

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「現代の数理科学と連携するモデリング  
手法の構築」  
研究課題「認識の数理モデルと高階・多層確率場  
による高次元実データ解析」

## 研究終了報告書

研究期間 2014年10月～2020年3月

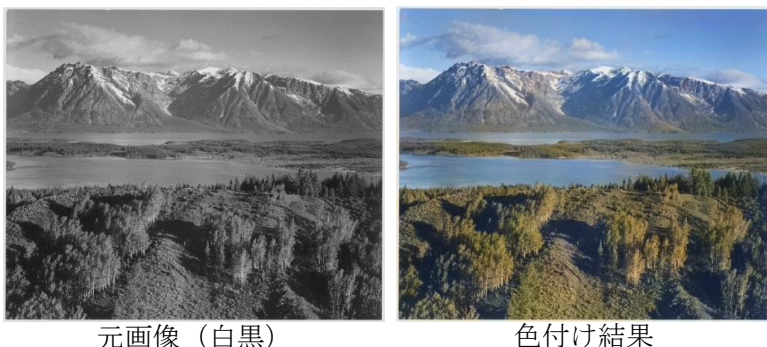
研究代表者:石川 博  
(早稲田大学理工学術院、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究課題では、認識の数理モデル構築をめざした理論的課題と、高次元データ解析の個別応用問題の両方に対して、2 グループがそれぞれのアプローチにより連携しつつ取り組んできた。

石川グループでは高階マルコフ確率場におけるエネルギー生成と、深層学習における構造つき予測問題において、問題例を多数検討し高度化することにより、その相違点と共通点を解析し抽象化することにより、データに内在する構造を自動的・明示的に扱うモデルを模索した。臓器の形状に関する事前知識を用いて高階マルコフ確率場の構造を自動生成することにより世界初の実用レベル全自動肺動静脈セグメンテーションを実現した。この技術は深層学習全盛の研究終了時点においてもその性能において凌駕されておらず、いまだ深層学習万能ではないことを示している。深層学習の急速な発展に鑑み、研究期間比較的初期に重点をマルコフ確率場から深層学習に移したのち、深層学習による構造つき予測問題に主に取り組んだが、「白黒写真の自動色付け」(図 1)、「イラストレーションのペン入れ」「画像補完」(図 2)などの高度な画像変換における重要な成果を得た。



元画像 (白黒)

色付け結果

図 1 白黒画像の自動色づけ

岡谷グループでは、深層学習の理解を目標として、その高効率学習最適化法の開発や深層学習モデル理論の構築などの研究を行い、「行列多様体制約による CNN 学習計算方法」「コンパクトで高性能な CNN 構造」「共変量シフトを克服する活性化関数」などの基礎的成果とともに、「画像からの物体材質認識」「動画認識」などの実用価値を持つ成果もあげた。



図 2 画像の自動補完

両グループのこれらの研究を通して、構造のない集合上の確率分布の言葉では深層学習の説明や認識の数理モデル構築は不可能であろうと予想し、データの持つ不変性や階層性などの構造による認識の理解をめざしてきた我々の研究方針の正しさが裏付けられてきている。例えば、石川グループの研究の過程において、画像認識によく使われる畳み込みニューラルネットワーク(CNN)の性能がよい理由の解明に、特に構造つき予測問題が適していることが明らかになった。これは、出力が単なる点集合である認識問題と異なり、CNN が自然画像のなす部分空間を学習できることを、敵対的生成ネットワーク(GAN)による画像生成などが示しているからであり、最近になって、自然画像の分布を CNN の構造自体が表現しており、構造つき予測問題の一部が学習を全くしなくても解けることが分かってきたことから解る。また岡谷グループの畳み込みオートエンコーダ各層詳細設計の自動最適化は、そのような構造による認識の理解及びその応用による人工知能システムの自動設計への道を示している。

## (2) 顕著な成果

### <優れた基礎研究としての成果>

#### 1.

概要： 深層学習による白黒画像の自動色付け手法を開発し、コンピューターグラフィックス分野トップの国際会議である SIGGRAPH2016 で発表した。この手法では、大域・局所両方の特徴を考慮した新たな畳み込みネットワークを用いることで、情景全体の構造を考慮した自然な色付けを行うことができる。新聞・テレビなどのメディアの注目を集めるとともに、経済産業省 Innovative Technologies 2016 特別賞「Culture」を受賞した。

#### 2.

概要： 深層ニューラルネットの中核的モデルである畳み込みニューラルネットを対象とする、新たな学習方法を開発した。各層の畳み込みフィルタに任意の行列多様体の制約を課すことを可能にする方法で、その数値計算アルゴリズムを安定性と局所解への収束保証付で導出した。行列多様体の選択により、画像認識タスクでの認識精度が向上することを実験的に示した。以上は世界初の成果であり、AI 分野で最高レベルの国際会議 AAAI-18(2018 年 2 月開催)に採択された。

#### 3.

概要： 画像に写るシーンの意味を理解する「画像理解」の実現へ向けて、画像と言語という異なるモダリティの表現を効果的に融合する「Dense Co-attention ネットワーク」を提案した。1 枚の画像と、そこに映るシーンに関する自然言語の質問文のペアが与えられ、その質問に適切に答えるタスクに適用し、最もメジャーなデータセットである VQA および VQA 2.0 において世界最高の精度を達成した。関連分野で最高レベルの国際会議 CVPR-18(2018 年 6 月開催)に採択された。

### <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

#### 1.

概要： 画像診断や診療指標の定量化に必要な医用画像のセグメンテーションのため、対象臓器の形状に関する事前知識を活用して劣モジュラ高階マルコフ確率場エネルギーを画像に応じて生成することにより、高階確率場の有効性と高速性を両立させた、実用性の高い高階確率場の活用手法を提案した。本手法による世界初の全自動肺動静脈セグメンテーションアルゴリズムと GUI によるユーザ修正機能を備えた手術シミュレーションシステムは、現在臨床現場で日常的に活用されている。

#### 2.

概要： 鉛筆によるラフ画を全自動で線画に変換する手法を開発した。ラフ画を線画にするのは、マンガやイラストレーションの制作過程に置いて必要だが非常に手間のかかる作業であり、その自動化は制作効率向上に重要である。深層学習を用いた本手法では、ラスター形式の様々なラフ画を良好に線画化することができる。さらに、ユーザの意思をコンピュータに伝えるインターフェースを機械学習により強化することにより、より実用的なシステムの構築を可能にした。

#### 3.

概要： 補完・大域識別・局所識別の3ネットワークによる深層学習による画像の欠損部分補完手法を開発した。両識別ネットワークが大域的・局所的な自然さを評価して、補完ネットワークに情景の整合性を考慮した画像補完を学習させる。人間の顔の一部を補完するなど、入力画像に写っていないテキストや物体を新たに生成することを必要とする、従来の手法では困難な場合にも対応し、様々な情景において自然な画像補完が可能となった。

## < 代表的な論文 >

Yoshiro Kitamura, Yuanzhong Li, Wataru Ito, and Hiroshi Ishikawa, “Data-Dependent Higher-Order Clique Selection for Artery-Vein Segmentation by Energy Minimization”, International Journal of Computer Vision, Vol. 117, Issue 2, pp. 142-158, 2016.

Satoshi Iizuka, Edgar Simo-Serra, and Hiroshi Ishikawa, “Let there be Color!: Joint End-to-end Learning of Global and Local Image Priors for Automatic Image Colorization with Simultaneous Classification,” ACM Transactions on Graphics, Volume 35, Issue 4 (Proc. of SIGGRAPH2016), Article 110, July 2016.

Mete Ozay and Takayuki Okatani, “Training CNNs with Normalized Kernels”, Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-18), 2018

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 石川グループ

- ・研究代表者: 石川 博 (早稲田大学理工学術院 教授)
- ・研究項目
  - ・トップダウンモデルと確率場生成
  - ・確率場最適化の応用
  - ・深層学習における学習データの必要性の削減
  - ・深層学習の応用

#### ② 岡谷グループ

- ・主たる共同研究者: 岡谷 貴之 (東北大学大学院情報科学研究科 教授)
- ・研究項目
  - ・高効率学習最適化法構築
  - ・異種タスク性能評価
  - ・動画認識への応用
  - ・多層モデル理論構築

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

石川グループでは、CREST 同領域の水藤チーム、長山チームおよび科研費新学術領域「多元計算解剖学」の本谷班と、医用画像処理についてセミナーを行うなどの連携をした。また海外ではスペインのマドリード工科大学およびバルセロナ工科大学との共同研究をするとともに、イギリスのダラム大学との共同研究を実施した。産業界においては、富士フイルム株式会社(医用画像処理)、株式会社セルシス(アニメーション、イラストレーションメディア開発ツール)、株式会社東芝(深層学習システムの高速化)、アイシン精機(深層学習による部品検査)等と共同研究もしくは技術協力を実施した。また、白黒写真色づけを応用した文化事業として、首都大学東京、東京大学、朝日新聞、読売新聞、沖縄タイムス、岩手日報、南日本新聞、福井新聞等に協力した。

岡谷グループでは、株式会社富士通研究所、パナソニック株式会社、株式会社日立製作所、新日鐵住金株式会社、ファナック株式会社等と共同研究を実施した。