

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24300049

研究課題名(和文)特徴空間の構造に基づく転移学習法の研究

研究課題名(英文)Transfer Learning based on the structure of Feature Space

研究代表者

吉田 哲也 (YOSHIDA, Tetsuya)

奈良女子大学・生活環境科学系・教授

研究者番号：80294164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,500,000円

研究成果の概要(和文)：利用可能なデータの量や種類の増加に効率的に対処するため、データごとに個別に学習を行うのではなく、学習した知識を効果的に再利用して活用するための技術を確立することが求められている。本研究では、特徴空間の構造に基づく転移学習法の研究に取り組んだ。具体的には、データを汎化した特徴表現を用いて学習し、学習した特徴空間の構造を表現するグラフを構築し、グラフを用いて特徴空間の構造を保存する正則化学習として転移学習法の定式化した。次に、この定式化に基づく最適化学習アルゴリズムの開発し、開発したアルゴリズムを計算機システムとしての実装するとともに、開発した手法を実データに適用して評価し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to cope with increasing quantity and variety of data, it is important to develop information technology which enables effective reuse of learned knowledge. We have developed a transfer learning method based on the structure of feature space. In the developed method, features are learned from the given data in the source domain, and a graph is constructed based on the learned features. Then, the method tries to preserve the structure of feature space as much as possible between the source domain and the target domain in transfer learning. Under the framework of optimization learning, we have developed a transfer learning algorithm based on multiplicative update rules. The algorithm has been implemented as a prototype system, and experiments over the prototype system were conducted over several benchmark datasets. The results of the experiments indicate the effectiveness of the developed transfer learning method.

研究分野：知能情報学

キーワード：転移学習 特徴空間

1. 研究開始当初の背景

入手可能なデータの量や種類の爆発的な増加に伴い、データから規則性やパターンを半自動的に取り出す「データマイニング」に関する研究が近年活発に行われている。情報洪水に押し流されることなく大量のデータを活用する技術が注目を集めている。データから規則性やパターンを半自動的に取り出すデータマイニングに関する研究が近年活発に行われており、スパムメールの自動フィルタリングなども実用に供されている。

従来のアプローチでは、学習される知識がデータの分布や定義域などの性質に強く依存するため、あるドメインで学習した知識は他のドメインでは有効に活用できないという課題がある。しかし、利用可能なデータの量や種類の増加に効率的に対処するため、データごとに個別に学習を行うのではなく、学習した知識を効果的に再利用して活用するために、ドメインが異なっても学習した知識を効果的に活用して再学習に要するコストを抑え、性能向上を実現する技術の確立が求められていた。

転移学習とは、ある問題を解くために、別の関連した問題に関するデータや学習結果を再利用することを目指す機械学習の枠組みである。2005年に開催されたNIPSワークショップを契機として、分類学習やクラスタリング、強化学習などに対して近年様々な手法が提案されている。

転移学習の枠組みにおいては、知識を転移する際に学習を行う側を元ドメイン、転移された知識を活用する側を目標ドメインと呼ばれ、異なるドメイン同士で何が類似し、どのように転移するかという転移仮説を数学的な転移モデルとして定式化する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、学習した知識を異なるドメイン間でも効果的に再利用して活用するために、特徴空間の構造に基づく転移学習法の研究開発を行う。文書中の単語頻度など観測データは非負のデータ行列として表現されることが多いため、本研究では、非負性制約に基づき、ラベルつきデータが不要な非負値行列分解を用いてまずデータから特徴表現を学習する。

データ解析法としての非負値行列分解の有効性は、データから次元削減した特徴空間を構築し、学習した特徴を用いて特徴空間内でデータを近似的に表現することに起因する。そこで、本研究では特徴空間に着目し、ドメインが異なっても特徴空間の構造が類似し、この構造を転移して特徴空間を保存することにより効果的な学習を行うとい

う転移仮説を設定する。これを実現するため、非負値行列分解を用いた学習を通じて特徴空間の構造をグラフとして表現し、目標ドメインに構築したグラフを転移して正則化に活用して最適化学習を行うという転移モデルに基づく最適化アルゴリズムを開発することに取り組む。

3. 研究の方法

本研究では、特徴空間の構造に基づく転移学習法の基礎理論の確立と、この理論に基づく転移学習アルゴリズムの開発を目指した。具体的には、

(1) 特徴空間の構造に基づく転移学習法の確立、

(2) 最適化に基づく転移学習アルゴリズムの研究開発、

(3) システム実装および実データへの適用と評価、

の3項目に対する研究開発を行った。具体的には、それぞれの項目に対して以下の課題に取り組んだ。

(1) 特徴空間の構造に基づく転移学習法の確立

カーネル法など、処理性能の向上のため処理の目的に応じて適切な特徴を構築してデータ処理に活用することが多い。本研究では、ドメインが異なっても特徴ベクトルで張られる特徴空間の構造が類似すると考え、非負値行列分解で学習した特徴を転移させることにより両ドメインでの特徴空間の構造を保存するという転移仮説に基づく学習法を開発する。

この目的を実現するため、研究代表者らが開発を進めてきた非負値行列分解に基づく手法を用いることで元ドメインにおいて特徴ベクトルを学習し、学習した特徴間の関係を重み付きグラフとして表現する特徴グラフを定義し、このグラフを転移し活用することにより目標ドメインで特徴空間の構造を保存する正則化学習を行うという転移モデルを定式化する。

また、従来の研究では非負値行列分解における非負性制約が非零の要素が少ないスパースな特徴の学習に寄与すると考えられてきたが、特徴表現のスパース性は明示的には考慮されてこなかった。そこで、非負値行列分解で学習する特徴表現のスパース性を独立性と相関から定式化し、データからスパースな特徴を学習して活用できる新しい特徴空間の学習法を開発して、意味的なまとまりのある良い特徴を用いて転移学習を行うことを実現する。

(2) 最適化に基づく転移学習アルゴリズムの研究開発

非負値行列分解における学習は、非負行列の積によるデータ行列の近似誤差の最小化として定式化される。行列のトレース演算との親和性からフロベニウスノルムに基づく最適化基準を用い、上記で定義する特徴グラフを用いて非負値行列分解における目的関数を拡張することにより、グラフに基づく正則化項を加えた目的関数の最適化問題として定式化する。

さらに、上記で定式化する目的関数を最適化して転移学習を行う際、高速な学習を可能とするために、行列演算のみに基づく最適化転移学習アルゴリズムを開発する。

(3) システム実装および実データへの適用と評価

開発する最適化転移学習アルゴリズムの有効性を評価するために、アルゴリズム開発用計算機上に、高速な行列演算が可能な R 言語を用いてプロトタイプシステムとして実装する。次に、実装したプロトタイプシステムを機械学習の分野での標準的なベンチマークデータに適用し、他手法との比較実験を行い、開発した手法の有効性を確認する。

さらに、得られた実験結果をもとに、開発するアルゴリズムでの計算時間や挙動を調べ、開発したアルゴリズムの更なる改良を行う。

4. 研究成果

(1) 特徴空間の構造に基づく転移学習法の確立

研究代表者らが従来から研究を進めてきたグラフ構造に基づく学習手法を発展させて、非負値行列分解に基づく手法を用いて学習する特徴ベクトルの間の関係を表現する特徴グラフを定義することにより、特徴空間の構造を保存するために正則化学習を活用する転移モデルを定式化した。

次に、上記で定義した特徴グラフを用いて、従来の非負値行列分解における目的関数を拡張し、転移学習をグラフに基づく正則化項を加えた目的関数の最適化問題として定式化した。

さらに、上記で定義した目的関数において正則化項として活用する項が、特徴グラフに対するグラフラプリアンに対応することを示し、非負値行列分解に基づくアプローチと多様体学習との対応の解明に取り組んだ。

(2) 最適化に基づく転移学習アルゴリズムの研究開発

上記で定式化した目的関数の最適化を通じて転移学習を実現する際、学習の高速化の

ために、行列演算のみに基づく最適化転移学習アルゴリズムを開発した。具体的には、上記で定義した目的関数に対する行列微分を行い、KKT 条件に基づいて行列の要素ごとに停留条件を求めることにより、転移学習を行うための学習規則を導出した。

また、最適化学習における目的関数に対する上界関数となる補助関数を考案し、開発したアルゴリズムがこの補助関数の逐次最小化を行うことを示すとともに、目的関数の非負性に基づいて、開発するアルゴリズムの収束性を示した。

さらに、上記で開発した転移学習アルゴリズムに対して、非負値行列分解で学習する特徴表現のスパース性を行列演算に基づく独立性と相関の観点から表現する正則化項を追加して目的関数を拡張するとともに、上記と同様に、拡張した目的関数の行列微分を通じて学習規則を導出した。

(3) システム実装および実データへの適用と評価

上記で開発したアルゴリズムを R 言語を用いてプロトタイプシステムとして計算機上に実装した。また、実装したプロトタイプシステムの評価のために、機械学習の分野での標準的なベンチマークデータとして用いられる、20 Newsgroups や TREC データなどの文書データ、Caltech256 などの画像データに関するベンチマークデータを収集して整備するとともに、開発したシステムをこれらのデータセットに適用し、他手法との比較実験を行い、開発した手法の有効性を確認した。評価指標としては、クラスタリングの精度に対応する正規化相互情報量を評価し、開発した手法が代表的な従来法を上回る精度を示すことを確認した。この結果より、開発した手法は効果的であると言える。

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 7件)

1. Yoshida, T. and Yamada, Y. : A Community Structure based approach for Network Immunization, Computational Intelligence, 査読有り, 印刷中, DOI: 10.1111/coin.12082
2. Tanaka, A., Takebayashi, H., Takigawa, I., Imai, H. and Kudo, M. : Ensemble and Multiple Kernel Regressors: Which Is Better? IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and

- Computer Science, Vol.E98-A, No.11, pp.2315-2433 (2015), 査読有り, DOI: 10.1587/transfun.E98.A.2315
3. Yoshida, T.: A Graph-based approach for Semi-Supervised Clustering, Computational Intelligence, Vol.30, No.2, pp.263-284 (2014), 査読有り, DOI: 10.1111/j.1467-8640.2012.00450.x
 4. Yoshida, T.: Weighted Line Graphs for Overlapping Community Discovery, Social Network Analysis and Mining, Vol.3, No.4, pp.1001-1013 (2013), 査読有り, DOI: 10.1007/s13278-013-0104-1
 5. Tanaka, A and Imai, H.: Parametric Wiener Filter with Linear Constraints for Unknown Target Signals, IEICE Transactions on Fundamentals, Vol.E97-A, No.1, pp.322-330 (2014), 査読有り
 6. Yoshida, T.: Toward Finding Hidden Communities based on User Profile, Journal of Intelligent Information System, Vol.40, No.2 189-209 (2013), 査読有り, DOI: 10.1007/s10844-011-0175-2
 7. 吉田哲也: 重複コミュニティ発見のための重み付き線グラフ, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, vol.5, No.3, 79-88 (2012), 査読有り
- [学会発表] (計 16 件)
1. Yoshida, T. and Yamada, Y.: Codebook Graph Coding of Descriptors, International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, pp. 223-228, July 27th, 2015, Las Vegas, U.S.A., 査読有り
 2. Tanaka, A. and Imai, H.: A Simple Proof for The Equivalence of Multiple Kernel Regressors and Single Kernel Regressors with Sum of Kernels, APSIPA Annual Summit & Conference 2015, December 16-19, 2015, Hong Kong
 3. Tanaka, A. and Imai, H.: Analyses on Empirical Error Minimization in Multiple Kernel Regressors, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2015), April 19-24, South Brisbane, Australia, 査読有り
 4. Tanaka, A. and Imai, H.: MUSIC-based DOA Estimation by Oblique Projection Along The Signal Subspace, Proceedings of 2014 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP2014), pp. 300-303, June 29-July 2nd, 2014, Gold Coast, Australia, 査読有り
 5. Tanaka, A., Takigawa, I., Imai, H. and Kudo, M.: Theoretical Analyses on Ensemble and Multiple Kernel Regressors, Proceedings of the 6th Asian Conference on Machine Learning (ACML2014), pp.1-15, November 26-28, 2014, Nha Trang, Vietnam, 査読有り
 6. . Tanaka, A., Takigawa, I., Imai, H. and Kudo, M.: Analyses on Generalization Error of Ensemble Kernel Regressors, Joint IAPR International Workshop, S+SSPR 2014, pp.273-281, August 20-22, 2014, Joensuu, Finland, 査読有り
 7. Yoshida, T.: Learning and Utilizing a pool of Features in Non-negative Matrix Factorization, 2013 International Conference on Active Media Technology (AMT-2013), LNCS 8210, pp. 96-105, October 29th, 2013, Maebashi, Japan, 査読有り
 8. Yoshida, T. and Ogino, H.: Theoretical Analysis and Evaluation of Topic Graph based Transfer Learning, 2013 International Conference on Active Media Technology (AMT-2013), LNCS 8210, pp.106-115, October 29th, 2013, Maebashi, Japan, 査読有り
 9. Yoshida, T. and Yamada, Y.: Toward Robust and Fast Two-Dimensional Linear Discriminant Analysis, 2013 International Conference on Active Media Technology (AMT-2013), LNCS

- 8210, pp.126-135, October 29th, 2013, Maebashi, Japan, 査読有り
10. Tanaka, A. and Imai, H.: Block-Based Image Interpolation by Linearly Constrained Least Mean Squares Estimation, The 2nd Hokkaido University - Korea University Joint Workshop in Statistics, June 25th, 2013, Seoul, Korea
 11. Yoshida, T.: Influence of Erroneous Pairwise Constraints in Semi-supervised Clustering, 2012 International Conference on Active Media Technology (AMT-2012), LNCS 7669, pp. 43-52, December 6th, 2012, Macau, China, 査読有り
 12. Yamada, Y. and Yoshida, T.: A Comparative Study of Community Structure Based Node Scores for Network Immunization, 2012 International Conference on Active Media Technology (AMT-2012), LNCS 7669, pp. 43-52, December 6th, 2012, Macau, China, 査読有り
 13. Yoshida, T.: Overlapping Community Discovery via Weighted Line Graphs of Networks, 12th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI 2012), LNAI 7458, pp. 895-898, September 5th, 2012, Kuching, Malaysia, 査読有り
 14. Yoshida, T. and Yamada, Y.: Community Structure based Node Scores for Network Immunization, 12th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI 2012), LNAI 7458, pp. 899-902, September 5th, 2012, Kuching, Malaysia, 査読有り
 15. Yoshida, T.: Line Graph for Weighted Networks toward Overlapping Community Discovery, 4th International Conference on Intelligent Decision Technologies (IDT 2012), vol.2, pp.404-413, May 24th, 2012, Gifu, Japan, 査読有り
 16. Yoshida, T. and Yamada, Y.: Immunization of Networks via

Modularity based Node Representation, 4th International Conference on Intelligent Decision Technologies (IDT 2012), vol.2, pp. 33-44, May 24th, 2012, Gifu, Japan, 査読有り

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 哲也 (Tetsuya YOSHIDA)
奈良女子大学・生活環境科学系・教授
研究者番号：80294164

(2) 研究分担者

今井 英幸 (Hideyuki IMAI)
北海道大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：10213216

(3) 連携研究者

なし