

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12052

研究課題名（和文）網膜情報処理による画像の可逆階調圧縮手法の創成

研究課題名（英文）Development of a lossless gradation compression technique by retinal information processing

研究代表者

青森 久（Aomori, Hisashi）

中京大学・工学部・教授

研究者番号：20453607

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、生体の網膜において外界の映像情報を生体パルスに変換する過程に着想を得たSD-CNNを用いて入力データをバイナリデータ列に分解し、それを多段デジタル積分器により積分することで、入力データを劣化させることなく復元する手法を開発した。また、低階調画像から原画像レベルの品質の画像を効率的に復元する高精度なビット深度拡張技術を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義として、生体の網膜における情報処理を応用することで、画像を含む様々なデータを可逆復元できることを明らかにした点が挙げられる。また、階調圧縮のみならず、海中など狭帯域の通信環境に適合するデータ伝送方式への応用が可能である点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have developed a method to decompose input data into binary data sequences and integrate them using a multistage digital integrator, thereby restoring the input data without degradation. In our method, two-stage SD-CNN, a mimic of converting external image information into biological pulses in the retina of a living body, is employed. We have also realized a highly accurate bit-depth expansion technique that efficiently reconstructs a visually lossless quality image from a low-gradation image.

研究分野：知能情報処理

キーワード：可逆階調圧縮 時空間分割

## 1. 研究開始当初の背景

クラウド型サービスの急速な進展に伴い、**Web** コンテンツのデータ量削減技術の重要性が増してきている。**Web** コンテンツで普及している **PNG** 画像形式は高画質である反面ファイルサイズが大きくなる傾向がある。**PNG** 画像のデータ削減には画像の色情報である階調を圧縮する手法が有用であることが知られている。しかし、階調圧縮は非可逆であり階調を復元するために必要な情報の大半が失われることが避けられない。

この問題を解決するため、本研究課題ではシグマデルタ型セルラーニューラルネットワーク (**SD-CNN**) による可逆階調圧縮に基づく新しい画像圧縮手法を提唱する。**SD-CNN** はパルス神経回路モデルの **1** 種であり、生体の網膜において外界の映像情報を生体パルスに変換する過程を模倣したニューラルネットワークである。具体的には、画像を **SD-CNN** により **2** 値画像列に変換し、それをデジタル積分器により積分することで可逆階調圧縮を実現する。このとき、高精度なビット深度拡張技術を併用することで、低階調画像から原画像レベルの品質の画像を効率的に復元できるようになると考えている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、**SD-CNN** による可逆階調圧縮に基づく画像圧縮技術とその効率化のためのビット深度拡張技術を構築することである。本研究では、次の研究開発を実施し、**SD-CNN** による可逆階調圧縮方式の実現のための技術基盤を確立する。

- (1) 可逆階調圧縮を可能とする **SD-CNN** の基盤方式を開発し、**SD-CNN** とデジタル積分器の多段化による性能向上を目指す。
- (2) 高性能なビット深度拡張処理を実現するために、画像内の空間的な相関と特徴空間でのチャンネル間相関を考慮した、**End-to-End** な深層学習モデルを構築する。

## 3. 研究の方法

研究目的の各項の実現のため、それぞれに対応した研究を実施する。

- (1) 画像の可逆階調圧縮を可能とする **SD-CNN** の開発

**SD-CNN** を構成するニューロンは、反復毎に「+1」と「-1」の **2** つの信号を出力する。この出力系列は、入力多ビット信号を **2** 値パルス信号に分解した系列であり、これをデジタル積分器により積分することで徐々に階調が復元される。この **SD-CNN** のニューロンを画像の画素と **1** 対 **1** に対応させることで **SD-CNN** のネットワークが構成される。**SD-CNN** の階調再現度は **SD-CNN** の反復回数に比例し、その特性はテンプレートと呼ばれるニューロン同士の結合係数、ニューロンの構造、積分器の構造により決定される。本項では、可逆階調圧縮を可能とする **SD-CNN** の開発するために次の研究を実施する。

- (a) 可逆階調圧縮を実現するテンプレートの設計
- (b) **SD-CNN** のニューロンの多層化
- (c) デジタル積分器の多段化

- (2) 高性能なビット深度拡張処理の開発

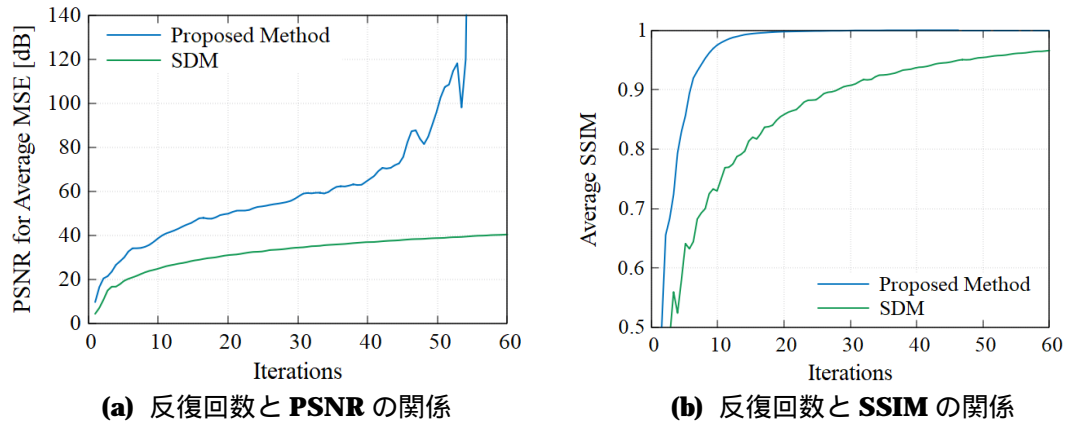
空間的な相関を考慮した適応フィルタモデルを導入したビット深度拡張ネットワークを構築する。また、**Transformer** モデルを導入することで、空間的なアテンション機構の画像予測における有効性を検討する。さらに、**Transformer** モデルにより抽出された特徴チャンネル間の相関を効果的に利用するために、新たなチャンネル間のアテンション機構を導入し、最適なネットワークを構築する。

## 4. 研究成果

- (1) 画像の可逆階調圧縮を可能とする **SD-CNN** の開発

**SD-CNN** を直列に結合した **2** 段の **SD-CNN** と **2** 段のデジタル積分器の組合せた方式を提案し、**Kodak** および **Waterloo Exploration Database** データセットの **4,744** 枚の画像全てを **58** 回の反復で可逆復元可能な方式を開発した。さらに、画像以外のデータへの対応のために、入力データを複製し疑似画像化する手法を導入することで、様々な形式のバイナリデータの可逆伝送に成功している。

図 1、図 2 に研究成果の一例を示す。図 1 は提案手法とシグマデルタ変調の反復毎の画像復元特性を示している。図より、提案手法は極めて優れた画像復元特性を有していることを示している。特に、**10** 回程度の反復で復元画像が損失を知覚できない画質 (**PSNR: 40dB**, **SSIM: 0.98**) に達していることがわかる。図 2 に提案手法の **2** 値画像列と復元画像の一例を示す。提案手法により、入力画像が画像のビットプレーン分解と似た **2** 値画像列に分解されること、復元画像の画質が反復毎に向上することがわかる。



(a) 反復回数と PSNR の関係

(b) 反復回数と SSIM の関係

図 1: 提案手法の画像復元性能

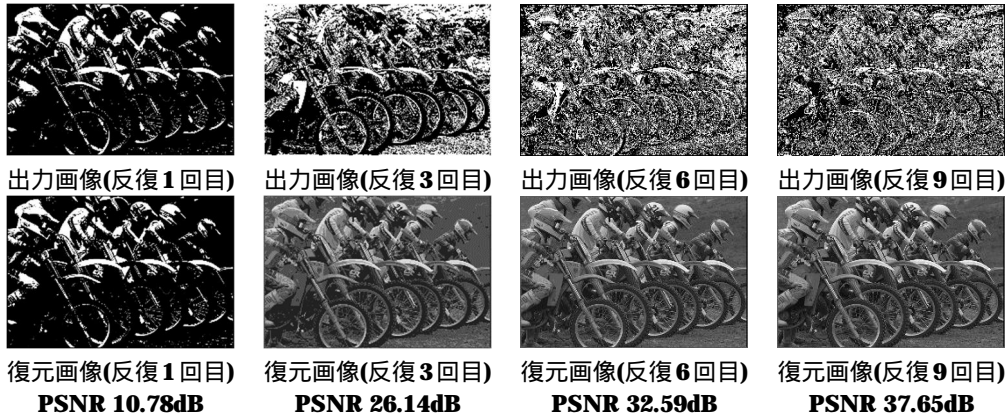


図 2: 提案手法による 2 値画像列と復元画像の一例

## (2) 高性能なビット深度拡張方式の開発

最適な適応フィルタの設計に、深層学習モデルとして **Predictive Filter Flow (PFF)** を導入した。PFF を用いて、入力低ビット画像の空間的特徴を考慮した **Shift-Variant Filter (SVF)** を学習することで、高品質な高ビット画像が得られた[1]。この結果から、空間特徴の有効利用が重要であることが分かった。

そこで、**Swin Transformer** による空間的なアテンション機構を導入したネットワークモデルのビット深度拡張処理への応用について検討した。その結果、従来手法よりも高性能なモデルの構築に成功している[2]。

さらに、空間的なアテンション機構により抽出された特徴だけでなく、特徴チャンネル間の相関を効果的に利用するために、チャンネル間のアテンション機構として **Residual Channel Attention Layer** を導入した新たなネットワークモデルを開発し、更なる性能の向上を果たした[3]。

表 1 に研究成果の一例を示す。表 1 は、**Kodak** および **McMaster** データセットに関して **4bit** 画像を **8bit** 画像へ深度拡張した際の客観評価結果である。これより、空間特徴量およびチャンネル間相関を考慮した提案手法 2 が、先行研究と比較して **PSNR** が **2.27 dB** 向上していることが分かる。また、提案手法 1 と比較して、提案手法 2 はネットワークサイズに関する僅かなオーバーヘッドのみで、優れた性能を発揮することも確認されている。本提案モデルは、ビット深度拡張に限らず、他の画像再構成問題への応用も期待される。

表 1 提案手法の性能評価 (4bit to 8bit)

dataset	先行研究 [4]		提案手法1 [2]		提案手法2 [3]	
	CPSNR	SSIM	CPSNR	SSIM	CPSNR	SSIM
Kodak	38.48	0.9657	40.32	0.9894	40.58	0.9946
McMaster	36.78	0.8895	38.85	0.9716	39.05	0.9725

(引用文献)

- [1] D. Arai, T. Iriyama, M. Sato, H. Aomori, and T. Otake, “Filter-Flow-Based Bit Depth Expansion,” *Journal of Signal Processing*, vol. 26, no. 4, pp. 115-118, 2022.
- [2] Tsuchihashi, T. Iriyama, M. Sato, H. Aomori, and T. Otake, “Swin Transformer Based Bit Depth Expansion,” *Proc. International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2023)*, pp. 52-54, 2023.
- [3] Tsuchihashi, T. Iriyama, M. Sato, H. Aomori, and T. Otake, “Bit-Depth Expansion via Swin Transformer with Channel Attention Layers,” *Proc. International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2024)*, pp. 283-286, 2024.
- [4] J. Byun and K. Shim, and C. Kim, “BitNet: Learning-Based Bit-Depth Expansion,” *Proc. ACCV* pp. 67-82, 2018.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Arai Daiki, Iriyama Taishi, Sato Masatoshi, Aomori Hisashi, Otake Tsuyoshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Filter-Flow-Based Bit-Depth Expansion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 115 ~ 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2299/jsp.26.115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Iriyama Taishi, Sato Masatoshi, Aomori Hisashi, Otake Tsuyoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Deep demosaicking considering inter-channel correlation and self-similarity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 453 ~ 463
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.12.453	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Arai Daiki, Iriyama Taishi, Sato Masatoshi, Aomori Hisashi, Otake Tsuyoshi	4. 巻 25
2. 論文標題 Predictive Filter Flow Network for Universal Demosaicking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 257 ~ 261
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2299/jsp.25.257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Iriyama Taishi, Sato Masatoshi, Aomori Hisashi, Otake Tsuyoshi	4. 巻 25
2. 論文標題 Deep Demosaicking with Luminance and Chrominance Estimations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 263 ~ 268
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2299/jsp.25.263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Aomori Hisashi, Mizutani Ryohei, Toda Hideharu, Otake Tsuyoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Progressive image transmission based on image spatio-temporal decomposition by sigma-delta cellular neural network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 264 ~ 270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Taishi Iriyama, Hisashi Aomori, Tsuyoshi Otake
2. 発表標題 Bit-Depth Enhancement with Frequency Domain-Based Loss Function
3. 学会等名 Proc. 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noriya Kondoh, Daiki Arai, Taishi Iriyama, Masatoshi Sato, Hisashi Aomori, and Tsuyoshi Otake
2. 発表標題 Bit Depth Expansion Network Considering Layer Attention
3. 学会等名 2023 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ai Tsuchihashi, Daiki Arai, Taishi Iriyama, Masatoshi Sato, Hisashi Aomori, and Tsuyoshi Otake
2. 発表標題 Color Image Demosaicking via SwinIR
3. 学会等名 2023 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Daiki Arai, Taishi Iriyama, Masatoshi Sato, Hisashi Aomori, and Tsuyoshi Otake
2 . 発表標題 Bit-Depth Limited Demosaicking using Predictive Filter Flow
3 . 学会等名 2023 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 F. Nakashima, T. Iriyama, T. Otake and H. Aomori
2 . 発表標題 Progressive Image Transmission by Sigma-Delta Cellular Neural Network Having Coupled Cells
3 . 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Toda, H. Aomori, T. Otake, I. Matsuda and S. Itoh
2 . 発表標題 Hierarchical Lossless Compression Method for Color Images Using CNN Predictors
3 . 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Daiki Arai, Taishi Iriyama, Masatoshi Sato, Hisashi Aomori, and Tsuyoshi Otake
2 . 発表標題 Bit-Depth Enhancement via Predictive Filter Flow
3 . 学会等名 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, NCSP ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideharu Toda, Ryohei Mizutani, Tsuyoshi Otake, and Hisashi Aomori
2. 発表標題 High Fidelity Image Coding by Sigma-Delta Cellular Neural Network
3. 学会等名 The 2021 Nonlinear Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Itano, Ryuya Ukai, Tsuyoshi Otake, and Hisashi Aomori
2. 発表標題 Reconstruction-Based Super-Resolution using Cellular Neural Networks Predictors Controlled by Edge Orientation
3. 学会等名 The 53rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Nakazawa, Y. Kawai, T. Otake, H. Aomori
2. 発表標題 Hierarchical lossless compression method for digital pathology using CNN predictors
3. 学会等名 The 53rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中嶋 文俊, 伊藤 有香, 水野 愛唯, 水谷 涼平, 藤田 実沙, 大竹 敢, 青森 久
2. 発表標題 シグマデルタセルラーニューラルネットワークによる減色に基づく画像圧縮手法の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2021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	大竹 敢  (Otake Tsuyoshi)  (20296883)	玉川大学・工学部・教授    (32639)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------