

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| 氏 名         | すぎ はら けい じ<br>杉 原 佳 次           |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 (人間・環境学)                    |
| 学 位 記 番 号   | 人 博 第 357 号                     |
| 学位授与の日付     | 平 成 19 年 3 月 23 日               |
| 学位授与の要件     | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当         |
| 研 究 科 ・ 専 攻 | 人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 共 生 人 間 学 専 攻 |
| 学 位 論 文 題 目 | グレイコードの性質を用いた画像処理に関する研究         |

|        |                      |             |             |
|--------|----------------------|-------------|-------------|
| 論文調査委員 | (主 査)<br>教 授 高 崎 金 久 | 助教授 立 木 秀 樹 | 助教授 日 置 尋 久 |
|--------|----------------------|-------------|-------------|

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年、コンピュータネットワークが大容量で高速なものになり、各種の情報機器において画像データを扱う機会が増えるにつれて、画像処理技術についてもこれまで以上に高性能のものが求められている。本研究では画像処理の代表的な分野として画像圧縮とデータハイディングを取り上げて、グレイコードと呼ばれる整数値表現形式に基づく新たな画像処理手法を考案し、実験によってその性能を評価している。

序文である第1章に続く第2章では、本研究の背景として、各種のグレイコードの概念やそのさまざまな応用を概観している。画像データは多数の画素から構成され、各画素には輝度を表す整数値すなわち画素値が指定されている。一般に、このような整数値はそれをそのまま2進数に書き直した純2進コードとして扱われることが多いが、取り扱うデータの種類によっては、純2進コード以外の表現形式を用いて処理効率の向上を図ることも行われる。グレイコードは整数値に対するコードの連続性を重視した表現形式であり、隣接する整数を表すコードが1ビットのみ異なる、という特徴をもつ。グレイコードは最初アナログ・デジタル変換回路の設計のために考案されたが、その後幅広い分野で活用されている。この章では、グレイコードの基本的な性質やいくつかの利用例を紹介した後、本研究のテーマである画像圧縮とデータハイディングの分野における既存の応用例について詳しく解説している。

第3章以降では、画像圧縮とデータハイディングに関して本研究で考案した3種類の新たな手法を順次紹介している。これらの手法はグレイコードがもつ連続性以外の性質も利用するものであり、既存の手法を越える性能を達成している。

第3章ではグレイコードを用いる画像の非可逆圧縮の手法を解説している。グレイコードに基づく画像圧縮の手法は本研究以前にも考案されていた。その基本的考え方は、原画像を適当な処理によって符号化しやすい形に変換した後、グレイコードで表現してビットプレーンに分解し、ビットプレーンのデータをエントロピー符号化や四分木などの方法によって符号化する、というものである。この方法を用いる非可逆圧縮は画像圧縮の標準的手法であるJPEGやJPEG2000に比べて圧縮率が低いという問題を抱えていた。この点を改善するため、本研究では新たにグレイコードを用いる画素値の量子化法GQを導入している。これはグレイコードのもつ代数的性質に基づく方法である。本章で解説されている手法では、予測符号化やウェーブレット変換によって原画像を処理した後、このGQを用いることによって最終的な圧縮率の向上を図っている。紹介されている実験結果によれば、原画像に予測符号化を施した後GQを用いる方法はJPEGよりも高い圧縮率をもつ。また、原画像に予測符号化とウェーブレット変換を組み合わせた処理を行う方法はJPEG2000と同程度の圧縮率をもち、画像の画質が高くなればそれよりも高い圧縮率を達成している。

第4章では画像の部分的改変に対して耐性をもつデータハイディングの手法を解説している。データハイディングはデジタル媒体に対して密かにデータを埋め込む技術であり、画像データの場合には、画像の視覚的变化を可能な限り小さく抑えつつデータを埋め込むことが要求される。その代表的な手法としてBPCSステガノグラフィがあるが、それも含めて従来のほとんどのデータハイディングの手法では、画像全体にデータを埋め込んでいるために、その一部を改変することによっ

て埋め込みデータが失われるという問題があった。本章で紹介している手法では、濃淡画像中の物体の領域を抽出して、その領域のみにデータを埋め込む。一般に、画像中の大きな物体は画像の部分的切り取りや貼り付けなどの操作の際にそのまま保存されると考えられるので、この手法は従来の手法よりも高い耐性をもつ。実際の処理においては、BPCS ステガノグラフィと同様に、画像データをビットプレーンに分解して、各プレーン上のノイズ状の領域を埋め込みデータと置き換える方法を用いているが、ビットプレーンへの分解の際にグレイコードを用いることによって、より正確にノイズ状の領域を判定している。これによって埋め込みによる画像の視覚的变化をより小さく抑さえつつ大量のデータを埋め込むことができ、より少ないオーバーヘッドで埋め込みデータを復元することも可能になる、と期待される。実際に、これらを確認する実験結果が紹介されている。

第5章もデータハイディングに関するものであるが、ここでは埋め込みデータの存在を第三者に検出されないことを目的としている。このような手法の一つとしてLSB ステガノグラフィがあるが、従来のLSB ステガノグラフィの手法に対しては埋め込みデータの検出方法がいくつか考案されており、特に、データ埋め込みによる画像の統計的性質の変化に注目する解析方法が有効とされている。この意味で、従来のLSB ステガノグラフィでは埋め込みデータの存在を秘匿することが難しい。本章で紹介しているのは、統計的解析による埋め込みデータの検出を防ぐことができるような、新たなLSB ステガノグラフィの手法である。この手法もまたグレイコードのもつ代数的性質に注目するものである。この手法ではデータ埋め込みに際して多数の画素値を変更する余地を残しており、それを利用して埋め込み後の画像の統計的性質を調整することができる。したがって、画素値を適当に修正すれば、各種の統計的解析に対して埋め込みデータの検出を防ぐことができると期待される。実際に、3種類の解析方法（RS, SPA, HCF）による埋め込みデータの検出実験では、この手法で検出を防止できることが確認されている。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は画像処理の代表的なテーマである画像圧縮とデータハイディングに対してグレイコードという整数値表現形式の観点から取り組んだものである。

画像処理全般について言えることであるが、画像圧縮とデータハイディングの分野も実用的な側面と理論的な側面が表裏一体をなしている。実用面から見れば、画像圧縮は高画質の画像を効率よく保存、伝送するために必要不可欠な技術であり、身近なところではデジタルカメラにも用いられている。また、データハイディングは画像などのデジタル媒体に対して密かにデータを埋め込む技術であり、著作権情報や註釈を埋め込んで管理に用いたり、デジタル媒体を隠れ蓑として秘密通信を行うなど、さまざまな応用が考えられる。理論面から見れば、これらを実現するためには情報のさまざまな表現形式や処理方法に関する深い理解が不可欠であり、それを支える数学的知識も重要になる。

画像圧縮とデータハイディングには、画像の視覚的变化をできるだけ小さく抑えながら処理を行う、という共通点がある。画像圧縮には、元のデータを完全に復元できる可逆圧縮と、完全に復元することはできないが圧縮したデータの量を小さくすることができる非可逆圧縮がある。非可逆圧縮であっても復元した画像が増しく劣化するものは実用にならないので、視覚的变化をなるべく小さくすることが必要になる。この非可逆圧縮に対する要求はデータハイディングにも通じるものである。

このような処理を考えるためには、画像という本来はアナログ的な対象と、コード（符号）というデジタル的な対象との関係に注目することが鍵となる。デジタル画像は多数の画素からなり、画素は輝度を段階的に表す値（画素値）をもつ。画素値は整数であるが、コンピュータ上ではそれを適当なコードで表現して扱う。普通用いられるのは整数値をそのまま2進数に書き直した純2進コードであるが、処理効率の向上を図るためそれ以外のコードを用いることもある。グレイコードはそのようなコードの一つで、隣接する整数のコードが1ビットのみ異なる、という一種の連続性をもつ。グレイコードはもともとアナログ・デジタル変換回路の設計のために考案されたものであり、同じくアナログ・デジタル間の関係が重要な画像処理にも適していることは容易に想像できる。

このような意味で、画像処理にグレイコードを用いるのはきわめて自然な発想であり、申請者の研究以前にも、グレイコードを利用する画像圧縮やデータハイディングの手法はいくつか提案されていた。それらの手法では、画素値をグレイコー

ドで表現して、画像をビットプレーン（各画素から同じ番号のビットの値を取り出したもの）に分解し、各ビットプレーン上のデータに対して処理を行う。しかしながら、特に非可逆圧縮に関しては、画像圧縮の標準的手法である JPEG や JPEG2000 よりも性能が劣っていた。

これらの既存の研究を踏まえて、申請者はグレイコードを用いた3つの新たな画像処理手法を考案し、それらが既存の手法よりも高い性能をもつことを実験によって示している。

第1の手法は画像の非可逆圧縮に関するものである。グレイコードを用いる従来の非可逆圧縮の手法は JPEG や JPEG2000 に比べて圧縮率が低かったが、申請者はグレイコード量子化と呼ぶ方法を開発し、従来から用いられていた予測符号化やウェーブレット変換による原画像の前処理と組み合わせる手法を考案した。申請者の行った実験によれば、この手法は JPEG や JPEG2000 と同等あるいはそれを上回る圧縮率をもち、処理速度の点でも遜色がない。申請者の開発したグレイコード量子化はグレイコードの従来あまり注目されなかった代数的性質を利用するという点で斬新なものである。

第2の手法は画像の部分的改変に耐性をもつデータハイディングに関するものである。従来のほとんどの手法では画像全体にデータを埋め込むのに対して、この手法では、画像の中から物体として識別できる領域を選び出し、その部分のみにデータを埋め込む。したがって、画像を部分的に改変しても、埋め込み領域が保存される限り埋め込みデータが失われない。前半の物体領域の識別処理には、申請者が以前に行った研究の成果が生かされている。後半の埋め込み処理では、グレイコードを用いて画像データをビットプレーンに分解し、その中のノイズ状の領域にデータを埋め込んでいる。これらの工夫によって、本手法は埋め込みデータの耐性を高めるのみならず、データ埋め込み後の画像の視覚的变化をより小さく抑えることにも成功している。

第3の手法は埋め込みデータの秘匿性を高めたデータハイディングに関するものである。第2の手法は画像の視覚的变化を小さく抑えつつ大量のデータを埋め込むことを目的としているが、ここでは埋め込みデータの存在そのものを第三者に気づかれないことに重点を置いている。埋め込みデータの検出には画像の統計的解析の方法が有効とされるが、申請者が考案した手法では、データ埋め込みによって生じる画像の統計的性質の変化を後で補正することができるので、各種の統計的解析に対して防御能力をもたせることが可能になる。実際に、申請者はいくつかの代表的な統計的解析方法による検出実験を行い、この手法によってデータの検出を防止できることを確認している。この手法もグレイコードのもつ代数的性質を巧妙に利用している。

これらはいずれも、卓抜した着想と豊富な知識に加えて、実装実験に欠かせない高度のプログラミング能力が生かされた、優れた研究成果として高く評価できる。グレイコードは情報科学において応用面のみならず理論面でも注目されており、実数計算など数学的色彩の濃い分野でも研究が進んでいる。申請者の研究はグレイコードのもつ純数学的な性質が実用的な情報処理技術の開発につながることを実証したものと言えるだろう。この研究は今後もさらに発展して行くことが期待される。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。