

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20760246

研究課題名(和文)

CNNによる空間領域シグマデルタ変調に関する研究

研究課題名(英文)

Research on Spatial Domain Sigma-Delta Modulation by Cellular Neural Network

研究代表者

青森 久 (AOMORI HISASHI)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：20453607

研究成果の概要(和文)：

本研究では、シグマデルタ変調型セルラーニューラルネットワーク(SD-CNN)において、高次ノイズシェーブ方式、オーバーサンプリング手法の導入を実現し、さらに、SD-CNNの時空間ニューロダイナミクスの基礎解析を行った。また、画像符号化を対象に検討を行い、SD-CNNのDA(digital-to-analogue)変換部で行われている画像予測性能を向上する手法を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

In this research, the basic theories and applications of the sigma-delta cellular neural network (SD-CNN) were studied. For its applications, the second-order SD-CNN and the SD-CNN with over sampling technique were developed. Also, basics of spatio-temporal dynamics of SD-CNN were clarified. Moreover, the image prediction performance in the DA part will be improved by the image context-driven CNN predictors whose parameters can be determined by supervised learning.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：セルラーニューラルネットワーク・非線形ダイナミクス・空間領域シグマデルタ変調・同期現象

## 1. 研究開始当初の背景

セルラーニューラルネットワーク(CNN)は人間の網膜の情報処理を模した人工神経回路網(ANN)であり、人間の持つ高度な情報処理機能の一つである知覚的補間能力を有し、網膜の情報処理が可能である。このため、CNNは画像処理に広く用いられてきている。CNNはテンプレートと呼ばれる空間フィルタの組み合わせにより様々な機能を有し、補間的なAテンプレート(フィードバック係数)

によりネガティブフィードバックさせ、積分的Cテンプレートを組み合わせる方式は空間領域でのシグマデルタ変調器として動作する(シグマデルタCNN:SD-CNN)。SD-CNNの基本特性は数式的に解析され、従来のシグマデルタ変調と同等な機能を有する事が解明されており、その応用や時空間ダイナミクスの解明が期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、SD-CNN において、以下に示す従来の 1 次元シグマデルタ変調と同等の機能を実装し、その特性を解析する事を目的とする。

(1) 高次ノイズシェープ特性を有する方式  
SD-CNN で用いられる低ビット量子化器による量子化誤差が低減可能であり、優れたハーフトーン・逆ハーフトーン能力を実現する事が期待出来る。

(2) オーバーサンプリング手法の導入  
効果的に量子化誤差を削減する事が可能であるため、空間領域でのオーバーサンプリングについて検討を行う。

(3) 基本 SD-CNN の応用とニューロダイナミクス解析

基本 SD-CNN の A テンプレートはガウスフィルタが用いられている。これは実数係数を必要とするためハードウェア実装が困難である。このため、ハードウェア実装が容易な A テンプレートの実現を目指す。また、SD-CNN の持つ時空間ニューロダイナミカルシステムの特性を解析し、現象の解明や、安定なシステムの実現を目指す。

(4) 画像予測性能の改善  
SD-CNN の DA(digital-to-analogue)変換部では画像予測が行われているため、DA 性能向上の鍵となる CNN の構成並びに CNN のパラメータを適切に設定する手法を検討する。このため、画像符号化を対象に検討を行う。

### 3. 研究の方法

上述の目的を達成するために、コンピュータ上でソフトウェア実装された SD-CNN・CNN を用いて様々なデジタル静止画像に対してシミュレーションを行い、特性を評価する。

(1) 高次ノイズシェープ特性を有する方式

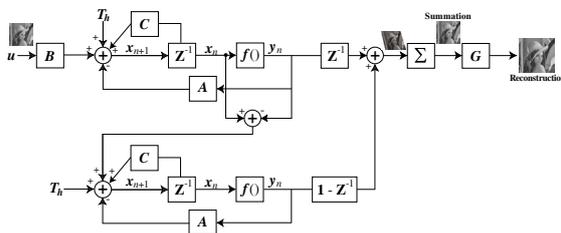


図 1: SD-CNN による MASH 構成

高次ノイズシェープ特性を SD-CNN にて実現するためには、マルチレイヤ CNN を用いる手法と Multi Stage Noise Shaping(MASH) を利用する手法が考えられるが、MASH 方式はマルチレイヤ CNN による実装と比較して、既に解析されている SD-CNN の組み合わせで実現できるため、安定性の議論が容易であ

り、さらにハードウェア実装も比較的容易である。このため、高次系については図 1 に示す MASH 方式のみを検討する。

(2) オーバーサンプリング手法の導入

図 2 に量子化雑音低減のために非常に有効な手法であるオーバーサンプリング技術を SD-CNN に適用したシステムを示す。本方式はオーバーサンプリングの概念を空間周波数方向に適用し、入力静止画像の解像度をデジタル的に拡大・縮小し、空間周波数領域でのオーバーサンプリング・デシメーションを行う手法である。このため、まず、様々な画像拡大手法についての基礎検討を行い、本手法に最適なオーバーサンプリングカーネルを実験的に求める。

次に、予備実験にて求めた最適なオーバーサンプリングカーネルによるオーバーサンプリング型 SD-CNN の基本特性を評価し、MASH 構成による安定的な高次ノイズシェープ特性を持つ方式について検討する。

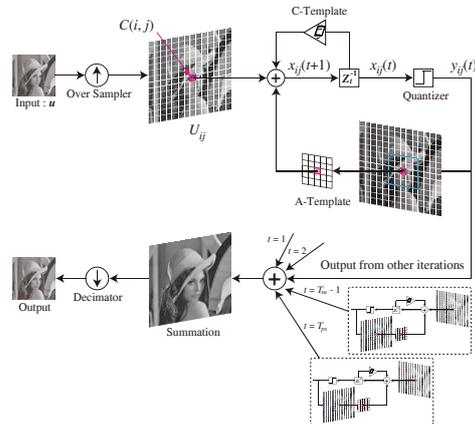


図 2: オーバーサンプリング型 SD-CNN

(3) 基本 SD-CNN の応用とニューロダイナミクス解析

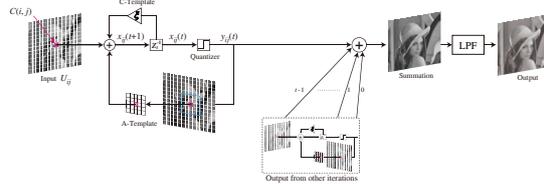


図 3: 基本 SD-CNN

SD-CNN では、CNN の状態をセルが周期解を持つ状態で安定化させるために、安定平衡解に収束するための条件を満たさないがエネルギー関数は単調減少するようなパラメータ設定をし、各セルがパルス密度変調を行うようにしている。また、各セルの入力値は正負の値を持つように線形変換されるため、セルは抑制性(負の入力) または興奮性(正の入力) の素子として振る舞う。これらのセル

が空間的に結合することにより、そのダイナミクスは協調・競合的要素を持つと考えられる。シグマデルタ変調では、入力値によりスパイク頻度が決定するが、SD-CNN においては協調・競合作用によりセルのスパイク頻度は空間結合係数である A テンプレートの結合範囲及び結合強度並びに入力の空間的構造に依存すると予測される。このため、SD-CNN のセルが呈する複雑な時空間ダイナミクス解析の基礎的研究として、空間的結合係数の結合範囲及び強度を変化させた際の各セルの時空間ダイナミクスをコンピュータシミュレーションにより調査を行う。

また、基本 SD-CNN の A テンプレートでは実数係数であるガウスフィルタが用いられているため、ハードウェア実装が困難である。この問題を解決するためにハードウェア実装が容易なシフト演算と加算により実現可能な A テンプレートの実現を目指す。

#### (4) 画像予測性能の改善

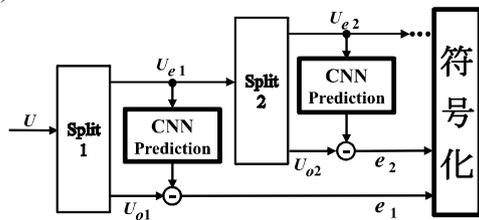


図 4: CNN を用いた階層的画像符号化

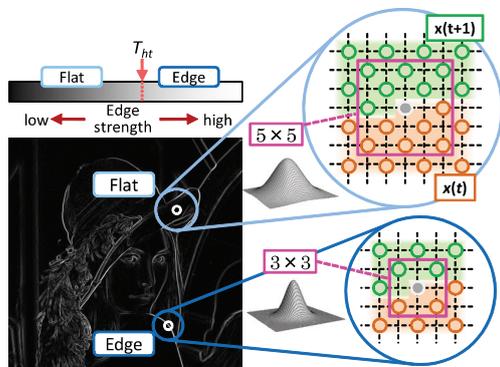


図 5: 適応的テンプレート切り替え

SD-CNN の DA 変換部では、画像の予測が行われている。従って、SD-CNN の量子化誤差低減のためには DA 変換部の予測性能向上が必要となる。ここで、DA 変換部の性能向上のために、画像符号化を対象に検討を行う。

図 4 に本課題で用いる階層的可逆符号化器を示す。このフレームワークの性能は予測器の性能に大きく依存するため、同様の予測機構である SD-CNN の予測性能向上評価に有効である。最新の画像符号化の見解より、画像の特徴(輪郭部や平坦部等)に応じて CNN のテンプレートを画像のエッジ強度に応じ

て適応的に変化させる事が有効である。しかし、テンプレートを切り替えるためには、それぞれのテンプレートのパラメータ及び切り替えに用いるエッジ強度のパラメータを適切に決定する必要がある。このため、教師付き学習手法を用いパラメータを学習により決定する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高次ノイズシェープ特性を有する方式

SD-CNN による空間領域シグマデルタ変調により、空間的に拡散されたノイズを C テンプレート(空間的積分器)により低減させ、良質なハーフトーン画像を得ることができ、さらに、ハーフトーン画像から原画像を再構成する事が可能である。しかし、ハーフトーン画像の画質を客観的に評価することは難しいため、性能評価は原画像の再構成能力にて行う。

表 1 に図 1 に示す基本 SD-CNN による MASH 構成を用い 2 次ノイズシェープ特性を有する方式(Proposed)と 1 次ノイズシェープ特性を有する基本 SD-CNN(1st-order)の様々な画像に対する原画像再構成性能を示す。表に示すとおり、2 次ノイズシェープ特性を有する MASH 構成は従来の SD-CNN より平均 0.45dB 優れた画像再構成性能を持つことが明らかとなり、MASH 構成の有効性が確認された。

表 1: MASH 構成と基本 SD-CNN

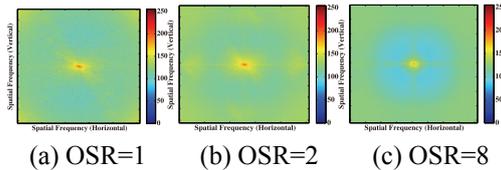
の画像復元特性

Image	Method	PSNR
Aerial	Proposed	33.75
	1st-order	33.7
Barbara	Proposed	31.91
	1st-order	31.78
Boat	Proposed	35.27
	1st-order	34.45
Couple	Proposed	36.84
	1st-order	36.2
Crowd	Proposed	34.74
	1st-order	34.29
Goldhill	Proposed	37.01
	1st-order	36.64
Lena	Proposed	39.09
	1st-order	38.18
Milkdrop	Proposed	33.57
	1st-order	33.32

##### (2) オーバーサンプリング手法の導入

表 2 に各 OSR におけるオーバーサンプリング型 SD-CNN の画像再構成特性を図 6 に各 OSR における加算画像のパワースペクトラムを示す。ここで、OSR=1 はオーバーサンプリングを行わない従来の SD-CNN の性能である。表 2 より、OSR=8 において再構成画像の PSNR は最高で 48dB と極めて高い事が

示され、オーバーサンプリング型 SD-CNN は非常に優れた画像再構成性能を持つ事が明らかになった。また、OSR と再構成画像の平均 PSNR が比例関係であり、従来のオーバーサンプリング型シグマデルタ変調と同様の特性を示している。これは、図 6 より、信号帯域の量子化ノイズが OSR に従って減少する事より説明できる。さらに、SD-CNN のノイズ伝達関数はノイズシェーピング特性を持つため、低周波領域の雑音電力が OSR に従って減少する事を解明した。



(a) OSR=1 (b) OSR=2 (c) OSR=8  
図 6: 加算画像のパワースペクトラム

なお、オーバーサンプリング技術を MASH 構成に適用した結果は[7]において、良好な結果が得られる事を報告済みである。

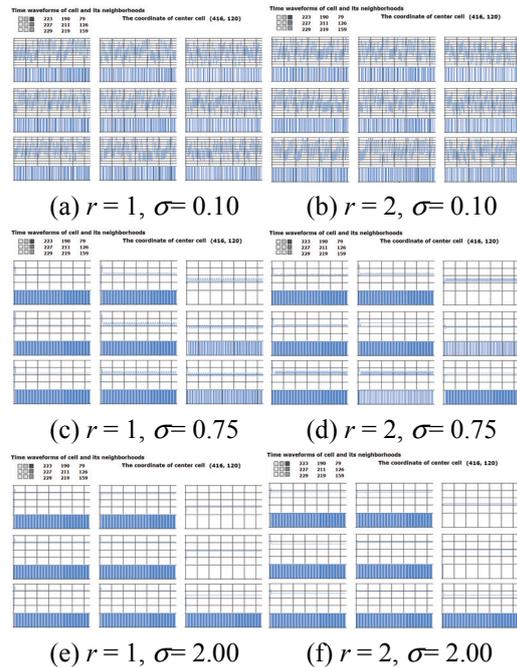
表 2: オーバーサンプリング型 SD-CNN

Image	OSR=1	OSR=2	OSR=8
Aerial	33.30	38.59	48.17
Airfield	32.34	37.62	45.42
Airplane	31.21	36.34	37.78
Baboon	30.30	37.90	48.60
Barbara	31.21	37.47	46.73
Boat	34.42	39.74	44.45
Bridge	32.05	38.54	44.90
Couple	35.92	40.76	45.26
Crowd	30.91	35.31	39.42
Elaine	29.39	27.14	39.42
Goldhill	36.53	40.15	42.69
Harbour	29.30	36.42	44.46
Lax	30.65	37.27	47.72
Lena	37.60	41.99	47.08
Man	34.53	35.10	41.87
Milkdrop	33.07	38.38	40.29
Peppers	33.04	38.87	41.62
Sailboat	32.57	38.00	42.09
Shapes	30.99	35.44	36.56
Tiffany	19.10	30.13	36.13
Water	36.52	40.78	47.12

### (3) 基本 SD-CNN の応用とニューロダイナミクス解析

図 7 に画像 Lena の座標(416, 120)のセル及びその 1 近傍の時間波形を示す。これより、空間結合が弱い領域( $\sigma = 0.10$ ) では複雑な時間波形を示し、結合強度が適切な領域( $\sigma = 0.75$ ) では周期的波形を示す。なお、結合強度が過大な領域( $\sigma = 2.00$ ) では各セルはほぼ収束状態である。また、結合範囲・強度は画像再構成性能に影響を与えないが、セルの時間的な振る舞いに大きな影響を与えている

ことが明らかになった。特に結合係数が小さい領域における振る舞いは非常に複雑であり、より詳細な解析手法を導入すべきである事を示唆している。



(a)  $r = 1, \sigma = 0.10$  (b)  $r = 2, \sigma = 0.10$   
(c)  $r = 1, \sigma = 0.75$  (d)  $r = 2, \sigma = 0.75$   
(e)  $r = 1, \sigma = 2.00$  (f)  $r = 2, \sigma = 2.00$   
図 7: 結合強度とセルのダイナミクス

また、ハードウェア実装が容易な A テンプレートに関する検討については、[13]において報告済みであり、従来の実数係数テンプレートと同等以上の原画像復元特性が得られる事を明らかにした。

### (4) 画像予測性能の改善

表 3: 各方式のロスレス符号化レート

Image	single-template	proposed	JPEG2000
Aerial	5.379	5.060	5.192
Airfield	5.784	5.591	5.834
Airplane	4.376	4.009	4.015
Baboon	6.299	5.960	6.109
Barbara	5.480	4.909	4.845
Boat	5.154	4.891	4.880
Couple	5.101	4.813	4.839
Crowd	4.416	4.022	4.197
Elaine	5.064	4.934	4.944
Goldhill	4.984	4.729	4.836
Lax	6.018	5.885	5.962
Lenna	4.805	4.553	4.685
Lennagrey	4.465	4.184	4.306
Milkdrop	4.120	3.803	3.768
Peppers	4.857	4.592	4.631
Sailboat	5.285	4.992	5.152
Shapes	3.619	2.776	1.928
Tiffany	4.530	4.298	4.223
Tiffanygrey	5.093	4.728	4.812
Water	4.415	4.330	4.177
Average	4.962	4.653	4.672

提案方式の符号化性能を評価するために、20 枚の  $512 \times 512$ , 8[bits/pel] グレースケール標準画像に対して実験を行った。性能は符号器全体で一種類のテンプレート (5 タップ) を利用する方式並びに JPEG2000 の可逆符号化方式と比較した。ここで、提案方式における各パラメータは、画像分割数を 6 (偶数, 奇数ステージを 1 セットとしている), セルの近傍数  $r$  を 2 (輪郭部では 1) としており、テンプレート係数用のガウス関数の分散とテンプレートを切り替えるためのしきい値は各画像の最適な値を予測誤差のエントロピーを最小とするように教師付学習にて求めている。

各方式の符号化性能を表 3 に示す。これらの実験結果より、提案方式は一種類のテンプレートを用いる方式と比較して符号化レートが平均 0.309[bits/pel] 低くなる。さらに、同様にスケーラビリティを有する JPEG2000 と比較して平均 0.019[bits/pel]低い符号化レートを達成した。これより、画像の特徴に応じて CNN のテンプレート形状を変化させ、パラメータを教師付学習にて決定する本方式の有効性が確認された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 21 件)

- [1] 田中 衛, 青森 久, “ローカルとグローバルな非線形ダイナミクスによる情報処理,” IEICE ESS Fundamentals Review, Vol.4, 2011, pp. 198-214 (査読無)
- [2] S. Takenouchi, H. Aomori, T. Otake and M. Tanaka, I. Matsuda and S. Itoh, “Lossless Image Coding by Local Structure Driven CNN Predictors,” Workshop on Picture Coding and Image Processing (WPCIP), 7th Dec. 2010, Nagoya (査読有)
- [3] S. Takenouchi, H. Aomori, T. Otake and M. Tanaka, I. Matsuda and S. Itoh, “Hierarchical Lossless Image Coding Using Cellular Neural Network,” 17th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP2010), 22nd Nov. 2010, Sydney Australia (査読有)
- [4] 青森 久, 松田 一郎, 伊東 晋, 大竹 敢, 田中 衛, “シグマデルタ型セルラーニューラルネットワークにおける時空間ダイナミクス,” 平成 22 年 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2010 年 9 月 2 日, 熊本 (査読無)
- [5] 竹之内 星矢, 青森 久, 大竹 敢, 田中 衛, 松田 一郎, 伊東 晋, “セルラーニューラルネットワークを用いた画像の階層的可逆符号化,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2010 年 6 月 18 日, 沖縄 (査読無)
- [6] M. Kataoka, R. Sekiyama, T. Keino, H. Aomori and M. Tanaka, “Local Dynamics Effect by Rotation Map in Area Intensity Quantization in CNN,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2010 年 3 月 10 日, 東京 (査読無)
- [7] 平野 雅丈, 青森 久, 大竹 敢, 田中 衛, “MASH 構成を用いたオーバーサンプリング型シグマデルタ CNN,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2010 年 3 月 9 日, 東京 (査読無)
- [8] M. Kataoka, R. Sekiyama, T. Keino, H. Aomori and M. Tanaka, “Local Dynamics Effect by Rotation Map in Area Intensity Quantization in CNN,” 2010 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'10), 5th Mar. 2010, Honolulu, U.S.A (査読有)
- [9] T. Yamamoto, H. Aomori and M. Tanaka, “Image Processings of Sigma-Delta Cellular Neural Network,” 2010 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'10), 5th Mar. 2010, Honolulu, U.S.A (査読有)
- [10] T. Konishi, H. Aomori, T. Otake, N. Takahashi, I. Matsuda, S. Itoh and M. Tanaka, “An Annealing Method for Cellular Neural Networks,” 2010 12th IEEE International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA2010), 5th Feb. 2010, Berkeley, U.S.A (査読有)
- [11] 小西 健文, 青森 久, 大竹 敢, 高橋 伸彰, 松田 一郎, 伊東 晋, 田中 衛, “アニーリング法を用いたセルラーニューラルネットワーク,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2009 年 12 月 21 日, 盛岡 (査読無)
- [12] 青森 久, 大竹 敢, 高橋 伸彰, 松田 一郎, 伊東 晋, 田中 衛, “オーバーサンプリング型シグマデルタ CNN,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2009 年 11 月 14 日, 屋久島 (査読無)

- [13] H. Aomori, Y. Naito, T. Otake, N. Takahashi, I. Matsuda, S. Itoh and M. Tanaka, "Hardware-Aware Model of Sigma-Delta Cellular Neural Network," IEEE 19th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD2009), 25th Aug. 2009, Antalya, Turkey (査読有)
- [14] 青森 久, 大竹 敢, 高橋 伸彰, 松田 一郎, 伊東 晋, 田中 衛, "疑似オーバーサンプリング手法を用いたシグマデルタ CNN," 2009 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2009 年 9 月 15 日, 新潟 (査読無)
- [15] 青森 久, 大竹 敢, 高橋 伸彰, 松田 一郎, 伊東 晋, 田中 衛, "画像の局所構造を考慮したシグマデルタ CNN," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2009 年 8 月 4 日, 高知 (査読無)
- [16] 青森 久, 内藤 裕喜, 田中 衛, "ハードウェア実装を考慮したシグマデルタ型 CNN モデル," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2009 年 3 月 10 日, 京都 (査読無)
- [17] D. Goto, T. Otake, H. Aomori, N. Takahashi and M. Tanaka, "Image Upscaling via Discrete-Time Cellular Neural Networks with Interpolation Error Theorem," 2009 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'09), 1st Mar. 2009, U.S.A (査読有)
- [18] M. Hirano, H. Aomori, T. Otake, M. Tanaka, "The Sigma-Delta CNN with Second Order Noise Shaping Property," WSEAS Trans. CIRCUITS and SYSTEMS, Vol. 9, No. 7, 2008, pp. 899-908 (査読有)
- [19] H. Aomori and M. Tanaka, "Functional Sigma-Delta CNN," 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2008), 7th Sept. 2008, Hungary (査読有)
- [20] M. Hirano, H. Aomori, T. Otake and M. Tanaka, "A Second Order  $\Sigma\Delta$  Modulation by Cascaded  $\Sigma\Delta$  CNNs," The 12th WSEAS International Conference on Circuits, 22nd Jul. 2008, Greece (査読有)
- [21] 山下 聖司, 青森 久, 田中 衛, "離散時間型セルラーニューラルネットワークによる機能付きシグマデルタ変調," 電子

情報通信学会 非線形問題研究会, 2008 年 7 月 31 日, 高知 (査読無)

[学会発表] (計 2 件)

- [1] 青森 久, "符号化レート最小化学習を用いた CNN による可逆符号化," 電子情報通信学会四国支部講演会, 2010 年 12 月 2 日, 徳島.
- [2] 青森 久, "セルラーニューラルネットワークのダイナミクスと情報処理への応用," 平成 22 年度計測自動制御学会九州支部大分地区委員会主催講演会, 2010 年 6 月 24 日, 大分.

[その他]

- 受賞歴
- [1] 2010 年 3 月 第 4 回 信号処理学会論文賞
- [2] 2010 年 3 月 平成 21 年度電子情報通信学会学術奨励賞

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青森 久 (AOMORI HISASHI)  
東京理科大学・理工学部・助教  
研究者番号: 20453607

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号:

### (3) 連携研究者

田中 衛 (TANAKA MAMORU)  
上智大学・理工学部・教授  
研究者番号: 00146804

大竹 敢 (OTAKE TSUYOSHI)  
玉川大学・工学部・准教授  
研究者番号: 20296883

高橋 伸彰 (TAKAHASHI NOBUAKI)  
日本アイ・ビー・エム株式会社