



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A Study on Efficient Algorithms for Nonnegative Matrix/Tensor Factorization [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	木村, 圭吾
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第12623号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65376
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Keigo_Kimura_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(情報科学) 氏名 木村 圭吾

審査担当者 主査教授 工藤 峰一
副査教授 今井 英幸
副査教授 田中 章

学位論文題名

A Study on Efficient Algorithms for Nonnegative Matrix/Tensor Factorization

(非負値行列/テンソル分解の効率のよいアルゴリズムに関する研究)

本論文は行列分解と行列の一般化であるテンソルの分解に関して特定の制約を課す場合を扱って分解の精度と速度の改善を行った研究をまとめたものである。

行列あるいはテンソル分解は近年の機械学習やデータマイニングの分野では欠かせない技術の一つであり、次元圧縮や非線形変換、認識などの多くの応用において最も多く用いられる定式化の一つである。例えば、一つのデータが複数個の特徴値で表現され、そのようなデータが複数あるとすると、これらをまとめることで行列が得られる。近年のデータ爆発の状況では、このような行列もすぐに巨大なものになる。これを二つの低ランク行列の積で精度よく近似できれば、それは少数かつ本質的な基底を使ったより優れた解釈を与える。言い換えると本質を損なわない疎な表現を得ることができる。それ故に、元の表現では見えてこなかった本質的な構造が見える可能性が高い。特に、元の行列だけでなく分解する行列においても要素が非負であることを要請することで、より物理的に解釈しやすい分解を行うことができる。実際、顔画像を行列として見たとき、その画像の画素値は濃淡に従った非負値であり、これを非負行列分解(NMFと略す)すると、目や鼻などのパーツに分かれるというのはよく知られたことであり、非負制約のない主成分分析と比べた際の優位性の根拠の一つとなっている。

テンソルはその持ちうる情報の量と質において行列を凌駕する。例えば、二人の人が知り合いかどうかを集団の中で調べた結果は隣接行列として表現可能であるが、さらにもう一次元、関係の種類(仕事仲間、趣味仲間、親戚など)を加えることで、理由の異なる複数の集団の検出などが可能になる。また、時間の軸を加えることでデータの時間変化を自然に組み込むことができる。行列分解と同様に非負テンソル分解(NTF)することで、より豊かで複層的な解析が可能になる。

これら NMF および NTF の両方に共通する問題点は、これらが NP 困難であることであり、準最適解で満足する他ないことである。さらに、準最適解を繰り返し探索で求める場合、一回の更新にかかる計算量が大きいとともに繰り返し回数も非常に多くなることが知られている。本研究はこれらの問題を解決すべくいくつかの提案を行ったものである。

本論文は、行列分解に関しては、非負制約だけでなく直交制約も加えた直交非負行列分解(ONMF)に関して高速化の方式を提案している。これまでの方法とは異なり、繰り返し手続きにおいて、行列に直接直交制約を課すのではなく、行あるいは列毎に直交制約を課す方式を考案し、高速化を実現している。さらに枠組みの拡張も行った。行列分解の近似精度は通常フロベニウスノルム(二乗ノルム)で測るが、このノルムを特殊な場合として含むブレグマンダーバージェンスにおいて

ONMF を拡張し、先の方式で高速化する方式も提案している。これは世界初の試みである。テンソル分解においては特殊な形の分解においてやはり高速化に成功している。NTF の解法は基本、テンソルを複数の行列に分解した後、NMF の問題として分解を実行する。しかし、処理の途中で巨大な行列の掛け算を実行する必要性が生まれ(「IDE 問題」と呼ばれる)、このことが実用性を阻む大きな要因となっていた。これに対して本研究では、例え元のテンソルがある程度密(多くの要素が非零)であっても分解後の個々の行列は疎(多くの要素が零)である事実に注目し、零になることがあらかじめわかる場合に行列要素の掛け算を省くことにより大幅な高速化に成功している。これには、IDE 問題を引き起こしている巨大行列の掛け算を実行することなく、その掛け算の結果の上界が既に零以下になることを少ない計算量で判定する方式を利用している。

本論文の成果をまとめると以下のようになる:

1. 直交非負行列分解問題において、直交制約をうまく列制約として表現することで、行列更新よりも高速であることが知られている列更新の方式を直交制約がある場合にも採用することを可能にし、実験的にその効果を確かめた。平均で 5 倍程度の高速化を実現した。
2. 同分解の近似精度評価において、従来のフロベニウスノルムをより一般のブレグマンダーバージェンスに置き換えることで、直交非負行列分解問題の利用範囲を大きく拡大した。
3. 非負テンソル分解問題において、分解の大きな障害となっていた IDE 問題を、上界を使った巧妙な方式を考案することで解いた。これにより解ける問題の拡大に貢献した。

これを要するに著者は、各種のアルゴリズムを改良することで非負行列分解および非負テンソル分解の利用拡大に大きな前進をもたらした。この成果はデータ解析の分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。