

令和 7 年 6 月 14 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K12279

研究課題名（和文）ハイパーグラフにおける機能と貢献度に基づく重要ノード抽出とグループ推薦

研究課題名（英文）Important Nodes Extraction and Groups Recommendation Based on Function and Contribution in Hypergraph

研究代表者

伏見 卓恭 (Fushimi, Takayasu)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・講師

研究者番号：80755702

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数の要素が同時に関与する関係を表現できるハイパーグラフに着目し、ノードの機能や貢献度に基づいて重要なノードを抽出する新たな手法を開発した。特に、二重中心化に基づく超球面への埋め込み手法を提案し、ハイパーノードとノードの関係構造を可視化可能とした。さらにこの手法を、グループ推薦や分類、クラスタリングといった応用タスクにも展開した。加えて、この研究から派生して、ノード列の意味的な類似性を捉える対照学習に基づく埋め込み手法 Path2Vec を開発し、国際会議にて発表を行った。ハイパーグラフ構造の理解とその応用の両面において一定の成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来のグラフでは表現しきれない複数要素間の高次関係を扱うハイパーグラフに着目し、その構造的特徴を活かしたノードの重要度推定やグループ推薦手法を開発した。学術的には、二重中心化に基づく新たな埋め込み手法の提案により、複雑な関係性を幾何学的に理解・可視化する枠組みを提供し、ネットワーク科学や機械学習分野に新たな視点をもたらした。社会的には、経路探索や地理情報処理など実社会の複雑な問題に対し、より柔軟かつ高精度なモデリングが可能となる基盤技術を提供し、災害時の避難支援や観光ルート推薦など多様な応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on hypergraphs, which can represent relationships involving multiple elements simultaneously, and developed a new method for extracting important nodes based on the functions and contributions of the nodes. In particular, we proposed an embedding method for hyperspheres based on double-centering, which enables visualization of the relationship structure between hypernodes. We have also extended this method to applied tasks such as group recommendation, classification, and clustering. In addition, we developed an embedding method based on contrastive learning, Path2Vec, which captures the semantic similarity of node sequences, and presented it at an international conference. We have achieved a certain level of success in both understanding hypergraph structures and their applications.

研究分野：データ工学

キーワード：ハイパーグラフ 埋め込み

1. 研究開始当初の背景

近年、ネットワーク構造の解析は多様な分野において不可欠な手法となっており、従来のノード間のペア関係（2項関係）を表現するグラフに基づく分析が広く用いられてきた。しかし、教育、医療、論文共著、購買行動、移動経路など多くの実世界のデータでは、複数の対象が同時に関与する高次関係（多項関係）が本質的に存在する。こうした高次関係を適切にモデル化するために、ハイパーグラフ（ノード集合を結ぶハイパーEdgeを持つ構造）が注目されている。図1は、8ユーザからなるハイパーグラフであり、大文字のアルファベットがノード、小文字がハイパーEdgeを表している。

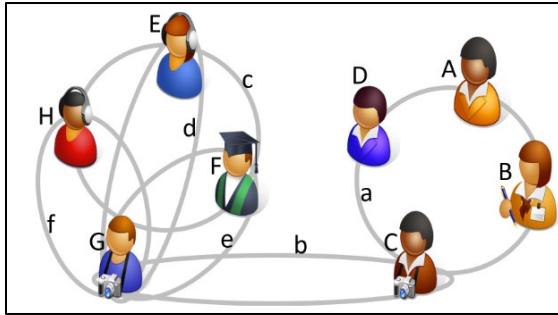


図1 ハイパーグラフの例

しかしながら、ハイパーグラフにおけるノードの重要性や構造の可視化、推薦への応用に関しては、理論的枠組みも実用的手法も未成熟であり、特にノード間の複雑な関係性をどのように低次元空間へ写像して可視化・解釈可能とするかが大きな課題であった。また、ハイパーEdgeにおける役割分担や機能の多様性を考慮した貢献度に基づくノード分析も十分に行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、ハイパーグラフ構造における各ノードの機能や貢献度を定量化し、それに基づく重要ノードの抽出およびグループ推薦を可能とする新たな分析手法を確立することを目的とした。特に以下の3点を主眼とした：

- (1) ノードとハイパーノード間の関係を定量化する指標の設計
- (2) 高次構造を保ったままノードやグループを低次元空間に埋め込む手法の開発
- (3) 提案手法を可視化・推薦・分類といった応用タスクに展開し、ハイパーグラフ活用の可能性を広げること

これにより、従来のグラフ理論では扱いきれなかった複雑な関係性の解釈と応用を同時に実現することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、まずハイパーグラフにおけるノードとハイパーEdgeの関係性を数理的に記述するために、ハイパーグラフの接続行列を拡張し、二重中心化した接続行列を計算する。この二重中心化により得られる類似度行列を高次元空間における距離として解釈し、類似するノードを近くに、類似しないノードを遠くに配置するように埋め込みベクトルを計算して、ハイパーグラフ構造を超球面上に埋め込む手法を開発した。これにより、ノードとハイパーノードが同時に幾何的に解釈可能となり、構造の可視化と解析が容易となった。図2の左側に示すように、元の接続行列は疎行列（ほとんどの要素が0）であり空間計算量、時間計算量の両方の観点から効

	a	b	c	d	e	f		a	b	c	d	e	f
A	1	0	0	0	0	0		0.65	-0.10	-0.23	-0.10	-0.10	-0.10
B	1	0	0	0	0	0		0.65	-0.10	-0.23	-0.10	-0.10	-0.10
C	1	1	0	0	0	0		0.48	0.73	-0.40	-0.27	-0.27	-0.27
D	1	0	0	0	0	0		0.65	-0.10	-0.23	-0.10	-0.10	-0.10
E	0	0	1	1	0	0		-0.52	-0.27	0.60	0.73	-0.27	-0.27
F	0	0	1	0	1	0		-0.52	-0.27	0.60	-0.27	0.73	-0.27
G	0	1	0	1	1	1		-0.85	0.40	-0.73	0.40	0.40	0.40
H	0	0	1	0	0	1		-0.52	-0.27	0.60	-0.27	-0.27	0.73

接続行列

二重中心化した接続行列

図2 接続行列と二重中心化した接続行列

率的に計算ができるが、図 2 の右側に示すように、二重中心化した接続行列は密行列であるため、計算効率が劣る。そこで、接続行列を保持したままで二重中心化接続行列と同様の計算ができるように工夫したアルゴリズムを開発した。また、この二重中心化した接続行列は、コミュニティ抽出で重要な役割を果たすモジュラリティ行列と密接に関連していることを証明した。

4. 研究成果

(1) ハイパーグラフの超球面上への埋め込み手法

図 3 は、提案手法による埋め込み結果と、平均座標間距離とグラフ距離分布の観点から適切な埋め込みを実現できていることを示している。

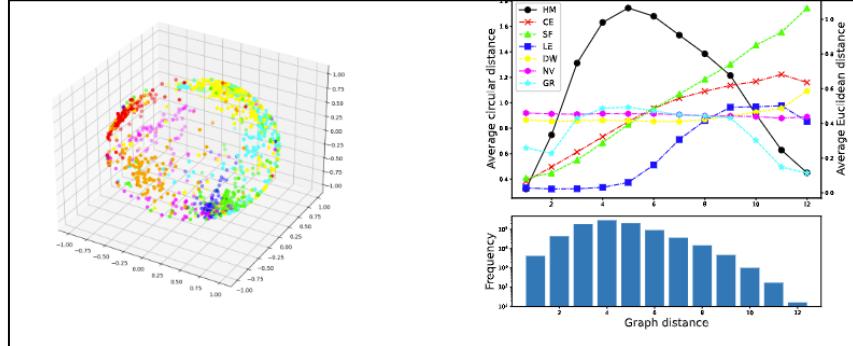


図 3 提案手法による可視化結果／平均座標間距離とグラフ距離の分布

表 1 定量評価結果

手法	空間充填率	分類精度	実行時間
HM	0.90	0.66	1.22
CE-Cliq	0.72	<u>0.50</u>	131.75
CE-Star	<u>0.77</u>	0.43	2273.03
SF-Cliq	0.75	0.45	8.63
SF-Star	0.75	0.45	30.20
LE-Cliq	0.17	0.33	0.38
LE-Star	0.17	0.32	1.64
DW-Cliq	0.61	0.26	17.03
DW-Star	0.65	0.26	37.28
NV-Cliq	0.69	0.26	15.37
NV-Star	0.64	0.26	33.33
GR-Cliq	0.45	0.46	4.87
GR-Star	0.32	0.41	5.32

表 1 は、空間充填率、分類精度、実行時間の観点から、他手法より提案手法が優れていることを示している。

(2) 対照学習によるノード列の埋め込み手法

さらに、応用展開として、経路探索や地理情報推薦への応用を視野に、ノード列の意味的類似性を捉えるための対照学習に基づく表現学習 (Path2Vec) や、ウイルス感染機構を取り入れた遺伝的アルゴリズムに基づく経路分散探索手法なども開発した。既存のグラフ埋め込み技術は主にノードやエッジの特徴を学習することに重点を置いているが、Path2Vec はノードの出現順序と特性を考慮し、ノード列全体を埋め込むことを目的とする。出発点・中間点・終点を固定し、ランダムウォークによるデータ拡張を行い、ノード列の埋め込みを学習する。特に、自己教師あり学習の一種である Contrastive Learning を利用し、類似するノード列の埋め込みが近くなるように学習を行う。評価実験では、実際の道路ネットワークデータを用いて手法の有効性を検証し、提案手法がノード列の特徴を適切に捉えられることを示した。表 2 は、他の手法と比べて、Path2Vec がポジティブペア (類似するノード列) を近くに、ネガティブペア (類似しないノード列) や反対向きのノード列を遠くに埋め込むことができたことを示している。

表 2 各種手法によるノード列ペア間の類似度

Methods	pos	sim	neg	opp
Path2Vec z	0.917	>0.382	>0.000	>-0.921
SimCLR z'	0.967	>0.001	=0.001	=0.000
Encoder y	0.839	>0.355	>0.000	>-0.831
Baseline g	0.784	>0.670	>0.434	<0.822

(3) 多項関係のボックス埋め込み手法

文書と単語の関係はハイパーグラフで表現できる最も代表的な例である。文書に含まれる単語にはそれぞれ役割があり、その意味は使われる文書、文脈で大きく異なる。その点に着目し、オンラインニュースサイトにおけるニュース記事文書を対象に、埋め込み実験を行った。既存の埋め込み手法、あるいは、分散表現は、単語や文章、文書をベクトル、すなわち、ベクトル空間上の1つの点として表現し、その内積により類似度を測ることができるが、1つの点として表現するため、意味の広がりや包含関係などを表現できない。そこで、単語をベクトルではなくボックスとして埋め込むWord2Boxに着想を得て、コメント文章をボックス埋め込みすることで、コメント文を分析する手法を提案した。

図4は、Yahooニュースに投稿された実際のニュース記事やコメント文の一部を提案するボックス埋め込みした結果である。意味の広さや包含関係を反映した埋め込みを実現できている。

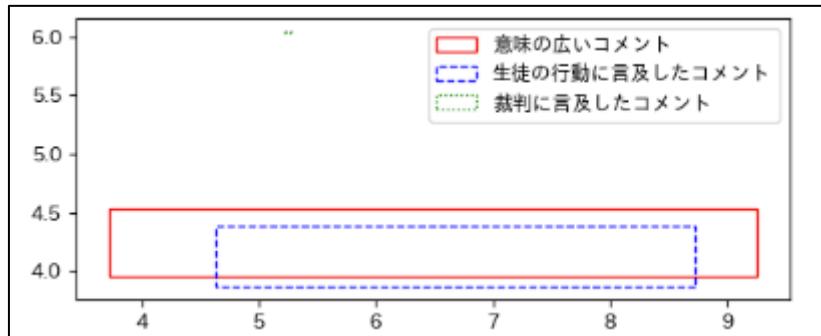


図4 3つのコメント文に対するボックス埋め込み結果

本研究により、以下の主要な成果が得られた：

- ・電子情報通信学会総合大会（2025年）企画セッションにて招待講演：「二重中心化に基づくハイパーグラフの超球面上への埋め込み」を発表し、本研究の中心的アイデアと可視化手法を紹介した
- ・国際ジャーナル Applied Network Science に「Dynamic Hypergraph Embedding onto Concentric Hypersphere Manifold Intended for Effective Visualization」が掲載された
- ・国際会議 WI-IAT2023 にて共同研究者（指導学生）が「Visualization and Extraction of Important Structural Changes via Dynamic Hypergraph Embedding」を発表し、Student Travel Award を受賞した
- ・国際会議 ASONAM 2024 にて発表した「Path2Vec: Representation Learning for Node Sequences Based on Contrastive Learning」では、ハイパーグラフ応用の一環として、ノード列に特化した対照学習手法を提案した
- ・国際会議 Complex Networks 2024 にて2件発表：経路探索手法（GA+感染機構）および近接グラフ分割に基づくジオローカライゼーション精度向上手法をそれぞれ報告した
提案手法は、ネットワークの可視化や推薦システム、経路案内、観光地分析などの応用タスクにおいて有効性を示し、実世界の高次関係データを扱うための基盤技術としての有望性を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] 計1件 (うち査読付論文 1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 Ito Shuta , Fushimi Takayasu	4. 巻 8
2. 論文標題 Dynamic hypergraph embedding onto concentric hypersphere manifold intended for effective visualization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Network Science	6. 最初と最後の頁 1--29
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41109-023-00568-1	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 -

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Takayasu Fushimi , Takumi Miyazaki
2. 発表標題 Classification of Following Intentions Using Multilayer Motif Analysis of Communication Density and Symmetry among Users
3. 学会等名 12th International Conference on Complex Networks and their Application(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayasu Fushimi , Hayato Otaki
2. 発表標題 A Method for Presenting Multiple Routes Considering Distance and Landscape Probability for Automotive Navigation Systems
3. 学会等名 22nd IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayasu Fushimi , Kazuki Sakamoto
2. 発表標題 Audience Prediction for Game Streaming Channels Based on Vectorization of User Comments
3. 学会等名 26th International Conference on Discovery Science(国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 川崎 優輝 , 伏見 卓恭
2 . 発表標題 Contrastive Learningに基づくノード列の埋め込み
3 . 学会等名 第19回Webインテリジェンスとインタラクション研究会
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 宮崎 拓海 , 伏見 卓恭 , 鳥海 不二夫
2 . 発表標題 複数コミュニケーション密度の対称性に基づくレイヤーモチーフを用いたTwitterデータの分析
3 . 学会等名 第19回Webインテリジェンスとインタラクション研究会
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 宮崎 拓海 , 伏見 卓恭
2 . 発表標題 ユーザー間のコミュニケーション密度に基づくフォロー意図の分類
3 . 学会等名 第129回知識ベースシステム研究会
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Takayasu Fushimi , Emi Matsuo
2 . 発表標題 Extracting Characteristic Areas Based on Topic Distribution over Proximity Tree
3 . 学会等名 The 13th International Conference on Complex Networks (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Kennosuke Yoshida , Takayasu Fushimi
2 . 発表標題 Comparative Analysis of Information Spreading Focused on Topics and Emotions via Temporal Point Process
3 . 学会等名 The 7th International Workshop on Application of Big Data for Computational Social Science (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Shuta Ito , Takayasu Fushimi
2 . 発表標題 Visualization and Extraction of Important Structural Changes via Dynamic Hypergraph Embedding
3 . 学会等名 The 7th International Workshop on Application of Big Data for Computational Social Science (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 坂本一樹 , 伏見卓恭
2 . 発表標題 動的二部グラフのノード間類似度に基づくチャンネル成長予測の検討
3 . 学会等名 第126回知識ベースシステム研究会
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 吉田憲之助 , 伏見卓恭
2 . 発表標題 点過程モデルを用いたSNS上の投稿のトピックと感情の傾向分析
3 . 学会等名 第126回知識ベースシステム研究会
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 大瀧隼 , 伏見卓恭
2 . 発表標題 位置情報付き写真に基づく景観と距離を考慮したドライブルート探索手法
3 . 学会等名 第126回知識ベースシステム研究会
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 伊藤柊太 , 伏見卓恭
2 . 発表標題 リンク予測タスクに基づくハイパーグラフ埋め込み手法の比較
3 . 学会等名 第126回知識ベースシステム研究会
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 伏見卓恭
2 . 発表標題 二重心化に基づくハイパーグラフの超球面上への埋め込み
3 . 学会等名 電子情報通信学会総合大会・企画セッション（招待講演）
4 . 発表年 2025年

1 . 発表者名 Haruto Aoyagi , Takayasu Fushimi
2 . 発表標題 Multiple Route Search Method on Road Network Using Genetic Algorithm with Virus Infection
3 . 学会等名 The 13th International Conference on Complex Networks and their Application (国際学会)
4 . 発表年 2024年

1. 発表者名 Rinto Koike, Takumu Toyama, Takayasu Fushimi
2. 発表標題 Improving Accuracy of Geolocation Based on Region Segmentation Using Proximity Graph Partitioning
3. 学会等名 The 13th International Conference on Complex Networks and their Application (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takayasu Fushimi, Yuki Kawasaki
2. 発表標題 Path2Vec: Representation Learning for Node Sequences Based on Contrastive Learning
3. 学会等名 The 16th International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋 優真, 伏見 阜恭
2. 発表標題 Box埋め込みに基づくオンラインニュースサイトのコメント分析
3. 学会等名 第132回知識ベースシステム研究会
4. 発表年 2024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
---------	---------