

令和元年6月6日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16055

研究課題名（和文）部分を表すキーワードによる3次元モデルの検索

研究課題名（英文）Part-based 3D model retrieval queried by keywords representing parts

研究代表者

古屋 貴彦（FURUYA, Takahiko）

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号：00770835

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究が取り組んだ課題は、部分検索、即ち「ユーザが欲する部分形状を一部に持つ3Dモデル群をデータベース中から探し出す」技術である。実用的な部分検索をねらい、「部分を表すキーワード」を指定して3Dモデルを検索するシステムを開発した。特に注力したのが、3Dモデルの部分に対してタグを付与する技術の開発である。深層学習を利用し、3D形状の特徴量と単語の特徴量を互いに関連付ける手法を開発した。3D形状と単語の関連付けにより、部分に対するタグ付与が実現した。開発した技術を実験的に評価した結果、7割程度の精度でタグ付与およびタグによる検索ができることが分かった。本精度は利用シナリオによっては実用に耐えうる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3D形状類似検索の問題に対し、部分を表すキーワードという新たな問い合わせ手段を提供した点に意義がある。例えば、工業製品の設計において、本技術が機械CADデータの再利用効率を大きく改善すると期待できる。また、3Dプリンタで印刷可能な3Dモデルには「一部に羽の形を持つ指輪」等、部分的な装飾に趣向を凝らしたものが多く、本技術を利用すれば、これらの3Dモデルを効率的に探し出すことができる。さらには、医療診断において、脳血管や内臓の3D画像を蓄積したデータベースから、「動脈瘤」や「腫瘍」等のキーワードで検索できれば、経験の浅い医師の診断補助や学習支援に役立つと期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research addressed the problem of part-based 3D shape retrieval, which searches, from a database, 3D models that include parts a user desires. To achieve practical part-based 3D shape retrieval, I developed a 3D shape retrieval system queried by “keywords representing parts”. In particular, I focused on developing an auto-tagging algorithm for partial 3D shapes. Proposed algorithm associates geometric features of partial 3D shapes and semantic features of keywords by using deep learning technology. Tagging to partial 3D shapes is processed based on distances among the associated features. Empirical evaluation demonstrated that the proposed algorithm yields nearly 70% accuracy for tagging to partial 3D shapes and retrieval queried by keywords. This accuracy would be sufficient for some application scenarios.

研究分野：マルチメディア情報検索

キーワード：3次元形状類似検索 部分検索 キーワード検索 3次元形状解析 深層学習

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

工業、医療、娯楽等の分野において、3次元形状モデル(3Dモデル)の利用が急速に広がった。最近では、低価格な3Dスキャナや3Dプリンタの普及により、3Dモデルの生成と利用が手軽になり、データベースには日々大量の3Dモデルが蓄積されている。3Dモデルの数が爆発的に増加すると、これらを効率良く管理・再利用するために、3Dモデル検索の技術が必要になる。3Dモデル検索に関する従来の研究の多くは、3Dモデルの全体形状を互いに比較する技術に注力してきた。その結果、全体形状の類似性に基づく検索の精度および速度は、利用シナリオを限定すれば実用に耐えるレベルになってきた。

上記のような状況の中、3Dモデル検索に対する新たな要求として、部分検索、即ち、「ユーザが欲する部分形状の一部を持つ3Dモデル群をデータベース中から探し出す」技術に注目が集まってきた。部分検索は、例えば、医療診断や工業製品の設計・再利用等の用途に必要な技術である。しかし研究開始当初、検索の速度・精度・簡便さの要求を高水準で満たす実用的な部分検索の手法は存在しなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、実用的な3Dモデルの部分検索の実現である。実用的な部分検索は、以下の3つの条件を全て満たす必要がある。

- 条件1. 高速な検索: 大規模データベースの中から効率良く(例えば3秒以内で)検索したい。
- 条件2. 高精度な検索: ユーザが欲する3Dモデル群を多く(例えば6割以上の適合率で)検索するのが望ましい。
- 条件3. 簡便な問い合わせ: ユーザの手間が少ない問い合わせが望ましい。

本研究では、検索要求として部分を表すキーワードを用いた部分検索の手法を開発することで、上記3つの条件を全て満たす実用的な部分検索の実現を目指す。キーワードは、情報検索システムで広く用いられる簡便な問い合わせ手段である。また一般的に、キーワードのインデクスを利用した検索は高速である。ただし、キーワードによる部分検索を高精度に行う上での課題として、3Dモデルの部分に対して、「手」や「タイヤ」といった部分を表す意味ラベルを精度良く付与(部分ラベル付与)する必要がある。

3. 研究の方法

実用的な3Dモデルの部分検索の実現に向け、以下の項目について研究を進めた。

1. 大規模ベンチマークの作成: 研究開始当初は、部分を表すキーワードによる3Dモデル検索の大規模ベンチマークが存在しなかったため、新たに作成する計画であった。しかしながら研究開始以降、部分に意味ラベルが付与された3Dモデルを多数含むデータセットが他の研究グループ(Changら)により作成・公開された。そのため、このデータセットを本研究の評価実験に用いることとした。

2. 部分ラベル付与アルゴリズムの開発: 本研究ではDeep Neural Network等、最新の機械学習の技術を元に、高精度なラベル付与器の学習を試みた。ラベル付与器は、学習用部分3D形状とこれに付与されたラベルとの関係を学習する。学習の結果得たラベル付与器を用いて未知の3Dモデルの部分に対してラベルを付与する。高精度なラベル付与を実現するためには、ラベル付与器の入力として用いるラベル(単語)特徴量と3D形状特徴量が高い表現力を持つ必要がある。そのため、まず文書解析および3D形状解析の分野のサーベイを行い、本研究課題に適した特徴量の選定および予備実験を行った。その結果、単語特徴量としてMikolovらのWord2Vec、形状特徴量としてQiらのPointNetを本研究に利用することとした。次に、これら異種の特徴量を比較可能にするため、共通特徴空間への埋込を行うDeep Neural Networkを設計した。

3. 部分を表すキーワードによる3Dモデル検索の評価実験: 上記1のベンチマークを用いて上記2のアルゴリズムのラベル付与精度を評価した。さらに、ラベル付与後の3Dモデルを用いて検索精度を評価した。評価実験とアルゴリズムの改良は反復的に行い精度改善を試みた。評価実験には、本科学研究費で購入した多コアCPU・GPU搭載の計算サーバを活用した。良好な実験結果がある程度得られた時点で論文執筆を行った。

4. 研究成果

(1) 3D 部分形状へのラベル付与アルゴリズム「Word-Shape embedding Network」の開発と評価

部分 3D 形状に対してラベル付与を行う Word-Shape embedding Network (WSN)を開発した (図 1). WSN は, 単語, 部分 3D 形状, 全体 3D 形状から抽出された特徴量を, それらで共通の特徴空間へ埋め込む Deep Neural Network である. 共通特徴空間における距離に基づいて, 3D 形状の全体および部分に対して単語ラベルを付与する. WSN の入力として用いる単語の意味特徴量には, Mikolov らの Word2Vec を利用した. Word2Vec は学習用文書コーパスに出現する単語の共起関係を学習することで, 各単語を多次元ベクトルとして表現する. 一方で, 部分 3D 形状および全体 3D 形状からの幾何特徴量抽出には, Qi らの PointNet を利用した. PointNet は点群表現の 3D 形状モデルを対象とした 3D 形状識別・領域分割手法である. 本研究では PointNet の領域分割機能を用いて全体 3D 形状を複数の部分 3D 形状へ分割し, さらに PointNet の隠れ層の活性を幾何特徴量として抽出し, WSN への入力として用いた. WSN は単語と形状の異種特徴量を, 数層の全結合層を通して共通特徴空間へ埋め込む.

WSN を実験的に評価した結果, 提案したタグ付与手法は, 実験に用いたデータセットでは 7 割程度の精度でタグ付与できることが分かった. 本精度は利用シナリオによっては実用に耐えうる. また, 図 2 に WSN による部分ラベル付与結果の例を示す. 自動車, ギター, 椅子の 3 つの 3D 形状について, 各部分に対して適切なラベルが付与されていることが見て取れる.

本研究の成果をまとめた論文は, 2019 年度 IEEE International Conference on Multimedia and Expo ワークショップに採択された [業績①].

しかしながら, 本研究で開発した検索システムの実用性には改善の余地がある. 例えば, 利用シナリオ拡大のためにはタグ付与精度を高める必要がある. また, 本研究の評価実験に用いた部分キーワードは数十種と少ない. そのため今後は, 精度改善に加えて, より多様な部分キーワードタグ (類義語や上位語, 下位語など) の付与を試みる.

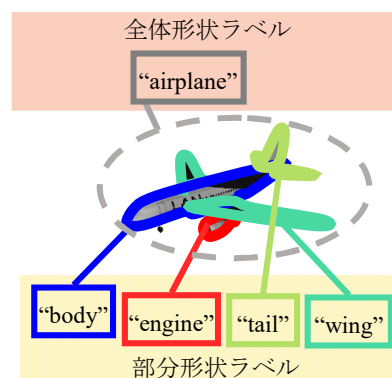


図 1. 本研究で開発した WSN は, 3D 形状の全体と部分の双方に対してタグを付与する.

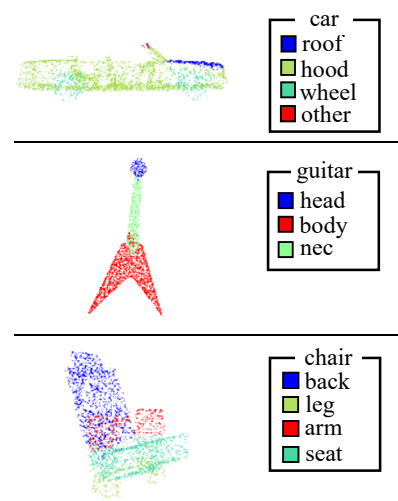


図 2. 本研究で開発した WSN による部分ラベル付与結果の例.

(2) 3D 部分形状と 3D 全体形状の包含関係を学習するアルゴリズム「Part-in-Whole Relation Embedding network」の開発と評価

部分形状に対するタグ付与の精度改善をねらい, 部分形状と全体形状の包含関係を学習する Part-in-Whole Relation Embedding network (PWRE) 法を開発した [業績②]. 図 3 に示す PWRE 法は, 全体形状と部分形状の包含関係を DNN に学習させることで, 全体形状と部分形状で共通の形状特徴空間を獲得する. PWRE 法の特長は, 部分形状と全体形状の包含関係を多次元ベクトル間の距離として表現できる点にある. すなわち, 包含関係にある 3D 形状 (例えば, タイヤと自動車, 腕と人間) は, 共通特徴空間における距離が小さくなる. 対して, 包含関係にない 3D 形状は距離が大きくなる. 評価実験を通して, PWRE が学習した共通特徴空間は, 精度は不十分ながらも 3D 形状の包含関係を反映していることが分かった. 図 4 に, 共通特徴空間を 2 次元に削減することで可視化した例を示す. 図 4 より, 例えば飛行機

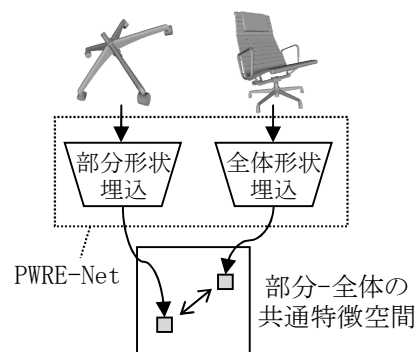


図 3. PWRE 法は部分形状と全体形状を共通特徴空間で比較.

とその部分（翼，エンジン等）が互いに近くに埋め込まれていることが見て取れる。

PWRE が学習した形状の包含関係の情報を WSN の学習に利用することができれば，タグ付与精度の改善が期待できる。しかしながら，PWRE 法と WSN 法を組み合わせた際の有効性は未検証であり，今後の課題である。

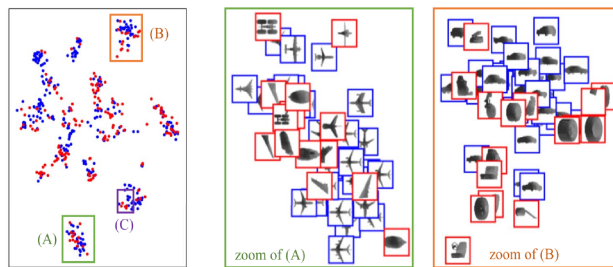


図 4. PWRE 法が学習した埋込特徴空間の可視化. 青は全体 3D 形状の埋込特徴量, 赤は部分 3D 形状の埋込特徴量を示す.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① **Takahiko Furuya**, Ryutarou Ohbuchi, Learning part-in-whole relation of 3D shapes for part-based 3D model retrieval, *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, Vol.166, pp.102-114, <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2017.11.007>, 2018. (査読有り)

[学会発表] (計 8 件)

- ② Kouki Omata, **Takahiko Furuya**, Ryutarou Ohbuchi, Annotating 3D Models and Their Parts via Deep Feature Embedding, *Proc. International Conference on Multimedia & Expo (ICME) workshops 2019*. (査読有り, to appear)
- ③ **Takahiko Furuya**, Ryutarou Ohbuchi, Data Augmentation via Photo-to-Sketch Translation for Sketch-based Image Retrieval, *Proc. International Conference on Graphics and Image Processing (ICGIP) 2018*, <https://doi.org/10.1117/12.2524230>, 2018. (査読有り)
- ④ **Takahiko Furuya**, Ryutarou Ohbuchi, Deep semantic hashing of 3D geometric features for efficient 3D model retrieval, *Proc. Computer Graphics International Conference (CGI) 2017*, Article No. 8, 2017. (査読有り)
- ⑤ **Takahiko Furuya**, Ryutarou Ohbuchi, Deep Aggregation of Local 3D Geometric Features for 3D Model Retrieval, *Proc. British Machine Vision Conference (BMVC) 2016*, 2016. (査読有り)
- ⑥ **Takahiko Furuya**, Ryutarou Ohbuchi, Accurate Aggregation of Local Features by using K-sparse Autoencoder for 3D Model Retrieval, *short paper, Proc. ACM International Conference on Multimedia Retrieval (ICMR) 2016*, pp.293-297, (2016). (査読有り)
- ⑦ **Takahiko Furuya**, Ryutarou Ohbuchi, Aggregating sparse binarized local features by summing for efficient 3D model retrieval, *oral paper, Proc. IEEE International Conference on Multimedia Big Data (BigMM) 2016*, DOI:10.1109/BigMM.2016.32, 2016. (査読有り)
- ⑧ 桑原 周太郎, **古屋 貴彦**, 大淵 竜太郎, 形の詳細を考慮した, 手描きスケッチによる 3D モデル検索, *Proc. Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017*, 2017. (査読有り)
- ⑨ 小俣 幸紀, **古屋 貴彦**, 大淵 竜太郎, 深層学習を用いた 3D モデルへのキーワードタグ付与, *Proc. Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017*, 2017. (査読有り)

[その他]

ホームページ等

- Ohbuchi & Furuya Laboratory
<http://www.kki.yamanashi.ac.jp/~ohbuchi/>
- Google Scholar Takahiko Furuya(古屋貴彦)
<https://scholar.google.co.jp/citations?user=RZyMS5UAAAAJ>

6. 研究組織

(1) 研究分担者
なし

(2) 研究協力者
なし