

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330208

研究課題名(和文) 不可視に構造化された光による実空間、実物体ベースの情報表現とその応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on information hiding technology using invisibly brightness-modulated light and its applications

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ある情報に基づいて不可視に輝度変調された光を照明光として被写体に照射することにより、その被写体の撮像画像の中に任意の情報を埋め込む技術について研究を進めた。本助成期間における主な成果は以下のとおりである。1) 照明領域を多数のブロックに分割して同一情報を多数の場所に分散して埋め込むことにより、ロバスト性の高い情報の埋め込み、読み出しを可能とする技術を確立した。2) 輝度の時間的変調により情報を埋め込むことで本技術を動画に適用可能とした。3) 奥行きにより特性が変化するパターンで光を変調し、撮像した2次元画像の中にそのデプスマップを埋め込む技術を実現した。

研究成果の概要(英文)：We developed the research on the technique of embedding information in the captured image of the real object by illuminating it with brightness-modulate light. The main results are as follows. We enhanced robustness of information hiding by embedding same information in many different positions, and we developed the technique that can apply this concept to moving picture using temporally luminance-modulated light. Moreover, we developed the technique that can hide information on depth of the object in its captured image using the light that contains invisible pattern of which characteristics depend on depth.

研究分野：情報学

キーワード：マルチメディア 情報セキュリティ 光情報処理

### 1. 研究開始当初の背景

ある情報の中に、その情報とは別の情報を人に気付かれないように埋め込む技術は情報ハイディングとよばれ、コンテンツの著作権保護など情報セキュリティ分野を中心に研究が進められてきた。特にコンテンツがデジタル化されてからは、デジタル処理による高度な情報ハイディング技術の研究が盛んになっている。

この情報ハイディングにおいて、情報の隠し場所をコンテンツの中から、実空間や実物体上へと拡張し、コンテンツの中に情報を埋め込むのと同様に、実際の空間中や実物体上に情報を不可視に潜在させることができれば、セキュリティ分野はもちろん、それ以外の様々な分野においても多くの新しい応用の創出が期待できる。本研究の代表者らは、光の空間的コード化を不可視の状態で行うことにより実際の空間中に情報を潜在させる方法を着想した。そして、光を不可視の状態空間的にコード化する方法として、図1に示す光を知覚限界以下に構造化して空間に放つ方法を考案した。これより人間に気付かれないように光に情報を含ませ、その光に照射された空間や実物体の表面に不可視に情報を付加することができる。そして、これを必要に応じて携帯端末等のカメラで取り出して活用するというのが本技術の基本概念である。

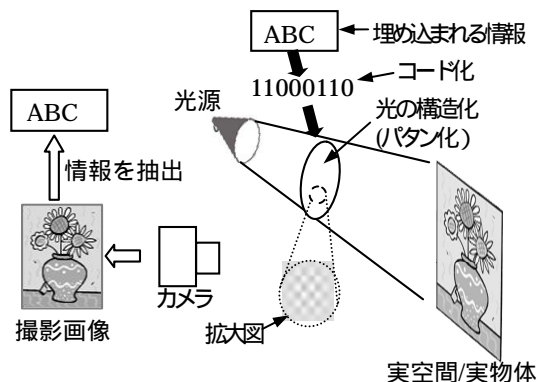


図1 提案技術の概念図

本技術により、例えばセキュリティの分野において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撮像画像が本物であることを証明でき、また実物体の肖像権の保護が可能となる。さらに、実物体に関する情報をスマートフォンなどの携帯端末を介してそれを必要とする人に意識させることなく提供できるようなサービスも可能となり、様々な分野において従来にない新しい応用が期待できる。

本研究は、平成23年度から2年間、科研費「挑戦的萌芽研究」の補助を受けてフィジビリティースタディを行い、情報の不可視性、可読性などを確認するとともに実現上の問題点を抽出した。

### 2. 研究の目的

光の構造化による実空間への情報埋め込みとその読み出し技術について、これまでの基礎検討結果をふまえ、基盤技術、応用技術の両面から技術の高度化と拡張化を目指し、以下の3点を本研究期間における主たる研究目的とした。

#### (1) ロバスト性の高い光の構造化

物体表面に黒い部分があると、その部分では光が反射しないので、情報の欠落が生じる。また、表面にあるテクスチャーの影響などのため正確な情報を読み出せないケースも想定される。これらのケースを考慮したロバスト性の高い光の構造化技術の確立を目的とした。

#### (2) 有効な光の構造化法の拡張

様々な用途に対応するには、状況に応じて最適な技術を使い分け、また複数技術の組み合わせによる最適化が必要となる。このため従来の空間的変調に加え、時間的変調による光構造化技術の確立を目的とした。

#### (3) 新規応用の開拓

応用技術として、実物体の肖像権保護に加え、実空間中に3次元奥行き情報を不可視の状態が付加し、撮像した2次元画像からの3次元空間を再構成する技術の確立を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) ロバスト性の高い光の構造化技術

部分的な情報欠落や情報読み出しの誤りに対応できる方法として、本研究ではブロック分散法を提案した。本研究では被写体を照明する光源としてプロジェクタを使用し、プロジェクタの時空間光変調機能を用いて光を構造化した。不可視に構造化されるので、プロジェクタの投影光は通常の照明光のように照明領域全面で一様な明るさに見える。

本方法では、照明領域を多数のブロックに分割し、ブロック内の1画素に1ビットの情報を埋め込む。“0”を埋め込むときは画素の輝度値をわずかに(B)だけ減少させ、“1”を埋め込むときはBだけ増加する。Bは目の検知限界以下の小さな値にする。本研究では、青色成分光に上記輝度変調による情報埋め込みを行った。

上記のように輝度変調された光で照射された被写体の撮像画像について、上記投影光のブロックと同一のブロック分割を行い、全てのブロックについて同一座標の画素の輝度値を積算する。その結果、上記輝度の変化分Bが積算されて検出可能な大きな値となる。そこで、適当な閾値を用いて埋め込まれた情報が“1”か“0”かを判定する。

本方法では、一つの情報を画像の全領域に分散させるので、一部の領域で情報の読み出しができなくても他の領域から読み出した情報により埋め込んだ情報を検出すること



(a) 被写体 A (b) 被写体 B

図 2 被写体として用いた印刷画像

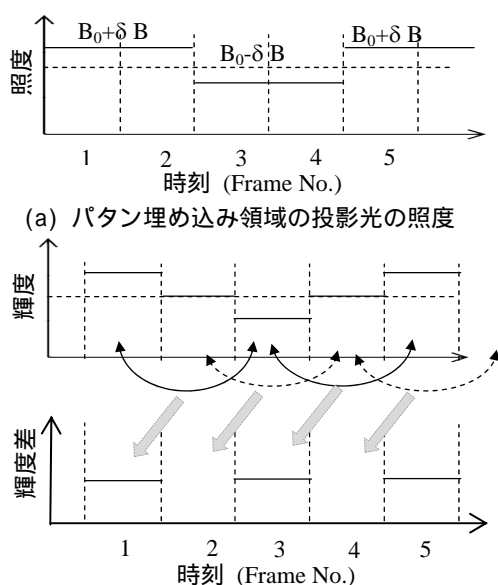
ができ、このためロバスト性の高い情報埋め込みが可能となる。

本研究ではシミュレーションにより本提案法の有効性を確認した。被写体として図 2 に示す画像の印刷物を仮定した。撮像画像の輝度は、投影光の照度と被写体の反射率の積で表されるので、被写体の反射率として図 2 の画像の輝度値を用いた。

### (2) 有効な光の構造化法

不可視性に優れる光の構造化の実現のため、これまでの空間的輝度変調に加えて時間的輝度変調による光の構造化を検討した。本方法の基本原則を図 3 に示す。図 3(a) に示すように、パターンを埋め込む領域の照度を 2 フレームごとに目の知覚限界以下のわずかな値 ( $B$ ) だけ増減する。

上記方法で輝度変調された光が照射された被写体の撮像画像で、パターン埋め込み領域の輝度の時間変化を図 (b) の上の図で示す。ここでは、プロジェクタとカメラのフレーム周波数は同じとするが、非同期のため位相は異なると仮定する。本方法では 2 フレームごとに照度を増減させるので、2 フレームおきの差分画像をとれば、図 (b) の下図に示すように必ず輝度変調によって生じた増減の



(a) パターン埋め込み領域の投影光の照度  
(b) 撮像画像におけるパターン埋め込み領域の輝度 (上) と 1 フレームおきの輝度差 (下)

図 3 時空間輝度変調による光の構造化



図 3 被写体として用いた印刷画像

差分が取り出すことができる。一方、フレーム差分をとるので、被写体が静止していると仮定すれば被写体像は完全に除去でき、結局、差分画像には埋め込まれたパターンだけが残る。ただし、この差分画像に現れるパタンの輝度値は微小なので、数十フレームにわたる差分を加算することで可視化する。埋め込みパタンの不可視性を高めるため、3 つの色成分画像のうちいずれか 1 つにのみパターンを埋め込む。

以上の方法について実験で原理確認を行った。実験では、画素数が  $1280 \times 1024$  の液晶プロジェクタを使用した。カメラは  $4752 \times 3168$  画素の CMOS イメージセンサを備えたデジタルカメラを使用し、その動画撮像機能を用いて毎秒 30 フレームの動画を撮像した。動画撮像に用いられる画素数は  $1280 \times 780$  であり、Motion-JPEG で圧縮されて記録された動画を用いた。図 3 に被写体として用いた印刷画像を示す。

### (3) 奥行情報埋め込み技術

応用技術として、撮影画像中へ被写体の奥行情報を埋め込む技術の検討を進めた。これまで、微細な周期パターンを投影し、空間周波数成分の振幅の変化から奥行を推定する方法を検討したが、焦点からずれたときのぼけを利用するため測定可能範囲が狭く実用性に欠けた。この問題を解決する方法として、本研究では図 4 に示す方法を提案した。照明装置としてのプロジェクタからパターンピッチが目の分解能以下の周期パターンを含む光が投影され、この光に照射された被写体がカメラで撮影される。本提案技術では、カメラと照明装置を奥行き方向 ( $z$  方向) に一定の距離だけ離して配置する点がポイントとなる。このような配置により、(1) 式に示すように撮像画像中に写るパタンの空間周波数  $f_C(z)$  が奥行き  $z$  に依存する。

$$f_C(z) = f_A \frac{z}{z_A} \cdot \frac{z_A - D}{z - D} \quad (1)$$

ここで、 $f_A$  は所定の奥行き  $z = z_A$  に投影されたパタンの撮影画像における空間周波数であり、既知の値として扱う。 $D$ 、 $f_A$ 、 $z_A$  が既知なので (1) 式から撮像画像から周期パタンの周波数を求めることにより奥行き  $z$  を得ることができる。

上記方法の実現性を評価するために実験を実施した。照明装置として、画素数が 1280

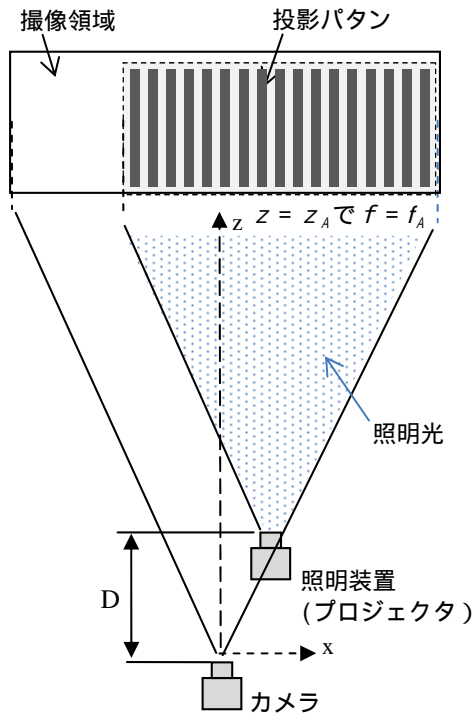


図4 奥行き情報を撮像画像に埋め込む方法

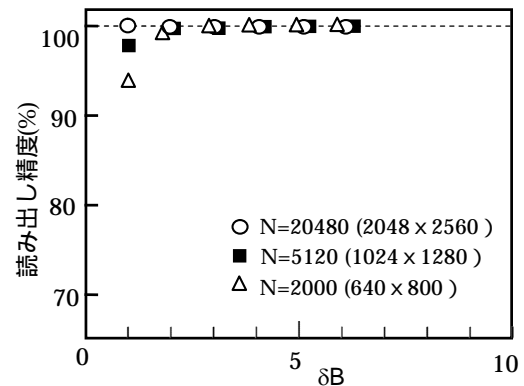
x 800 の DLP プロジェクタを使用した。投影パターンは縦方向のラインアンドスペース (LS) パターンとした。平均輝度は 256 階調で 180 とし、パターンのコントラストは同 50 とした。ライン (スペース) 幅は投影画像における 1 画素分とした。カメラの解像度は 4752 × 3168 画素である。撮影画像において、各画素を中心に水平方向に 12 画素分の領域について離散フーリエ変換を行い LS パターンの周波数を求めた。この周波数から (1) 式により各画素の奥行きを求めデプスマップを得た。

#### 4. 研究成果

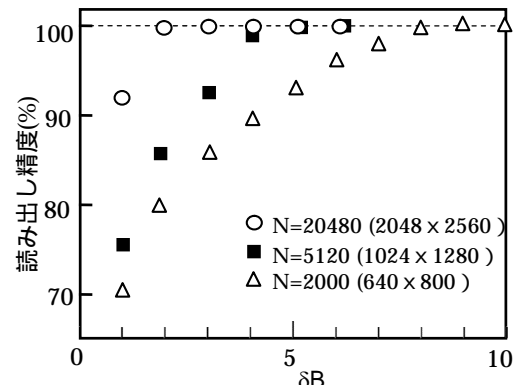
##### (1) ロバスト性の高い光の構造化技術

図5に埋め込み情報の読み出し精度についてのシミュレーション結果を示す。図5においてNはブロック数を示し、カッコ内の数字は画素数を示す。ブロック内の画素数は 16 × 16 である。図5から読み出し精度は B またはブロック数が大きくなるにしたがって増加し、B が 9 以上では全ての条件で 100% の精度で読み出しが可能であることがわかる。また、画素数が 1280 × 1024、2560 × 2048 のときは、B がそれぞれ 4、2 以上で読み出し精度は 100% となることがわかる。また、図5の結果から、細かなテクスチャーをもつ被写体 A でも精度よく情報の読み出しが可能であることがわかった。

被写体 B のほうが被写体 A より読み出し精度が低い。この理由は被写体 B には黄色の領域が多く、この領域の青色光の反射率がほぼ 0 と非常に低いことにある。すなわち、情報は青色成分光に埋められたので、この領域



(a) 被写体 A



(b) 被写体 B

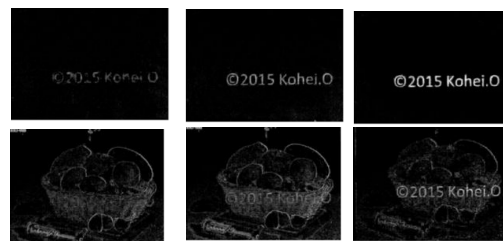
図5 情報読み出し精度のシミュレーション結果

の情報が欠落したと考えられる。しかし、このような情報欠落があっても上述のように小さな B で 100% の読み出し精度が達成でき、本方法がロバスト性の高い方法であることが確認できた。

##### (2) 有効な光の構造化法

時間的輝度変調によりパターンを埋め込む際、使用する色成分として、3 つの色成分を試したが、いずれもフレーム差分画像において被写体像が完全に除去できずノイズとして残ることがわかった。このノイズは緑成分で最も少ないので、パターンは緑成分に埋め込むこととした。

図6に埋め込みパターンの読み出し結果例を示す。上段は比較のため被写体に白紙を用いたときの結果、下段は図3に示す被写体を用いたときの結果である。いずれも 30 フレームにわたり差分画像を加算した画像である。



(a) B=4 (b) B=6 (c) B=10

図6 埋め込みパターンの読み出し結果の例

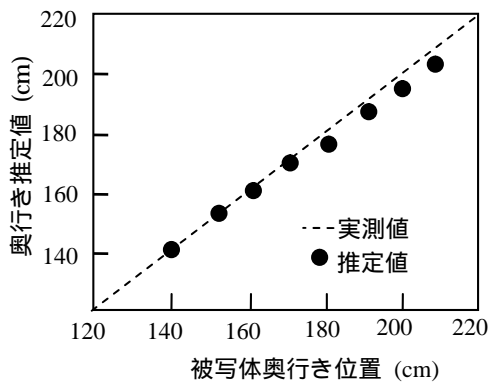


図7 被写体の奥行き推定結果

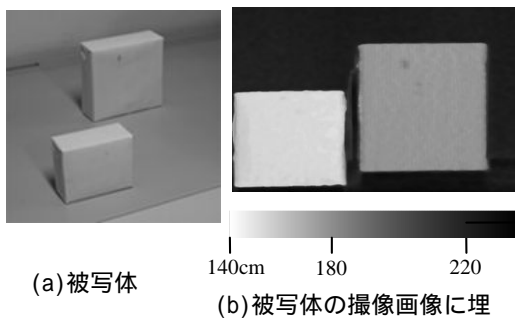


図8 時間的輝度変調により埋め込んだパターンを読み出した例

図6から、上述のように被写体自身のテクスチャが完全に除去されずノイズとして残りパタンの可読性を低下させていることがわかる。このようなノイズがあるものの、 $B$ が6以上になるとパターンを読み取れることがわかり、本方法の実現性を確認することができた。

不可視性の評価から、 $B$ が10以下でパターンは光の中、撮像画像の中のどちらでも不可視とすることができ、不可視性と可読性をともに満足できる  $B$  が存在することを確認した。しかし、このマージンを広げ本技術の実用性を高めるためには、埋め込んだパタンの可読性、不可視性の改善が不可欠であり、そのために残留ノイズの低減が必要である。撮像画像においてパターンエッジなど輝度変化が大きい場所で大きなノイズが発生すること、また緑成分画像より青および赤成分画像でノイズが多いことなどから、ノイズはMotion-JPEGによる符号化に起因して発生していると考えられる。今後、ノイズの原因の詳細な解析と低減法を検討していく。

### (3) 奥行情報埋め込み技術

図7に実際の被写体の奥行き位置と本提案法で求めた被写体位置の関係を示す。図7から、本方法で得られた被写体の奥行きは、5%程度の誤差はあるものの、実際の被写体の奥行きの増加にともなって増加し、本方法が原理通りに機能することがわかる。

図8に本方法により得られたデプスマップの例を示す。これは、奥行き方向に異なる位置に配置された二つの物体のデプスマップ

であり、テーブル上に配置された2つの物体と背景について、それぞれの奥行きに相当したデプスマップが得られていることがわかる。奥行きの値も大部分で正確である。ただし、パターンエッジや複雑なテクスチャー部分など被写体の輝度変化の大きな部分では十分な精度が得られておらず、今後はこのような部分での精度を改善していく。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

H. Unno, S. Isaka, and K. Uehira, New Technique for Embedding Depth Information in Captured Images Using Light Beam Containing Invisible High-Frequency Patterns, IEEE/OSA Journal of Display Technology, 査読有, Vol. 11, No.2, 2015, pp.136 - 145

Y. Ishikawa, K. Uehira, K. Yanaka, Tolerance Evaluation for Defocused Images to Optical Watermarking Technique, 査読有, IEEE/OSA Journal of Display Technology, Vol.10, No.2, 2014, pp. 94-100

M. Komori and K. Uehira, Optical watermarking technology for protecting portrait rights of three-dimensional shaped real objects using one-dimensional high-frequency patterns, Journal of Electronic Imaging, 査読有, Vol. 22, No. 3, 2013, pp. 033004-1 - 033004-7

[学会発表](計3件)

P. Silapasuphakornwong, H. Unno, and K. Uehira, Information embedding in real object images using temporally brightness-modulated light, 査読有, Proceedings of SPIE OPTICS+PHOTONICS, 2015年2月、San Francisco

K. Uehira, H. Unno, and Y. Takashima, Optically Written Watermarking Technology Using Repeated Block Patterns, 査読有, Proceedings of the 2nd International Conference on Human-Computer Interaction, 2014年8月、Prague

H. Unno, S. Isaka, and K. Uehira, New technique for embedding depth information in captured images using light containing invisible high-frequency patterns, 査読有, Proceedings of IEEE IAS, 2013年10月、Orlando

6 . 研究組織

(1)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