

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17763

研究課題名（和文）教師なしで学ぶ汎用型3次元形状特徴量の開発と、少数派3次元形状の解析への応用

研究課題名（英文）Unsupervised learning of general-purpose 3D shape feature and its application to analysis of minority 3D shapes

研究代表者

古屋 貴彦（FURUYA, Takahiko）

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：00770835

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多様な種類の3D形状データに対して使える汎用型形状特徴量を教師なし深層学習で獲得する技術の確立に取り組んだ。具体的には、(1)多様な表現の3D形状データに適用可能な教師なし特徴学習アルゴリズム、(2)3D点群の形状補完のための新しいDNN構造とその損失関数、(3)回転不変な3D形状特徴量を獲得するための新しいDNN構造とその教師なし学習手法、を提案した。定量的評価実験を通して、いずれの提案手法も従来手法と比べて高い解析精度を示すことを確かめた。以上の研究成果により、これまで手作り形状特徴量に依存していた学習サンプル数の少ない（少数派の）3D形状の解析精度の改善が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、3D形状データの種類を問わず使える汎用型形状特徴量を教師なし深層学習で獲得する手法を提案したことである。これにより、ラベル付きデータが少ない3D形状の解析においても、ある程度高精度な特徴量を利用できる。

社会的意義として、製造業、建築、医療、娯楽作品制作といった3D形状データを活用する様々な分野において、3D形状解析の自動化・高精度化が期待できる。特に、ラベル付きデータの収集が困難な分野では本研究で提案した教師なし学習手法が有効に活用できると考えられる。さらには、各分野における3D形状データの活用が促進され、生産性の向上や新たな価値創造につながることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on establishing techniques for unsupervised learning of general-purpose 3D shape features that can be applied to various types of 3D shape data. Specifically, we proposed (1) an unsupervised feature learning algorithm applicable to 3D shape data with diverse shape representations, (2) a novel DNN structure and its loss function for 3D point cloud shape completion, and (3) a new DNN structure and its unsupervised learning method for acquiring rotation-invariant 3D shape features. Through quantitative evaluations, we confirmed that each of the proposed methods demonstrates higher analysis accuracy compared to conventional methods. These research results are expected to improve the analysis accuracy of 3D shapes with a limited number of samples (minority 3D shapes), which have previously relied on handcrafted 3D shape features.

研究分野：3次元形状解析

キーワード：3次元形状 3次元点群 教師なし学習 自己教師あり学習 深層学習

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3D 点群, ボクセル, ポリゴンといった様々な形状表現で表される 3D 形状データは, 製造・建築・医療・製薬・娯楽作品制作等の多様な分野で活用されている。例えば, 3D 点群表現は工場プラントの保守点検や地表の解析に, ボクセル表現は医療診断に, ポリゴン表現は機械部品や CG キャラクタの設計などに用いられる。これら多様な分野において, 機械学習の技術を用いた 3D 形状データ処理・解析の自動化に対する要望が高まっている。分野によっては, ラベルが付与された形状データを多数収集可能である。その場合には, 教師あり深層学習を用いることで高精度な形状特徴量を獲得し, 解析に役立てることができる。一方で, 多数のラベル付き形状データの収集が困難な分野においては, 機械学習の導入そのものが難しいため, 人間によって設計された手作り特徴量が用いられることが多い。手作り特徴量は必ずしも解析タスクに最適化されているとは限らないため, 高精度な解析が困難である。3D 形状解析の研究分野では, 教師なし深層学習を用いて, ラベルを持たない 3D 形状データから形状特徴量を獲得する試みが存在する。しかし, 形状データのサンプル数が限られる条件下では, 高精度な形状特徴量の教師なし学習は難しい。

2. 研究の目的

本研究は, 同種形状のサンプル数が少ない「少数派」の 3 次元形状データに着目し, これら少数派 3D 形状データに適用できる形状解析技術の確立をねらう。3D 形状解析(例:分類, 比較, 検索, 領域分割)では, 3D 形状特徴量が非常に重要な役割も持つ。従来研究は教師なし深層学習を用いて 3D 形状特徴量を獲得する手法を考案した。教師なし深層学習の利用により, ラベルを持たない多量の 3D 形状データから高精度な形状特徴量を獲得できる。しかし, 従来研究が獲得する 3D 形状特徴量は, 学習に用いた形状に過剰に適合するために適用できる形状種が限られる問題があった。本問題を解決するため, 本研究は形状種を問わず使える「汎用型」の形状特徴量を教師なし学習する技術を開発し評価する。汎用型の形状特徴量が開発できれば, これまで手作り特徴量に頼っていた少数派 3D 形状の解析が, 大きく精度改善すると期待できる。

3. 研究の方法

本研究は, 3D 形状データの種別を問わず使える汎用型形状特徴量を教師なし深層学習で獲得する技術を確認し, その汎用型形状特徴量が同種形状のサンプル数が少ない少数派 3D 形状データの解析に役立つことを確かめる。これを達成するため, 以下の 3 つの研究を実施した。いずれの研究でも, 本科研費で購入した計算機を用いてプログラム開発および評価実験を実施した。

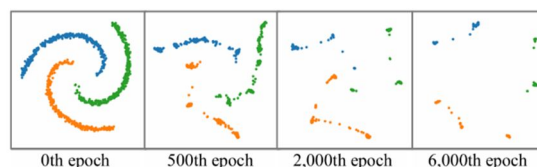
【研究 1】汎用的な形状特徴量の学習手法は, 3D 点群, ボクセル, ポリゴンといった多様な表現の 3D 形状データに対して適用可能であるべきである。この考えに基づき, 入力データの種別, および入力データを処理する深層ニューラルネットワーク (DNN) の構造に依存しない教師なし深層学習アルゴリズムの開発に取り組んだ。開発した手法の評価では, パブリックなベンチマークデータセット(例: ShapeNetCore55)を利用し, 形状類似検索のシナリオで精度を定量的に評価した。これらデータセットはカテゴリサイズがばらついており, サンプル数が少ないカテゴリを複数含むため, 少数派の 3D 形状を含むと見なすことが可能である。

【研究 2】汎用的な形状特徴量は, 現実世界の物体をスキャンした際に生じる部分形状の欠損に対しても頑強であるべきである。この考えに基づき, 部分形状が欠損した 3D 点群からその完全な形状を再構成(補完)する DNN の開発に取り組んだ。開発した手法の評価では, 3D 点群の形状補完のシナリオを用い, DNN が獲得した形状特徴量の精度を定量的・定性的に評価した。

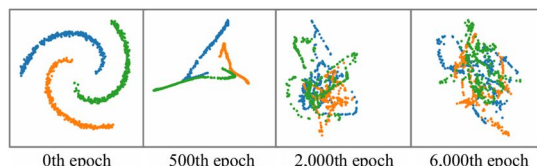
【研究 3】汎用的な形状特徴量は, 物体の 3 軸回転に対しても頑強であるべきである。物体の回転に影響されない形状特徴量は幅広い用途に利用可能である。この考えに基づき, 回転不変性を持つ 3D 点群特徴量を教師なし学習するアルゴリズムの開発に取り組んだ。(1)の研究内容と同様, 評価にはパブリックなベンチマークデータセット(例: ShapeNetCore55)を利用し, 形状類似検索のシナリオで精度を定量的に評価した。

4. 研究成果

【研究 1 の成果 [1]】 DeepDiffusion (DD) という特徴表現の教師なし深層学習アルゴリズムを提案した。DD は、DNN が抽出した潜在特徴量の空間上における拡散距離に基づいて、類似検索に適した特徴表現を獲得する。DD による学習では、エンコーダ DNN と潜在特徴量の分布 (特徴多様体) を同時に最適化する。これにより、互いに類似したデータサンプルが近くに、異なるデータサンプルが遠くに配置されるような潜在特徴空間が形成される。図 1 に示す通り、DD は多様体の構造を考慮した潜在特徴空間の変換が可能である。DD はロス関数のみに依存するため、3次元形状や2次元画像など、様々なマルチメディアデータに適用可能である。3D点群形状を用いた実験では、DDにより学習された特徴表現が、既存の教師なし学習手法よりも高い検索精度を達成することを示した。DDは点群以外の形状表現(ボクセルやポリゴン)に対しても適用できるため、汎用的な形状特徴量の獲得に適した手法である。



(a) 提案手法による潜在特徴の学習。



(b) 従来手法による潜在特徴の学習。

図 1. 教師なし特徴学習手法の比較。

【研究 2 の成果 [2]】 3D点群の形状補完のための新しいデコーダ DNN 構造である Hyperplane Mixing and Folding Net (HMF-Net) と、新しい損失関数 Weighted Chamfer Distance (WCD) を提案した。HMF-Net は、入力表現として超平面パッチを用い、トークンミキシングを行う DNN ブロックを用いてパッチ間の大域的な関係性を学習する。これにより、詳細な局所的な 3D 形状を再構成できる。WCD は、再構成された 3次元点と正解の 3次元点の間の対応点ペアの距離に重み付けを行うことで、DNN が局所的な形状の詳細により注目して学習できるようにした。形状補完、形状アップサンプリング、複数視点画像からの形状再構成の 3つのタスクで評価実験を行った結果、HMF-Net と WCD の両方が形状再構成の精度向上に効果があることを示した。図 2 に示す通り、提案手法は、既存手法 PSG-Net よりも正解に近い形状を再構成できる。

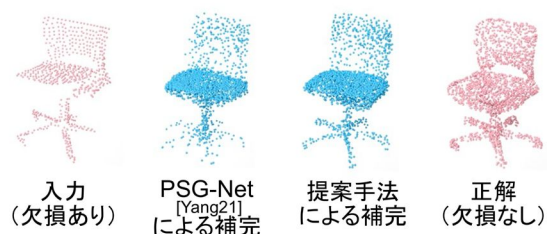


図 2. 3D点群の形状補完の例。

【研究 3 の成果 [3]】 ラベルを持たない 3D点群データセットから回転不変な形状特徴量を獲得するための新しい DNN 構造およびその教師なし学習手法を提案した。提案した DNN は、入力 3D点群を複数の大域的なトークンに分解し、自己注意機構を用いてトークン間の関係性を考慮しつつ特徴精製することで、表現力の高い回転不変な特徴を抽出する。また、教師・生徒 DNN を用いた教師なし自己蒸留学習と、Multi-crop, cut-mix データ拡張を組み合わせることで、効果的な学習を実現した。提案手法を複数のベンチマークデータセットで評価した結果、既存の教師なし学習手法と比べて高い形状類似検索精度と回転不変性を持つことを示した。表 1 に示す通り、提案手法 RIPT+SDMM は物体がランダム回転した条件下 (Nr/Nr と Rr/Rr) において、既存手法を大きく上回る検索精度を示すことがわかる。

表 1. 異なる教師なし学習法で獲得した点群形状特徴量の検索精度。

SSL algorithms	MN10 dataset		
	Nr/Nr	Nr/Rr	Rr/Rr
FoldingNet [45]	67.4	18.1	20.0
Canonical Capsules [46]	61.2	21.0	21.7
Point-BERT [47]	45.6	21.3	21.2
MaskPoint [48]	40.5	17.9	18.6
DCGLR [50]	76.7	19.6	27.6
PPF-FoldNet [12]	36.8	37.0	37.3
RIPT + SDMM (ours)	70.3	70.5	70.4

[1] T. Furuya, et al., DeepDiffusion: Unsupervised Learning of Retrieval-adapted Representations via Diffusion-based Ranking on Latent Feature Manifold, IEEE Access journal, 2022.

[2] T. Furuya, et al., Hyperplane patch mixing-and-folding decoder and weighted chamfer distance loss for 3D point set reconstruction, Visual Computer journal, 2022.

[3] T. Furuya, et al., Self-supervised Learning of Rotation-invariant 3D Point Set Features using Transformer and its Self-distillation, CVIU journal, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Furuya Takahiko, Chen Zhoujie, Ohbuchi Ryutarou, Kuang Zhenzhong	4. 巻 244
2. 論文標題 Self-supervised learning of rotation-invariant 3D point set features using transformer and its self-distillation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Computer Vision and Image Understanding	6. 最初と最後の頁 104025 ~ 104025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cviu.2024.104025	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 刈込喜大, 古屋貴彦, 大淵竜太郎	4. 巻 52
2. 論文標題 自己注意機構を用いた,3次元点群形状の回転不変な解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 516 ~ 526
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi	4. 巻 10
2. 論文標題 DeepDiffusion: Unsupervised Learning of Retrieval-Adapted Representations via Diffusion-Based Ranking on Latent Feature Manifold	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 116287 ~ 116301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3218909	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 Takahiko Furuya, Wujie Liu, Ryutarou Ohbuchi, Zhenzhong Kuang	4. 巻 39
2. 論文標題 Hyperplane patch mixing-and-folding decoder and weighted chamfer distance loss for 3D point set reconstruction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Visual Computer	6. 最初と最後の頁 5167 ~ 5184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00371-022-02652-6	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 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 古屋貴彦
2. 発表標題 深層学習を用いた点群処理（中/上級）
3. 学会等名 精密工学会，大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術専門委員会，技術講習会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古屋 貴彦
2. 発表標題 深層学習を用いた点群処理（中/上級）
3. 学会等名 大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術専門委員会，点群処理基礎技術講習会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 刈込 喜大
2. 発表標題 自己注意機構を用いた3次元点群形状の解析
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム（MIRU）2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古屋 貴彦
2. 発表標題 深層学習を用いた点群処理（中級）・3次元点群深層学習の解説と実践
3. 学会等名 大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術専門委員会 技術講習会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 刈込 喜大
2. 発表標題 自己注意機構を用いた, 3次元点群形状の回転不変な解析
3. 学会等名 画像電子学会VCワークショップ 2022 in 諏訪湖
4. 発表年 2022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