

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12151

研究課題名（和文）神経回路網の動的モデル学習におけるモデル切り替え基準の検討

研究課題名（英文）Model Switching Criteria in Dynamic Model Learning of Neural Networks

研究代表者

亀山 啓輔（Kameyama, Keisuke）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40242309

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：複数のニューラルネットワークモデルを切り替えつつ必要なモデルと写像を獲得する学習過程を「動的モデル学習」として整理し、特に切り替え後のモデルと写像の選択について、学習効率と圧縮後の性能の観点から多角的に検討を行った。畳み込みニューラルネットワークを用いた画像認識問題において、多段階のモデル圧縮手法や、蒸留において有益な性質を選択的に転移させる手法を提案し、モデルの規模を徐々に変化させて切り替えていくことや、切り替え後写像の選択基準の工夫により圧縮後の性能向上が可能であることなどを示した。また、マルチモーダルなパターン分類における効率的なモーダリティ選択法を提案し、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、パターン認識系の構築における蒸留や転移学習などに見られる複数のニューラルネットワークモデルを経由した学習過程について、それらに共通するモデル切り替え時のモデルと写像の選択方法について学習効率と認識精度の観点から検討を加え、新たな学習方式を提案して学習の効率化と認識精度の向上が可能となることを示しており、単一のモデルに限定されない学習方式の実用化に貢献する成果である。このことは、一定の能力を持つパターン認識系を従来より計算リソースの限られたデバイス上に実現することを可能にするもので、タブレット端末やIoTデバイス等への高度なパターン認識系の実装に資するものである。

研究成果の概要（英文）：This project concerns the “dynamical model training” of neural networks which involves a training process that switches multiple models and maps implemented during a single learning process. It aimed to clarify the methods and conditions for obtaining a superior map in the desired model in an efficient manner. In model compression using dynamical model training in convolutional neural networks (CNNs) for image classification, methods using multi-stage switching and map selection by distillation with selective transfer of meritorious nature have been proposed. There, it was clarified that a gradual change in the model size and merit-based distillation contribute to the improvement of the performances of the compressed networks. In addition, a method for modality selection in image classification using multimodal features was proposed, and its effectiveness was shown.

研究分野：パターン認識

キーワード：ニューラルネットワーク 動的モデル学習 転移学習 蒸留

### 1. 研究開始当初の背景

いわゆる「人工知能」技術の中核となった層状ニューラルネットワークの学習は、所定のモデル中のパラメータを調整することで最適とされる写像を獲得する。一方、単一のモデルに束縛されずに動的にモデルを変更しつつ学習を行い、最適なモデルと写像を獲得する学習法の研究も、近年では進められてきた。特に、過学習を解消し計算量を抑えるための、より小さなモデルへの切り替え（刈り込み）や、複雑な問題に対応する、より大きなモデルへの切り替え（成長）等の場面でモデルの切り替えが必要と認識され、学習済みネットワークが獲得した写像を別のネットワークで継承する手法についても検討が進められてきた。報告者はこれまで層状ネットワークの学習、アンサンブル学習、画像のモデリングなどにおける動的なモデル変更を伴うパラメータ調整法について研究を進めてきており、上記のケースを含む「動的モデル学習」による、適切な写像獲得の一般的な手法の開発と整理が必要と考えた。

### 2. 研究の目的

従来、過学習の解消、複雑な問題への適応、転移学習など異なる目的への手段としてそれぞれに検討されてきたニューラルネットワークのモデルの切り替えを、学習過程全体を固定したモデルによらない動的モデル学習として整理し、それが効率的にかつ適した写像を獲得する形で実現されるための学習法を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、モデルの切り替えに際して必要となる切り替え後のモデルの選択や、そこでの写像の選択について、学習の容易さや切り替え後のネットワークの性能の高さなどの観点から、学習を改善する手法について多角的に検討を進めた。

中心となった課題は畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いた画像認識問題であり、学習後のネットワークの運用コストを低く抑えることができる小規模なモデルでの認識を動的モデル学習で実現するものである。精度の高い学習が可能となる規模の大きなCNNモデルから開始して、最終的には運用コストの小さなコンパクトなCNNモデル上に高性能な認識機能を実現する過程における適切なモデル選択や転移学習の指針を明らかにすることを目指した。さらに、異なる特徴量を用いる複数の認識器の結果を適応的に選択・統合することにより、全体の認識精度を向上させる手法の検討などを並行して進めた。

### 4. 研究成果

#### (1) 動的モデル学習によるCNNの多段階モデル圧縮手法

小型情報デバイス上での実現に適した運用リソースが少なく、かつ高性能な画像認識系をCNNで実現することを目的として、大規模なCNNの学習から開始して小規模なモデルに至る動的モデル学習過程について、学習過程におけるモデル選択と、写像転移を効率化するための手法について検討を行った。

モデルの切り替えに際しては、モデル間の規模の相違が著しい場合に、蒸留などの手法を用いた写像の転移が難しいことを確認し、Mirzadehら[1]が提案しているような中間的な規模のモデルを介して多段階に切り替えて（圧縮して）行くことの有効性を確認した。また、この多段階モデル圧縮に、Hint学習[2]で行われているように、ネットワーク全体の写像の転移に加えて、中間層までの写像の転移も並行して行う学習法を導入することで、学習の効率と転移後の小規模なネットワークにおける認識精度の向上を図ることができることを示した。

実験では特に目標とするモデルが学習開始時のモデルより層数が多くかつパラメータ数の少ない小規模ネットワークとなるケースについて、画像認識ベンチマークデータのCIFAR-10において、パラメータ数の比較で7分の1の規模のモデルで、当初モデルを超える認識性能を実現することができた。

動的モデル学習においては、モデルは規模の差が大きいものを段階的に切り替えていくことにより、元のネットワークの写像をより高精度に転移できること、そして転移学習においては、手本となるネットワークの中間層の応答も転移させることで、目標とする写像の効率的な獲得を助けることができ、これらの知見を組み合わせることで効率的に高精度な写像の転移が可能となることが明らかになった。

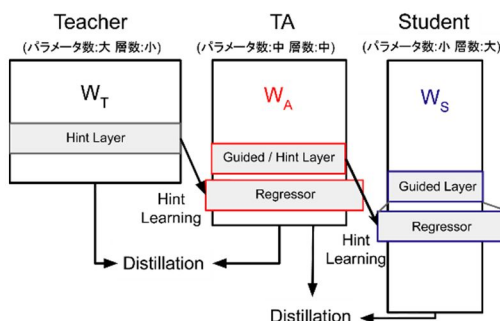


図1. 中間的な規模のモデルを介した蒸留と hint 学習の多段的併用。

## (2) 動的モデル学習における選択的な写像転移基準の導入

動的モデル学習の過程で発生するモデル切り替えに際しては、当初モデル上の写像が極力忠実に新モデル上で実現（転移）されるよう、新モデル上のパラメータが選択される。しかし、一般に当初モデル上の写像は、目的に対して理想的なものとは限らないため、常にそれが忠実に転移されればよいわけではない。ここではその点に着目し、写像転移に際してその有益な側面がより重点的に転移されるような選択的な写像転移基準を導入することで、モデル切り替え後のネットワークの性能が改善できると考えた。

提案法では、モデル切り替えの際の蒸留を用いた転移に際して、蒸留で用いられる2つの損失量（当初モデルの写像からの乖離を表す  $E_{soft}$  と、学習誤差に相当する  $E_{hard}$ ）のバランスを学習データごとに変えることでこれを実現した。学習データのうち、当初モデルが正しく認識できているものに対しては  $E_{soft}$  の重みを大きくし、誤っているものに対しては逆に  $E_{hard}$  の重みを大きくするよう損失関数を変更しつつ蒸留を行うこととした。

この方法の有効性を検証する画像認識実験において、2つの損失の重みを変更する規則を数種類変えて検証した結果、学習データの正誤に応じて重みを少量だけ増減させた場合に、固定重みの場合と比べて、転移後のモデルにおける認識精度に改善が見られることが分かった。これにより、モデルの切り替えに伴う写像の転移では、転移元の写像の望ましい特性を選択的に転移させることで、より適した転移先の写像を選択できることが明らかとなった。

## (3) マルチモーダル認識におけるモーダリティの選択機構の開発

ある観測対象の認識を複数の異なる特徴量を用いて行う場合には、観測条件の悪化によりいずれかの特徴量（モーダリティ）の信頼性が低下することがある。モーダリティごとに認識器を準備し、結果を統合して最終的な認識結果を得ようとする場合には、この問題に対処するために、観測条件に応じて認識器を選択したり、その重みを変えたりすることで、最終的な認識結果の精度の維持や向上を図ることができると考えた。

提案法では、分類クラスに対応する one-hot 出力を行うよう学習させた各モーダリティの分類器の出力ベクトルの特徴からそのモーダリティの信頼性を推定し、信頼性の高いモーダリティの選択を行い、その選択を最終的な認識結果として用いる機構（マルチモーダルセレクトア:MMS）を提案した。

有効性の検証は眼周囲画像と虹彩パターンの2つのモーダリティを用いて個人を認識する場合について行った。初めに各モーダリティによる個人認識器を、それぞれCNNを学習させて準備した。その後、いずれかのモーダリティ入力をノイズ付加や遮蔽などの方法で劣化させ、これを入力した個人認識器の出力ベクトルを入力として、劣化していない側のモーダリティを選択するようにMMSを学習させた。その結果、いずれかのモーダリティの劣化度が高いほど、MMSの選択精度は向上すること、MMSの選択したモーダリティの分類結果を採用することで全体としての分類精度が向上することが分かった。

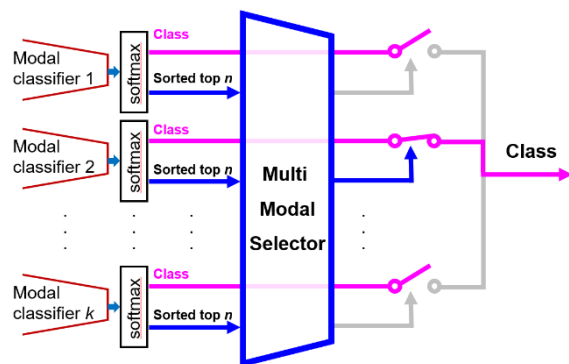


図2. MMSによる信頼性の高いモーダリティ分類器の選択

## (4) まとめと課題

本研究では、モデルを切り替えつつ行う教師付き学習の枠組みを動的モデル学習と定義し、切り替え時のモデルと写像の選択について、学習の容易さや切り替え後のネットワークの性能の高さなどの観点から多角的に検討を進めた。その結果、特にCNNの動的モデル学習において、モデルの規模を徐々に変化させつつ切り替えていくことが重要であること、切り替え後の写像の選択基準の工夫により認識精度を向上させられることなどを明らかにした。また、マルチモーダルなパターン分類における効率的なモーダリティ選択法を提案し、その有効性を示した。今後は、ここで得られた知見をさらに一般化し、モデルを切り替えつつ目的とする写像を学習的に獲得する過程の整理と高度化を進める必要がある。

### < 引用文献 >

- [1] S. I. Mirzadeh, M. Farajtabar, A. Li, N. Levine, A. Matsukawa and H. Ghasemzadeh, "Improved knowledge distillation via teacher assistant," Proc. AAAI, pp. 5191-5198, 2020.
- [2] A. Romero, N. Ballas, S. E. Kahou, A. Chassang, C. Gatta, and Y. Bengio, "Fitnets: Hints for thin deep nets," arXiv preprint arXiv:1412.6550, 2014.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ogawa Keita, Kameyama Keisuke	4. 巻 13111
2. 論文標題 Adaptive Selection of Classifiers for Person Recognition by Iris Pattern and Periocular Image	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 28th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP2021), Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 656 ~ 667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-92273-3_54	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 Morikawa Takumi, Kameyama Keisuke	4. 巻 1
2. 論文標題 Multi-Stage Model Compression using Teacher Assistant and Distillation with Hint-Based Training	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. Workshop on Pervasive and Resource-constrained AI (PerConAI), part of the 20th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2022)	6. 最初と最後の頁 484 ~ 490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767229	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 Taguchi Yusuke, Hino Hideitsu, Kameyama Keisuke	4. 巻 53
2. 論文標題 Pre-Training Acquisition Functions by Deep Reinforcement Learning for Fixed Budget Active Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Processing Letters	6. 最初と最後の頁 1945 ~ 1962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11063-021-10476-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 Ali U A Md Ehsan, Kameyama Keisuke	4. 巻 1
2. 論文標題 Informative Band Subset Selection for Hyperspectral Image Classification using Joint and Conditional Mutual Information	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Remote Sensing (IEEE SSCI 2022)	6. 最初と最後の頁 573 ~ 580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SSCI51031.2022.10022154	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 Huang Tzu-Jui, Kameyama Keisuke	4. 巻 1
2. 論文標題 Machine Learning Curriculums Generated by Classifier Ensembles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 19th IEEE International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA)	6. 最初と最後の頁 117 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CSPA57446.2023.10087822	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 Morikawa Takumi, Kameyama Keisuke	4. 巻 1
2. 論文標題 CNN Model Compression by Merit-Based Distillation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 19th IEEE International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA)	6. 最初と最後の頁 122 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CSPA57446.2023.10087390	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 Maniamfu Pavodi, Kameyama Keisuke	4. 巻 1
2. 論文標題 LSTM-based Forecasting using Policy Stringency and Time-varying Parameters of the SIR Model for COVID-19	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 19th IEEE International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA)	6. 最初と最後の頁 111 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CSPA57446.2023.10087773	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6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小川恵太, 亀山啓輔
2. 発表標題 分類器の学習的な組み合わせによる虹彩と眼周囲情報を用いたマルチモーダル個人認証
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム(FIT)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森川拓海, 亀山啓輔
2. 発表標題 Teacher Assistant及び中間層を模倣するDistillationによるニューラルネットワークのモデル圧縮
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム(FIT)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀山啓輔
2. 発表標題 虹彩認証における高次スペクトル特徴量の利用
3. 学会等名 信学技報, IEICE-MICT2021-35 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 U. A. Md Ehsan ALI, Keisuke KAMEYAMA
2. 発表標題 Joint-Conditional Mutual Information based Feature Subset Selection for Remotely Sensed Hyperspectral Image Classification
3. 学会等名 IEICE Tech. Rep., vol. 122, no. 90, IBISML2022-16
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河内信誠, 亀山啓輔
2. 発表標題 3DCNN と MLP の特徴量交換を用いた口唇動画を併用した音声認識
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会, D-20-9
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 朴潤花, 亀山啓輔
2. 発表標題 敵対的サンプルの生成法を活用したデータ拡張
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会, D-20-17
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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