明なガラス質を形成する釉薬）を用いて行った別の実験では、ガラス蛍光体粉末の量が微量の場合、陶器の表面に添加された当該粉末の存在は視認困難であり、光励起によって近赤外線を十分に発光することが確認されている[3]。このことから、当該蛍光体は上記の技術を確立できる有効な素材であるといえる。

この手法はまた、真正品の偽造困難性を高めることができる。なぜならば、インクに含まれるガラス蛍光体の粒子は、(1)印刷時に転写紙上に3次元的かつランダムに配置され、(2)焼成時に粒子どうしが自然偶発的に熔融・結合するからである。これにより、焼成後に形成される個々の粒子が持つ赤外線の発光強度・発光方向は一樣ではなく、ランダム性を持つ。この現象は、個々の陶磁器についても同様に発生するため、これらが人工物メトリクスにおける特徴情報として使用できる。1.5節では、理想的な粒子の存在を仮定したうえで、真正品が持つ赤外線の発光強度・発光方向をコピー品に持たせることができないことを証明したが、実際には「粒子中を赤外線が透過する割合」や「粒子表面における反射または屈折の度合い」は粒子ごとに異なるため、積み重ねる粒子の位置や個数を調整しても、真正品を参照しながらコピー品を製造することはきわめて困難であるといえる。

3.2 QRコードの焼き付け

転写紙の利用によって、焼き付けられるQRコードの厚みは約 $10\mu\text{m}$ になるが、この値は微粒子の存在を視認できるか否かの境目である[5]ため、物理的にQRコードの存在が視認できる可能性がある。また、QRコードの厚み

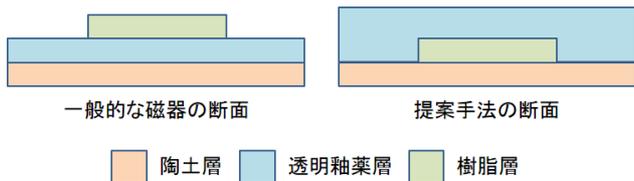


図 8 QR コードの焼き付け方法

Fig. 8 Baking QR code onto the porcelain products.

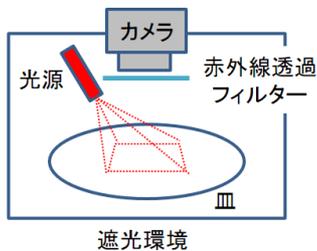


図 9 QR コードの画像の取得

Fig. 9 Acquisition of the QR code's images.

によって生じる段差は光を散乱するため、目視により QR コードの存在が確認できる可能性がある。

上記 2 つの視認可能性を解消するために、著者らは、陶土層（素焼き後）の上に QR コードが印刷された樹脂層を貼り付けたあと、陶土層の上位に形成される透明釉薬層を通常よりも厚めにする方法を提案する（図 8 参照）。これは、ガラス蛍光体と釉薬は同じガラス質であり、焼成時に双方が親和性をともなって溶融することで QR コードの厚みと段差を減らすことができるため、物理的・光学的側面から QR コードの存在を視認困難にできると考えられるからである。なお、ガラス蛍光体は安定した酸化物であるため人体や自然に影響を与えない [3] が、上記のように釉薬層でカバーすることによって、製品に対する安心感と信頼性を高めることができる。

3.3 QR コードの画像撮影と情報の抽出

著者らは、広範囲に励起光を照射できる光源を用いて、皿に焼き付けられた QR コードに含まれるガラス蛍光体を励起する。そして、図 9 に示すように、ガラス蛍光体による発光の様子を赤外線カメラで撮影することで、QR コードの画像を取得する。

製品の情報の抽出は、上記によって得られた画像に適切な前処理を加えたあと、画像に含まれる QR コードから文字列を抽出できるソフトウェアを用いて実施する。

4. 実験

本章では、3 章で述べた提案方法の実現可能性を検証するために行った実験とその結果について述べる。

4.1 転写紙への QR コードの印刷

はじめに、一般的な転写紙用インクの作製方法に従い、



図 10 作成した QR コードの画像

Fig. 10 An image of generated QR code.

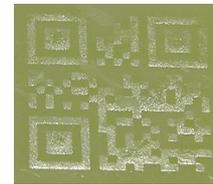


図 11 転写紙に印刷された QR コード

Fig. 11 Printed QR code onto the transfer paper.

ガラス蛍光体粉末（インクの顔料に相当する）とビヒクル（顔料を分散させる液体であり、樹脂とこれを溶かす溶剤から構成される）との重量比を 50% : 50% にした透明なインクを作製した。

次に、QR コードに関する文献 [6], [7] を参照し、バージョン 1 (21 セル), 誤り訂正レベル L (復元率約 7% *2), セルサイズ 3 × 3 画素の QR コードを作製した（図 10 参照）。試みに、上記のコードには Fuchi という英文字を格納した。ちなみに、バージョンと誤り訂正レベルと格納可能な文字数には相関関係があるため、上記コードに格納できる最大文字数は英数字 25 文字となる。

その後、当該コードが 10.5mm 四方に収まるように縮小して転写紙に印刷した（図 11 参照）。印刷サイズを 10.5mm 四方にした理由は、落款印を製造している企業 3 社に著者らがインタビューしたところ、陶磁器を含む工芸品に付される落款印の最小サイズが 10.5mm 四方であったからである。

本論文では、著者らのアイデアの実現可能性を検証するために上記の大きさの QR コードを用いて実験を行うが、今後は、QR コードのバージョンを変えて実験を行い、当該コードに格納できる情報量を増やす予定である。

著者らは、陶磁器に関する情報（文字情報）を QR コードに格納することで、特徴情報を抽出する際に文字情報を同時に得ることを意図しているが、QR コードに格納できる文字数には制限があるため、文字情報が制限を超える状況が発生する場合には、システムを拡張する必要がある。このような状況に備えるために、システム拡張の一例として図 12 に示すシステムを提案する。はじめに、セキュアな Web サーバを構築し、その中に陶磁器に関する文字情報をあらかじめ登録する。次に、文字情報を参照できる URL を短縮 URL [8] に変換し、「https://」以降の文字

*2 4 段階ある誤り訂正レベル (H, Q, M, L) のなかで、最も低い復元率。一般的にはレベル M (復元率約 15%) 以上が使用される。



図 12 情報の閲覧方法

Fig. 12 Referring method of information.



図 13 QR コードが焼き付けられていない皿 (左) と焼き付けられている皿 (右) の写真

Fig. 13 Image of the porcelain plate without QR code (left) and with QR code (right).

列を QR コードに格納する。これにより、特徴情報を抽出した際に得られる文字情報 (「https://」以降の文字列) と「https://」とを連結させてブラウザに入力することで、陶磁器に関する情報を得ることができる。

4.2 QR コードの焼き付け

はじめに、白色陶土を使用した素焼き皿を用意した。当該皿を選択した理由は、2.3 節で述べた要件 1 (色への影響) の充足を確認するためであり、ガラス蛍光体が持つ薄い青色が、白色陶土がもたらす色に影響を与えるか否か (つまり、焼成後に薄い青色が視認されるか否か) を検証しやすくするためである。

次に、4.1 節で作成した転写紙から樹脂層を剥離し、素焼き皿の中央に貼り付けて乾燥させた。3.2 節で示した、透明釉薬層に厚みを持たせる作業は、素焼き皿に透明釉薬を塗布して乾燥させるという作業を 2 回繰り返すことで実現した。透明釉薬は、焼成前は白色であるが、焼成すると透明なガラス質を形成するため、前段の検証を妨げることはない。焼成では、上記のプロセスを経た皿を炉の中に入れ、2.5 時間かけて 800 度にまで温度を上げたあと 10 分間温度を維持し、1.5 時間かけて温度を下げた。

図 13 に、QR コードが焼き付けられた皿とそうでない皿の画像を示す。2 つの皿に、外見上の違いは見られない。

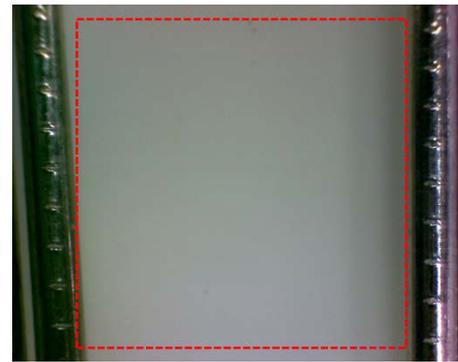


図 14 赤枠内に QR コードが焼きつけられている

Fig. 14 QR code was baked in red frame.

図 14 に、マイクロスコープを使って、QR コードが焼き付けられている部分を撮影した画像を示す (倍率 10 倍)。QR コードが焼き付けられている場所を分かりやすくするために、幅約 10mm のクリップを目印として撮影している。QR コードは、赤の破線部分 (クリップの内径部分) に焼き付けられているが、QR コードの存在と、ガラス蛍光体が持つ薄い青色が視認しにくいことが分かる。

4.3 QR コードの視認性

2.3 節で述べた要件 2 (視認困難性) の充足を確認するために、著者らは 4.2 節で示した要領で QR コードを焼き付けた皿とそうでない皿 (樹脂層を貼り付けなかった皿) を 3 枚ずつ作成し、前者の皿の裏面にのみ目印を付けた。次に、被験者 30 人に対して以下の要領で実験を行い、被験者ごとに正答率を算出した。

- (1) 実験者は、QR コードが焼き付けられている皿とそうでない皿の 2 種類があることを説明する。なお、QR コードを焼き付けている位置は教えない。
- (2) 実験者は、被験者から見えない場所で 6 枚の皿から 2 枚の皿をランダムに選択する。そして、選択した皿を机の上に置く。
- (3) 被験者は、目視により 15 秒間皿を観察する (この間、被験者は皿に触れたり皿の裏面を見たりすることはできない)。次に、2 枚の皿が、以下に示す 3 つの組合せのうち、どれに該当するのかを回答する。
 - (A) QR コードが焼き付けられている皿とそうでない皿のペア
 - (B) QR コードが焼き付けられている皿のペア
 - (C) QR コードが焼き付けられていない皿のペア
- (4) 実験者は皿の裏面を確認し、回答が正しいときにのみ 10 点を加算する。なお、回答の正誤は被験者に通知しない。
- (5) (2) から (4) を 10 回繰り返す、正答率を算出する。

図 15 は、被験者ごとの正答率を示す散布図である。横

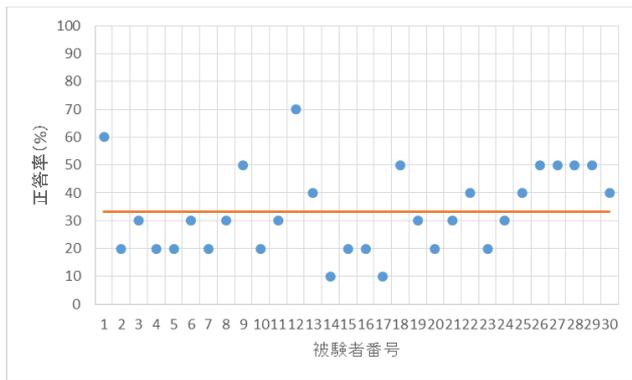


図 15 正答率の分散図
Fig. 15 Test results (scatter chart).

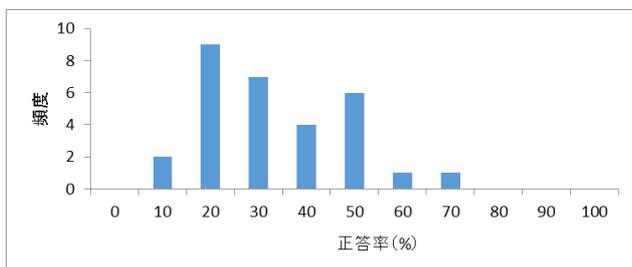


図 16 正答率の度数分布
Fig. 16 Graph of frequency distribution.



図 17 原画像 (左から 300 mA, 400 mA, 500 mA)
Fig. 17 Original image. From left, 300 mA, 400 mA, 500 mA.

軸は被験者番号を、縦軸は被験者の正答率を、赤線は平均正答率 (33.3%) を表している。図 16 は、正答率の度数分布を表している。正答率 20% にピークが見られ、これが全体的な正答率を下げている。これらのことから、目視によって QR コードの存在の有無を識別することは難しいといえる。

4.4 QR コードの画像撮影と情報の抽出

2.3 節で述べた要件 3 (情報の抽出) の充足を確認するために、照射する励起光 (レーザー光) の出力を 3 段階 (300 mA, 400 mA, 500 mA) に変化させながら、3.3 節で示した要領で、皿に QR コードが焼き付けられている部分を赤外線カメラで撮影した。原画像と画像処理後の画像を図 17 と図 18 に示す。なお、画像処理手順は以下のとおりである。

(1) 原画像では、QR コード部分が白っぽく、他の部分が黒っぽく表現されている。画像処理ソフトでの読み取りを容易にするために、色情報を反転させる。



図 18 画像処理後 (左から 300 mA, 400 mA, 500 mA)
Fig. 18 After the image processing. From left, 300 mA, 400 mA, 500 mA.

- (2) 励起光が均一に照射されていないために、撮影された画像は中心部分が明るく端部が暗い。画像全体の明るさを均一にするために、DoG (Difference of Gaussian) 手法を使って画像を平滑化する。
- (3) 輝度値を正規化する。具体的には、画像全体において最も暗い輝度値が 0 よりも大きいときには、当該輝度値が 0 になるように画像全体の輝度値を補正する。同時に、画像全体において最も明るい輝度値が 255 よりも小さいときには、当該輝度値が 255 になるように画像全体の輝度値を補正する。

次に、OpenCV [9] を使ってそれぞれの画像から文字情報を抽出したところ、文字列 Fuchi が正しく抽出された。

5. 考察

本章では、要件の充足と転写紙の製造コストという観点から提案システムを考察する。その後、現在研究が進められている陶磁器向けのインクジェット印刷技術について言及する。

5.1 要件の充足

本節では、提案システムが 2.3 節で述べた 4 つの要件を充足していることを述べる。

5.1.1 要件 1 (色への影響)

4.1 節と 4.2 節で述べたように、ガラス蛍光体とビヒクルとの重量比を 50% : 50% にしたインクを用いて転写紙に QR コードを印刷し、白色陶土と透明釉薬からなる皿に当該コードを焼き付けたところ、ガラス蛍光体が持つ薄い青色は視認されなかった。これは、著者らが行った別の実験 [3] の結果と同じであり、10.5 mm 四方におけるガラス蛍光体の割合が微量であったからであると考えられる。

以上のことから、他の色の陶土や釉薬を用いた陶磁器、および絵の具によって絵付けされた陶磁器についても同様のことが成立する可能性が高い。このため、4.1 節と 4.2 節で述べた方法は有効であり、要件 1 を充足しているといえる。

5.1.2 要件 2 (視認困難性)

4.3 節で述べたように、被験者 30 人に対して行った実験では、平均正答率は 33.3% であった。これは、QR コードの存在を視認しにくくするための工夫 (3.2 節参照) が著



図 19 3 枚の皿から抽出された QR コードの画像 (左から皿 (1), 皿 (2), 皿 (3))

Fig. 19 QR code images extracted from three plates (From left, plate (1), (2), and (3)).

者らの狙いどおりに功を奏したこと、および、これによって QR コードの有無を正しく識別することが難しかったことを意味している。

以上のことから、3.2 節で述べた工夫は有効であり、要件 2 を充足しているといえる。

5.1.3 要件 3 (情報の抽出)

4.4 節で述べたように、3.3 節で示した要領で、皿に QR コードが焼き付けられている部分を赤外線カメラで撮影したところ、励起光の出力を変化させても QR コードが撮影できた。また、OpenCV を用いて QR コードから情報を抽出したところ、いずれの画像からも文字列が正しく抽出された。これは、励起光の出力に多少の幅があっても、また、ガラス蛍光体の量が多少変化しても、光励起によってガラス蛍光体が近赤外線を発光し、その様子を赤外線カメラがとらえられること、および、得られた画像から情報が正しく抽出できることを意味している。

以上のことから、3.3 節で示した方法は有効であり、要件 3 を充足しているといえる。ただし、今回の実験結果は図柄のない白色の磁器によるものであり、提案手法の有効性を深く検証するためには、図柄のある有色の磁器を使用した実験を行うべきであり、今後、著者らは当該磁器に対する実験を行う予定である。なお、現時点で想定できることとして、陶磁器が「黒色を含む図柄」や「黒色の陶土」、「黒色の釉薬」を持つ場合、ガラス蛍光体から放射された近赤外線が吸収される可能性があるため、QR コードの画像が不鮮明になり、QR コードの認識精度が低下する (= 情報が抽出できない) ことが考えられる。

5.1.4 要件 4 (特徴情報としての利用可能性)

ここでは、撮影によって得られた QR コードの画像 (赤外線の発光強度) が皿ごとに異なることを示すことで、当該画像が人工物メトリクスにおける特徴情報として利用できる可能性があることを示す。

はじめに、QR コードが焼き付けられた 3 枚の皿について、励起光の出力を固定 (400 mA) して撮影することで図 19 に示す QR コードの画像を得る。

次に、図 20 に示すように QR コードの領域 A と B にフォーカスし、図 19 で示したそれぞれの画像についてヒストグラムを算出する (図 21, 図 22 参照)。



図 20 ヒストグラムを算出する領域
Fig. 20 The area to calculate histogram.

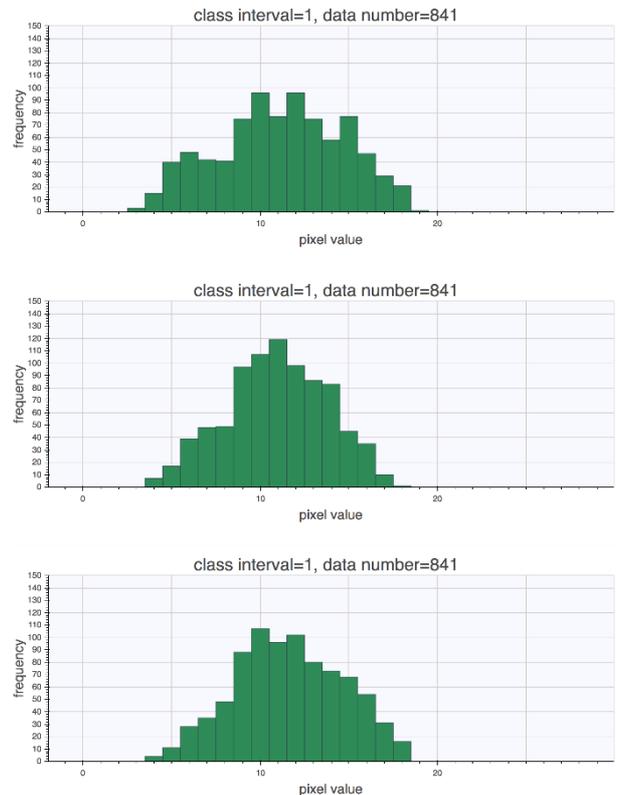


図 21 領域 A のヒストグラム (上: 皿 (1), 中: 皿 (2), 下: 皿 (3))
Fig. 21 The histogram of area A (Top: plate (1), Center: plate (2), Bottom: plate (3)).

ヒストグラムを算出した理由は、それぞれの画像に違いがあることを視覚的に分かりやすくすることである。なお、今回は参考までに、上記 2 つの領域からヒストグラムを算出したが、これらの領域に限定するものではない (QR コード全体、または当該コード内の任意の領域からヒストグラムを算出しても差し支えない)。なお、ヒストグラムは特徴情報が保持されている原画像から算出されているため、「同一の QR コードが焼き付けられた 3 枚の皿から得られる画素値のヒストグラムが明確に異なる」、という結果に影響を及ぼすことはない。

ヒストグラムを比較すると、皿ごとに異なることが分かる。これは、QR コードの焼き付け時にガラス蛍光体粒子の大きさや厚さが自然偶発的に決定され、これらが画素ごとの明暗の違いとして表現されるためである。

次に著者らは、1.5 節で述べたように、観測される 2 次元コードの赤外線画像が観測点によって異なること (つま

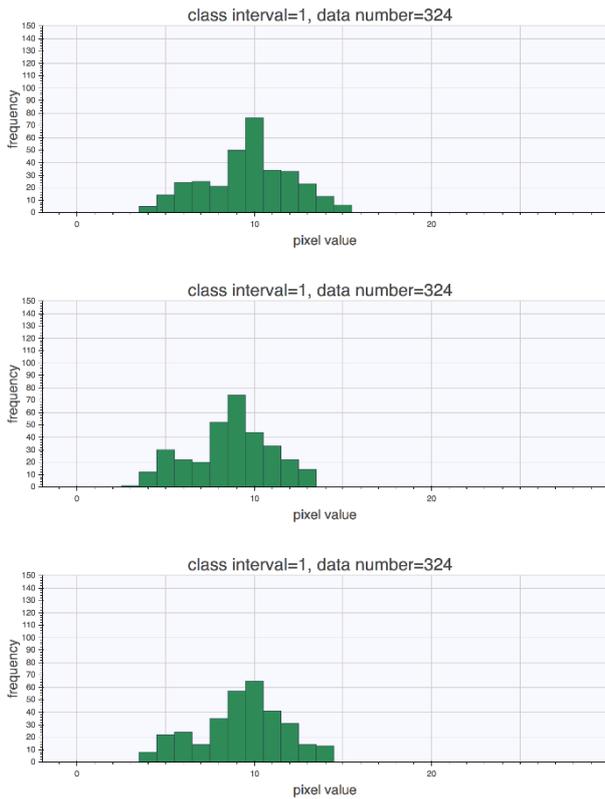


図 22 領域 B のヒストグラム (上: 皿 (1), 中: 皿 (2), 下: 皿 (3))
 Fig. 22 The histogram of area B (Top: plate (1), Center: plate (2), Bottom: plate (3)).

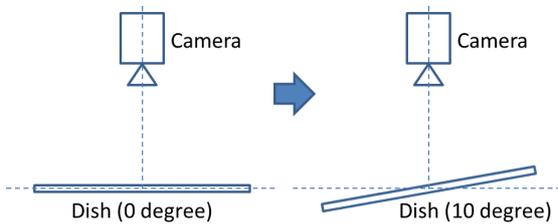


図 23 QR コードの撮影 (角度 10 度)
 Fig. 23 Taking IR image of QR code from oblique direction.



図 24 QR コードの画像比較 (左: 0 度, 右: 10 度)
 Fig. 24 Comparison of QR code images (Left: 0 degree, Right: 10 degree).

り, QR コードの特定の部分に注目したときに, 観測点ごとに異なる発光強度が観測されることを確かめるために, 図 23 に示すような方法で QR コードの画像を 1 枚ずつ撮影したあと, QR コード部分のヒストグラムを算出した. 図 24 に QR コードの画像を, 図 25 にヒストグラムを示す. 両者には, 明らかな違いがあることが分かる.

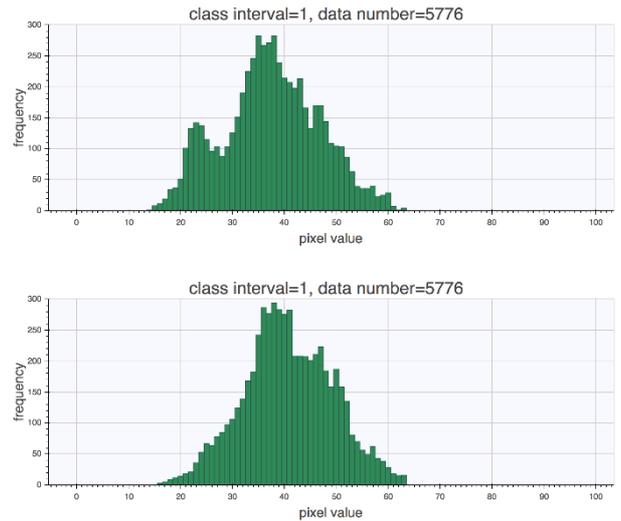


図 25 ヒストグラムの比較 (上: 0 度, 下: 10 度)
 Fig. 25 Comparison of histogram (Top: 0 degree, Bottom: 10 degree).

これらのことから, 撮影によって得られた QR コード画像は特徴情報としても利用できる可能性が高く, 提案システムは要件 4 を充足しているといえる.

5.2 撮影条件の変化への対応

前節では, 撮影によって得られた「QR コード画像」が特徴情報として利用できる可能性があることを証明したが, 画像から得られるヒストグラムはノイズや撮影条件などの影響を受けやすいため, 類似度判定のための情報としては適切ではない.

このため著者らは, 撮影環境が多少変化したとしても, 安定して画像の類似度判定を行うための手法として, 位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) による画像マッチング [10] の採用を検討している. 当該手法は, 登録画像と入力画像との間で角度補正, 位置ずれ補正, 共通領域の抽出を行ったあと, 相関度合いを計算して類似度を算出するものであり, 従来のアルゴリズムよりも撮影環境の変化に対してロバストであることが知られている (これまでにバイオメトリクス (指紋認証, 虹彩認証, 掌紋認証, 顔認証, 歯科 X 線写真認証) で応用されている [11]).

著者らは, 当該手法の有効性を確認するために, 基礎的な実験を行った. その内容と結果を以下に示す.

- (1) 皿 1 について, 撮影条件を変える前 (手動で平行移動を加える前) の QR コード画像 1 枚 (図 26 左側を参照) と, 当該条件を変えた後の QR コード画像 1 枚 (図 26 右側を参照) を使い, 位相限定相関法を使って両者の類似度を算出した. その結果, 2 つの画像からは高い類似度 (87.6) が算出された. 同様のことを皿 2 と皿 3 について実施したところ, 類似度はそれぞれ 89.0, 90.5 となり, 同様に高い値が算出された (表 1 を参照).

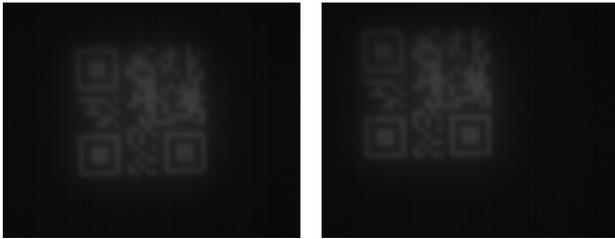


図 26 QR コードの画像比較 (1)
Fig. 26 Comparison of QR code images.

表 1 類似度の比較
Table 1 Comparison of similarity.

		平行移動後		
		Ⅲ 1	Ⅲ 2	Ⅲ 3
平行移動前	Ⅲ 1	87.6	77.0	79.0
	Ⅲ 2	77.0	89.0	81.9
	Ⅲ 3	79.0	81.9	90.5

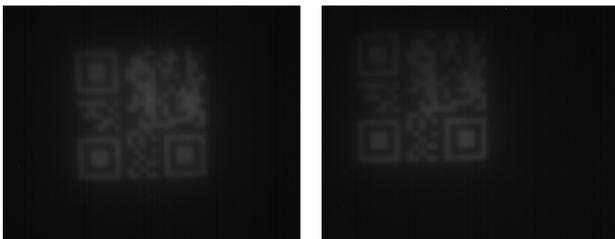


図 27 QR コードの画像比較 (2)
Fig. 27 Comparison of QR code images.

(2) 手で平行移動を加える前の QR コード画像 (Ⅲ 1) 1 枚 (図 27 左側を参照) と、当該移動を加えた後の QR コード画像 (Ⅲ 2) 1 枚 (図 27 右側を参照) を使い、位相限定相関法を使って両者の類似度を算出した。その結果、2つの画像からは低い類似度 (77.0) が算出された。同様のことをⅢ 3 について実施したところ、類似度は 79.0 となり、同様に低い値が算出された (表 1 を参照)。

基礎的な実験ではあるものの、以上のことから、位相限定相関法は撮影環境の変化に対してロバストであり、2つの画像の類似度を算出するための有望な手法であるといえる。今後我々は、より多くの画像を用いて同手法の有効性を検証していく予定である。

5.3 転写紙の製造コスト

今回試作した転写紙は、(1) ガラス蛍光体の生成 (1 kg)、(2) インクの作製 (ガラス蛍光体の粉碎と微粒粉末化、ピヒクルとの混合)、(3) スクリーン印刷用の版の作成、(4) 転写紙への印刷、という 4つのプロセスを経て製造された。

転写紙 50 枚のサンプル製造にかかったコストは 441,129

円であり、内訳は (1) が 333,129 円、(2) から (4) が 108,000 円であった。転写紙 1 枚あたりに換算すると 8,822 円であるが、実運用では大量製造が見込まれるため、上記の金額よりも安く生成できると考えてよい。ちなみに、図柄が印刷された陶磁器用の転写紙 1 枚あたりの販売価格を著者らが調査をしたところ 200 円~600 円前後であり、おおむねこの価格帯に収まるものと考えられる。

参考までに、転写紙 1 枚に含まれるガラス蛍光体の価格を算出してみる。著者らは、転写紙 1 枚を印刷するために必要なガラス蛍光体の量を計測していない。このため、QR コードを印刷したサイズである 10.5 mm 四方にガラス蛍光体が一様に印刷され、その厚さが図柄の厚みと同じ 10 μm になったと仮定する。

図 7 に示すガラス蛍光体 (50 mm 四方、厚さ 3 mm) の重さは 22 g であるため、10.5 mm 四方、厚さ 10 μm におけるガラス蛍光体の重さは 15.4×10^{-3} g となる。このため、転写紙 1 枚あたりのガラス蛍光体の価格は 5.13 円である。実際には、転写紙と同様にガラス蛍光体も大量生産が見込まれるため、転写紙 1 枚あたりのガラス蛍光体の価格は、上記の金額よりも安くなると考えられる。

5.4 インクジェット印刷の活用と課題

本節では、陶磁器への図柄の焼き付けを目的として研究されているインクジェット印刷 [12] を紹介し、その活用可能性と課題について述べる。

5.4.1 オンデマンド印刷

本論文で紹介した、転写紙を用いた図柄の焼き付け方法は、同じ QR コードを持つ製品を大量生産するのに適しているが、転写紙に QR コードを印刷するための版を製造する必要がある。一方、インクジェット印刷は大量生産には適していないが製版プロセスがないため、QR コードを焼き付ける製品の数が少ないときに有利である。

オンデマンド印刷とは、「要求があり次第、迅速に印刷する」という意味であるが、インクジェット印刷には上記のような柔軟性があることから、作家や窯元のニーズに応じて製品ごとに異なる QR コードを焼き付けることが可能になると考えられる。

5.4.2 より厚みの薄い QR コードの印刷

文献 [12] では、ガラス粉体とアルコール系の溶剤を混合させたインク (重量比 10% : 90%) を生成し、シェアモードタイプピエゾ式ノズルのインクジェット印刷機を用いて撥水加工されたガラス基板にパターン印刷を行ったあと、基板を 700 度で 10 分焼成した結果が示されている。それによると、厚さ約 0.1 μm、幅約 0.12 mm のパターンを描くことができている。これは、転写紙による印刷で得られる厚さの 100 分の 1 である。

ガラス粉体の重量比は低いものの、この結果から、インクジェット印刷により QR コードの厚みを大幅に削減でき

る可能性が高いことが分かる。

5.4.3 課題（ガラス蛍光体粉末の沈降）

文献 [12] では、インクに含まれるガラス紛体の沈降試験を行っており、紛体（平均粒子径約 $1\mu\text{m}$ ）に表面処理（ステアリン酸処理）を施すことでガラス紛体と溶剤との分離を抑えることに成功している。

著者が試作したインクはスクリーン印刷用ではあるが、インクに占めるガラス蛍光体の割合は文献 [12] よりも多いため、同じ割合でインクジェット用のインクを作成したときに、沈降による分離が見られる可能性がある。このため、割合を調整したり、表面処理の方法を変更したりするなど、沈降による分離を抑える方法を検討する必要がある。

6. おわりに

6.1 サマリー

本論文では、窯元や作家によって日々製造される有価陶磁器製品について、製造プロセスにおいて個々の製品に不可視な 2 次元コードを焼き付ける方法と、当該製品から情報を非接触で抽出する方法を提案した。

前者は、スクリーン印刷と転写紙を使用した図柄の焼き付け技術の応用である。はじめに、透明なガラス蛍光体を含むインクを使って転写紙に QR コードを印刷する。次に、転写紙の樹脂層を陶土層と釉薬層との間に配置してから焼成することで実現できる。

後者は、QR コードに含まれるガラス蛍光体による近赤外線発光の様子を赤外線カメラで撮影したあと、得られた画像を処理することで実現できる。

著者らは、ガラス蛍光体が持つ薄い青色が、釉薬や絵の具がもたらす色に影響を与えないこと、製品に焼き付けられた QR コードが視認困難であること、および、撮影によって取得された QR コード画像から文字列を抽出できることを実験により証明した。今回使用した QR コードに格納できる英数字は最大 25 文字であるが、Web サーバと短縮 URL の活用により、製品に関するすべての情報をインターネット経由で閲覧することが可能である。

考察では、提案手法が 4 つの要件を充足していること、転写紙の製造コストがリーズナブルであることを示した。また、インクジェット印刷を用いることにより QR コードの厚みを大幅に削減できる可能性があること、製品ごとに異なる QR コードをオンデマンドで焼き付けられる可能性があることを示した。

6.2 今後の取り組み

転写紙を用いた方法により、著者らのアイデアの実現可能性が高いことが証明されたため、今後は、インクジェット印刷を用いて QR コードをオンデマンド印刷する方法について研究を行う。具体的には、焼成後に形成される QR コードと釉薬層の厚さの低減、QR コードに格納する情報

量の増量と誤り訂正率の抑制、ガラス蛍光体粉末の沈降によるインクの分離の抑制があげられる。また、撮影装置の低価格化を図るために、LED 光源を使用した光源の開発を行う。

謝辞 鳴海製陶株式会社・野崎哲様には、転写紙の印刷と焼成実験にご協力をいただいた。岐阜県セラミックス研究所・安達直己博士、茨木靖浩博士、倉知一正研究開発部長には、インクジェット技術に関するディスカッションにご協力をいただいた。ここに謹んで感謝申し上げる。なお、この研究の一部は、公益財団法人・倉田記念日立科学技術財団の支援を受けた。

参考文献

- [1] サンリツ服部美術館学芸部（編）：サンリツ服部美術館所蔵名品聚，pp.10-12 (June 1995).
- [2] ビンチク・モニカ，前崎信也：日本工芸データベース—在外コレクション所蔵作品を中心とする画像データベース構築について，情報処理学会研究報告，pp.3-4 (May 2011).
- [3] 藤川真樹，森安研吾，小田史彦，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 (2014).
- [4] 林亜希美，尾石友弘：絵具の活用技術に関する研究—強化磁器の強度に及ぼす下絵付の影響，岐阜県セラミックス研究所・平成 20 年度報告書，pp.43-44 (2009).
- [5] 新妻直人，大屋秀信，山内正好：塗膜形成方法，透明導電膜付き基材，デバイス及び電子機器，特許出願番号 2014-30842，特許公開番号 2015-155086 (2015).
- [6] 小野智司，森永健介，中山 茂：最適化アルゴリズムを用いたアニメーション QR コードの作成，芸術科学会論文誌，Vol.8, No.1, pp.25-34 (2009).
- [7] 伊藤拓也，川上雄大，澤井陽輔，小野智司，川崎 洋，中山茂：局所的な歪みを含む QR コードの復号方式に関する研究—位置検出パターンの発見方法について，情報処理学会研究報告，pp.1234-1240 (2012).
- [8] 神谷健一：Google ドキュメントによるアンケートフォームと短縮 URL：簡易オンライン出席カード/質問カードの作成，e-Learning 教育研究，Vol.5, pp.31-34 (2010).
- [9] 小枝正直，上田悦子，中村恭之：OpenCV による画像処理入門（KS 情報科学専門書）(July 2014).
- [10] 伊藤康一，青木孝文，中島 寛，小林孝次，樋口龍雄：位相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).
- [11] 青木孝文，伊藤康一，本間尚文：位相情報に基づく画像マッチング技術とその応用展開—3D ビジョンからバイオメトリクスまで，電子情報通信学会誌，Vol.90, No.8, pp.680-685 (2007).
- [12] 横山久範，柘植英明，安達直己，尾畑成造：ガラス紛体を用いたインクジェット印刷試験，岐阜県セラミックス研究所・平成 19 年度報告書，pp.12-15 (2008).



藤川 真樹 (正会員)

1996年徳島大学工学部知能情報工学科卒業。1998年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2004年中央大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1998年総合警備保障株式会社入社。2016年より工学院大学准教授。セキュリティとセーフティに関する研究に従事。IEEE会員。日本セキュリティ・マネジメント学会賞(現、論文賞)、情報処理学会論文賞等受賞。



西村 英伍

2010年九州大学芸術工学部工業設計学科卒業。2012年同大学大学院芸術工学府芸術工学専攻博士前期課程修了。2012年サイエンスパーク株式会社入社。中小規模システムの受託開発に従事。



湊 真悟

1997年名古屋大学工学部材料機能工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2002年同大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。特許庁審査官、名古屋大学大学院工学研究科助教を経て、2013年度より青山学院大学理工学部准教授。ガラス蛍光体や化合物半導体量子構造の作製および光デバイス化に関する研究に従事。応用物理学会、日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本結晶成長学会各会員。