

令和 2 年 4 月 18 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02820

研究課題名（和文）不可視に構造化された光による実空間、実物体ベースの新しいメディア表現法の研究

研究課題名（英文）Study on new media representation method based on real space and real object using invisible structured light

研究代表者

上平 員丈（Uehira, Kazutake）

神奈川工科大学・情報学部・教授

研究者番号：50339892

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,110,000円

研究成果の概要（和文）：不可視に構造化した光を実物体に照射し、その撮像画像に情報を埋め込む技術进行研究した。主な成果は以下の通りである。

色差信号で光を構造化して情報を埋め込めば、情報の読み出しを高精度化できること、および埋め込まれた情報がJPEG圧縮に対して耐性を有することを明らかにした。トレードオフ関係にある埋め込み情報の高密度化と不可視性を同時に満たす方法として、光で書き込んだ情報を消去し、同情報をデジタル処理により再度埋め込む方法を提案し、その効果を実証した。また、情報消去にGANの使用が有効であることを明らかにした。本方法により、2次元画像中に3次元情報の埋め込みを可能にし、本技術の応用範囲の拡大を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、光を利用した実空間、実物体ベースの新しいメディア表現法を創出したという点にある。また、実物体の肖像権、著作権の保護、実物体撮像画像の本物証明、3次元空間の再構成など、いずれも従来は不可能であったことが実現でき、学術だけでなく社会的意義も大きく大きなインパクトを与えることが期待できる。さらに、撮影時に、被写体となる実物体に関する情報をその物体象に重畳して埋め込むことができ、必要に応じてその情報を取り出して利用するという新しい画像情報の形態を創出する点でも大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：We studied on technique that can embed information in a captured image of an object by using structured light by invisible pattern. It was clarified that the information can be read out with high accuracy by structuring light with color difference signals and embedding information is resistant to JPEG compression. We proposed a method of erasing the information written by light and embedding the information again by digital processing, as a method of simultaneously satisfying the high density and invisibility of the embedded information, which are in a trade-off relationship, and demonstrated the effect. Moreover, it was clarified that the use of GAN is effective for erasing information. This method enables embedding of three-dimensional information in a two-dimensional image and expands the range of application of this technology.

研究分野：画像工学

キーワード：マルチメディア情報表現 情報ハイディング 光情報処理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人物や実物体を被写体として撮像した画像に、それらの被写体に関連する情報を撮像時に自動的に埋め込むことができれば、肖像権の保護や証明用写真の偽造防止などへの応用が期待でき、さらに、実空間や実物体をベースとする従来にはない新たなメディア表現を創出できる可能性がある。画像中に別の情報を目に見えないように埋め込む技術は、電子透かしやステガノグラフィなどで用いられるが、これらの技術ではデジタル処理によってカバー画像に別の情報を埋め込むため、実物体を撮像する際に撮像画像へ実物体に関連する情報を撮像と同時に埋め込むことはできない。そのためには、実物体上に何らかの形で情報を付加しておいて、その実物体が撮像されたときこの情報が撮像画像に不可視に写り込むような手段が必要である。

報告者らは上記手段として図1に示す実物体を照明する光に情報を埋め込む方法を提案した。この方法では、不可視に構造化した光を被写体の照明光として用いる。すなわち、人間に気付かれないように光に情報を含ませ、その光で照射された実物体の表面に不可視に情報を付加する。不可視であっても光に情報が含まれていれば、その光で照明された被写体を撮像した画像にも同じ情報が不可視に含まれるはずである。

報告者らは、これまでに上記技術について情報の不可視性、可読性などの基本的要素技術の実現可能性を示してきた。そして、実用に向けた技術の高度化、深化、さらに多様な応用に適用するため技術の拡幅化が課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究は不可視に構造化した光を用いて、実空間中の任意の場所や実空間に存在する実物体上にその場所や物体に関する情報を潜在させ、空間や物体を撮像した画像に情報を不可視に付加できる技術の実現を目指す。さらに、情報を不可視に空間中に潜在させるという本技術の特徴を生かした新たな応用の開拓も目的とする。具体的には、従来の情報セキュリティ技術では不可能であった実物体の肖像権を保護する技術、実物体の撮像画像が本物であることを証明する技術、空間の奥行き情報を不可視情報として付加することにより通常の方法で撮像した2次元画像から3次元画像を生成可能にする技術などを実現し、光を利用した実空間、実物体ベースの新しいメディア表現とその応用の創出を目指す。

特に、本助成期間においては、実用に向けた不可視性、可読性等の基本特性の向上など、技術の高度化、拡張化を図り、具体的な応用において本技術の実用性を実証すること目的とする。

3. 研究の方法

(1) 基本特性の向上

本技術では埋め込み情報の不可視性と可読性が基本となる。しかし、これらは互いにトレードオフの関係にあり、両者を同時に向上させることが課題となっていた。これまでの研究では、光に情報を含ませるための光の構造化として、輝度変調により不可視パターンを生成する方法を用いてきたが、今回、色差信号の変調により不可視パターンを生成する方法を検討した。

図2に光構造化の例を示す。目の分解能以下の高周波パターンを生成し、このパターンを投影する。8×8画素のブロックを想定し、最高周波数成分の符号で2進数を表現する。すなわち、8×8画素のブロックごとに1ビットの情報を埋め込む。このデータを逆DCT変換し高周波パターンに変換し、この光を照明光として図1のように被写体に照射する。不可視パターンの投影にはプロジェクタを使用した。プロジェクタにはRGB信号を入力するが、入力前に一旦YCbCr信号に変換し、色差信号の一つであるCb信号で図2の高周波パターンを生成した。その後、RGB信号に再変換してプロジェクタへ入力した。以上の方法によって構造化された光で照明された実物体の撮像画像から情報を読み出す。まず、RGBからYCbCrの変換および解像度変換を行い、その後、DCT変換を行って最高周波数成分の符号を調べることにより埋め込まれた情報を読み出す。この方法について、情報の不可視性と可読性を評価した。

また、本研究では色差信号で生成された不可視パターンによる情報が、撮像画像に埋め込まれたときの画像圧縮に対する耐性を評価した。通常、カメラで撮像された画像はSDカード等の記憶媒体にJPEG等で圧縮されて保存される。したがって、実用化の観点から埋め込み情報の画像圧

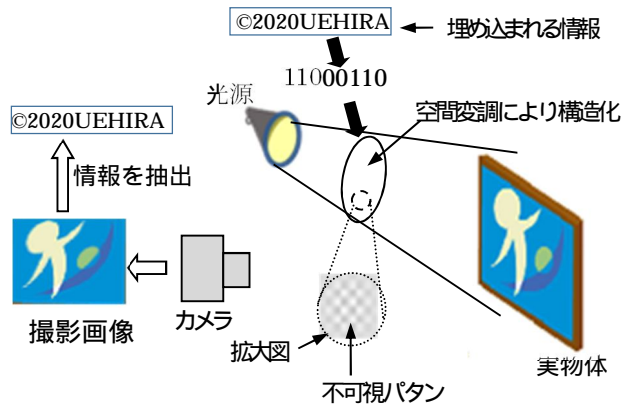


図1 本技術の概念図

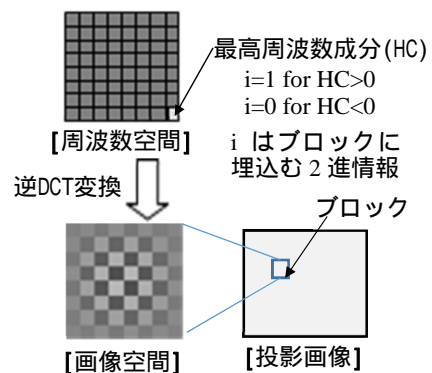


図2 光構造化の一例

縮に対する耐性をもつことは必須である。本研究では、撮像画像を JPEG で圧縮したとき、埋め込まれた情報が保存されるかについて、変調度や圧縮率をパラメータとして調べた。

(2) 3次元情報埋め込み

具体的応用の一つとして本研究では実物体や実空間を撮像した 2 次元画像の中に、その実物体や実空間の 3 次元情報を埋め込む研究を続けた。この技術は、図 3 に示すように光を構造化する際、構造化特性が撮像画像において、空間の奥行きに依存して変化する特性とする。これより、この光で照射された空間を撮影した画像に奥行情報を不可視に埋め込むことができる。そして、撮像画像からその特性を抽出すれば被写体の奥行き情報が領域ごとに得られるので、通常のカメラで撮像した画像からでも 3 次元画像を生成できる。

奥行きに依存する構造化の具体的な方法として光源とカメラを奥行き方向に一定距離だけ離し、光源から空間的な周期パターンを投影する方法を提案した。光源とカメラを一定距離 D だけ離すことにより撮影画像に写る周期パタンの空間周波数は奥行きに依存して変化する。そこで、この空間周波数を求めれば奥行情報が取得できる。

これまでの研究から、周期パターンから正確な奥行き情報を取得するためには、パタンの変調度を十分高くする必要があることがわかった。しかし、変調度を高くすると撮像画像中のパタンの不可視性が低下し、パターンがノイズとして撮像画像中に現れる。この問題を解決する方法として、図 4 に示すハイブリッド法を提案し、その実現性を評価した。埋め込み情報を精度よく読み出すには被写体に投影するパタンの変調度を高くすればよいので、本方法では満足できる可読性を得られるように変調度を十分高くする。しかし、変調度を高くすると撮像画像中のパタンの不可視性が低下するので、このパターンが表現する情報を一旦読み出した後、撮像画像からパターンを除去する。次に、読み出した情報を不可視性の高いコード情報に変換し、これを電子透かし等で用いられているデジタル処理によって再度撮像画像中に埋め込む。

本方法は、実物体の撮像画像に情報を付加できるという光学的な情報埋め込み手段の特徴と、不可視で高密度に情報の埋め込みが可能なデジタル処理の双方の特徴を組み合わせた方法である。本方法実現のカギは撮像画像中からパターンのみを選択的に消去できるかである。本研究では、パターンは視覚の感度が低い青色成分画像に埋め込み、以下の方法でパタンの除去を試みた。

パターンは知覚されにくい高周波成分で生成する。通常、被写体画像には高周波成分は少ないので周波数空間において周辺に比べて大きな値をもつ高周波成分を除去すればパターンが除去できると考えられる。しかし、被写体画像にもある程度の高周波成分は存在するので、色成分間の相関性を利用して、パターンが重畳されていない他の色成分において当該周波数成分と周辺の周波数成分の比を同程度になるように、青色成分の当該周波数成分を低減した。

ハイブリッド法は、撮像画像ではパターンは除去されて見えなくなるが、実空間においては高い変調度で光を構造化するためパターンが見えやすくなる。そこで、正変調と負変調で生成したパターンをフレームごとに交互に表示することにより実空間でもパターンを不可視とする。この方法ではカメラのシャッター時間を適切に設定すれば、正負どちらかで変調されたパターンが撮像され変調度の高いパターンが撮像できる。しかし、通常の応用では表示と撮像は非同期なので、赤色成分画像でも位相を 90 度ずらして同様の表示を行えば、青か赤のどちらかの色成分で確実に変調度の高いパタンの撮像が可能となる。

(3) 技術の拡張化

ハイブリッド法は、3 次元情報の埋め込み以外の応用にも適用可能であると考えられる。ただし、必要なパターンは応用に依存して異なる。そこで、多様なパターンに対応できる技術として、ディープラーニングの一種である GAN (Generative Adversarial Network) とよばれる方法を用いてパターンが重畳された画像からパターンを除去する方法を検討した。ここで GAN は重畳される前の画像を推定させるために用いる。使用した GAN の構成を図 5 に示す。ここで使用した GAN は、画像から画像を生成する pix2pix タイプの GAN である。投影パターンはラインアンドスペースで変調

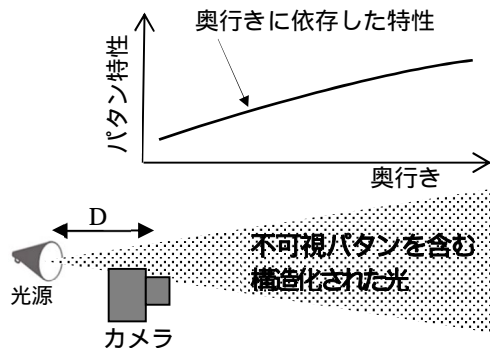


図 3 3次元空間情報埋め込み技術の概念図

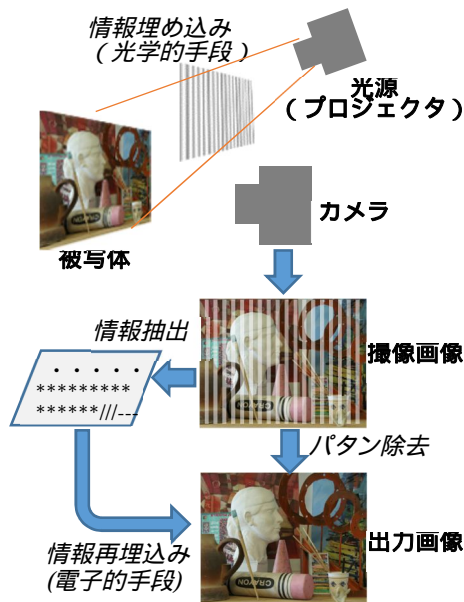


図 4 ハイブリッド法

度 50 (最大値が 255 の階調値、以下でも同様とする) の高いコントラストで青成分画像に重畳されている。ここでは、色成分間の相関性を利用することにより推定精度が向上することを期待して青成分画像に加えてパタンが重畳されていない緑成分画像を参照画像として入力した。パタン重畳前の画像を教師画像として、1 万組のペア画像で学習を行わせた。学習済みの GAN に学習で未使用のパタン重畳画像を入力し、パタン重畳前の画像を推定させ、その推定精度を目視による主観評価と PSNR による定量評価で評価した。

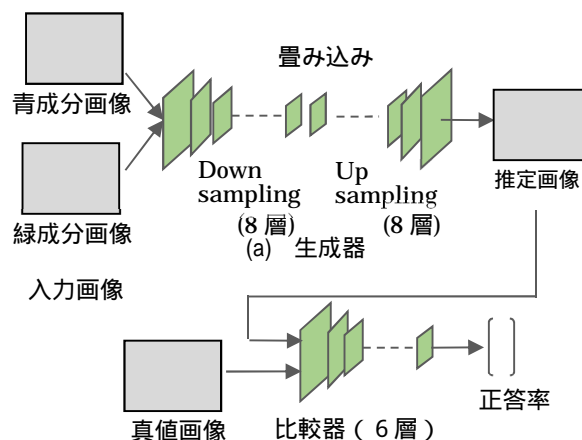


図 5 GAN の構成

4. 研究成果

(1) 埋め込み情報の不可視性、可読性の改善

色差信号を用いたときの読み出し精度の評価結果を図 6 に示す。図中の写真は変調度が 5 で構造化された光が照射されたときの撮像画像である。この写真では目視により埋め込まれたパタンは確認できなかった。

図 6 から、色差信号で変調するほうが輝度信号による変調より読み出し精度が高くなるのがわかる。この結果より、色差信号で変調することにより埋め込み情報の不可視性と可読性をともに向上できることが明らかになった。

図 7 に JPEG 圧縮時の読み出し精度の評価結果の一例を示す。この例は、同図(a)に示す画像に 4096 ビットの情報を埋め込み、正しく読み出せたビット情報の比率を示す。図 7 において、Scale factor は圧縮率を示すパラメータであり、画像にもよるが Scale factor が 10 のとき圧縮率は約 1/20 であった。図 7 から、例えば、Scale factor が 10 のときは変調度を 5 以上にすれば、100%の精度で埋め込み情報の読み出しが可能となり、適切に条件を選べば圧縮画像にも適用可能であることが確認できた。

本技術では数 k ビットの情報を埋め込めることができ、また、圧縮耐性も確認できたので、実物体の肖像権保護などへの応用が可能であることを実証できた。

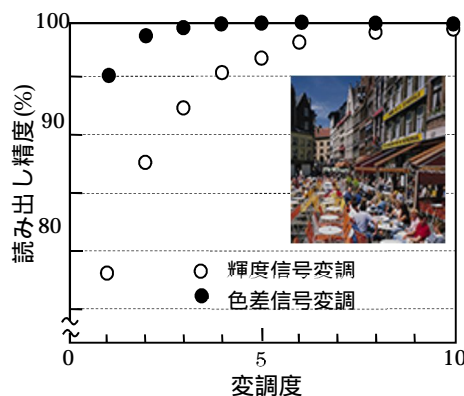


図 6 色差信号で変調したときの読み出し精度と撮像画像の例



(a) 使用した画像

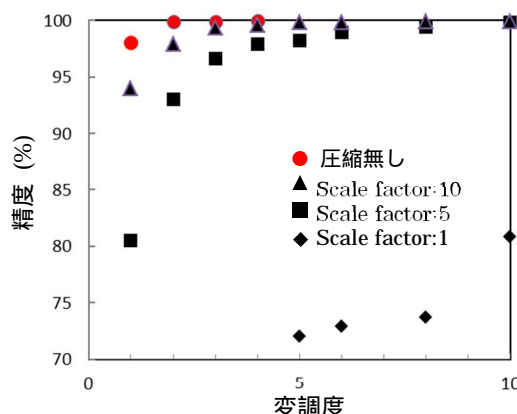
(2) 3次元情報埋め込み

図 8 に示す市松パタンを印刷画像上に投影し、これをカメラで撮像した画像の一部を拡大して図 9 に示す。図 9 は青成分画像である。図 9 から、上記のパタン除去法により市松パタンは振幅が大幅に低減されて知覚されにくくなっている。しかし、被写体に高周波成分を含む領域では低減が不十分であり、さらなる改善が必要であることがわかった。

(3) ハイブリッド法

図 10 および図 11 にハイブリッド法の評価結果を示す。図 10 から、GAN の推定画像ではパタンが見えず目視で見る限りパタンは完全に除去されている。

図 11 は、推定画像のパタン重畳前の画像に対する PSNR の評価結果である。グラフの横軸はパタンの空間周波数である。図 11 から、いずれの条件においても PSNR は 40 台後半の高い良好な結果が得られることがわかった。また、この結果から緑成分画像を参照画像として入力することにより PSNR が改善できること、PSNR はパタンの空間周波数にはほとんど依存しないことも



(b) 埋め込みデータの読み出し精度

図 7. JPEG 圧縮による読み出し精度への影響

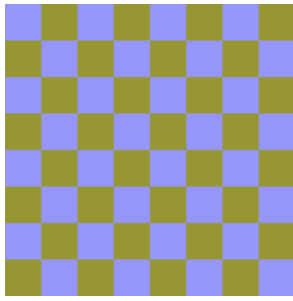


図 8 投影パターン (拡大図)
平均輝度 : 150、変調度 : 50



図 9 撮像画像 (拡大図)

わかった。

以上の結果から、ハイブリッド法において、光で書き込まれたパターンを撮像画像から除去する方法として GAN が有効であることを確認した。この方法は、上記の 3 次元情報埋め込みにも適用でき、これより 3 次元情報を内部に含みながら伝送や記憶媒体への保存では通常の 2 次元画像として処理できる新しい 3 次元画像の形態を可能にした。

(4) その他の成果と今後の課題

以上、主たる研究成果について述べたが、これらの他にも以下の成果を上げた。

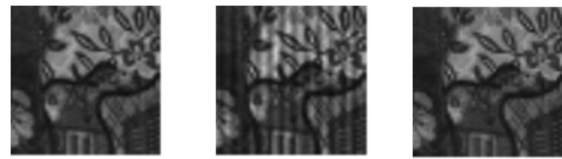
撮像画像から情報を自動的に読み出すため、画像中でパターンが埋め込まれている領域を、高周波成分の有無を調べることにより、自動的に検出するソフトウェアを開発した。

単色光とバンドパスフィルタの使用により屋外などの強い環境光の下でも使用を可能とする技術の実現性を確認した。

秘匿性の高い情報埋め込み法を提案した。

ディープラーニングにより投影パターンから高精度で奥行き情報を取得する方法を提案し、実現性を確認した。

上記 については今後本格的に研究を開始する予定である。このほか、印刷画像への展開も開始する予定である。



(a) パターン重畳前 (b) パターン重畳後 (c) 推定画像

図 10 GAN によるパターン除去結果

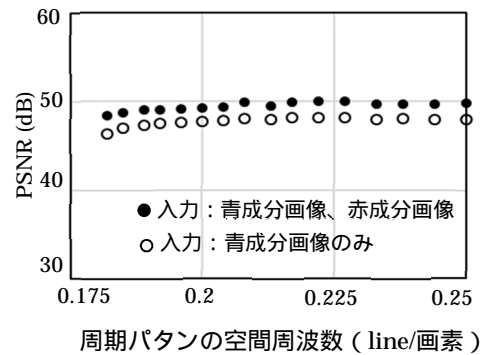


図 11 推定画像のパターン重畳前の画像に対する PSNR

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroshi Unno and Kazutake Uehira	4. 巻 53
2. 論文標題 Display Technique for Embedding Information in Real Object Images Using Temporally and Spatially Luminance-Modulated Light	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 5966-5971
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2017.2726499	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazutake Uehira and Hiroshi Unno	4. 巻 6
2. 論文標題 Effects of JPEG Compression on Reading Optical Watermarking Embedded by Using Color-Difference Modulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computer and Communications	6. 最初と最後の頁 56 - 64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/jcc.2018.61006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kazutake Uehira, Piyarat Silapasuphakornwong, and Hiroshi Unno
2. 発表標題 Embedding depth information in captured images by projecting periodical pattern using multi-band pass filter
3. 学会等名 2018 International Conference on Data Science and Information Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Uehira Kazutake, Unno Hiroshi
2. 発表標題 Optical Watermark Pattern Technique using Color-Difference Modulation
3. 学会等名 PATTERNS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Unno and Kazutake Uehira
2. 発表標題 Display technique for embedding information in real object images using temporally and spatially luminance-modulated light
3. 学会等名 IEEE Industry Application Society 52nd Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazutake Uehira and Hiroshi Unno
2. 発表標題 Optical Watermark Pattern Technique using Color Difference Modulation
3. 学会等名 The Ninth International Conferences on Pervasive Patterns and Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazutake Uehira and Hiroshi Unno
2. 発表標題 Technique for removing superimposed patterns on objects using GAN
3. 学会等名 IEEE ICCE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Unno and Kazutake Uehira
2. 発表標題 Lighting technique for attaching invisible information onto real objects using temporally and spatially color-intensity modulated light
3. 学会等名 IEEE Industry Application Society 55th Annual Meeting (国際学会)
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	海野 浩 (Unno Hiroshi) (40387080)	神奈川工科大学・情報学部・助教 (32714)	