

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	PENG SHAOWEN
論文題目	Towards Effective and Efficient Personalized Recommendation from a Spectral Perspective (スペクトル観点から効果的かつ効率的な個人推薦に向けて)		
(論文内容の要旨)			
<p>Due to the development of computer hardware and explosive growth of data, personalized recommendation has been applied to many online services such as E-commerce, social network service, short videos, and so on. From earlier matrix factorization to state-of-the-art deep learning-based methods, tremendous research effort has been devoted to exploit powerful algorithms to extract user preference from complex user behaviors, and they have shown great potentials and superior performance for recommender systems. However, limited attention has been paid to the spectrum of data representation containing important information of the recommendation datasets and reflecting how users and items are represented in the embedding space. This thesis analyzes and evaluates recommendation algorithms from the following spectral perspective: (1) the graph spectrum and (2) the spectrum of user/item representations.</p> <p>While Graph Convolutional Networks (GCNs) have shown tremendous success in recommender systems and collaborative filtering (CF), the mechanism of how they contribute to recommender systems has not been explored very well. Furthermore, GCN-based recommendation methods suffer from expensive computational complexity and poor scalability compared with traditional methods. By analyzing GCN from a spectral perspective (i.e., the graph spectrum), this thesis unveils the effectiveness of GCN for recommendation from the following three aspects:</p> <ul style="list-style-type: none">• The thesis discovers that only a small fraction of spectral graph features that emphasize the neighborhood smoothness and difference contribute to the recommendation accuracy, whereas most graph information can be considered as noise that even reduces the performance. What is more, stacking multiple graph convolution layers (i.e., repeating the neighborhood aggregation) emphasizes smoothed features and filters out noise information in an ineffective way.• The thesis shows the close connection between GCN-based and low-rank methods such as singular value decomposition (SVD) and matrix factorization (MF), where stacking graph convolution layers is to learn a low-rank representation by emphasizing (suppressing) components with larger (smaller) singular values.• The number of required spectral graph features is closely related to the spectral distribution, where important information tends to be concentrated on more (fewer) spectral features on the dataset with a flatter (sharper) distribution.			

Based on the above findings, this thesis proposes more effective and efficient GCN learning algorithms for recommender systems, which outperform state-of-the-arts and reduce the time and space complexity in existing works.

The thesis also focuses on the spectrum of the user/item representations to study what factors contribute to good representations, especially, issue in the existing pair-wise learning paradigm (i.e., the embedding collapse problem), where the representations tend to span a subspace of the whole embedding space, leading to a suboptimal solution and reducing the model capacity. Specifically, optimization on observed interactions is equivalent to a low pass filter causing users/items to have the same representations and resulting in a complete collapse; while negative sampling works as an unreliable high pass filter to alleviate the collapse by balancing the embedding spectrum but still leads to an incomplete collapse. To tackle this issue, the thesis proposes a novel method called DirectSpec, working as a reliable all pass filter to balance the spectrum distribution of the embeddings during training, ensuring that users/items effectively span the entire embedding space. Additionally, the thesis provides a thorough analysis of DirectSpec from a decorrelation perspective and proposes an enhanced variant, DirectSpec+, which employs self-paced gradients to optimize irrelevant samples more effectively.

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

電子商取引、ソーシャルネットワークサービス、ショートビデオなどの多くのオンラインサービスに、推薦システムが適用されている。初期の行列分解から、最新の深層学習に基づく手法に至るまで、非常に多くの研究が行われており、これらは、優れた推薦精度を示している。しかし、推薦システムにおいて、データセットの重要な情報を含んでおり、ユーザとアイテムが埋め込み空間でどのように表現されるかを反映しているデータ表現のスペクトルには、ほとんど注目されてこなかった。そこで、本論文では、(1) グラフスペクトル、(2) ユーザ/アイテム表現のスペクトルの観点から、推薦システムを解析し、評価している。

Graph convolutional networks (GCNs) は、推薦システムにおいて大きな成功を収めているが、GCNsが推薦システムにおいて、どのように貢献するかという仕組みは、これまでに詳しく調べられてこなかった。また、GCN に基づいた推薦システムは、これまでの方法と比較して、計算量が高いことや、スケーラビリティが低いことが問題とされていた。GCNをスペクトルの観点（すなわち、グラフスペクトル）から解析することによって、本論文は、次の3つの観点から推薦システムのためのGCNの有効性を明らかにしたものである。

- ・本論文では、隣接するものの同質さや相違を強調するグラフスペクトルの特徴の一部のみが推薦精度に貢献する一方、ほとんどのグラフの特徴は、推薦精度を低下させることになるノイズとなり得る、ということを見出した。また、複数のグラフの畳み込み層を重ねていくこと（すなわち、隣接するものの集約を繰り返すこと）は、非効率で、同質な特徴を強調し、ノイズとなる情報を除いてしまうことも見出した。

- ・本論文では、特異値分解や行列分解といったGCNに基づいた手法と低次の手法との間に、密接なつながりがあることを示した。すなわち、グラフの畳み込み層を重ねていくことは、大きな（小さな）特異値を強調（抑制）することによって、低次の表現を学習することになることを示した。

- ・必要となるグラフスペクトルの特徴数は、スペクトルの分布と密接に関係している。その分布においては、重要な情報は、一定の（鋭い）分布を伴って、対象とするデータセットに関する多数（少数）のスペクトルの特徴に集中する傾向にある。

上述した知見に基づいて、本論文では、推薦システムのための、より効果的、かつ効率的なGCNの学習アルゴリズムを提案した。そのアルゴリズムは、複数の最新の手法を上回り、既存の研究における計算量も削減することができた。

また、本論文では、どのような要素が良い表現に貢献するか、特に、既存のペアワイズ学習法における問題（すなわち、“embedding collapse”問題）を研究するために、ユーザ/アイテム表現のスペクトルにも着目した。それらの表現は、埋め

込み空間全体の部分空間に及ぶ傾向があり、部分最適解や、そのモデルの能力を低下させることにつながる。具体的には、観測されるユーザとアイテム間のインタラクションに関する最適化は、ローパスフィルターと等価であり、同じような表現となるユーザ／アイテムの原因となり、“complete collapse”という結果になる。一方、negative sampling は、スペクトルの埋め込みのバランスを保つことによって、その collapse を緩和する信頼性の低いハイパスフィルターとして機能するが、それでも、不完全な collapse につながる。この問題に対処するために、本論文では、学習中に埋め込みのスペクトル分布のバランスを保つ信頼性のあるすべてのもののフィルタとして機能する“DirectSpec”という新たな手法を提案した。この手法は、ユーザ／アイテムが埋め込み空間全体に、効果的に及ぶことを保証する手法である。さらに、本論文では、非相関的な観点から、DirectSpec を詳細に解析し、適合しないサンプルをより効果的に最適化するために、自己ペース型の勾配を採用することで高度化した“DirectSpec⁺”を提案した。

以上、本論文では、スペクトルの観点から、より高い推薦精度を実現するとともに、より効率的な計算量も実現する推薦システムに関する研究に取り組み、多くの最新の研究を上回るなど、大きな成果を収めている。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。