

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04141

研究課題名（和文）3Dプリンタ造形物への情報埋め込み技術の研究

研究課題名（英文）Technique of embedding information inside 3D-printed objects

研究代表者

鳥井 秀幸（Torii, Hideyuki）

神奈川工科大学・情報学部・教授

研究者番号：20343642

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,880,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、3Dプリンタで造形する実物体の内部にデジタル情報を造形と同時に埋め込む技術、および埋め込んだ情報を非破壊で読み出す技術の実現を目的とし、以下成果を得た。1) 埋め込み情報の読み出しを容易にするため、近赤外蛍光色素を配合した樹脂で埋め込みパターンを形成し高コントラストでパターンを検出する方法を確立した。また、検出パターン画像に敵対的生成ネットワークを適用することで高精度の情報読み出しを達成した。2) 埋め込みパターンに磁性材配合樹脂を用いる方法を検討し、埋め込み情報を書き換えを可能にする方法の実現性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3Dプリンタが普及すると、消費者はネットを介して商品の設計データを購入すれば、これを3Dプリンタに入力するだけで自宅やオフィスで所望の商品を簡単に製造して入手可能となる。このため、3Dプリンタは製造業や物流の世界を変革するといわれている。本研究が目指す、3Dプリンタで製造されるものの中にデジタル情報を埋め込む技術が実現されれば、IoTなどでの利用も可能になり、3Dプリンタ造形物の活用範囲が飛躍的に拡大して社会に大きなインパクトを与えることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to achieve the technology of embedding digital information into the interior of physical objects created by a 3D printer, simultaneously with the fabrication process, and the technology to read the embedded information non-destructively. Near-infrared fluorescent dyes were used as embedding materials to make the embedding patterns detectable with high contrast, and the desired results were obtained. Additionally, we achieved a practical reading accuracy by applying a generative adversarial network to the reading images. Furthermore, we investigated the use of magnetic materials in the embedding patterns as a method to enable rewriting of the embedded information and demonstrated its feasibility.

研究分野：情報通信

キーワード：3Dプリンタ デジタルファブリケーション 情報ハイディング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初においては、3D プリンティングがデジタル技術と融合する将来のものづくり技術として注目を集めており、様々な材料に対応した各種プリンティング技術の研究開発が盛んであった。さらに、3D プリンタ造形物の高付加価値化として造形物内に情報を埋め込む研究が世界のトップレベルの研究機関などでこの分野での最先端研究として始まりつつあった。しかし、それらの研究は3D プリンタで本体をいくつかの部品に分けて造形し、最終組み立て工程で情報を含む薄い板を内部に組み込む方法や、造形中に造形を一時中断して IC タグを組み込む方法など、いずれも情報を埋め込むためのパタンを別部品として本体に組み込むものであり、データさえ入手すれば誰もが簡単にモノを作れるという3D プリンタの特長が生かされた方法ではなかった。

### 2. 研究の目的

本研究は、上記の従来の研究とは異なり、余分な工程や部品を必要とせず、通常のプリンタと同様に単にデータを入力するだけで最終造形物が出力されるという3D プリンタの特徴を保ったまま、造形物内に情報を不可視に埋め込む技術と埋め込まれた情報を外部から非破壊に読み出す技術を実現することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では普及タイプである熱溶解積層方式の3D プリンタを対象とした。樹脂で造形される造形物内に情報を埋め込むため、本体の造形プロセスの中で造形物内に情報を表現するための微細なパタンも同時に形成した。本研究では、埋め込み情報の高精度の読み出しと、埋め込み情報の書き換え可能を実現するため下記の2種類の材料による内部パタン形成と、そのパタンからの情報読み出しを検討した。

(1) 蛍光色素配合樹脂による読み出しパタンの高コントラスト化と敵対的生成ネットワークによる高精度化

内部のパタン領域を微量の近赤外蛍光色素を配合した樹脂で形成する方法を検討した。蛍光色素は、近赤外光が照射されると励起されて蛍光を発する。この波長は照射光の波長と異なるので、適当な光学フィルタの使用により内部パタンから発した光のみカメラに取り込むことができる。このため、高S/N、高コントラストで内部パタンの撮像が期待できる。PLA樹脂に1%未満の微量の色素を配合した樹脂を用いてサンプルを試作して、内部パタンのコントラストを評価した。

一般の造形物で表面が湾曲した形状など、表面が平坦でない場合は内部パタンを表面から深い位置に埋め込む必要がある。近赤外線は樹脂を透過するが、安価な赤外線カメラで用いられる近赤外線は波長が短く、樹脂透過中に散乱を受ける。このためパタンが深い位置にある場合、外部の近赤外線カメラで撮像するとパタン撮像画像がぼけて正確な読み出しが困難となる。本研究ではディープラーニングを用い、撮像画像からぼける前の画像を予測することにより読み出しの高精度化を試みた。ディープラーニングとしてオートエンコーダと pix2pix 型 GAN (Generative Adversarial Network) を用いた。埋め込みパタンとしてQRコードを用い、読み出したコードの認識率により本方法を評価した。これらのモデルの学習はランダム形状の3000個の造形物モデルを用いてシミュレーションで生成したQRコードのぼけ画像3000枚により実施した。

(2) メモリ材料による書き換え可能な情報埋め込み技術

PLA樹脂で造形される造形物内部に、鉄粒子を配合したPLA樹脂による微細なメモリ領域を多数形成し、領域ごとに外部から磁界を印加して磁化し、さらに領域ごとに磁化の方向を2値情報として検出することにより、3D プリンタ造形物内部に書き換え可能に情報を埋め込む方法を検討した。本研究では実験により試料を作成して基本的事項の確認を行うとともに本方法実現のための諸条件を明らかにした。図1に試作した試料の形状を示す。メモリ領域のサイズW、間隔S、厚みT、表面からの深さDは実験パラメータとした。メモリ領域は鉄粒子を含むがPLA樹脂に配合されているため他の鉄粒子を含まない領域と同一温度で形成でき、このため、試料全体を連続した1回のプロセスで形成した。情報の書き込みは直径1mm棒状の磁石(表面磁束密度:140mT)の一端を、各メモリ領域上部の造形物表面に接触させてメモリ領域を磁化することにより行った。

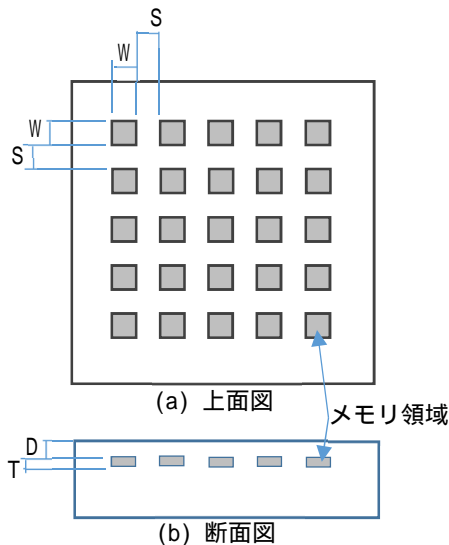


図1 実験で試作した試料

#### 4. 研究成果

(1) 蛍光色素配合による読み出しパタンの高コントラスト化とディープラーニングによる読み出しの高精度化

図2に蛍光色素配合による読み出しパタンの例を示す。図2(a)は蛍光色素配合樹脂で形成されたパタンが埋め込まれた試料の近赤外線撮像画像である。図2(b)は比較参照のため撮像した金属配合樹脂パタンが埋め込まれた試料の近赤外線撮像画像である。図2の両画像の比較からわずかな蛍光樹脂を含有させるだけで、高コントラストでノイズのない内部パタン画像が撮像できることがわかる。

図3は、それぞれ実験で用いたQRコードパタン(a)、このパタンを表面が湾曲した造形物に埋め込み、これを外部から近赤外線カメラで撮像した画像をシミュレーションにより生成した画像(b)、さらにこの撮像画像からディープラーニングにより原画像を予測した画像(c)(d)の例である。(b)に示す画像は、パタンと表面までの距離が最長で7mm、最短で3mmとなる湾曲した表面の造形物に埋め込まれた場合の例である。図3から、撮像画像のぼけが大きい場合でも、オートエンコーダやGANなどのディープラーニングにより原画像に近い画像を復元できることがわかった。表面からパタンまでの距離条件を上記に設定し、局面はランダムに生成した100個の試料についてQRコードの認識率を評価した結果、撮像画像で直接認識した場合の認識率は3%以下であったが、予測画像ではオートエンコーダ、GANいずれで予測しても100%であった。

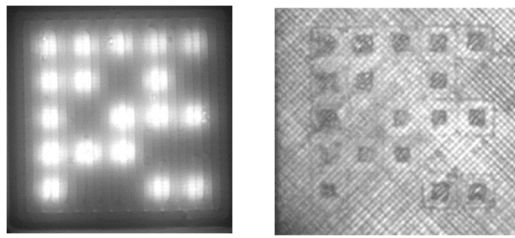
以上の結果より、蛍光樹脂を配合した樹脂で内部パタンを形成し、造形物の表面が平坦でない一般的な造形物でパタンの撮像画像から直接読み取りが困難な場合においてもディープラーニングにより正確な読み取りが可能であることを確認し、本方法の実用性を実証した。

(2) メモリ材料による書き換え可能な情報埋め込み技術

図4に本方法の実現性を示す実験結果の一例を示す。図4の結果は、図1における各パラメータが、 $S=1\text{mm}$ 、 $W=1\text{mm}$ 、 $D=1\text{mm}$ 、 $T=2\text{mm}$ のときの結果である。図4ではメモリ領域間のスペースは省略している。図4の左側の図はいずれも各メモリ領域に外部から磁界を印加して磁化を試みた際の印加磁界の方向、すなわち磁石のN極、S極のどちらをメモリ領域上部の造形物表面に接触させたかを示す。したがって、磁化された場合はその上部面では磁界の印加時と反対の極性が検出される。図4における右側の図は、磁化後に各メモリ領域上部における磁化の方向と磁束密度の測定結果である。

図4に示す結果から、印加した磁界によりメモリ領域が磁化されること、および各メモリ領域の磁化の方向を外部から検出できることが確認できた。また、図4(a)からは、周囲を囲む全てのメモリ領域の磁化方向が逆の場合でも、書き込まれた通りに磁化の方向を正しく検出できることを確認した。図5(b)は磁化方向をランダムに配置したときの検出結果を示す。この場合も全ての領域で磁化の方向は書き込まれた通りに正しく検出できることが確認できた。

以上の結果から、磁性材として鉄粒子を配合したPLAで3Dプリンタ造形物の内部にメモリ領域を生成することにより書き換え可能に造形物内部に情報を埋め込み、また埋め込んだ情報を正確に読み出すことが可能であることを明らかにし、本方法の実現性を実証した。



(a) 蛍光樹脂含有パターン (b) 金属含有パターン

図 2 埋め込みパタンの近赤外線撮像画像



(a) 原画像

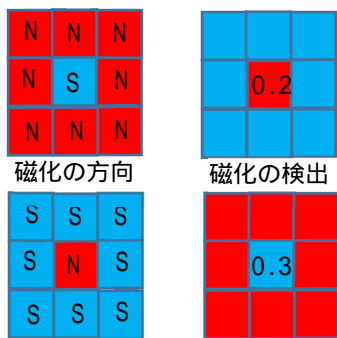
(b) 撮像画像



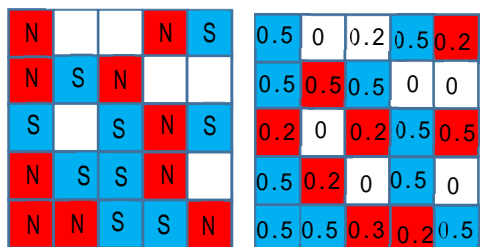
(c) オートエンコーダによる予測画像

(d) GAN による予測画像

図 3 ディープラーニングによる原画像の予測



(a) 周辺磁化の影響評価の結果



(b) ランダム配置における読み出し評価

図 4 メモリ材料による書き換え可能性評価実験の結果

( :S、 :N、 :磁化無し、単位 : Gauss )

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Piyarat Silapasuphakornwong, Hideyuki Torii, Masahiro Suzuki, and Kazutake Uehira
2. 発表標題 3D Printing Technique to make Information inside an Object Rewritable: Effect of Amount of Filament on Readability
3. 学会等名 NIP & Digital Fabrication Conference, Printing for Fabrication Online 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Piyarat Silapasuphakornwong, Hideyuki Torii, Kazutake Uehira, and Siravich Chandenduang
2. 発表標題 Embedding Information in 3D Printed Objects with Curved Surfaces Using Near Infrared Fluorescent Dye
3. 学会等名 MMEDIA 2020: The Twelfth International Conferences on Advances in Multimedia (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Piyarat Silapasuphakornwong, Hideyuki Torii, Masahiro Suzuki, and Kazutake Uehira
2. 発表標題 3D Printing Technique That Can Record Information Inside An Object As Rewritable
3. 学会等名 NIP & Digital Fabrication Conference, Printing for Fabrication 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ピヤラット シラパスパコンウォン、鈴木 雅洋、鳥井 秀幸、上平 員丈
2. 発表標題 磁性材配合樹脂による3Dプリンタ造形物内への書き換え可能な情報記録
3. 学会等名 Conference on 4D and Functional Fabrication 2019: New Paradigm over 3D Technology
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Piyarat Silapasuphakornwong , Hideyuki Torii , Masahiro Suzuki , Kazutake Uehira
2. 発表標題 Effects of embedded depth of internal printed ferromagnetic cell on data clarity of rewritable 3D objects
3. 学会等名 NIP & Digital Fabrication Conference, Printing for Fabrication Online 2021 ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chavin Peansuwan , Worawut Pitjitlekha , Anuwat Sinthawanon , Maethas Cheancharadpong , Thanakrit Chanthaworn , Kingkarn Sookhnaphibarn , Piyarat Silapasuphakornwong , Masahiro Suzuki , Hideyuki Torii , Kazutake Uehira
2. 発表標題 A mobile scanner application for embedding data inside 3D fabricated objects
3. 学会等名 2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki Torii , Masahiro Suzuki , Kazutake Uehira
2. 発表標題 High-accuracy reading technology for QR codes embedded in 3D printed object using an autoencoder
3. 学会等名 2023 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahiro Suzuki , Hideyuki Torii , Kazutake Uehira
2. 発表標題 GAN technique for reading QR code embedded in 3D printed object
3. 学会等名 The 2023 5th International Conference on Image, Video and Signal Processing ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ピヤラット シラパスパコンウォン, 鈴木雅洋, 鳥井秀幸, 上平員丈
2. 発表標題 磁性材配合樹脂による3Dプリンター造形物内への情報記録における情報記録領域の体積の効果
3. 学会等名 Conference on 4D and Functional Fabrication 2020: New Paradigm over 3D Technology
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ピヤラット シラパスパコンウォン, 鈴木雅洋, 鳥井秀幸, 上平員丈
2. 発表標題 磁性材配合樹脂による3Dプリンター造形物内への書き換え可能な情報埋め込み
3. 学会等名 第18回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Piyarat Silapasuphakornwong, Masahiro Suzuki, Hideyuki Torii, Kazutake Uehira
2. 発表標題 Writing and reading information embedded inside 3-D printed objects by utilizing resin blended with magnetic material
3. 学会等名 Imaging Conference Japan 2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	上平 員丈  (Uehira Kazutake)  (50339892)	神奈川工科大学・情報学部・教授    (32714)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	鈴木 雅洋  (Suzuki Masahiro)  (30397046)	聖泉大学・人間学部・准教授    (34203)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関