

令和元年6月20日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02707

研究課題名(和文) デジタルファブリケーションにおける著作権保護技術の研究

研究課題名(英文) Technique of Copyright Protection in Digital Fabrication

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) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：3Dコンテンツデータから実物体を造形するデジタルファブリケーションにおいて、データの違法コピーなどによる不正な造形を防ぎ、コンテンツデータの著作権を保護する技術を研究して、次の成果を得た。(a) 微細構造化による実物体への情報埋め込み技術を確立した。(b) データの攻撃耐性、秘匿性を高める方法を明らかにした。(c) 情報読み出し法を確立した。(d) シミュレーションによる構造の最適化、埋め込み可能な情報量を明らかにした。(e) コンテンツと埋め込み情報とのデータ合成ソフトウェアを作成した。(f) 樹脂以外の材料での実現性を明らかにした。(g) 近赤外蛍光色素を含有する樹脂を用いた方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デジタルファブリケーションにおけるオリジナルコンテンツの著作権保護技術を提供できるようになる。従来、デジタルファブリケーションでコンテンツデータを不正に入手して違法に製造された実物体に対して、著作権を保護する方法はなかったが、本方法によれば実物体中に著作権情報を含ませるので、コンテンツデータの不正な利用や流通を抑制できる効果がある。デジタルファブリケーションを発展させる上でコンテンツの著作権問題は避けて通れない課題であり、本技術はこの課題を解決できるため、デジタルファブリケーションの普及・発展に貢献するという大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：We studied a new technique for copyright protection of digital data for digital fabrication in which real objects are fabricated with 3-D printers and digital data. This technique can prevent illegal fabrication using illegal copy of digital data, and can protect copyright of digital data. The achievements were as follows. (a) We established the technique of embedding information inside 3-D printed objects by constructing inside the objects. (b) We clarified the method of enhancing the attack resistance and confidentiality. (c) We established the method of reading information. (d) We clarified the optimal structure and maximum information by using simulation. (e) We created the software of merging original data and copyright information. (f) We confirmed that the technique was applicable to the non-resin materials. (g) We established the method using resin containing near-infrared fluorescent dye.

研究分野：情報通信、情報セキュリティ

キーワード：デジタルファブリケーション 3Dプリンタ アディティブマニュファクチャリング 情報ハイディング
電子透かし コンテンツ流通・管理 著作権

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、3D-CADなどで生成されたデジタルデータから3Dプリンタなどにより実物体を造形するデジタルファブリケーションが注目されている。最近では、個人でも購入可能な安価な3Dプリンタが発売されており、今後、3Dプリンタはオフィスや学校から始まり、やがては家庭にも普及していくと予想される。3Dプリンタが普及すれば、ユーザは従来のように「もの」としての商品を購入するのではなく、インターネットなどを介して商品を製造するためのデジタルデータを購入し、自宅で「もの」としての商品を製造できることになる。従来のように「もの」を購入する場合は「もの」に価値があるが、デジタルファブリケーションでは、ユーザが最終的にほしいのは「もの」であっても、価値を有するのは「もの」を作るためのデジタルデータである。そして、デジタルデータは簡単にコピーでき、入手すれば3Dプリンタでだれでも簡単に「もの」をいくつでも作れるので、従来のデジタルコンテンツの場合と同様に違法コピーや不正使用を防止するための著作権保護技術が不可欠となる。

従来、デジタルコンテンツの著作権を保護する技術として、電子透かし技術をはじめ種々の技術が開発されているが、いずれも不正が疑われるデジタルコンテンツに対し、デジタル処理を施して不正か否かを判定するものであり、デジタルコンテンツの形態でユーザが利用することを前提とした技術である。これに対して、デジタルファブリケーションでは、デジタルデータを購入するものの、ユーザが最終的に入手するのは、そのデータから造形した実物体であるので、従来のデジタルコンテンツ用の技術を適用することはできない。すなわち、デジタルコンテンツから最終出力として実物体が製造される場合のデジタルコンテンツの著作権保護技術は未開拓であり、新たにデジタルファブリケーション用の著作権保護技術の開発が必要となっている。筆者らは、これまでに絵画などの肖像価値の高い実物体が違法に撮影されて、撮影画像が不正に利用されることを防止できる光透かし技術の研究を進めてきた。これは、実物体からデジタルコンテンツを作成する際に、元の実物体には含まれない著作権情報を光学的手段を用いてデジタルコンテンツの中に埋め込む技術であった。本研究では、この光透かし技術の発想を逆転させて、デジタルコンテンツから実物体を作成する際に、何らかの方法を用いて実物体中に著作権情報を埋め込もうと着想した。すなわち、デジタルコンテンツに著作権情報を含ませておき、このコンテンツから実物体が造形される際に、データに含まれている著作権情報により実物体内部を構造化する。そして、この内部構造が情報を表現するように形成ことにより実物体中に著作権情報を埋め込む。そして、必要に応じて、外部から非破壊で内部の構造を解析して、埋め込まれた著作権情報を読み出すことにより、従来の電子透かしが埋め込まれたデジタルコンテンツの場合と同様に実物体が違法に造形されたものか判定する。

本提案の代替法として3Dプリンタに不正な造形ができないようにする機能を持たせる方法も考えられるが、これをすり抜ける方法が多数現れることは想像に難しくなく、本研究では電子透かしの考え方と同様に、生成された商品において不正を検出できることが不可欠との立場をとる。

2. 研究の目的

(1) 基本技術の実現性の明確化

本技術の実現のカギは、実物体中に情報を埋め込み、これを非破壊で読み出すという二つの基本プロセスを同時に可能にする方法、条件が存在するかにある。そこで、本研究では、実物体内部を微細構造化して情報を埋め込む方法において、提案済みの構造も含め実現可能な構造を明らかにする。また、明らかにした微細構造について、その構造が表現する情報を読み出す方法を明らかにする。これには内部構造を外部から非破壊で解析する方法が必要となるため、サーモグラフィー、近赤外光を用いる方法について、本方法への適用性を明らかにする。

(2) データの攻撃耐性、秘匿性を高める方法の明確化

電子透かしと同様に埋め込まれる情報について、攻撃耐性や秘匿性が求められるため、データの状態において、埋め込まれた情報が削除できないデータ構造を明らかにし、実物体の造形時に微細構造に気づかれない不可視性の高い微細構造化技術を明らかにする。

(3) 埋め込み可能な情報量の明確化

明らかにした情報の埋め込み法、読み出し法を用いた場合の単位体積当たりに埋め込み可能な情報量を明らかにする。

(4) 適用可能な材料の明確化

本研究では、主としてプラスチック系材料を用いるが、金属などプラスチック系以外の複数の材料についても適用可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 微細構造化による実物体への情報埋め込み技術の検討

デジタルファブリケーションにおいて実物体を造形する方法は様々であり、方法ごとに使用可能な材料は異なる。最終的な目標はどのような材料にでも適用できる汎用性の高い技術とす

るが、本研究では、特に著作権問題の顕在化が最も懸念される普及型 3D プリンタで使用されるプラスチック系材料を対象とする。

実物体の内部を微細構造化して情報表現する方法として、実物体中に母体とは物理的性質の異なる多数の微小領域を配置し、この配置形態で情報表現を行う方法を検討する。この方法として、配置形態が直接文字などの情報を表現する方法と、一定間隔で設定された基準位置において、この微小領域が存在するか否かによって 2 進数列を表現し、文字情報をコード化して表現する方法を検討する。

物理的特性の異なる微小領域を形成する方法として二つの方法を検討する。第 1 の方法では、母体と同一の材料で密度を異ならせる。この最も極端な場合として微小領域を空洞とする。第 2 の方法では、微小領域を母体とは異なる材料で形成する。

(2) データの攻撃耐性、秘匿性を高める方法の検討

本技術をデジタルデータの著作権保護に応用する場合は、従来の電子透かしと同様にデータの不正利用を企む者からの攻撃に対する耐性が求められる。本研究では特に、実物体内部を構造化するためのデータと本来のコンテンツ形成のためのデータの合成において、「STL」形式などのデジタルファブリケーションにおけるデータの標準フォーマットを保ちつつ、両者が分離不可能な状態で合成される方法を検討する。

また、3D プリンタなどで実物体を造形する途中において、著作権情報を表現する微細構造が形成されていることを気付かれないようにすることも必要である。このため、微小領域も可視光領域における光学的特性を母体に近い特性となるよう形成することが望ましく、このような形成法として、母体と同一材料で密度を異ならして形成する方法についてその可能性を調べる。また、微小領域を深さ方向にはランダムな位置に形成することにより不可視性を高める方法についてもその有効性を評価する。3D プリンタでは実物体を薄い層ごとに形成するので、このような方法を用いることにより、造形中において、内部構造が形成されていること、またその構造が表現する情報を知ることは困難であるが、実物体を完全に造形した後は、上部から透視画像を撮像して平面に投影された像を見ることにより、内部構造が表現する情報を知ることができる。

本研究においては、上記二つのケースにおいて微細構造の不可視性を評価する。評価は微小領域のサイズなどをパラメータとして主観評価により行い、不可視のための条件を明らかにする。

(3) 情報読み出し法の検討

実物体内部の微細構造を外部から非破壊で解析し、その構造が表現する情報を読み出す方法として、サーモグラフィー（遠赤外線）、近赤外線を用いる方法を検討するが、このうち、サーモグラフィーを用いる方法について、プラスチック材を用いて予備検討を行い、実現性を確認したので、この方法を用いた読み出し法から本格検討を開始する。

サーモグラフィーを用いる方法では、造形する実物体の内部で表面に近い部分に熱伝導率が周囲の母体に比べ十分低い微小領域を形成する。この実物体の表面をランプ照射などで加熱すると表面温度は上昇し、表面から物体内部に向かう熱流が生じる。しかし、表面の近くに熱伝導率の低い領域があると、熱流れがこの領域によってブロックされ、その結果、表面温度が周囲に比べて高くなる。したがって、サーモグラフィーにより表面の熱分布画像を得ることにより、内部の微細領域の配置を知ることができ、情報の読み出しが可能となる。予備検討では微小領域を空洞で形成し、空洞のサイズを $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ （深さ）とした試料について微小領域の配置を検出できることを確認した。本格的検討では、微小領域の形成法、サイズ、深さ方向の位置などを実験パラメータとして情報読み出しの分解能を評価する。

近赤外線を用いる方法については、プラスチック材の中には近赤外の光に対して透過性の性質を示すものもあり、サーモグラフィーの場合と同様に表面付近の構造を非破壊で解析できる可能性がある。

(4) シミュレーションによる構造の最適化と埋め込み可能な情報量の評価

通常の 3D プリンタでは、数十ミクロンの分解能で物体を造形できるので、埋め込み情報の高密度化は読み出し系における分解能で制限されると予想される。そこで、上述のような微細構造を内部に含む物質中における、熱、光の伝播や反射を物理モデルを作ってシミュレーションを行い、これより読み出しにおける分解能を求める。シミュレーション結果が実物体を用いた実験結果と一致するように物理モデルのパラメータを調整してシミュレーションの精度を高め、高密度化に最適な構造を明らかにする。このシミュレーション結果を実物体の造形にフィードバックして、実物体を用いた実験によりシミュレーションの妥当性を確認する。そして、シミュレーションと実験の両方の結果に基づいて実物体中に埋め込み可能な情報量を明らかにする。

(5) コンテンツと埋め込み情報のデータ合成用ソフトウェアの開発

本方法を実際に用いる場合、コンテンツデータの作成時に微細構造が内部に形成されるようデータを作成すればよいが、複雑な形状のオブジェクトのコンテンツデータを作成しながら、

オブジェクト内部に所定の情報を表現する微細構造を含むデータを作成することは難しく、また、一般にコンテンツクリエイターは、本技術で必要な内部構造化についての知識や技術は備えていない。したがって、まずコンテンツデータを作成し、その後、埋め込むべき情報に基づいて内部が構造化されるようにコンテンツデータを改変するという二段階のデータ作成が適当である。そこで、既存のコンテンツデータに対し、実物体が造形されたときに内部が構造化されるように埋め込まれる情報のデータを合成するデータ合成用ソフトを開発する。

(6) プラスチック系以外の材料での実現性の評価（適用可能な材料の明確化）

本研究では、プラスチック系材料に絞って本技術の実用性を確認するが、将来に向けて本技術の拡張性を明らかにしておくため、金属など他の材料について実現性を調べる。サーモグラフィーや超音波を用いる方法は、ほとんどの材料で適用できると考えられるので、これらの方法の適用を想定して、シミュレーション技術を用いて最適な構造化が可能なデータを作成する。そして、外部の造形サービスなどを利用して実物体を造形し、実現性を実証する。

4. 研究成果

(1) 微細構造化による実物体への情報埋め込み技術の検討

上記 3(1) に記載したとおり、実物体内部を微細構造化して情報表現する方法として、実物体中に母体とは物理的性質の異なる多数の微小領域を配置して、この配置形態で情報表現を行う方法を検討した。配置形態が直接文字などの情報を表現する方法、一定間隔で設定された基準位置に微小領域が存在するか否かにより 2 進数列を表現して文字情報をコード化して表現する方法、どちらも実現可能であることを確認した。

(2) データの攻撃耐性、秘匿性を高める方法の検討

上記 3(2) に記載したとおり、実物体内部を構造化するためのデータと本来のコンテンツ形成のためのデータとの合成において、両者が分離不可能な状態で合成される方法を検討した。具体的には、微小構造を母体と同一材料で密度を異ならせて形成する方法、微小領域を深さ方向にランダムな位置に形成することにより不可視性を高める方法を検討して、微細構造の不可視性を微小領域のサイズなどをパラメータとした主観評価により評価し、不可視のための条件を明らかにした。

(3) 情報読み出し法の検討

上記 3(3) に記載したとおり、実物体内部の微細構造を外部から非破壊で解析し、その構造が表現する情報を読み出す方法として、サーモグラフィーを用いる方法、近赤外線を用いる方法を検討した。

サーモグラフィーを用いる方法では、内部に熱伝導率が異なるパターン領域を含む物質中の熱伝導をシミュレーションによって解析し、解析結果に基づいて最適なパターン形状や配置を明らかにした。そして、これにより読み出しにおける分解能の限界を明らかにした。

近赤外線を用いる方法では、プラスチック材の多くは近赤外線に対して透過性の性質を示すことから、近赤外線光源で造形物を照射すると内部に存在するパターンが近赤外線カメラで撮像できると考え、密度差を用いて内部にパターンを形成した場合と、反射率の差を用いて内部にパターンを軽視した場合とについて検討した。

密度差を用いたパターンでは、造形物を同一材料で造形する場合の方法として、造形物内部の物質密度の違いで内部にパターンを形成する方法を検討した。近赤外線はプラスチック材を透過するが、一部は吸収されることから、密度差がある場合では、高密度領域を透過する光やより多く吸収され、密度差により形成されたパターンが透過像を撮像することによって解析できた。

反射率の差を用いたパターンでは、2 ヘッドの 3D プリンタで 2 種類の材料が使用できる場合の方法として、パターン領域をそれ以外の領域よりも反射率の高い材料で形成する方法を検討した。パターン領域は、反射像では高輝度領域として、透過像では低輝度領域として現れ、どちらでも読み取りができると期待できたことから、波長が 850~1550 nm の近赤外線を用いて撮像特性の波長依存性などを調べ、また、撮像画像によるパターン解析から最適なパターンの形成条件や埋め込み可能な情報量などを明らかにした。

(4) シミュレーションによる構造の最適化、および埋め込み可能な情報量の検討

上記 3(4) に記載のとおり、微細構造を内部に含む物質中における熱や近赤外線の伝播や反射について、物理モデルを作ってシミュレーションをおこない、これまでの実験結果と合わせて評価することにより、高密度化に最適な構造、および読み出しにおける分解能を検討して、実物体中に埋め込み可能な情報量を検討した結果、20~30 bit/cm の情報の埋め込みが可能であることを明らかにした。

(5) コンテンツと埋め込み情報とのデータ合成ソフトウェアの検討

上記 3(5)に記載のとおり、既存のコンテンツデータに対して、実物体が造形されたときに内部が構造化されるように埋め込まれる情報のデータを合成する、データ合成ソフトウェアを検討して、基本仕様を設計した。

(6) 樹脂以外の材料での実現性の検討(適用可能な材料の明確化)

上記 3(6)に記載のとおり、内部の情報を表現するパターンを金属で形成する方法を検討し、実験により、設計通りにパターンの形成が可能であること、サーモグラフィーや近赤外線カメラにより外部から非破壊で内部パターンを解析できることを明らかにして本方法の実現性を確認した。

(7) 近赤外蛍光色素を微量に含有する樹脂で内部パターンを形成する方法の検討

この色素は波長_Aの近赤外線光を照射すると波長_Bの近赤外線光を発光する。パターン領域にこの色素が含有させられていればパターン自らが発光するので近赤外線カメラで撮像すると明るいパターン像が得られる。さらに、光源光と色素が発する光の波長が異なるのでフィルタにより色素から発した光のみ撮像に用いれば、光源光の造形物の表面反射によるノイズが除去でき、高コントラスト化で低ノイズの撮像が期待できる。実験結果から、予想通り高輝度で高コントラストのパターンの撮像が可能であることを確認し本方法の実現性を実証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

1. Piyarat Silapasuphakornwong, [Masahiro Suzuki](#), [Hideyuki Torii](#), [Kazutake Uehira](#), "Technique for embedding information in objects produced with 3D printer using near infrared fluorescent dye," *MMEDIA 2019: The Eleventh International Conference on Advances in Multimedia, March 24-28, 2019, Valencia, Spain*, 査読あり, 2019年, 55~58頁

2. Piyarat Silapasuphakornwong, [Masahiro Suzuki](#), Youichi Takashima, [Hideyuki Torii](#), [Kazutake Uehira](#), "New technique of embedding information inside 3-D printed objects," *Journal of Imaging Science and Technology*, 査読あり, 63巻, 1号, 2019年, 010501-1~8頁

3. [Masahiro Suzuki](#), Tomohisa Matumoto, Youichi Takashima, [Hideyuki Torii](#), [Kazutake Uehira](#), "Information hiding inside 3-D printed objects by forming high reflectance projections," *Proceedings of the International Conference on Video and Image Processing (ICVIP 2017)*, 査読あり, 2017年, 146~150頁

4. [Kazutake Uehira](#), [Masahiro Suzuki](#), Youichi Takashima, [Hideyuki Torii](#), "Technique of information hiding for 3-D printed objects with transmission images of near-infrared rays," *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2017*, 査読あり, 2017年, 87~93頁

5. [Masahiro Suzuki](#), Piyarat Silapasuphakornwong, Youichi Takashima, [Hideyuki Torii](#), [Kazutake Uehira](#), "Number of detectable gradations in X-ray photographs of cavities inside 3-D printed objects," *The IEICE Transactions on Information and Systems*, 査読あり, E100-D巻, 6号, 2017年, 1364~1367頁

6. [Masahiro Suzuki](#), Pailin Dechrueng, Soravit Techavichian, Piyarat Silapasuphakornwong, [Hideyuki Torii](#), [Kazutake Uehira](#), "Embedding information into objects fabricated with 3-D printers by forming fine cavities inside them," *Electronic Imaging: Volume 2017: Media Watermarking, Security, and Forensics 2017*, 査読あり, 2017年, 6~9頁

7. [Masahiro Suzuki](#), Piyarat Silapasuphakornwong, Youichi Takashima, [Hideyuki Torii](#), Hiroshi Unno, [Kazutake Uehira](#), "Technique for protecting copyrights of digital data for 3-D printing, and its application to low infill density objects," *Proceedings of the Eighth International Conferences on Advances in Multimedia (MMEDIA 2016)*, 査読あり, 2016年, 56~59頁

8. Ayumi Okada, Piyarat Silapasuphakornwong, [Masahiro Suzuki](#), [Hideyuki Torii](#), Youichi Takashima, [Kazutake Uehira](#), "Non-destructively reading out information embedded inside real objects by using far-infrared light," *Proceedings of SPIE 9599: Applications of Digital Image Processing XXXVIII*, 査読あり, 2015年, 95992V-1~V-7頁

[学会発表](計4件)

1. Piyarat Silapasuphakornwong, [鳥井 秀幸](#), [鈴木 雅洋](#), [上平 員丈](#), "磁性材配合樹脂による3Dプリンタ造形物内への情報記録," 2019年 電子情報通信学会総合大会, 2019年3月19~22日, 東京都新宿区

2. ピヤラット シラパスパコオンウォン, 鈴木 雅洋, 鳥井 秀幸, 上平 員丈, “近赤外線蛍光樹脂を用いた 3D プリンター造形物用情報ハイディング技術,” 2018 年度 第 46 回 画像電子学会年次大会, 2018 年 6 月 21~23 日, 山形県山形市

3. 鈴木 雅洋, Piyarat Silapasuphakornwong, 上平 員丈, 鳥井 秀幸, 高嶋 洋一, “3D プリンター用デジタルコンテンツの著作権保護技術,” 画像電子学会第 276 回研究会, 2016 年 3 月 3~4 日, 福岡県飯塚市

4. 鈴木 雅洋, ピヤラット シラパスパコオンウォン, 上平 員丈, 高嶋 洋一, 海野 浩, 鳥井 秀幸, “造形物内部への情報埋め込みによる 3D プリンター用データの著作権保護技術,” 第 14 回情報科学技術フォーラム, 2015 年 9 月 15 日~17 日, 愛媛県松山市

〔図書〕(計 2 件)

1. Yun Qing Shi, Hyoung Joong Kim, Fernando Perez-Gonzalez, Feng Liu eds. (Kazutake Uehira, Masahiro Suzuki, Piyarat Silapasuphakornwong, Hideyuki Torii, Youichi Takashima), *Digital Forensics and Watermarking: 15th International Workshop, IWDW 2016, Beijing, China, September 17-19, 2016, Revised Selected Papers (Lecture Notes in Computer Science 10082)*, Springer, 2017 年, 総頁数 618 頁 (担当部分 370~378 頁)

2. Yun-Qing Shi, Hyoung Joong Kim, Fernando Perez-Gonzalez, Isao Echizen eds. (Piyarat Silapasuphakornwong, Masahiro Suzuki, Hiroshi Unno, Hideyuki Torii, Kazutake Uehira, Youichi Takashima), *Digital-Forensics and Watermarking: 14th International Workshop, IWDW 2015, Tokyo, Japan, October 7-10, 2015, Revised Selected Papers (Lecture Notes in Computer Science 9569)*, Springer, 2016 年, 総頁数 445 頁 (担当部分 232~238 頁)

〔産業財産権〕

出願状況 (計件)

取得状況 (計件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 上平 員丈

ローマ字氏名: Kazutake Uehira

所属研究機関名: 神奈川工科大学

部局名: 情報学部

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 50339892

研究分担者氏名: 鈴木 雅洋

ローマ字氏名: Masahiro Suzuki

所属研究機関名: 常磐大学

部局名: 人間科学部

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 30397046

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 高嶋 洋一

ローマ字氏名: Youichi Takashima

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。