

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2020
課題番号：17K12752
研究課題名（和文）確率モデルに基づく時系列予測ニューラルネットワークの提案と生体信号予測への応用

研究課題名（英文）Probabilistic model-based time-series forecasting neural networks and related applications to biosignal forecasting

研究代表者
早志 英朗（Hayashi, Hideaki）

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：00790015
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトの体から計測できる電気信号である生体信号を表現できる数理モデル（現象を数式で表現したもの）を複数提案し、実データ解析へ応用した。例えば、筋肉の電気信号である筋電位信号をモデル化し筋力の解析に応用したり、心電図や脳波のモデルを提案し識別に応用したりした。また、確率モデルに基づくニューラルネットワークを複数提案し、データ識別や時系列予測へ応用した。さらに、Cardiotocographyと呼ばれる妊婦の生体信号や内視鏡画像といった医用データの大規模データセットを構築し、それらを胎児の状態予測や臓器分類などへ応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義として最大の点は、本研究においてニューラルネットワーク（NN）へのドメイン知識埋め込み法を提案している点である。提案法では、データの特徴を確率モデルに基づき表現し、それをNNへ埋め込むことで解釈性や汎化性を向上させる。

社会的意義としては、生体信号の予測が実現できれば医療モニタリング応用に役立つ。在宅医療を受ける患者は約18万人いるとされる（2017年厚生労働省調べ）。そのような患者に対し、自宅でも計測が容易な血圧や指尖容積脈波などと提案法を組み合わせることで、容態変化を予測することができれば、異常が起こる前に医師に連絡することができスムーズな治療が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We proposed mathematical models that can represent biological signals, which are electrical signals that can be measured from the human body, and applied them to the analysis of actual data. For example, we modeled myoelectric signals, which are electrical signals of muscles, and applied them to the analysis of muscle strength. We also proposed models for electrocardiogram and electroencephalogram and applied them to signal classification. Furthermore, we developed neural networks based on probabilistic models, and applied them to data classification and time series forecasting. In addition, we constructed large medical datasets such as biological signals of a pregnant woman called cardiotocography and endoscopic images, and applied them to fetal condition prediction and organ classification.

研究分野：機械学習

キーワード：ニューラルネットワーク 深層学習 時系列予測 確率モデル 生体信号

1. 研究開始当初の背景

人の身体からは、脳の電氣的活動である脳波や筋が収縮する際に発生する微弱な電気信号である筋電信号、心臓の電氣的活動を捉えた信号である心電図など、さまざまな生体信号を計測することができる。これらの生体信号は人の内部状態を強く反映しており、体調や運動、人の意志などによって変化するため、生体信号を機械学習に基づき識別することで病気の診断支援やインタフェース応用へつなげることができる。しかしながら、生体信号は個人差や計測環境による影響が大きいことや、学習用に確保できるデータ数が限られることから、ニューラルネットワークをはじめとした一般的なパターン識別器をそのまま用いると過学習がおこり識別精度が低下する。

研究代表者はこれまでの研究で、入力信号に関する固有の性質を確率モデルとしてニューラルネットワークの構造に組み込むとともに、識別クラスと信号パターンの対応などをパラメータとして学習する手法である確率モデルベース・ニューラルネットワークを提案した。この方法では、組み込んだモデルが自然な制約になるため、学習データが少ない際の過学習を防止できる。これにより、脳波を用いた人の運動イメージの識別や筋電信号を用いた上肢動作の識別に成功している。これらの研究ではそれぞれ 1 種類の生体信号のみを用いたが、複数種類の信号識別へ拡張することで、医療モニタリングや病気のスクリーニングなどへの応用が考えられる。しかしながら、この方法の技術的な限界として、生体信号に「異常が起きてから」しか容態の判定ができず、異常を発見できたとしても処置の遅れが考えられる。そのため、生体信号に「異常が起きてから」ではなく、「異常が起こる前」に容態が予測できれば有用である。

時系列予測のための手法として、自己回帰モデルやそれを発展させた方法、リカレントニューラルネットワークに基づく方法などが一般的であるが、学習データが少ない場合に次数やニューロン数などのパラメータ設定が難しいことや、生体信号特有の複雑な非線形性や非正常性に対応しきれない問題があった。そのため、生体信号予測に関する研究は少なく、血圧波形を用いた急性低血圧の予測(**Henriques and Rocha, 2009**)など、一部の信号や症例にとどまっていた。

2. 研究の目的

本研究は、現在までの信号から将来の信号値および信号源の状態を予測・識別する時系列予測ニューラルネットワーク (NN) の開発を目的とする。そして、提案 NN を生体信号予測・容態推定へ応用することで、予測に基づく医療モニタリングへの足掛かりとする。提案 NN には、複雑な非線形性や個人差に対応するための工夫として、(1) 確率モデルに基づく設計、(2) 事後確率に基づく予測と識別、(3) **Sparse Bayesian learning**、(4) 大規模データを用いた学習を取り入れる。

3. 研究の方法

研究の目的における各項目をさらに、筋電位信号の確率モデル、深層生成モデルを用いた生体信号モデリング、高次自己相関を学習的に獲得する NN、確率モデルに基づく時系列予測 NN、識別的混合正規分布とスパース学習、大規模医用データセットの構築の 6 つのテーマに分割し研究を遂行した。

4. 研究成果

筋電位信号の確率モデル

筋電位信号の解析・生成できる確率モデルを提案した。筋電位信号を異なる分散を持つ正規分布の混合モデルに基づき表現する(図 1)。これにより筋発揮力に応じて筋電位の分散に重畳するばらつきを表現することができる。実験では、提案モデルに基づき筋電分布の非正規性と筋力の強さの関係性を明らかにした。

[主な出版物]

- Akira Furui, Hideaki Hayashi, and Toshio Tsuji, **Scale Mixture-based Stochastic Model of Surface EMG Signals with Variable Variances**, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* (IF=4.491), Vol. 66, No. 10, pp. 2780–2788, DOI: 10.1109/TBME.2019.2895683, October 2019.

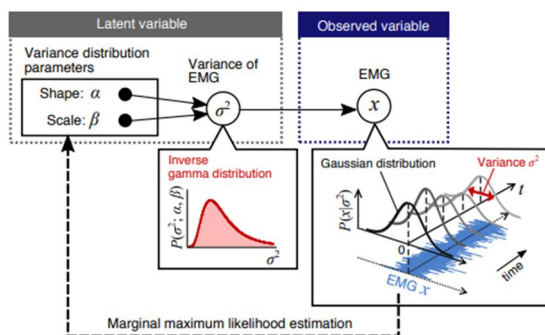


図 1. 筋電位信号の確率モデル

深層生成モデルを用いた生体信号モデリング

生体信号生成に適した **Generative Adversarial Networks (GANs)** を提案し **data augmentation** に応用した。GANs は深層生成モデルの一種であり、人工データを生成するニューラルネットワ

ークと、実データと生成データを識別するニューラルネットワークを用い、これらを敵対的に学習させることで質の高い人工データを生成する技術である。本研究では、各ネットワーク構造を再帰型にすることで生体信号特有の時系列性や周期性の再現を可能とした。さらに、提案法により生成した人工データを心電図や脳波識別のための学習データに追加することで識別精度が向上することを示した。

[主な出版物]

- Shota Harada, Hideaki Hayashi, Seiichi Uchida, **Biosignal Generation and Latent Variable Analysis with Recurrent Generative Adversarial Networks, IEEE Access (IF=4.098), Vol. 7, pp. 144292–144302, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934928, August 2019.**

- Shota Harada, Hideaki Hayashi, Seiichi Uchida

Biosignal Data Augmentation Based on Generative Adversarial Networks

Proceedings of 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2018), pp. 368–371, Honolulu, Hawaii, July, 17–21, 2018 (Poster presentation).

高次自己相関を学習的に獲得する NN 重要な統計量であり、パターン認識においても多用される高次自己相関を学習的に獲得する NN を提案した。提案 NN は入力要素を重み係数に基づき選択し、選択された要素同士の積をとることで特徴量を算出する (図 2)。これにより入力から高次自己相関や共起を抽出可能である。実験では医用画像認識や画像 segmentation において有用性を示した。

[主な成果物]

- Hideaki Hayashi and Seiichi Uchida, **A Trainable Multiplication Layer for Auto-correlation and Co-occurrence Extraction, Proceedings of the 14th Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2018), Perth, Australia, December, 2–6, 2018 (Poster presentation, acceptance rate: 28%).**

- Joonho Lee, Hideaki Hayashi, Wataru Ohyama, and Seiichi Uchida, **Page Segmentation using a Convolutional Neural Network with Trainable Co-occurrence Features, Proceedings of the 15th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2019), pp. 1023–1028, Sydney, Australia, September 20–25, 2019 (Oral presentation).**

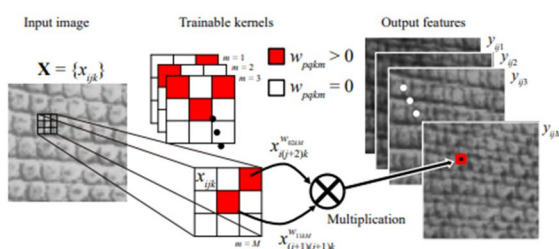


図 2. 高次自己相関を獲得する NN

確率モデルに基づく時系列予測 NN

確率モデルに基づく NN を構築し、時系列予測に応用した。入力時系列に対し、数時刻先の予測値を混合正規分布に基づきモデル化する。そして、予測分布のパラメータを出力するように NN を学習させることにより、複数の可能性を考慮した予測波形を出力可能なモデルを提案した (図 2)。実験ではベンチマークデータ (オンライン手書き文字) を用いて、提案法が従来法に対して高い精度で予測可能であることを示した。

[主な成果物]

- Masaki Yamagata, Hideaki Hayashi, and Seiichi Uchida, **Handwriting Prediction Considering Inter-Class Bifurcation**

Structures, Proceedings of the 17th International Conference on Frontiers of Handwriting Recognition (ICFHR 2020), Virtual Conference due to COVID-19, September 7–10, 2020.

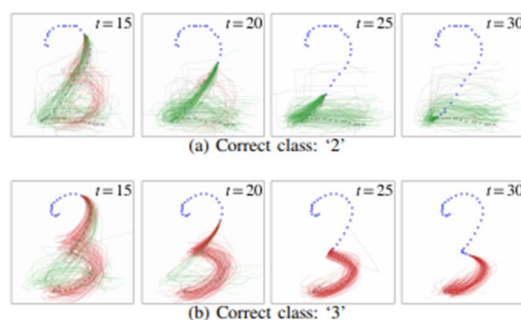


図 3. 時系列予測 NN の出力例

識別的混合正規分布とスパース学習

混合正規分布に基づく識別モデルを提案し、パターン認識へ応用した。提案モデルは、入力データが混合正規分布に従うと仮定することにより、各クラスの事後確率を学習的に推定できる。また、提案モデルの **Sparse Bayesian learning** に基づく学習アルゴリズムを提案した。**Sparse Bayesian learning** はモデルの各重みに事前分布を設定し、重みの学習と同時に事前分布を最適化することによって重みをスパース化し、モデルの複雑度を自動決定する手法である。この技術を提案モデルの学習へ応用することにより、多峰性とスパース性を兼ね備えた識別器を実現した (図 4)。また、提案モデルを深層 NN と組み合わせることにより、大規模データの識別に応用した。

[主な成果物]

- Hideaki Hayashi and Seiichi Uchida, **A Discriminative Gaussian Mixture Model with Sparsity**, Proceedings of the 9th International Conference on Learning Representations (ICLR 2021), Virtual Conference due to COVID-19, May 4–8, 2021 (Accepted as a poster presentation, acceptance rate: 29%).

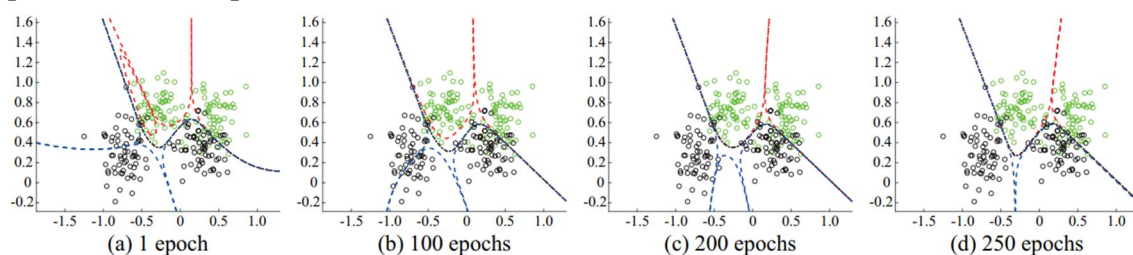


図 4. Sparse Bayesian learning に基づく識別的混合正規分布の複雑度の自動決定

大規模医用データセットの構築

大規模な医用データセットの構築に取り組んだ。例えば、**Cardiotocography** と呼ばれる妊婦の生体信号について、医師の協力のもと **3000** 例を超えるデータを収集し、胎児の状態予測に応用した。また、クラスタリングを用いて内視鏡画像を効率よくアノテーションする手法を提案した。
[主な成果物]

- 原田翔太, 早志英朗, 古賀俊介, 重見大介, 柴田綾子, 吉田昌義, 蓮尾泰之, 内田誠一, **Cardiotocogram** の識別に基づく胎児の状態推定, 電子情報通信学会技術研究報告 **MI2019-14**, 名古屋工業大学, 2019年5月24日。

- Ryoma Bise, Kentaro Abe, Hideaki Hayashi, Kiyohito Tanaka, and Seiichi Uchida, **Efficient Soft-Constrained Clustering for Group-Based Labeling**, Proceedings of the 22nd International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI 2019), Shenzhen, China, October 13–17, 2019 (Poster presentation).

- Shota Harada, Hideaki Hayashi, Ryoma Bise, Kiyohito Tanaka, Qier Meng, and Seiichi Uchida, **Endoscopic Image Clustering with Temporal Ordering Information Based on Dynamic Programming**, Proceedings of the 41st International Engineering in Medicine and Biology Conference (EMBC2019), pp. 3681–3684, Berlin, Germany, July 23–27, 2019 (Oral presentation).

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 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Toshio Tsuji, Shota Nakashima, Hideaki Hayashi, Zu Soh, Akira Furui, Taro Shibasaki, Keisuke Shima, Koji Shimatani	4. 巻 10
2. 論文標題 Markerless Measurement and Evaluation of General Movements in Infants Scientific Reports	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1422
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-57580-z	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 Changhee Han, Leonardo Rundo, Ryosuke Araki, Yudai Nagano, Yujiro Furukawa, Giancarlo Mauri, Hideki Nakayama, Hideaki Hayashi	4. 巻 7
2. 論文標題 Combining Noise-to-Image and Image-to-Image GANs: Brain MR Image Augmentation for Tumor Detection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 156966-156977
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2947606	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 該当する
1. 著者名 Shota Harada, Hideaki Hayashi, Seiichi Uchida	4. 巻 7
2. 論文標題 Biosignal Generation and Latent Variable Analysis with Recurrent Generative Adversarial Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 144292-144302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2934928	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 Hideaki Hayashi, Kohtarō Abe, Seiichi Uchida	4. 巻 186
2. 論文標題 GlyphGAN: Style-Consistent Font Generation Based on Generative Adversarial Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Knowledge-Based Systems	6. 最初と最後の頁 104927
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.knosys.2019.104927	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akira Furui, Hideaki Hayashi, and Toshio Tsuji	4. 巻 66
2. 論文標題 Scale Mixture-based Stochastic Model of Surface EMG Signals with Variable Variances	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 2780-2788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TBME.2019.2895683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Shohei Kubota, Hideaki Hayashi, Tomohiro Hayase, Seiichi Uchida
2. 発表標題 Layer-Wise Interpretation of Deep Neural Networks Using Identity Initialization
3. 学会等名 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideaki Hayashi and Seiichi Uchida
2. 発表標題 A Discriminative Gaussian Mixture Model with Sparsity
3. 学会等名 International Conference on Learning Representations (ICLR 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takato Otsuzuki, Hideaki Hayashi, Yuchen Zheng, Seiichi Uchida
2. 発表標題 Regularized Pooling
3. 学会等名 International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Yamagata, Hideaki Hayashi, and Seiichi Uchida
2. 発表標題 Handwriting Prediction Considering Inter-Class Bifurcation Structures
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Handwriting Recognition (ICFHR 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保田祥平, 早志英朗, 早瀬友裕, 内田誠一
2. 発表標題 深層パーセプトロンの単位初期化に基づく中間層の貢献度と尤度の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 緒纈隆人, 早志英朗, Zheng Yuchen, 内田誠一
2. 発表標題 正則化プーリング
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山縣将貴, 早志英朗, 内田誠一
2. 発表標題 クラスの利用した時系列予測とその手書きパターンへの応用
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早志英朗, 内田誠一
2. 発表標題 識別・生成のハイブリッドモデルと弱教師あり学習への応用
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保田祥平, 早志英朗, 早瀬友裕, 内田誠一
2. 発表標題 単位初期化による深層パーセプトロン学習: ヤコビ行列を用いた誤差逆伝播に関する考察
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Yamagata, Hideaki Hayashi, Seiichi Uchida
2. 発表標題 Class-Guided Handwriting Prediction with Uncertainty
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryoma Bise, Kentaro Abe, Hideaki Hayashi, Kiyohito Tanaka, and Seiichi Uchida
2. 発表標題 Efficient Soft-Constrained Clustering for Group-Based Labeling
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taichi Sumi, Brian Kenji Iwana, Hideaki Hayashi, and Seiichi Uchida
2. 発表標題 Modality Conversion of Handwritten Patterns by Cross Variational Autoencoders
3. 学会等名 The 15th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Joonho Lee, Hideaki Hayashi, Wataru Ohyama, and Seiichi Uchida
2. 発表標題 Page Segmentation using a Convolutional Neural Network with Trainable Co-occurrence Features
3. 学会等名 The 15th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Harada, Hideaki Hayashi, Ryoma Bise, Kiyohito Tanaka, Qier Meng, and Seiichi Uchida
2. 発表標題 Endoscopic Image Clustering with Temporal Ordering Information Based on Dynamic Programming
3. 学会等名 The 41st International Engineering in Medicine and Biology Conference (EMBC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早志英朗, 内田誠一
2. 発表標題 識別と生成のハイブリッドニューラルネットワーク
3. 学会等名 パターン認識・メディア理解研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田翔太, 早志英朗, 古賀俊介, 重見大介, 柴田綾子, 吉田昌義, 蓮尾泰之, 内田誠一
2. 発表標題 Cardiotocogramの識別に基づく胎児の状態推定
3. 学会等名 医用画像研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早志英朗, 内田誠一
2. 発表標題 混合正規分布に基づくニューラルネットワークのスパースベイズ学習
3. 学会等名 パターン認識・メディア理解研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Hayashi and Seiichi Uchida
2. 発表標題 A Trainable Multiplication Layer for Auto-correlation and Co-occurrence Extraction
3. 学会等名 14th Asian Conference on Computer Vision (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Joonho Lee, Hideaki Hayashi, Seiichi Uchida
2. 発表標題 A Multiplication Layer for Sequence Data
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Hayashi and Seiichi Uchida
2. 発表標題 A Trainable Multiplication Layer
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Hayashi and Seiichi Uchida
2. 発表標題 A Trainable Multiplication Layer and its Applications
3. 学会等名 14th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shota Harada, Hideaki Hayashi, Seiichi Uchida
2. 発表標題 Biosignal Data Augmentation Based on Generative Adversarial Networks
3. 学会等名 The 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Hayashi
2. 発表標題 A Probabilistic Model-based Neural Network
3. 学会等名 The 13th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原田翔太, 早志英朗, 内田誠一
2. 発表標題 Generative Adversarial Networksに基づく生体信号生成
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 早志英朗, 内田誠一, 辻敏夫
2. 発表標題 Johnson分布に基づくニューラルネットワーク
3. 学会等名 パターン認識・メディア理解研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideaki Hayashi and Toshio Tsuji
2. 発表標題 A Time-series Discriminant Component Network
3. 学会等名 第20回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2017)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Changhee Han, Leonardo Rundo, Ryosuke Araki, Yujiro Furukawa, Giancarlo Mauri, Hideki Nakayama, and Hideaki Hayashi	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 521
3. 書名 Infinite Brain MR Images: PGGAN-based Data Augmentation for Tumor Detection. In Neural Approaches to Dynamics of Signal Exchanges, (Eds. by A. Esposito, M. Faundez-Zanuy, F.C. Morabito, and E. Pasero)	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------