

# 視覚特性を利用した画像型デジタルコンテンツの不正コピー防止

塩田 和也<sup>†1</sup> 吉田 英樹<sup>†2</sup> 曽我 正和<sup>†3</sup>  
 田窪 昭夫<sup>†4</sup> 林部 敬吉<sup>†5</sup> 中村 逸一<sup>†6</sup>  
 水野 忠則<sup>†5</sup> 西垣 正勝<sup>†5</sup>

現在、様々なコンテンツがデジタル化されインターネットや CD-ROM 等の媒体を介して広く流通している。しかしその一方で、デジタルデータであるがためにコンテンツの不正コピーが容易であるという大きな問題をかかえている。このような問題に対し、様々な不正コピー防止方式が提案されているが、どの方式も完全に不正コピーを防止するには至っていない。その理由として、どの方式においても PC 内に必ずオリジナルデータが存在することがあげられる。本論文では、不正コピー防止が不可能である原因はオリジナルデータそのものが流通していることにあると考え、オリジナルデータそのものが流出することのない方式として「変調データ配信方式」を提案する。変調データ配信方式の実現の第 1 歩として、適用対象を静止画とし、人間の視覚特性を利用したデータ変調処理と知覚的仮想再現の方法を示す。まず、継時加法混色を利用した変調方式として「輝度変更型変調方式」を提案し、その動作や効果、問題点等について検討する。続いて、輝度変更型変調方式の耐性に関する問題点の検討を基に、2 つ目の変調方式である「並置混色型変調方式」を提案したうえで両変調方式を組み合わせた「併用方式」を提案し、その動作や効果等を検討する。

## Digital Image Content Protection Using Human Visual Performance Characteristics

KAZUYA SHIODA,<sup>†1</sup> HIDEKI YOSHIDA,<sup>†2</sup> MASAKAZU SOGA,<sup>†3</sup>  
 AKIO TAKUBO,<sup>†4</sup> KEIKICHI HAYASHIBE,<sup>†5</sup> ITSUKAZU NAKAMURA,<sup>†6</sup>  
 TADANORI MIZUNO<sup>†5</sup> and MASAKATSU NISHIGAKI<sup>†5</sup>

Nowadays, digital contents are distributed via several media such as Internet and CD-ROM and so on. On the other hand, there is a problem of illegal copying. So far, a variety of methods such as cryptography and digital watermarking have been widely studied. However, the conventional methods are not enough to protect digital contents from illegal copying. This paper proposes to distribute a "tainted data", in which any image data is intentionally tainted. The tainted image data has less quality of image than original one, so that a content provider can distribute the tainted image free. Another important definition of the "image tainting" is that the tainted images are virtually reproduced on viewer's eye. This means that viewer can perceive the original image, while the tainted image is displayed on viewer's PC. It is expected that copy protection is achieved by image tainting, since there exists no original image anywhere. As a pilot study on image tainting, this paper discusses a "brightness modulation", "juxtaposition mixture modulation" and "the combinational modulation scheme".

†1 静岡大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University

†2 株式会社 NTT データビジネスソリューション事業本部システムソリューション BU セキュリティSU

Security Service Unit, Business Solutions Sector, NTT DATA CORP.

†3 岩手県立大学ソフトウェア情報学部

Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

†4 東京電機大学情報環境学部情報環境工学科

School of Environment Information, Tokyo Denki Uni-

## 1. はじめに

インターネットで流通するコンテンツはデジタルデータであるため、作成や編集、複製等の作業がアナログデータと比較してはるかに容易であり、これがディ-

versity

†5 静岡大学情報学部情報科学科

Faculty of Informatics, Shizuoka University

†6 北京 NTT データ系統集成有限公司

Beijing NTT DATA Systems Integration Co., Ltd

ジタルデータの優れている点である。また、アナログデータの多くが使用または複製を繰り返すことによりその品質が劣化していくのに対し、デジタルデータは同様の作業によってその品質が劣化することはない。しかし、これらの特徴が悪用された場合、オリジナルデータと同品質のデータがいくらかでも不正にコピーされることになる。現在このような不正コピーが行われることが、著作権を有するコンテンツや有料コンテンツを扱う著作者や配信者に大きな問題として認識されている。

不正コピーの問題に対し、これまでに数多くの手法が提案、研究されている。画像データを対象とした不正コピー防止方式を例にあげると、代表的な例として、電子透かし技術<sup>1)</sup>や暗号技術<sup>2),3)</sup>を利用した方式、コンピュータの PrintScreen 機能等を制御する方式等がある。また、これらのソフトウェア的な対策のほかハードウェア的な対策も存在する<sup>4)~8)</sup>。しかし、これらの方式を用いたとしても不正コピーを完全に防止することは不可能である。なぜならば、どの方式においても必ずオリジナルデータがコンピュータ内に存在する瞬間があり、その瞬間を狙われる可能性があるからである。

したがって、我々はデータの利用可能な環境のいかなる場所においてもオリジナルデータがいっさい存在しない解決方法を提案し、かつ現行の PC においても容易に実現できるようにソフトウェア的な手法によってその提案方法を実装する。本論文では、その解決方法として、オリジナルデータへの復元に多大なコストを必要とするほどの変調を施すことによりオリジナルデータよりも品質の劣る変調データを作成し、変調データを流通させる「変調データ配信方式」を提案する。本方式の大きな特徴は、配信されているときだけでなく、ユーザの PC 内で使用されているときさえ、データはつねに変調されており、オリジナルデータはどこにも存在しないことである。そして、実際に変調データ配信方式を実現するための現実的な方法について検討する。

以降では、2 章において従来の不正コピー防止手法の利点と欠点について述べ、根本的な問題点を明確にする。3 章で変調データ配信方式に求められる 4 つの要求条件（変調、不正合成耐性、知覚的仮想再現、不正閲覧耐性）を提唱する。4 章では、その現実的な一実現方式として、人間の視覚特性を利用した輝度変更型変調方式を提案し、視覚特性を基盤とした変調処理

や CRT ディスプレイを使用した知覚的仮想再現について詳細に述べる。5 章では輝度変更型変調方式の問題点をあげ、問題点を改善する方法を提案する。6 章で今後の課題等を述べ、7 章で本論文をまとめる。

## 2. 従来方式

本章では、不正コピー防止方式として提案、研究されてきた方式を例にあげ、各方式の特徴や問題点等について述べる。

### 2.1 電子透かし技術を利用した方式

電子透かし技術はデータの品質をほとんど劣化させることなく、データそのものに著作者情報や売買情報等を透かし情報として埋め込む技術である。電子透かし技術はデータの不正コピーを不能にする技術ではなく、不正コピーに対する抑止力として働く。しかし、透かし情報が埋め込まれた電子データを不正コピーしても誰にも見つからないのならば、抑止効果は期待できない。すなわち、電子透かしを不正コピーの抑止力として機能させるためには、至るところで透かし検証が行われるような社会的枠組みが必須となる。

不特定多数による透かしの検査が可能であれば、文献 14) の方法等を用いて、インターネット上に公開されているすべてのコンテンツの透かしを検査することができる。そのためには、誰でも透かしを検証できる電子透かし技術が必要となる。しかし従来の電子透かしは、透かし情報の除去または改竄に対する耐性を備えるために透かし埋め込み位置等を秘密にせざるをえず、透かしの検証ができるのは配信者（コンテンツホルダ）のみになってしまう。一極集中による検査では「至るところでの透かし検証」は不可能である。不特定多数による透かしの検査が可能であるような公開鍵暗号型の電子透かしは、基本アイデアについては文献 15) 等に提案されているものの、いまだ研究途上の段階である。

### 2.2 暗号技術を利用した方式

#### 2.2.1 基本的な使用形態

暗号技術を利用した方式では、基本的に、配信者がオリジナルデータを暗号化して暗号化データを配信し、正規ユーザが暗号化データを復号してオリジナルデータを使用するという形態をとる。これにより、確かに正規ユーザにのみ安全にデータを配信することが可能になるが、正規ユーザの手元では暗号化データはオリジナルデータに戻るわけであるので、正規ユーザに悪意があれば即座に不正コピーが横行することになる。つまり暗号技術は、配信におけるデータを管理すること（ディストリビューションコントロール）は可

能であるが、ユーザの手元で使用されるデータの管理（ユースコントロール）を実現するには至っていない。

### 2.2.2 自己復号型プログラム

2.2.1 項において述べた問題に対する対策の1つとして、自己復号型プログラムの使用があげられる。自己復号型プログラムは、暗号化データに復号用のプログラムが付加されている形態となる。暗号化データは、プログラムの実行時にのみ主メモリ上に復号されて使用されるため、HDD等の外部記憶装置にオリジナルデータが保存されることはない。しかし、データの使用時（プログラムの実行時）に主メモリ上に展開されているオリジナルデータを、PrintScreen機能等のキャプチャプログラムや機械語レベルのメモリアクセス命令等を用いて不正にコピーすることが可能である。また、正規ユーザが自分の復号鍵を他人に譲ることを厭わなければ、復号鍵と自己復号型プログラムを合わせて配布することによって、他人がデータを不正に使用することが可能になってしまう。すなわち、自己復号型プログラムによっても、データのユースコントロールを完全に実現することは難しい。

### 2.2.3 再暗号化技術

暗号技術を利用した他の対策として、再暗号化技術<sup>16)</sup>があげられる。再暗号化技術とは、外部記憶装置等へのデータの不正コピーを防止するために、保護対象となっているデータがCPUから外に出る時点で、OSがそのデータを自動的にかつ強制的に暗号化する技術である。さらに、鍵センタで鍵を中央管理して使用のたびに鍵を変更することにより、コンテンツの使用管理（Digital Rights Management）を行うことが可能である。しかし、

- データの使用時には主メモリ等にオリジナルデータが展開されているため、やはり、その点がセキュリティホールとして狙われる、
  - 保護すべきデータとそれ以外のデータとを区別する情報が存在しているのであれば、その情報を操作することにより、データ保存の際の強制的な暗号化を回避することも可能である、
  - OSレベルでの改造が必要、
  - 鍵センタと毎回の通信を行う必要がある、
- 等の問題が残る。

### 2.3 PrintScreen機能等を無効化する方式

2.2節でも述べたように、PrintScreen機能等のキャプチャプログラムは不正コピーの温床となっている。これを制御する方式として、PrintScreenを無効化する機能を有するプラグインをWebブラウザに追加する製品等が提供されている<sup>17)</sup>。その中には、ブラウザ

のキャッシュデータの暗号化を併用するプラグインも存在する。しかし、

- PrintScreen以外の方法（たとえば機械語レベルのメモリアクセス命令等）により、主メモリやVRAMに展開されているオリジナル画像データを不正にコピーするという攻撃が考えられる、
- 既存の製品ではPrintScreenの無効化は一般にDLLのフックにより実装されているが、これを改造または回避してしまえば、PrintScreenの無効化は機能しなくなる、

等の問題が残る。

### 2.4 ハードウェアの改造による方式

#### 2.4.1 動的復号型表示方式

オリジナルデータがユーザのコンピュータ内に存在することが不正コピー防止を困難にしている原因であるととらえ、その対策を提案した研究に文献8)がある。この研究では、VRAM上では画像データをつねに暗号化しておき、VRAMからディスプレイに信号を出力する際に出力信号を動的に復号することにより、VRAM上にオリジナル画像データを存在させることなくオリジナル画像をディスプレイに表示させることを可能にしている。VRAM上では画像データはつねに暗号化されているため、PrintScreenにより画像のコピーを行っても、表示されている画像を取得することは不可能である。ソフトウェア的な対処と比較すると、ハードウェア的な対処である動的復号型表示方式は非常に有効な不正コピー防止方式であるといえる。しかし、ハードウェアに手を加える方法は、現行のPCの環境に即座に適用することが難しい。また、デジタルディスプレイの場合は、VRAMだけでなく、ディスプレイへの出力信号も保護しなければならない<sup>18)</sup>。

#### 2.4.2 CMP

動的復号型表示方式はVRAMを搭載したビデオカードのハードウェア的な改造を行うことによって実現されているが、CPU全体をハードウェア的に保護しようという方式にCMP（Crypto Micro Processor<sup>4)-7)</sup>があげられる。CMPではCPUや暗号化・復号モジュールがハードウェア的に封印されている。主メモリや外部記憶装置上のデータは必ず暗号化されており、暗号化データは復号モジュールで復号されたうえでCPUに読み込まれ、CPU内のデータは暗号モジュールで暗号化されたうえで記憶装置に戻される。CMPは再暗号化技術をハードウェア的に実装したものととらえることができるが、主メモリのデータをも暗号化している点が再暗号化技術よりも頑強である。

CMP もハードウェア的に対策をする分、効果が高いが、やはり、現行の PC の環境への適用性に問題がある。また、再暗号化技術と同様、保護すべきデータとそれ以外のデータとを区別する情報が存在しているのであれば、その情報を操作することにより、強制的な暗号化を回避することが可能である。

### 3. 変調データ配信方式

2 章で例にあげた従来の不正コピー防止技術のほとんどが、データのコースコントロールを完全に実現できていないという共通した問題をかかえている。2 章で論じたように、オリジナルデータが PC 内に存在するという現在の PC の仕様が、データのコースコントロールを困難なものにしている。逆に考えると、PC 内にオリジナルデータがまったく存在しなければ不正コピーのしようがない。この着想に基づく不正コピー防止方式として、本論文では「変調データ配信方式」を提案する。変調データ配信方式においては、オリジナルデータへの復元に多大なコストを必要とするほどの変調を施すことによりオリジナルデータよりも品質の劣る変調データを作成し、その変調データを流通させることにより不正コピーの防止が図られる。本方式の大きな特徴は、配信されているときだけでなく、ユーザの PC 内で使用されているときでさえ、データはつねに変調されており、オリジナルデータはどこにも存在しないことである。

#### 3.1 要求条件

変調データ配信方式においては以下の事項が運用において要求される条件となる。

- (1) コンテンツ作成者もしくは配信者はデータに変調を施すことにより、その価値が失われるほどに品質を落とした「変調データ」を作成することができる。
- (2) 変調データにおける変調は正規ユーザであっても除去することはできず、変調データからオリジナルデータが復元されることはない。
- (3) 「知覚的仮想再現」を用いることにより、ユーザは変調データに施されている変調を動的に除去し、正しく使用することが可能となる。知覚的仮想再現とは、変調データに対し何らかの復元処理を行ってオリジナルデータを生成することではなく、オリジナルデータの持つ情報と同等の情報を正規ユーザに知覚させることである。すなわち、配信されるときだけでなく、データが PC 内で使用されている際にもオリジナルデータは存在しないということに注意されたい。

- (4) ある変調データに対して知覚的仮想再現を行うことができるのは、その変調データを使用する権利を有する正規ユーザのみである。

要求条件 (1) および (2) を満たすことにより、オリジナルデータを有する者は配信者（コンテンツ作成者またはコンテンツホルダ）だけとなる。オリジナルデータに復元できないほどの変調が施されており、変調データからオリジナルデータを不正に合成することも不可能であるため、配信者以外の者がオリジナルデータを有する術はなくなる。すなわち、世の中に流通しているデータは変調データのみであり、配信者以外は誰もオリジナルデータを不正コピーすることはできない。変調データは価値が劣化したデータであるため、不正コピーの対策をとる必要がない。

要求条件 (1) および (2) のみを満たした場合は、ユーザが変調データを使用することも不可能である。そこで、要求条件 (3) をともに満たすことにより、ユーザにオリジナルデータと同等の情報を動的に知覚させることが可能になる。ここで、ユーザはオリジナルデータと同等の情報を「知覚」しているだけであり、オリジナルデータそのもの（またはオリジナルデータに近い品質のデータ）は主メモリや外部記憶装置をはじめ、いかなる場所にもいっさい生成されていない。そのため、データの保存時だけでなく使用時においてもオリジナルデータが不正にコピーされることはない。

要求条件 (1), (2), (3) を満たすことにより、オリジナルデータそのものを流通させないことにより不正コピーを不可能とし、かつ使用時にはオリジナルデータを復元することなくオリジナルデータと同等の情報を知覚させることが可能になる。しかし、これだけでは使用する権利を持たない不特定多数のユーザまでもオリジナルデータと同等の情報を知覚できてしまうという「不正使用」が可能になってしまう。これに対し、要求条件 (4) を満たすことにより、正規ユーザだけがデータを使用することができるようになり、不正使用を防止することができる。

#### 3.2 従来方式との比較

変調データ配信方式が不正コピーに対してどの程度の効果を有するのかを示すために、本節では 2 章で紹介した方式と変調データ配信方式との比較を行う。各方式の不正行為に対する効果を表 1 に示す。なお、ここで比較している変調データ配信方式は、要求条件 (1), (2), (3), (4) を理想的な状態で満たしているとする。

表 1 に示したように、変調データ配信方式はディストリビューションコントロールとコースコントロール

表 1 提案方式と従来方式との技術面での比較

Table 1 Technical comparison of the proposed scheme with the conventional schemes.

	ディストリビューションコントロール	コースコントロール				
	配信経路の盗聴に起因する不正コピーの防止	画像の保存による不正コピーの防止	Printscreenによる不正コピーの防止	メモリアクセスによる不正コピーの防止	出力信号の取得による不正コピーの防止	ハードウェアの必要性
変調データ配信方式	○	○	○	○	○	無
CMP	○	○	○	○	×	有
動的復号型表示方式	○	○	○	○	×	有
Printscreen機能等の無効化	×	○	○	×	×	無
再暗号技術	○	○	○	×	×	無
暗号技術	○	×	×	×	×	無
電子透かし技術	×	×	×	×	×	無

の両方を実現できると考えられる。なぜならば、3.1 節で述べた要求条件をすべて満たしていれば、配信経路からであろうがユーザの PC 内からであろうが、オリジナルデータを不正に取り出すことは不可能だからである。これに対し、従来の方式は、主メモリ等の記憶装置や出力信号に直接アクセスされる攻撃に対して脆弱であるという点において変調データ配信方式に及ばない。従来方式が PC 内に存在するオリジナルデータを「隠す」または「守る」という方針であるのに対し、変調データ配信方式は PC 内にオリジナルデータをつねに「存在させない」という方針をとっている。このコンセプトの違いが、メモリへの直接アクセス等の攻撃に対する耐性として表れている。

### 3.3 変調データ配信方式の実現

変調データ配信方式を完全に実現するためには 3.1 節で述べた要求条件をすべて満たす必要がある。しかし、復元が不可能な変調データを作成すること（要求条件 (1) および (2)）、その変調データを知覚的仮想再現により正しくユーザに使用させること（要求条件 (3)）、さらに知覚的仮想再現を正規ユーザにだけ許可すること（要求条件 (4)）を一度に実現するのは非常に困難であると考えられる。

その一方で、著者らの調査から、コンテンツ作成者にとって自分の作品の唯一性が損なわれることが致命的な問題であり、たとえば画像コンテンツの作成者は「自分の作品をユーザに広く見てもらいたいのに、そのためには、ユーザの PC にオリジナル画像のコピーを届けなければならない」というジレンマをかかえていることが分かっている。このため、オリジナルデータをユーザの PC に届けることなく、データの使用を可

能にする変調データ配信方式であれば、安心してデータをユーザに供することができるという声が多く聞かれた。

さらに、コンテンツプロバイダにとっては、コンテンツの不正コピーが発見された際の知財権に関する抗争（裁判）が悩みの種となる。たとえば CMP や再暗号化等を利用した場合には、不正者が「システムや CPU の誤動作等が原因でオリジナルデータが記憶装置に出力されてしまったに違いない」と主張した場合に、裁判の場でそれを論破するには労力がかかってしまう。これに対して、変調データからオリジナルデータを不正に合成することが可能であったとしても、変調データ配信方式においては「正規の」オリジナルデータがユーザの手元に存在するはずがないので、万一、オリジナルデータに近い品質のデータがユーザの PC 内に存在することが発覚した場合には、それはユーザが悪意を持って合成したものであるということが断定できる。よって、どこにもオリジナルデータがないという変調データ配信方式は、不正コピーに対するユーザの悪意を証明できるという点からも、大きな安心感が得られるということであった。

そこで本論文では、3.1 節における要求条件 (2) を「変調データからオリジナルデータを復元するには対応の処理が必要となる（要求条件 (2')）」という内容に読み替え、まずは、要求条件 (1)、(2')、(3) のみを満たすことのできる方式の実現を目指すことにする。要求条件 (2) および (4) を満たしていない場合は、CMP や再暗号化等の従来方式と変調データ配信方式との技術的な差異は薄れてしまうものの、変調データ配信方式がもたらす利用者の安心感という観点は従来

表 2 提案方式と従来方式との運用面での比較

Table 2 Operational comparison of the proposed scheme with the conventional schemes.

	証拠・追跡 能力	配信者の 安心感
変調データ配信方式	○	○
CMP	△	×
動的復号型表示方式	△	×
Printscreen 機能等の無効化	△	×
再暗号技術	△	×
暗号技術	△	×
電子透かし技術	○	×

の不正コピー防止技術にない特徴であり、研究・開発を進めていく価値を十分有していると考えられる。これを表 2 に示した。本方式は、電子美術館やインターネットを介しての試展会等のように「不特定多数による視聴はかまわないが、コンテンツのオリジナルデータそのものが意図しない所で不正にコピーされることは許可できず、オリジナルデータに相当するデータの存在が発覚した際には、その所持者を法的に確実に処罰できることを望む」ようなコンテンツホルダにとっては有用なソリューションとなりうる。

また、本論文では、変調データ配信方式の第 1 歩目の研究ということで、コンテンツの対象は静止画のみに限定することとする。静止画は、著作コンテンツの流通量も多く、また、PC に標準で付加されている PrintScreen 機能や画像のディスプレイへの出力等、コピーが行われやすい状況にあるとよい。したがって、静止画を優先的に扱うことは理にも適していると考えられる。

### 3.4 実現の方針

変調データ配信方式の大原則は、いかなる場所にもオリジナル画像が存在しないことである。変調画像をオリジナル画像として知覚するには、どこかで何らかの方法により変調の効果を除去してやる必要がある。この 2 つの相反する要求を満たすには、人間が行う脳内の情報処理の過程でオリジナルデータを復元する仕組みが必要となる。

よって、本論文では変調データ配信方式における要求条件 (3) を実現するために、人間の知覚系や脳における情報処理に関する特徴等を利用することにし、人間の視覚特性を利用した変調処理と知覚的仮想再現を可能とする方式の実現を目指す。

## 4. 輝度変更型変調方式

人間の視覚の時間的分解能の限界を利用した変調方式を提案する。「視覚の時間的分解能」とは、異なる

時刻に視覚刺激が提示されたときに、提示された刺激のそれぞれが異なる時間に提示されているものであることを区別できる能力である。人間は、時間的分解能の限界以上の視覚刺激を受けた場合に、すなわちあまりに短い時間的間隔 (50 ~ 60 Hz 以上) で画像が切り替わると、時間的に変化する視覚刺激を区別することができなくなる<sup>19)</sup>。たとえば 2 つの異なる色が高速に切替え表示された場合には、2 つの色が混色して知覚される。これは、「継時加法混色」という言葉で知られている人間の視覚特性である。輝度変更型変調方式では、この継時加法混色を利用して変調と知覚的仮想再現を行う。

### 4.1 変調処理

輝度変更型変調方式の変調処理の概観を図 1 に示す。図 1 に示されている変調処理の具体的な手順は以下のとおりである。

Step 1 入力された画像のある 1 画素の R 成分, G 成分, B 成分それぞれに対して (a) ~ (c) の処理を行う。

(a) 階調レベル  $l_0$  から輝度レベル  $L_0$  を計算する。

$$L_0 = 255 \cdot \left( \frac{l_0}{255} \right)^\gamma \quad (1)$$

(b)  $L_0$  に変調量  $\alpha$  を加えて  $L_1$  を、 $L_0$  から変調量  $\alpha$  を減じて  $L_2$  を得る。

$$L_1 = L_0 + \alpha, \quad (2)$$

$$L_2 = L_0 - \alpha \quad (3)$$

(c)  $L_1, L_2$  から階調レベル  $l_1, l_2$  を計算する。

$$l_1 = 255 \cdot \left( \frac{L_1}{255} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (4)$$

$$l_2 = 255 \cdot \left( \frac{L_2}{255} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (5)$$

Step 2 画像の全画素の RGB 各成分に対して Step 1 の処理を行う。

Step 3  $l_1$  の階調レベルにより構成される画像を「変調画像 1」、 $l_2$  の階調レベルにより構成される画像を「変調画像 2」として出力する。

ここで、 $L_0, L_1, L_2$  はそれぞれオリジナル画像、変調画像 1、変調画像 2 の各画素の RGB 各成分の輝度レベルを表し、 $l_0, l_1, l_2$  はそれぞれオリジナル画像、変調画像 1、変調画像 2 の各画素の RGB 各成分の階調レベルを表す。 $\gamma$  は CRT ディスプレイのガンマ値であり、 $\alpha$  は変調量を表す。 $\alpha$  は画素ごとに、さらにはその画素の RGB 成分ごとに独立した値をとることが可能であり、 $\alpha$  の選択によっては、ノイズが付加されたように見える変調画像や、全体的に画像の明

暗が変更された変調画像を作成することが可能である。

なお継時加法混色は、ディスプレイに表示される画像の光の強さ（輝度）の観点で、2色の平均色が知覚されるという現象であるので、輝度を用いて変調処理を行う必要がある。しかし、PCでは輝度を正確に表現することはできず、画像の記録フォーマットにおいて使用される0~255のRGB値（階調レベル）によって画像が表現される。よって、本変調処理では、階調レベルから「輝度レベル」と呼ぶ擬似的な輝度を計算によって求め、その値を使って変調を施す方法をとっている。

CRTディスプレイにおいては、輝度レベルと階調レベルの関係はCRTディスプレイのガンマ特性（入力信号と出力信号が非線形の関係にある特性<sup>20)</sup>）に依存する。したがって、ガンマ特性を考慮すれば、階調レベルから輝度レベルへの変換または輝度レベルから階調レベルへの変換が可能となり、結果としてPC内で輝度の変調を擬似的に行うことが可能となる。上記の変調手順では、輝度レベルで起こる混色を考慮してPC側で変調画像を生成する必要があるため(a)で階調レベルから輝度レベルへの変換を行ったうえで(b)において変調画像の輝度レベルを算出し、再び(c)で輝度レベルから階調レベルの画像に戻している。

#### 4.2 知覚的仮想再現

知覚的仮想再現は変調画像に施された変調を閲覧時に人間の知覚上で動的に除去することである。輝度変更型変調方式の変調処理によって作成された変調画像の変調を除去する場合、変調画像を高速に切替え表示することによって画像の知覚的仮想再現を実現することができる。知覚的仮想再現の概観を図2に示す。

閲覧者が行うことは、専用のプログラムを使用して2枚の変調画像を高速に切替え表示することのみであ

---

ガンマ特性はディスプレイの機種が同じでもばらつきがあるため、現時点では、事前に一度、ディスプレイごとに以下のような調整をすることにより、 $\gamma$ の値を決定している。(1) R, G, B, モノクロそれぞれにおいて階調レベル0から階調レベル255までで構成されるグラデーション画像を用意する。(2) (1)の画像をオリジナル画像とし、 $\gamma$ の値を仮定したうえで、そのオリジナル画像から変調画像を作成する。(3) (1)のオリジナル画像と(2)の高速切替え表示画像を並べて表示する。(4) 両画像が同じ色に知覚されるまで $\gamma$ の値を徐々に変更しながら(2), (3)を繰り返す。

人間の視覚上で画像の復号をするという意味では、本方式は視覚復号型の秘密分散(VSS)技術<sup>21)</sup>と類縁の研究であると考えられる。しかし、VSSのコンセプトは「計算機を使用しない」で、2枚(もしくは複数枚)のシェア画像を静的に重ね合わせて復号することであり、ネットワークを介した「計算機を使用して」のセキュア画像配信を目的とする本論文とは主旨が異なるものである。このため、本論文では、2章および3章における本方式の比較検討対象にVSSを含めていない。

このとき、異なる(輝度レベルの)色が高速に切り替えられることにより、中間の(輝度レベルの)色が知覚されるという継時加法混色起きる。その結果、変調画像1に施された変調(輝度レベルの $+\alpha$ の変更)と変調画像2に施された変調(輝度レベルの $-\alpha$ の変更)が互いに打ち消されて、変調が施される前のオリジナル画像とほぼ同画質の画像が知覚される。提示する光の輝度や背景の平均輝度に左右されるが、CRTディスプレイに1枚の画像を表示する際に、人間がフリッカを知覚しなくなる周波数は50~60Hzであることが分かっている<sup>19)</sup>。よって、1枚の変調画像を50~60Hz以上、すなわち2枚の変調画像を100~120Hzで切替え表示することにより、ユーザにフリッカを知覚させることなくオリジナル画像と同画質の画像を知覚させることが可能になる。

ここまでの記述で分かるように、知覚的仮想再現はオリジナル画像と同画質の画像をPC内で復元して、その画像を静的に表示することではなく、文献8)のようにディスプレイへの出力信号を動的にオリジナル画像の信号に復号することでもない。知覚的仮想再現による変調の除去は人間の脳内で行われており、PCでは変調画像の高速切替え表示以外の処理はまったく行われてはいない。したがって、PCおよびディスプレイから接続ケーブルに至るまですべての機器内には一瞬たりともオリジナル画像が存在することはない。そのため、知覚的仮想再現時にディスプレイに表示されている画像を取得しようとしても、取得できるのは変調画像のみであり、不正者がオリジナル画像を手に入れることは不可能である。

#### 4.3 知覚的仮想再現による画像の再現性の検証

輝度変更型変調方式が変調データ配信方式を実現するための要求条件(3)を満たしているかどうかを実験により検証した<sup>10)-12)</sup>。文献10)では、モノクロ、R, G, B画像に対する輝度変更型変調画像の知覚に関する主観評価実験、文献11), 12)では、自然画像やCG等に対する輝度変更型変調画像の知覚に関する主観評価実験、客観評価実験を行った。ここでは紙面の都合上、文献10)において「混色実験」と呼ばれている主観評価実験の結果のみを説明する。

混色実験では、色の異なる画像を2枚選択し、それらの高速切替え表示画像がどのような色に知覚されるかを被験者に評価してもらう実験である。評価実験の手順を以下に示す。

Step 1 実験に使用する画像として、階調レベルが  $(R, G, B) = (255, 0, 0)$   $(R, G, B) = (0, 255, 0)$   $(R, G, B) = (0, 0, 255)$   $(R,$

$G, B) = (0, 255, 255)$  ( $R, G, B) = (127, 255, 0)$  ( $R, G, B) = (127, 0, 255)$  の 6 枚の平坦画像を用意する。ここでは、それぞれを RED, GREEN, BLUE, CYAN, YELGRN, BLUMAG と呼ぶことにする (図 3)。そして、(変調画像 1, 変調画像 2) のペアとして ( $RED, GREEN$ ) ( $GREEN, BLUE$ ) ( $BLUE, RED$ ), ( $RED, CYAN$ ) ( $YELGRN, BLUMAG$ ) を使用する。

**Step 2** 変調画像 1 と変調画像 2 を高速に切替え表示する画像を ST (標準刺激), 被験者自身が階調レベルを変更できる静止画像を CM (比較刺激) とする。CM の階調レベルは 0 から 255 の間で変更することができる。

**Step 3** 被験者は変調画像のペアそれぞれに対して, Step 4~6 を行う。なお, 測定はディスプレイから発せられる光以外の影響を抑えるために, 暗幕によって被験者とディスプレイを覆う形で行われる。また, 視角が変わらないように被験者の頭を固定する棒を設置した (図 4)。

**Step 4** 標準刺激 ST と比較刺激 CM をディスプレイに表示する。ここで, 画面中央上部に円形の領域を表示し, 円の右側に ST, 円の左側に CM を映す (2 分円等色法<sup>19)</sup>)。背景は GRAY ( $[R, G, B] = [127, 127, 127]$ ) に固定する。画面のサイズは縦 273.6, 横 364.8 mm である。画面から目までの距離は約 65 cm とし, 円の直径は約 2.3 cm とする。画面の視角は垂直方向が約 24 度, 水平方向が約 32 度, ST, CM が映されている円の視角は約 2 度である (図 4)。

**Step 5** 被験者は, ディスプレイに表示されている標準刺激 ST と比較刺激 CM を見比べ, CM が ST と同じ色になるように CM の色を調節する。被験者が ST と同じくらいの色だと感じる CM の値を記録していく。各測定を終えるごとに, 今まで被験者が見ていた画像が被験者の眼に与える影響を消すために, 30 秒間ディスプレイ全体を GRAY にする。

**Step 6** 変調画像の組合せ各々につき, 各被験者が 8 回の測定を行う。その 8 回の中に上昇的調整 (CM の初期値をより暗い画像の階調レベルから始める) と下降的調整 (CM の初期値をより明るい画像の階調レベルから始める) を, 上昇, 下降, 下降, 上昇, 下降, 上昇, 上昇, 下降の順に配置する。その 8 回の測定で記録された階調レベルを平均した値を実験結果とする (精神物理学的測定法の中

の調整法<sup>19)</sup>)。

使用機器は, CRT ディスプレイ: SONY GMD-F400 (ディスプレイの解像度: 1,024 画素  $\times$  768 画素, リフレッシュレート: 100 Hz, ブライトネス 100%, ガンマ値: 2.2), CPU: PentiumII 400 MHz, ビデオボード: 3D Blaster RIVA TNT2 Ultra である。21~24 歳の男子学生 10 名を被験者として上記実験を行い, PSE (Point of Subjective Equivalence: 主観的等価値) を求めた結果, 高速切替え表示されている 2 つの色の輝度レベルの中間色が知覚されていることが確かめられた。すなわち, 4.1 節の変調アルゴリズムによって生成された 2 枚の変調画像を高速切替え表示することにより, オリジナル画像が知覚されることが確認できた。

また, 自然画像およびイラスト画像を例にとった場合の変調画像を図 5, 図 6 に示す。図 5, 図 6 の例では, 変調量  $\alpha$  を各画素の RGB 各成分ごとに (変調後の画素の階調レベルが 0~255 の値に収まる値の中から) 乱数により決定しているが, 変調量  $\alpha$  を各画素の RGB 各成分でとりうる最大値 (変調後の画素の階調レベルが 0 または 255 の値となるような変調) とするという工夫も可能である。

#### 4.4 輝度変更型変調方式の問題点

##### 4.4.1 問題点 1: 変調による画質劣化度の低さ

輝度変更型変調方式の問題点として, まず, 変調画像に大きな変調を施すことができない場合があることがあげられる。大きな変調を施すことができない理由は, 変調後の画像の各画素の階調レベルを 0~255 に収めなくてはならないため, 変調量  $\alpha$  の値が制限されることにある。たとえば, 輝度レベルが 127 のオリジナル画像における変調量の最大値は 127 である (輝度レベル 0 と輝度レベル 255 の混色により輝度レベル 127 が知覚される) のに対し, 輝度レベルが 240 のオリジナル画像における変調量の最大値はわずか 15 である (輝度レベル 225 と輝度レベル 255 の混色により輝度レベル 240 が知覚される)。そのため, 中間色が多く含まれるオリジナル画像から変調画像を生成した場合には, 変調によってある程度の画質劣化が見込めるが, 原色が多く含まれるオリジナル画像から変調画像を生成した場合は, オリジナル画像に近い変調画像となってしまう。この問題は, アニメーション画像やイラスト画像において顕著に発生しており, 最悪の場合, 1 枚の変調画像にノイズ除去等の画像処理<sup>22)</sup> を

本実験をはじめ, 各種の実験結果の詳細な数値等に関しては各参考文献<sup>10)~12)</sup> を参照されたい。



施すだけでオリジナル画像と同画質の画像が復元される可能性もありうる。したがって、少ない変調量でも大きな画質劣化が得られるような工夫が必要となる。

#### 4.4.2 問題点 2: オリジナル画像と同画質の画像の合成

輝度変更型変調方式においては、残念ながら、コンテンツの「不正閲覧」と「不正合成」の阻止に関しては達成されていない。不正閲覧とは、すべての変調画像を不正コピーして、高速に切替え表示すれば、誰でもオリジナル画像に知覚できる画像を閲覧することが可能であるという問題である。不正合成は、すべての変調画像の輝度レベルの平均（階調レベルに対してはガンマ値を考慮した加重平均）をとることにより、オリジナル画像が生成されるという問題である。本論文では、まずは 3.1 節および 3.3 節で示した要求条件 (1), (2'), (3) を満たす変調データ配信方式の実現を考えるため、正規ユーザ以外によるコンテンツの不正合成を禁止する要求条件 (2) および不正閲覧を禁止する要求条件 (4) については本論文のスコップから外れることになる。しかし、オリジナル画像の不正合成に対しては相応の耐性が望まれるという要求条件 (2') より（不正合成を完全に阻止することはできないとしても）できる限りの耐性を本方式に与えるにこしたことはない。

### 5. 問題の対策

#### 5.1 問題点 1 の対策: 変調画像のスクランブル特性の強化

各画素の変調量  $\alpha$  に一定の法則性を与えることによりスクランブル特性を向上させる方法を 2 例示す。

##### 5.1.1 色調を考慮しての変調量の決定

問題点 1 の解決の方法として、 $\alpha$  の正負と絶対値を固定する方法を試みる。すなわち、変調画像を作成する際に、各画素の R 成分に対する変調量  $\alpha$  の符号を負に、G 成分に対する変調量  $\alpha$  の符号を正に、B 成分に対する変調量  $\alpha$  の符号を負にそれぞれ固定し、1 つの画素の RGB 各成分においては変調量  $\alpha$  の絶対値を同一にする。よって、たとえば輝度レベルが  $(R, G, B) = (127, 127, 127)$  の画像に対し、 $\alpha$  の絶対値を 100 として画像変調を行った場合には  $(R, G, B) = (27, 227, 27)$  の変調画像 1 と  $(R, G, B) = (227,$

$27, 227)$  の変調画像 2 が生成されることになる。この結果、変調画像 1 は全体的に緑がかった画像となり、変調画像 2 は全体的に紫がかった画像となる。本項で提案する方法によって作成された変調画像を図 7 に示す。ランダムノイズが付加された場合（図 6）の変調画像は、ノイズが付加されてはいるが全体的にオリジナル画像の色調を保っているのに対し、本方法によって作成された変調画像は、ある一部の色が退色しているような画像となる。なお、本方式においては、変調量  $\alpha$  を各画素の RGB 各成分でとりうる最大値とするという工夫を追加する効果が大いである。この結果、変調画像に必ず階調レベルが 0 または 255 の画素が多数存在することになり、各変調画像における画素間の差分情報が失われ、1 枚の変調画像からオリジナル画像を推測することがさらに困難になるからである。図 7 には、変調量  $\alpha$  を最大値とした例を示してある。

##### 5.1.2 モザイク処理に基づく変調量の決定

変調画像がモザイク処理された画像になるように、各画素に適用する変調量  $\alpha$  を調整して変調を行うという方法も、劣化度を向上させるための一方法としてあげられる。具体的には、オリジナル画像に対してモザイク処理を施した画像を中間画像 1 とし、画素ごとに中間画像 1 の輝度レベルとオリジナル画像の輝度レベルの差分をオリジナル画像から減じた画像を中間画像 2 とする。この時点では、中間画像 1 はモザイク画像であるが、中間画像 2 はモザイク画像ではない。そこで、中間画像 1 と中間画像 2 の任意の領域を入れ替えることにより、どちらの中間画像にもモザイク処理された領域ができるようにする。中間画像の任意の領域を入れ替えた画像が変調画像 1、変調画像 2 である。

モザイク処理された画像は、高周波成分が除去された画像、すなわち低周波成分のみで構成されている画像であり、低周波成分のみの画像から高周波の値を推測してオリジナル画像を完全に復元することは困難であると考えられる。本項で提案する方法によって作成された変調画像を図 8 に示す。

#### 5.2 問題点 2 の対策: 並置混色型変調方式と併用方式の提案

輝度変更型変調方式は継時加法混色を利用しているため、画像の不正合成は変調画像の輝度レベルの平均（階調レベルに対してはガンマ値を考慮した加重平均）をとることにより行われる。したがって、変調画像の平均化処理を行ってもオリジナル画像を合成することが不可能であるような変調方式を考案することができれば、その変調方式と輝度変更型変調方式を組み合わせることにより、画像の不正合成に対する耐性を向上

たとえば、4.1 節に示した変調処理アルゴリズムが公開されている場合には、ガンマ値  $\gamma$  のみが秘密のパラメータとなるため、この値を何らかの方法で測定（または推定や総当たり）して変調の逆変換処理を施されると、オリジナル画像が合成されてしまう。

させることが可能になると考えられる．本節ではそのような変調方式として並置混色型変調方式を新たに提案し，この方式と輝度変更型変調方式を組み合わせた併用方式を示す<sup>13)</sup>．

並置混色型変調方式は，人間の視覚の空間的分解能の限界を利用した変調方式である．「視覚の空間的分解能」とは，異なる位置に視覚刺激が提示されたときに，提示された刺激のそれぞれが異なる位置に提示されているものであることを区別できる能力である．人間は，空間的分解能の限界以上の視覚刺激を受けた場合，すなわちあまりに狭い空間的間隔で視覚刺激が切り替わると，空間的に変化する視覚刺激を区別することができなくなり，異なる色が混色して知覚される<sup>19)</sup>．たとえば，印刷物の色は複数の色の点を細かく敷き詰めることによって表現されている．これは，「並置加法混色」という言葉で知られている人間の視覚特性である．並置混色型変調方式では，この並置加法混色を利用して変調と知覚的仮想再現を行う．

### 5.2.1 並置混色型変調方式の変調処理

並置混色型変調方式の変調処理の概観を図9に示す．輝度変更型変調方式においては，オリジナル画像の各画素の輝度レベル  $L_0$  に対して  $\pm\alpha$  の変調を加えることにより変調画像が作られるが，並置混色型変調方式においては， $L_0$  に対して  $+\beta_1$  および  $-\beta_2$  ( $\beta_1 \neq \beta_2$ ) の変調を加えた場合に適度な変調画像が得られることが経験的に分かっている．図9に示されている変調処理の具体的な手順は以下のとおりである．

**Step 1** 入力された画像のある1画素のR成分，G成分，B成分それぞれに対して(a)～(c)の処理を行う．

(a) 階調レベル  $l_0$  から輝度レベル  $L_0$  を計算する．

$$L_0 = 255 \cdot \left( \frac{l_0}{255} \right)^\gamma \quad (6)$$

(b)  $L_0$  に変調量  $\beta_1$  を加えて  $L_1$  を， $L_0$  から変調量  $\beta_2$  を減じて  $L_2$  を得る．

$$L_1 = L_0 + \beta_1, \quad (7)$$

$$L_2 = L_0 - \beta_2 \quad (8)$$

(c)  $L_1, L_2$  から階調レベル  $l_1, l_2$  を計算する．

$$l_1 = 255 \cdot \left( \frac{L_1}{255} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (9)$$

$$l_2 = 255 \cdot \left( \frac{L_2}{255} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (10)$$

**Step 2** 画像の全画素のRGB各成分に対してStep1の処理を行う．

**Step 3**  $l_1$  の階調レベルにより構成される画像を中

間画像1， $l_2$  の階調レベルにより構成される画像を中間画像2とする．

**Step 4** 中間画像1および2の各画素のR成分，G成分，B成分それぞれに対して，以下の処理を施し，中間画像1と中間画像2の画素を選択的に入れ替えることにより，両画像を市松模様化する．

$$\text{if}(\text{position} = 1) \quad l_1' = l_1 \quad (11)$$

$$l_2' = l_2 \quad (12)$$

$$\text{elseif}(\text{position} = 0) \quad l_1' = l_2 \quad (13)$$

$$l_2' = l_1 \quad (14)$$

**Step 5**  $l_1'$  の階調レベルにより構成される画像を変調画像1， $l_2'$  の階調レベルにより構成される画像を変調画像2として出力する．

$L_0, L_1, L_2$  はそれぞれオリジナル画像，中間画像1，中間画像2の輝度レベルを， $l_0, l_1, l_2, l_1', l_2'$  はそれぞれオリジナル画像，中間画像1，中間画像2，変調画像1，変調画像2の階調レベルを表す． $\gamma$  はCRTディスプレイのガンマ値を表す．positionは，Step4で中間画像1と2の対応画素を入れ替えるかどうかの値として用いられ，「配置パターン」によって各画素におけるposition値(0または1)が決定される．本論文では配置パターンとして1画素単位の市松模様を使用する．すなわち，1枚の変調画像において明るい画素( $L_1$ )と暗い画素( $L_2$ )が狭い間隔で規則的に配置され，その結果として並置加法混色が動く画像が生成されることになる．

経験的に，CRTディスプレイで黒(輝度レベル0)と白(輝度レベル255)の画素を1画素単位で市松模様と並べて表示した際に並置加法混色によって知覚される画像は，黒と白の中間値(輝度レベル127)よりも暗い色に知覚されることが分かっている．既存のPC用のCRTディスプレイにおいては，リフレッシュレートを最大に設定した場合，1画素分の蛍光体に電子ビームが当てられる時間は数ナノ秒程度となるが，そのために，1画素ごとに白と黒が反転する市松模様を表示しようとしても，ナノ秒単位で電子ビームの強度を急激に変化させることができず，電子ビームを必要な強度まで引き上げることができない，もしくは，蛍光体が求められている輝度に達する前に電子ビームが次の画素に移動してしまうことが，考えられる原因の1つとしてあげられる．

この現象に関して，明るい画素と暗い画素を市松模様状に配置した画像がどのくらいの輝度レベルに知覚されるのかを調査したところ，著者らの主観評価で

は、並置混色型変調方式における輝度レベルの知覚は図 10 のような傾向にあることが分かった。なお、文献 10) における実験実行時から時間が経過しており、研究室の実験装置用の物品が変更になっていた関係で、本調査は CRT ディスプレイ：iiyama HM204D (ディスプレイの解像度：1,152 画素 × 864 画素、リフレッシュレート：120 Hz、ブライツネス：100%、ガンマ値：2.4)、CPU：Pentium4 3 GHz、ビデオボード：LeadTek WinFast A350 XT-TDH を用いて実施した。図 10 は、たとえば、輝度レベル  $s_1$  と輝度レベル 0 の画素を 1 画素単位で市松模様状に配置した 2 枚の変調画像を高速切替え表示した場合には輝度レベル  $s_0$  が、輝度レベル 255 と輝度レベル  $t_2$  の画素を 1 画素単位で市松模様状に配置した 2 枚の変調画像を高速切替え表示した場合には輝度レベル  $t_0$  が、輝度レベル 0 と輝度レベル 255 の画素を 1 画素単位で市松模様状に配置した 2 枚の変調画像を高速切替え表示した場合には輝度レベル  $L_p$  が、それぞれ知覚されるということを表している。

本調査より、変調画像 1 および 2 を生成するためにオリジナル画像に加えられる変調量 ( $+\beta_1$  および  $-\beta_2$ ) には、不連続性、非線形性が存在することが分かった。このため、変調画像生成手順の Step 1-(b) における  $L_1$  および  $L_2$  の計算式 (式 (7) および式 (8)) は、図 10 の変調画像 1 および 2 のそれぞれの曲線のおおよその形状から、

$$if(L_0 \leq L_p) \\ L_1 = 255 \cdot \left(\frac{L_0}{L_p}\right)^{pow1} \quad (15)$$

$$L_2 = 0 \quad (16)$$

$$if(L_0 > L_p) \\ L_1 = 255 \quad (17)$$

$$L_2 = \left\{ \frac{255 \cdot (L_0 - L_p)}{(255 - L_p)} \right\} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{255 - L_0}{255 - L_p}\right)^{pow2} \right\} \quad (18)$$

という式にて近似することとした<sup>1</sup>。ここで、 $L_p$  は輝度レベルが 0 と 255 の画素を 1 画素単位で市松模様状に配置した 2 枚の変調画像を高速切替え表示した場合に知覚される輝度レベルであり、 $pow1$  および  $pow2$  は定数である。なお、これらのパラメータは CRT ディスプレイの構造や仕組みに大きく依存していると推測され、ディスプレイの明るさ・場面領域・リフレッシュ

レート等の状態によってその値が決定されるため、注意が必要である。

本変調方式の大きな特徴は、前述したとおり変調画像 1 に付加する変調量と変調画像 2 に付加する変調量の大きさが  $+\beta_1$  および  $-\beta_2$  となっており、その比が 1:1 ではないという点である。このため、2 枚の変調画像の輝度レベルの平均 (階調レベルに対してはガンマ値を考慮した加重平均) をとったとしても、各画素の変調量が相殺されずに何らかの値が残ることになる<sup>2</sup>。これは輝度変更型変調方式にはない特徴である<sup>3</sup>。

### 5.2.2 併用方式の変調処理

あらかじめ、輝度変更型変調方式を適用する領域と並置混色型変調方式を適用する領域を決めておき、それぞれの領域においてそれぞれの変調処理を行って変調画像を作成する。

輝度変更型変調方式に対しては、4.3 節に示したように、オリジナル画像の輝度レベルを  $+\alpha$ 、 $-\alpha$  することにより変調画像を作成してやれば、変調画像の高速切替え表示によりオリジナル画像と同等の画像が知覚される。そこで、併用方式において輝度変更型変調方式を適用する領域に対しては、変調量  $\alpha$  を各画素の RGB 各成分でとりうる最大値 (変調後の画素の階調レベルが 0 または 255 の値となるような変調) とすることにす。なお、ガンマ値  $\gamma$  の決定に関しては、4.1 節の脚注に示した方法を用いている。

一方、並置混色型変調方式に対しては、5.2.1 項に示したように、オリジナル画像の輝度レベルを  $+\beta_1$ 、 $-\beta_2$  ( $\beta_1 \neq \beta_2$ ) することにより変調画像が作成されることになるが、これを実現するにあたり、 $\beta_1$  および  $\beta_2$  の値を決定するためのパラメータ ( $L_p$ ,  $pow1$ ,  $pow2$ ) を決定する必要がある<sup>4</sup>。

そこで、4.3 節に示した文献 10) の混色実験をベースに、主観評価実験を繰り返すことにより、 $L_p$ ,  $pow1$ ,  $pow2$  を調整することとした。手順を以下に示す。

**Step 1** R, G, B, モノクロのそれぞれにおいて、輝度レベルが 0 と 255 の画素を 1 画素単位で市松模様上に配置した変調画像のペアを作成する。

**Step 2** 被験者は変調画像のペアのそれぞれに対して、4.3 節に示した実験手順の Step 2~6 を行い、

<sup>2</sup> 詳細については付録 A.2 を参照されたい。

<sup>3</sup> ただし、並置混色型変調の処理アルゴリズム (5.2.1 項) が公開されている場合、秘密のパラメータである  $L_p$ ,  $pow1$ ,  $pow2$  の値を推定 (または総当たり) して変調の逆変換処理を施されると、オリジナル画像は合成可能である。

<sup>4</sup> ガンマ値は輝度変更型変調方式の  $\gamma$  と同じ値である。

<sup>1</sup> 詳細については付録 A.1 を参照されたい。

表 3 並置混色型変調方式の知覚的仮想再現に関する実験結果

Table 3 Experimental result of virtual reproduction for juxtaposition mixture modulation.

被験者番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R 平均	129.0	128.3	130.6	128.8	128.8	128.8	127.9	128.3	128.6	127.3
R 標準偏差	1.69	1.58	2.62	1.98	1.58	1.98	3.04	1.98	4.60	2.19
G 平均	132.4	133.0	134.4	132.3	133.3	131.4	134.1	133.4	129.9	129.9
G 標準偏差	3.25	1.60	1.60	1.16	1.58	0.92	1.25	1.41	4.09	3.87
B 平均	133.0	131.8	134.3	134.3	133.9	132.1	133.0	132.0	128.1	131.5
B 標準偏差	2.07	1.75	1.83	2.49	2.10	2.64	1.51	1.93	4.22	2.93
モノクロ平均	129.9	127.4	128.9	129.4	128.3	129.3	131.3	131.0	128.6	130.3
モノクロ標準偏差	4.67	2.13	2.42	2.45	1.91	3.28	2.05	1.20	3.20	1.58

知覚される画像の階調レベルに対する PSE を求める．この値を輝度レベルに変換した値が  $L_p$  である．

**Step 3**  $pow1$ ,  $pow2$  の値を仮定して，並置混色型変調の処理アルゴリズム (5.2.1 項) によって，階調レベルの異なる複数の R 画像，G 画像，B 画像，モノクロ画像のそれぞれに対して変調画像のペア (変調画像 1 および 2) を作成する．

**Step 4** 被験者は変調画像のペアそれぞれに対して，4.3 節に示した実験手順の Step 2~6 を行い，知覚される画像の階調レベルに対する PSE (Point of Subjective Equivalence: 主観的等価値) を求める．

**Step 5** 各 PSE がそれぞれのオリジナル画像に十分近くなるまで， $pow1$ ,  $pow2$  の値を変更して，Step 4 および Step 5 を繰り返す．

**Step 6** 必要に応じ，他の画像に対しても Step 3~5 を行う．

実験は，図 10 のデータを測定したときと同じ機材を使用した．また，被験者は 21~26 歳の男子学生 10 名である．

本実験の結果， $L_p$ ,  $pow1$ ,  $pow2$  の値は RGB 成分それぞれによって幾分異なり，

$$(L_{pr}, pow1_r, pow2_r) = (84.0, 0.93, 2.4)$$

$$(L_{pg}, pow1_g, pow2_g) = (72.0, 0.93, 2.0)$$

$$(L_{pb}, pow1_b, pow2_b) = (72.0, 0.93, 2.0)$$

という設定をした場合に，実験に使用したすべての画像に対して，5.2.1 項の変調アルゴリズムによって生成された 2 枚の変調画像を高速切替え表示した画像がオリジナル画像に十分近い画像として知覚されることが確認できた．その際の PSE の値の一例を表 3 に示す．この例では，階調レベルが  $(R, G, B) = (128, 0, 0)$ ,  $(R, G, B) = (0, 128, 0)$ ,  $(R, G, B) = (0, 0, 128)$ ,  $(R, G, B) = (128, 128, 128)$  の 4 枚の画像をオリジナル画像として使用した．表 3 から，全被験者が，R, G, B, モノクロのすべてにおい

て，オリジナル画像の階調レベルである 128 に十分近い PSE 値を示していることが確かめられる．

以上より，併用方式において並置混色型変調方式を適用する領域に対しては上記のパラメータを使用することにする．図 11 に併用方式を用いて作成した変調画像の例を示す．図 11 の変調画像には「SAMPLE」という文字が浮かび上がって見えるが，この文字外の領域に輝度変更型変調が，文字内の領域に並置混色型変調が施されている．

### 5.2.3 知覚的仮想再現

輝度変更型変調方式と同様に，作成された変調画像を高速切替え表示することにより，併用方式の変調画像が知覚的仮想再現される．CRT ディスプレイのリフレッシュレートは 100~120 Hz 以上が望ましい．

なお，並置混色型変調方式は，明るい色と暗い色を格子状に配置してオリジナルの色を知覚させるため，各々の変調画像 1 枚の中で知覚的仮想再現が実現されている．すなわち，並置混色型変調方式が適用されている領域は，高速切替え表示を行わなくてもオリジナル画像と同様に知覚されることに注意されたい．並置混色型変調方式を適用した領域のみについていえば，高速切替え表示は必要ないと考えられるが，実際に高速切替え表示を行って見たところ，並置混色型変調方式を適用した領域の粗さが若干目立たなくなるような効果が見られている．

現段階では，併用方式の知覚的仮想再現の確認は，単一の実験装置 (CRT ディスプレイ: iiyama HM204D (ディスプレイの解像度: 1,152 画素 × 864 画素, リフレッシュレート: 120 Hz, ブライトネス: 100%, ガンマ値: 2.4), CPU: Pentium4 3 Ghz, ビデオボード: LeadTek WinFast A350 XT-TDH) における 10 名の被験者による主観評価を行っているのみである．今後，広範囲かつ詳細な実証実験を行う予定である．

### 5.2.4 併用方式の画像合成に対する耐性

作成された変調画像には輝度変更型変調方式を適用した領域と並置混色型変調方式を適用した領域が混在

している．輝度変更型変調方式の変調は，4.1 節の変調アルゴリズムより，輝度レベル  $L_0$  のオリジナル画像に対して，変調画像 1 および 2 の輝度レベルが  $L_0 + \alpha$ ， $L_0 - \alpha$  となる．よって，2 枚の変調画像を輝度レベルにおいて単純に平均すると  $\{(L_0 + \alpha) + (L_0 - \alpha)\} / 2$  が得られ，オリジナル画像  $L_0$  が求まることになる．一方，並置混色型変調方式の変調は，5.2.1 項の変調アルゴリズムより，輝度レベル  $L_0$  のオリジナル画像に対して，変調画像 1 および 2 の輝度レベルが  $L_0 + \beta_1$ ， $L_0 - \beta_2$  ( $\beta_1 \neq \beta_2$ ) となる．よって，2 枚の変調画像を輝度レベルからオリジナル画像  $L_0$  を求めるには，輝度レベルにおいて  $\{\beta_2(L_0 + \beta_1) + \beta_1(L_0 - \beta_2)\} / (\beta_1 + \beta_2)$  の加重平均を計算する必要がある．

以上より，両変調方式を併用した場合には，(1) 2 枚の変調画像全体の輝度レベルを単純に平均すると，輝度変更型変調の領域の輝度レベルはオリジナル画像  $L_0$  に戻るものの，並置混色型変調の領域は  $L_0 + (\beta_1 - \beta_2) / 2$  の輝度レベルとなりオリジナル画像に戻らない，(2) 2 枚の変調画像全体の輝度レベルを  $\beta_2 : \beta_1$  の比で加重平均すると，並置混色型変調の領域の輝度レベルはオリジナル画像  $L_0$  に戻るものの，輝度変更型変調の領域は  $L_0 + \alpha(\beta_2 - \beta_1) / (\beta_1 + \beta_2)$  の輝度レベルとなりオリジナル画像に戻らない，という結果となることが分かる．そのため，すべての変調画像を用いて輝度変更型変調方式の変調を除去しようとしても並置混色型変調方式の変調が残り，逆に，すべての変調画像を用いて並置混色型変調方式の変調を除去しようとしても輝度変更型変調方式の変調が残ることになり，不正合成の痕跡が残る．

2 枚の変調画像に対して，輝度変更型変調方式の変調を除去するように処理した画像，並置混色型変調方式の変調を除去するように処理した画像を図 12 に示す．図 12 の例のように，輝度変更型変調方式を適用する領域と並置混色型変調方式を適用する領域を明示的に区別することによって，不正合成をした途端に可視型透かしが現れる（変調画像を知覚的仮想再現により表示しているときにはオリジナル画像として知覚されていた画像を，不正に合成して 1 枚の画像に戻した途端に，オリジナル画像に文字が浮かび上がる）ような効果が期待できる．しかし，この方法は 2 つの変調方式の境界を明白にすることにつながり，結果として，それぞれの領域を分割してそれぞれの領域を適切な合成処理を用いて部分画像を合成し，その部分画像を結合させることによってオリジナル画像と同画質の画像を合成するという攻撃を許すことになる．画像合成に対する耐性を向上させるには，2 つの変調方式

を適用する領域を，人間にも PC にも分割困難なほどに複雑に区別する必要があると考えられる．

## 6. 考察と検討

本章では，変調データ配信方式および輝度変更型・並置混色型変調に関する考察，今までに認識されている問題点，今後の展開および課題についての検討を行う．

### 6.1 変調量の大きさの制限

画像変調後の階調レベルを 0 ~ 255 に収めなくてはならないため，変調量 ( $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) の値が制限されてしまう．5.1 節では，変調量が小さくても変調画像が大きく劣化しているように見えるような変調方式の工夫を示したが，これは根本的な解決法ではなく，極端な例では，オリジナル画像が白色単色画像や黒色単色画像である場合にはまったく変調をかけることができない．継時加法混色や並置加法混色に代わる他の視覚特性が上手く利用可能であれば，問題の解決が図られるかもしれない．

### 6.2 知覚的仮想再現の再現性の制限

知覚的仮想再現によって知覚される画像は，同じ変調画像であっても，CRT ディスプレイの画面領域，リフレッシュレート，ガンマ値等に大きく左右される．したがって，異なるディスプレイを用いた場合にはもちろんのこと，同一の CRT ディスプレイを使用しても各種設定を変更すると知覚される画像が異なった色に見える場合がある．本方式を完全に実用的にしていく場合においては，CRT ディスプレイの性質の差異を吸収できるような工夫を考えていく必要がある．

### 6.3 不正使用の防止

画像データにおけるコンテンツの不正使用は不正閲覧と不正合成に大別される．不正合成に対しては，5.2 節に輝度変更型変調方式と並置混色型変調方式の併用方式を示して耐性の改善を図ったが，暗号学的にはいまだ非常に脆弱な方法にすぎない．現時点では不正閲覧と不正合成の両者を完全に阻止するという要求条件については本論文のスコープから外したが，本来は，変調データ配信方式はこれらの要求条件をも完全に満たす方式に昇華させていくべきである．ただし，万人に共通な人間の視覚特性を利用した表示方法をとっている以上，不正閲覧や不正合成を完全に防止することは難しいように思われる．視力の違い等，ユーザ間の個人差が存在する視覚特性を活用する等の方策が必要なかもしれない．

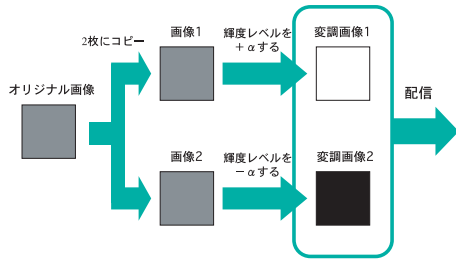


図 1 輝度変更型変調方式の変調処理の概観

Fig.1 Modulation process for brightness modulation.

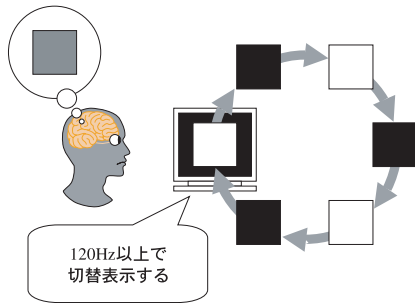


図 2 輝度変更型変調方式の知覚的仮想再現の概観

Fig.2 Virtual reproduction for brightness modulation.

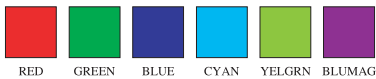


図 3 混色実験に使用する変調画像

Fig.3 Tainted images for experiment.

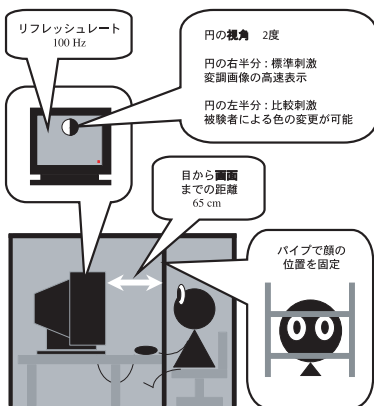
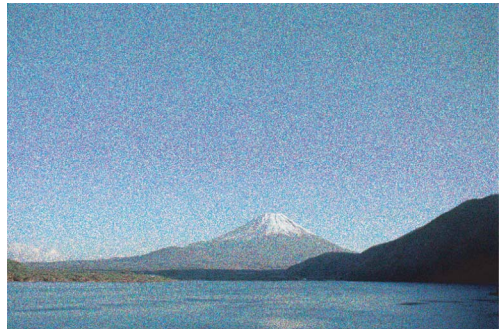


図 4 実験環境と操作画面

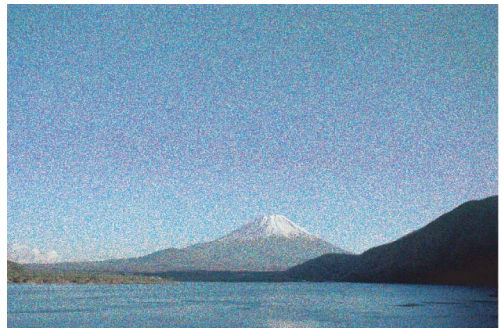
Fig.4 Experimental environment and screen for manipulation.



(a) オリジナル画像



(b) 変調画像 1



(c) 変調画像 2

図 5 輝度変更型変調方式による変調画像 (自然画像)

Fig.5 Tainted images modulated by brightness modulation (natural image).





(a) オリジナル画像



(b) 変調画像 1



(c) 変調画像 2

図 6 輝度変更型変調方式による変調画像 (イラスト画像)

Fig. 6 Tainted images modulated by brightness modulation (illustration image).



(a) 変調画像 1



(b) 変調画像 2

図 7 色調を考慮した輝度変更型変調方式による変調画像

Fig. 7 Tainted images modulated by brightness modulation with color coordination.

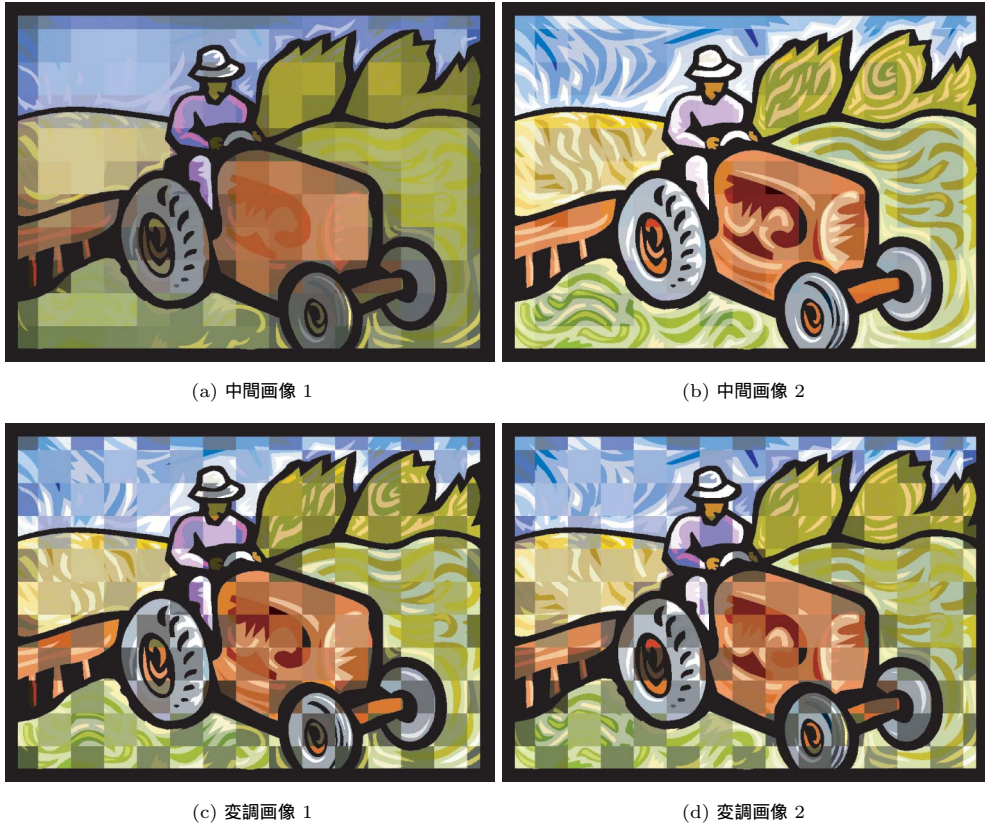


図 8 モザイク処理を適用した輝度変更型変調方式による変調画像  
 Fig. 8 Tainted images modulated by brightness modulation with image mosaicing.

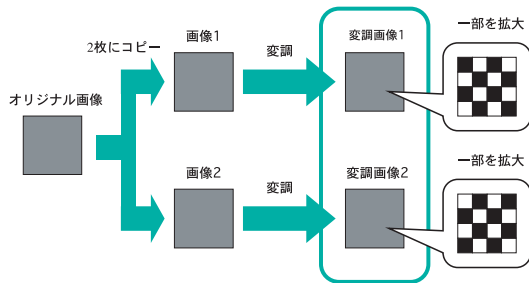


図 9 並置混色型変調方式の変調処理の概観  
 Fig. 9 Modulation process for modulation scheme with color juxtaposition.

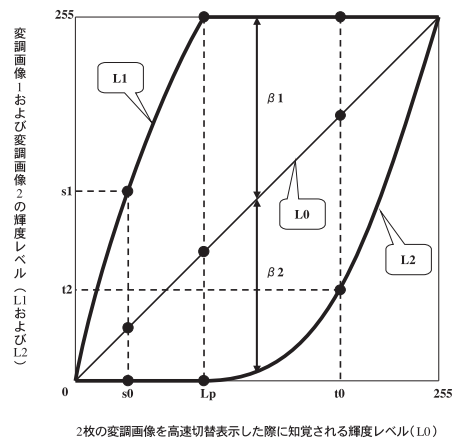


図 10 並置混色型変調方式における輝度レベルの知覚の傾向  
 Fig. 10 Experimental result of perception by modulation scheme with color juxtaposition.



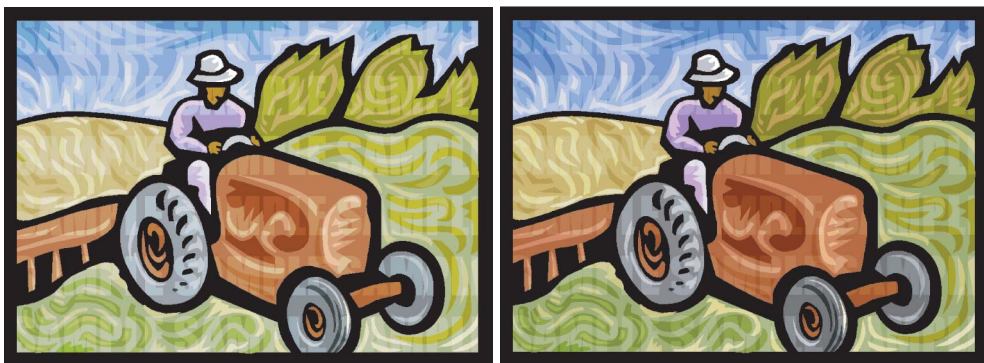


(a) 変調画像 1

(b) 変調画像 2

図 11 併用方式による変調画像

Fig. 11 Tainted images modulated by combinational modulation.



(a) 輝度変更型変調方式の変調を除去するように処理した画像

(b) 並置混色型変調方式の変調を除去するように処理した画像

図 12 合成画像の例

Fig. 12 Images synthesized from tainted images modulated with combinational modulation.

#### 6.4 LCD ディスプレイ等に対する適用可能性

本論文において提案した各変調方式の効果は、いずれも CRT ディスプレイにおいてのみ、その効果が確認されており、LCD ディスプレイをはじめとする他の表示機器における効果は未知数である。LCD ディスプレイは近年の普及率が激増していることから、LCD ディスプレイにおける変調方式、知覚的仮想再現についても考慮する必要がある。なお、現在の技術レベルにおいては、一般的に液晶の反応速度が知覚的仮想再現に必要な 100 ~ 120 Hz のリフレッシュレートに追いついていないという問題もある。

#### 6.5 表示可能な変調画像の枚数

$n$  枚の変調画像をフリッカを知覚させずに知覚的仮想再現により表示させるためには、 $50n \sim 60n$  Hz のリフレッシュレートが必要である。現在の技術レベルにおいては、CRT ディスプレイでさえ、4 枚以上の変調画像を用いて高速切替え表示を行うことはできない。

## 7. ま と め

本論文では、従来のデジタルコンテンツの不正コピー防止手法の問題点をあげ、不正コピーを防止する方式として新たに変調データ配信方式を提案した。変調データは不完全な（劣化した）データであるため、いくらコピーされたとしても問題ない。従来の不正コピー防止技術と異なり、変調データが使用される瞬間においても、どこにもオリジナルデータが存在しないことが大きな特長である。不正コピー防止の対象として静止画に焦点をあて、変調データ配信方式を実現するための手法として、人間の視覚特性を利用した輝度変更型変調方式を提案した。変調画像は、画像の閲覧の際に、変調画像を高速に切替え表示することにより、人間の目（脳）において復元される。また、並置混色型変調方式を提案し、並置混色型変調方式と輝度変更型変調方式の併用方式を示した。今後は、本方式の不正耐性を改善するとともに、適切な画質評価、安全性

評価を行い、本方式の有効性及び適用範囲について検討していく必要がある。

謝辞 本研究の文献 10), 11) の成果に関しては, DCAj (旧, MMCA) の「視覚心理効果を利用した不正コピー防止システムに関する調査研究」ならびに「視覚心理効果を利用した不正コピー防止システムの開発に関するフィジビリティスタディ」のプロジェクトの助成を受けた。

### 参 考 文 献

- 1) Zhao, J. and Koch, E.: Embedding robust labels into images for copyright protection, *Proc. ICIPR* (1995).
- 2) Diffie, W. and Hellman, M.E.: New direction in cryptography, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.IT-22, No.6, pp.644-654 (1976).
- 3) Rivest, R.L., Shamir, A. and Adleman, L.: A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems, *Comm. ACM*, Vol.21, No.2, pp.120-126 (1978).
- 4) Best, R.M.: Crypto microprocessor for executing enciphered programs, US patent 4278837. Issued September 1981.
- 5) Best, R.M.: Crypto microprocessor that executes enciphered programs, US patent 4465901. Issued September 1984.
- 6) Best, R.M.: Microprocessor for executing encrypted programs, US patent 4168396. Issued September 1979.
- 7) 末松俊成, 今井秀樹: CMP (Crypto Microprocessor) の一構成方法とその応用例, 電子情報通信学会技術報告, ISEC98-8, pp.71-79 (1998).
- 8) 西垣正勝, 小澤卓也, 曾我正和, 田窪昭夫: 動的復号型表示方式による画像コンテンツの不正コピー防止, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.8, pp.1983-1991 (2001).
- 9) 松本昭則, 西垣正勝, 曾我正和, 田窪昭夫: 汚染データ配信方式による画像型デジタルコンテンツの知的財産権保護, 1999年暗号とセキュリティシンポジウム予稿集, pp.439-444 (1999).
- 10) (財)機械システム振興会, (財)マルチメディアコンテンツ振興協会: 視覚心理効果を利用した不正コピー防止システムに関する調査研究報告書 (2001).
- 11) (財)機械システム振興会 (財)デジタルコンテンツ協会: 視覚心理効果を利用した不正コピー防止システムの開発に関するフィジビリティスタディ報告書 (2002).
- 12) 檜川 勝, 塩田和也, 西垣正勝, 曾我正和, 田窪昭夫, 林部敬吉: 輝度値変更型変調方式による画像型デジタルコンテンツの不正コピー防止: 復元された画像についての視覚実験, 情報処理学会研究報告, pp.253-258 (2002).
- 13) 塩田和也, 西垣正勝, 曾我正和, 田窪昭夫, 林部敬吉, 中村逸一: 視覚特性を利用した画像型デジタルコンテンツの不正コピー防止: 並置加法混色型変調の導入, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウム論文集, pp.173-176 (2003).
- 14) 松下哲也, 西垣正勝, 曾我正和, 田窪昭夫, 中村逸一: 賞金稼ぎの仕組みを利用したデジタルコンテンツの監視方式, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.8, pp.1970-1982 (2003).
- 15) 山口和彦, 岩村恵市, 今井秀樹: 誤り訂正符号を用いたアルゴリズム公開型電子透かし, 1999年暗号と情報セキュリティシンポジウム講演論文集, pp.713-718 (1999).
- 16) 三菱商事: ReEncryption. <http://www.reencryption.com/>
- 17) トリニティーセキュリティーシステムズ: Pirates Buster for Picture. <http://www.trinity-ss.com/>
- 18) Digital Content Protection LLC. <http://www.digital-cp.com>
- 19) 大山 正, 今井省吾, 和氣典二: 新編感覚知覚心理学ハンドブック, 誠信書房 (1994).
- 20) Roberts, A.: Measurement of display transfer characteristic ( $\gamma$ ), *EBU Technical Review*, No.257, pp.32-40 (1993).
- 21) Naor, M. and Shamir, A.: Visual Cryptography, *Advances in Cryptology — Eurocrypt '94*, pp.1-12 (1994).
- 22) 橋本有平, 梶川嘉延, 野村康雄: 画像信号の方向性を考慮したインパルス性ノイズ除去手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-A, No.6, pp.759-768 (2001).

### 付 録

#### A.1 並置混色型変調方式における近似式導出の考慮事項

今回は図 10 の実験値から試行錯誤により近似式を導出している。なお,  $L_0 \leq L_p$  の領域における  $L_1$  が, 式 (11) のように  $L_0$  のべき乗 ( $L_0$  を  $L_p$  で正規化した値を  $pow1$  乗し, これを 255 倍して 0~255 の階調レベルの値に戻す) の形で近似可能であったのに対し,  $L_0 > L_p$  の領域における  $L_2$  の値 (式 (14)) は, 式 (11) の鏡像関係の式である

$$255 - 255 \cdot \left( \frac{255 - L_0}{255 - L_p} \right)^{pow2} \quad (19)$$

だけでは実験値とは一致せず, この値にさらに  $(L_0 - L_p)/(255 - L_p)$  を乗じて補正する必要があった。

## A.2 並置混色型変調方式と輝度変更型変調方式との違い

輝度変更型変調の処理アルゴリズム(4.1節)を熟知している攻撃者は、ガンマ値を推測して変調画像1および2の階調レベルを輝度レベルに変換し、その平均をとったものがオリジナル画像の輝度レベルであることを知っている。しかし、並置混色型変調の場合は、輝度レベルが $L_0$ であるオリジナル画像の画素は、変調画像では

$$L_1 = 255 \cdot \left( \frac{L_0}{L_p} \right)^{pow1} \quad (20)$$

$$L_2 = 0 \quad (21)$$

または、

$$L_1 = 255 \quad (22)$$

$$L_2 = \left\{ \frac{255 \cdot (L_0 - L_p)}{255 - L_p} \right\} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{255 - L_0}{255 - L_p} \right)^{pow2} \right\} \quad (23)$$

の輝度レベルとなる。すなわち、その平均をとってもオリジナル画像の輝度レベル $L_0$ に戻らず、輝度レベルで

$$\left\{ 255 \cdot \left( \frac{L_0}{L_p} \right)^{pow1} \right\} / 2 - L_0 \quad (24)$$

もしくは、

$$\left\{ 255 + \left\{ \frac{255 \cdot (L_0 - L_p)}{255 - L_p} \right\} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{255 - L_0}{255 - L_p} \right)^{pow2} \right\} \right\} / 2 - L_0 \quad (25)$$

の誤差が生じる。

## A.3 併用方式に対して考えられる攻撃手順

具体的な攻撃手順は以下のとおりである。

**Step 1** 2枚の変調画像を不正に合成することにより、輝度変更型変調方式が適用されている領域と並置混色型変調方式が適用されている領域を明示的に区分けできる。

**Step 2** 2枚の変調画像に対し、それぞれの領域を切り出す。

**Step 3** 輝度変更型変調方式の領域には、2枚の変調画像を用い、4.1節に示した変調処理アルゴリズムに対して、秘密のパラメータ $\gamma$ の値を測定(または推定や総当たり)して変調の逆変換処理を施し、オリジナル画像を合成する。

**Step 4** 並置混色型変調方式の領域には、2枚の変調

調画像を用い、5.2.1項に示した変調処理アルゴリズムに対して、秘密のパラメータ $L_p$ ,  $pow1$ ,  $pow2$ の値を測定(または推定や総当たり)して変調の逆変換処理を施し、オリジナル画像を合成する。

**Step 5** 合成された各領域の画像を結合する。

(平成16年11月29日受付)

(平成17年6月9日採録)



塩田 和也

平成12年静岡大学情報学部情報科学科卒業。平成14年同大学大学院修士課程修了。現在、同大学院理工学研究科博士後期課程。情報セキュリティに関する研究に従事。



吉田 英樹

平成8年三重大学人文学部卒業。同年日本電信電話株式会社(研究開発職)入社。その後、東日本電信電話株式会社、西日本電信電話株式会社を経て平成14年より株式会社NTTデータにてセキュリティ技術の研究・開発に従事。現在、同社で新規ビジネス案件のチーフプロデューサー。



曽我 正和(正会員)

昭和33年京都大学工学部電子工学科卒業。昭和35年同大学大学院修士課程修了。昭和35~平成8年三菱電機、計算機製作所副所長、情報電子研究所所長を経て平成8年静岡大学情報学部教授、平成11年岩手県立大学ソフトウェア情報学部教授、現在に至る。博士(工学)(東京大学)。汎用計算機、制御用計算機、制御用システムの開発。フォールトトレラントシステム、セキュリティシステムに関する研究に従事。IEEE、電子情報通信学会会員。



田窪 昭夫（正会員）

昭和 41 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。昭和 43 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年三菱電機株式会社入社，平成 10 年静岡大学大学院博士後期課程修了。平成 14 年東京電機大学情報環境学部教授。博士（工学）。モバイルコンピューティング，ネットワーク・セキュリティ，個人情報保護，情報倫理等に興味を持つ。電気学会，IEEE，ACM 各会員。



林部 敬吉（正会員）

昭和 44 年名古屋大学大学院文学研究科修士課程修了。同年名古屋大学助手。昭和 54 年静岡大学助教授。平成 1 年静岡大学教授。現在，情報学部メディア科学講座所属。文学博士。認知科学に関する研究に従事。日本心理学会，日本バーチャルリアリティ学会，日本教育工学会各会員。



中村 逸一（正会員）

昭和 60 年茨城大学工学部卒業。昭和 62 年同大学大学院修了。同年日本電信電話株式会社入社。LAN システムの研究に従事。平成 8 年より（株）NTT データにてセキュリティ技術の研究・開発に従事。平成 16 年より北京 NTT データ系统集成有限公司総経理。博士（工学）



水野 忠則（フェロー）

昭和 20 年生。昭和 43 年名古屋工業大学経営工学科卒業。同年三菱電機（株）入社。平成 5 年静岡大学工学部情報知識工学科教授，現在，情報学部情報科学科教授。工学博士。情報ネットワーク，モバイルコンピューティング，放送コンピューティングに関する研究に従事。著書としては『プロトコル言語』（カットシステム），『コンピュータネットワーク概論』（ピアソン・エデュケーション）等がある。電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員。当会フェロー。



西垣 正勝（正会員）

平成 2 年静岡大学工学部光電機械工学科卒業。平成 4 年同大学大学院修士課程修了。平成 7 年同大学院博士課程修了。日本学術振興会特別研究員（PD）を経て，平成 8 年静岡大学情報学部助手。平成 11 年同講師，平成 13 年同助教授。博士（工学）。情報セキュリティ，ニューラルネットワーク，回路シミュレーション等に関する研究に従事。