

論文内容の要旨

博士論文題目 Blind watermarking for 3D printed objects by applying small geometric modification on the surface
(3D プリント造形物の表面への微細な幾何学的加工による
ブラインド型電子透かし)

氏 名 Delmotte Arnaud Jean (デルモット アルノー ジャン)

(論文内容の要旨)

3D プリント造形物への電子透かしの埋め込みは、3D プリンタの普及に伴って注目されている比較的新しい研究分野である。今日では、誰でも数百ドル程度の信頼できるエントリーレベルの 3D プリンタを所有したり、学校や DIY センター等にある公共の 3D プリンタを利用可能である。このような広い利用可能性は、簡単に複製できる造形物の著作権侵害や、写真からの鍵の複製、さらには武器の印刷などの犯罪的使用についての懸念をもたらし始めている。そのため、他のメディアと同様に、電子透かし技術はこれらの違法な使用を調査する方法を提供することができる。

本論文では、表面に微細な幾何学的加工を適用することにより、3D プリント造形物へのブラインド型電子透かしに焦点を当てる。電子透かしは、3D プリントされた造形物に密かにマーカを挿入することで構成される。その中でも、「ブラインド型電子透かし」は、マーカの抽出処理のために、元の透かしのないモデルを必要としないサブカテゴリである。多くの応用事例では、元のモデルが公開されていないため、一般にブラインド型が非ブラインド型よりも優先される。本研究での「表面への微細な幾何学的加工」とは、機械によって検出可能であるが、人間の目には知覚できず、機能に影響を与えないことを意味する。

3D プリント造形物に対して、電子透かしは表面または表面下に挿入できる。表面下の場合には、表面の歪みを生じないという利点があるが、造形物の内部をスキャンしてマーカを抽出するには、特別な機器と手順が必要となる。ほとんどの著作権保護の場合、悪意のある者は造形物の表面のみをスキャンし、その過程で透かしの削除するため、埋め込まれていた著作権情報は利用できなく

なる。そのため、本研究では表面への透かしの挿入に焦点を当て、2つの新しい方法を提案する。

1つめの方法では、表面ノルムのヒストグラムに対して電子透かしビットと造形物の位置合わせのための3Dモーメントを埋め込む。この場合、約16~32ビットの情報を埋め込むことができ、再構築されたメッシュが完全である限り、任意の3Dプリンタおよびスキャナが利用可能で、さらにスキャンされたモデルからの再印刷にも耐えることができる。2つめの方法では、印刷層の厚さを1D信号キャリアとして使用する。この方法は熱溶解積層法または類似の印刷方法でのみ動作する。64ビットの情報を埋め込み、民生用2Dドキュメントスキャナを使用して1回のスキャンで抽出できるが、埋め込み場所は平面に限定されている。デコード装置が低コストであるため、容易に実用化が可能である。

提案する2つの方法には、それぞれ異なる利点、欠点、および応用事例がある。1つめの方法は、標準的な3Dスキャンをしても模造品を作成しても電子透かしは残るため、著作権保護に適している。2つめの方法は、埋め込む情報が多く、それらを高速に抽出する必要があるが、再印刷への耐性は必要でないような場合に適している。さらに両方の方法は、犯罪調査、盗まれた造形物の所有者の識別、および他の多くの応用事例に使用できる。実験においては、造形物の視覚的な品質の低下を防ぐため、一般的な印刷の誤差に対して電子透かしの十分に頑健に保ちながら、幾何学的な歪みを最小限に抑えることに注意を払った。以上の手法は、民生用3Dプリンタを使用し、実際に3Dプリントすることで評価した。

(論文審査結果の要旨)

本論文では、表面に微細な幾何学的加工を適用することにより、3D プリント造形物へ電子透かしを埋め込む手法を提案している。近年では、安価で高性能な 3D プリンタが普及し始めており、3D プリント造形物への電子透かしの埋め込みは、比較的新しい研究分野である。3D プリンタの普及とともに、簡単に複製できる造形物の著作権侵害や、写真からの鍵の複製、さらには武器の印刷などの犯罪的使用についての懸念が生じ始めている。そのため、写真や音楽などの他のメディアと同様に、電子透かし技術はこれらの違法な使用を調査する方法として有用である。

本論文では、表面に微細な幾何学的加工を適用することにより、3D プリント造形物へのブラインド型電子透かしに焦点を当てている。電子透かしは、3D プリントされた造形物に密かにマーカを挿入することで構成されるが、その中でも「ブラインド型」は、マーカの抽出処理の際に、元の透かしのないモデルを必要としないため、シナリオによっては重要な特徴である。

本論文では、表面への透かしの挿入に焦点を当て、2つの新しい方法を提案している。1つめの方法では、表面ノルムのヒストグラムに対して電子透かしビットと造形物の位置合わせのための 3D モーメントを埋め込む。この方法では、埋め込める情報量は少ないが、スキャンした 3D モデルにも再印刷された模造品にも電子透かしは残るため、著作権保護に適していることを明らかにしている。2つめの方法では、熱溶解積層法の 3D プリンタを用いて印刷層の厚さに 1D 信号を埋め込む。この方法では、埋め込み場所は平面に限定され、再印刷への耐性が弱いという弱点はあるが、多くの情報量を埋め込むことができ、民生用 2D ドキュメントスキャナを使用して 1 回のスキャンで抽出できるという利点があるため実用的である。

これら 2 手法について、実際に民生用 3D プリンタを使用して、様々な形状の造形物を印刷し、電子透かしを埋め込む際のパラメータを変化させた場合の頑健さを検証している。その結果、ある程度の変形にも耐性があることを示して

いる。

本研究は、コンピュータビジョン分野において、学術面での貢献を認めることができる。本論文の主要部分に相当する内容に関しては、学術論文誌に論文が掲載されるとともに、国際会議等においても公表されている。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値ある物と認める。