

アセンブリ構造をもったアニメーション CAD モデルのレイアウト情報を考慮した検索

豊泉翔太郎[†] 平島 栄志[†] 片山 薫[†]

[†] 東京都立大学システムデザイン研究科情報科学域 〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

E-mail: †{toyoizumi-shotaro,hirashima-takashi1}@ed.tmu.ac.jp, ††kaoru@tmu.ac.jp

あらまし 近年、3D CAD ソフトウェアの普及により、製造業をはじめとする様々な分野で 3D CAD モデルが活用されている。さらに、モデルの構造解析や動作イメージの確認などを目的に 3D モデルにアニメーション情報が付加されることも一般的である。本稿では、アセンブリ構造をもったアニメーション CAD モデルのレイアウト情報を考慮した検索手法を提案する。アニメーションのあるモデルを対象とした検索の方法として最も単純なものは、静止したモデルに対しての比較手法を一定時間ごとに繰り返すことであるが、処理に時間がかかるという問題がある。提案手法では、3D モデルに付加されたアニメーションの情報を利用することで特徴量の計算に要する時間を削減する。アニメーションのあるモデルを作成して、提案手法の実験的評価を行った。

キーワード 3D モデル, CAD モデル, アセンブリ構造, 完全一致検索, 部品配置, アニメーション

1 はじめに

製造業や建築業をはじめとする様々な分野では、製品設計の際に 3D CAD ソフトウェアを用いることが一般的となっている。また、近年のコンピュータの性能向上により、作成した 3D モデルを用いて部品の干渉や構造解析などを行うことや、機械製品の実際の動作をアニメーションとしてコンピュータ上で再現することなど、純粋な製品設計以外の分野にも 3D CAD モデルが活用されている。特に動画広告市場や仮想・拡張現実技術の発展から、設計した 3D CAD モデルにアニメーションを付与したものも 3D CG のように使用する例も増えつつある。今後、さらに 3D CAD モデルがアニメーションをはじめとする様々な用途に活用されることが予想されるが、効率的な活用のためには 3D CAD モデルの分類・比較・検索といった基礎的な技術が求められる。

本稿では、アセンブリ構造をもったアニメーション CAD モデルについて、レイアウト情報を考慮した検索手法を提案する。本稿で扱う用語の定義について説明する。アセンブリ構造とは、複数の部品から全体が階層的に構成された形式のことを指し、部品が集まってサブアセンブリを、サブアセンブリが集まってアセンブリを構成する。アニメーション CAD モデルとは、上述のように 3D CAD モデルにアニメーション情報を付与したものである。アニメーションをもった CAD モデルの例を図 1 に示す。レイアウト情報とは、アセンブリモデルの部品に付与されたラベルの配置のことを指す。付与されるラベルの例としては、部品の素材、色情報、生産者情報などがある。レイアウト情報の異なるアセンブリモデルの例を図 2 に示す。

次に、検索の設定について説明する。クエリとして静止したモデルがひとつ、データベースとしてアニメーションを持ったモデルが複数与えられ、クエリと一致するレイアウトを持つモ

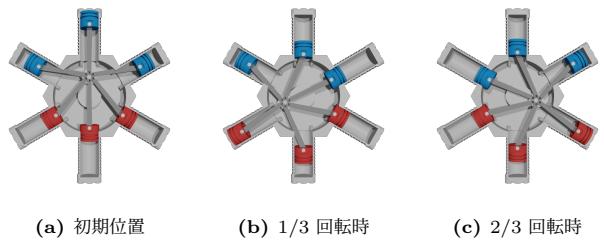


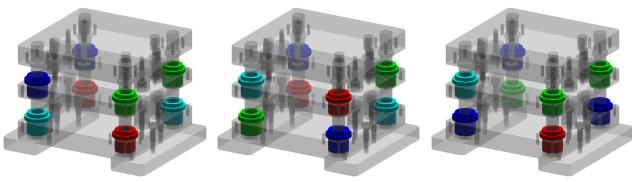
図 1: アニメーションつき CAD モデル

デルをデータベースから検索する。検索は、以下の手順で行う。まず、クエリモデルの特徴量とデータベースモデルの特徴量をアニメーション内のフレームごとに比較し、最も距離が小さくなったフレームでの距離をそのデータベースモデルとクエリモデルの距離とする。次に、クエリモデルとデータベース内の各モデルの距離を比較し、最も距離の小さいデータベースモデルを検索結果として返す。検索の概要を図 3 に示す。

アニメーションのあるモデルを対象とした検索の方法として最も単純なものは、静止したモデルに対しての比較手法を一定時間ごとに繰り返すことであるが、各時刻においてモデルから特徴量を計算すると処理に時間がかかるという問題がある。そこで提案手法では、3D モデルにおけるアニメーションの初期位置からのみ特徴量を計算し、それをもとに各時刻における特徴量を再現することで、ボトルネックとなっている特徴量計算部分を回避して処理時間の削減を実現する。

2 関連研究

3D モデルを対象とした比較・検索手法については様々な研究が行われている。Kazhdan ら [1] は、3D モデルを同心球状にサンプリングし、各球面をそれぞれ球面調和変換して次数ごとのノルムを計算することでモデルの特徴量を構成した。Papadakis



(a) レイアウト 1 (b) レイアウト 2 (c) レイアウト 3

図 2: レイアウト情報の異なるアセンブリモデルの例

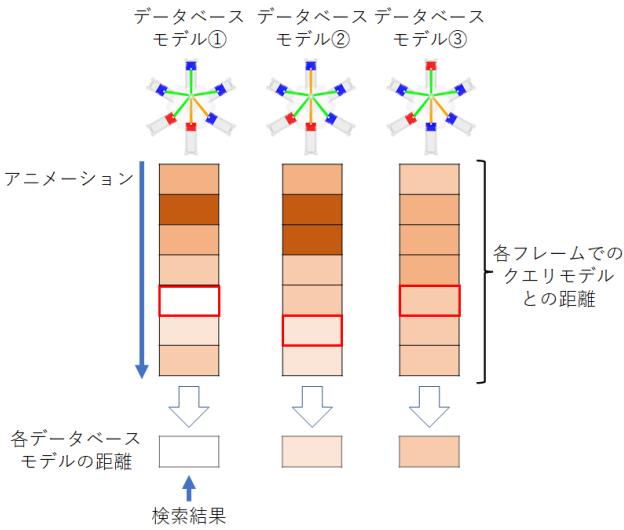


図 3: モデル検索の概要図

ら [2] は、6 つの軸からの深さ画像から計算した 2 次元特徴量と、3D モデルを同心球状にサンプリングして計算した 3 次元特徴量を組み合わせたものをモデルの特徴量としている。Ip ら [3] は、CAD モデルの点群データとポリゴンメッシュをそれぞれサーフェイスパッチに分割し、一致する可能性のあるサーフェイスパッチを比較することで両者の距離を計算している。しかし、これらの比較手法はモデルの形状のみを対象としたものであり、アセンブリ構造などの内部情報を考慮していない。

内部情報を考慮した手法については、Lupinetti ら [4] が既存の検索技術の比較と分類のための基準を提案し、比較条件や検索の設定などをもとに分類および評価を行っている。Miura ら [5] は、CAD モデルに定義されている接触や幾何拘束関係をもとに作成したアセンブリグラフを比較することでモデル間の類似度を計算している。これらの手法はアセンブリ構造を考慮しているものの、サブアセンブリの形状や位置の識別には対応していない。

アニメーションをもつ 3D モデルの検索としては、Wang ら [6] は固有ベクトル相関に基づいてマッチングスコアを計算することで人型モデルのモーションのリアルタイム検索を実現している。Kapadia ら [7] は、モーションキャプチャデータに対して構造や幾何学的特徴を表すキーを用いることで、大規模なモーションデータベースを効率的に検索する手法を提案している。しかし、これらは人型の骨格モデルを対象としたものであり、

本稿で扱うアセンブリモデルには適用できない。

部品のレイアウト情報を考慮した検索技術として、Katayama ら [8] は、3 次元ラドン変換と球面調和変換を用いた完全一致検索手法を提案している。Katayama ら [8] は特徴量を求める方法として 1 次元への投影を使用したものと 2 次元への投影を使用したものの 2 種類を、距離を計算する方法として球面調和変換を用いたものと特徴量の二乗差の和を用いたものの 2 種類をそれぞれ提案している。本稿ではそのうち、1 次元への投影を使用して特徴量を求める方法と球面調和変換を用いて距離を計算する方法とともに、対象をアニメーションモデルに拡張した検索手法を提案する。本稿では、Katayama ら [8] の手法を既存手法、本稿で説明するものを提案手法と呼ぶことにする。

3 静止モデルにおける同一モデル検索

既存手法である同一モデル検索手法では、以下の手順でアセンブリモデルの特徴量を計算している。なお、距離計算の過程で行われる球面調和変換を用いる処理も特徴量計算の一部とみなし、以下に含めている。

- (1) 3 次元ラドン変換を行う
- (2) 正規化してサブアセンブリごとの重みづけ和をとる
- (3) フーリエ変換を行う
- (4) パワースペクトルをとる
- (5) 球面調和変換を行う
- (6) パワースペクトルをとる

ステップ (1), (2) では、3 次元ラドン変換を用いてアセンブリモデルの形状からサブアセンブリごとに特徴量を計算している。ステップ (3), (4) では、ラドン変換結果をフーリエ変換することにより、モデル全体の平行移動に対して不变な特徴量に変換している。ステップ (5), (6) では、ステップ (4) で得られた特徴量を球面調和変換することにより、モデル全体の回転移動に対して不变な特徴量に変換している。

また、2 つのモデル間の距離は以下の手順で計算している。

- (1) 各モデルにおけるサブアセンブリごとに特徴量のユークリッド距離をとる
- (2) 距離の総和が最小となるようなサブアセンブリの組み合わせを選び、その距離の総和を 2 モデル間の距離とする

ステップ (1) では、各モデルにおけるサブアセンブリごとに特徴量のユークリッド距離をとり、サブアセンブリ数 × データベースモデルのサブアセンブリ数の配列とする。ステップ (2) では、得られたサブアセンブリ間の距離の配列について、距離の総和が最小となるようなサブアセンブリの組み合わせを選び、その距離の総和を 2 モデル間の距離とする。

既存手法では、このような手法によりアセンブリモデルの検索において高い精度を実現している。

4 提案手法

本稿では、アセンブリ構造をもったアニメーション CAD モ

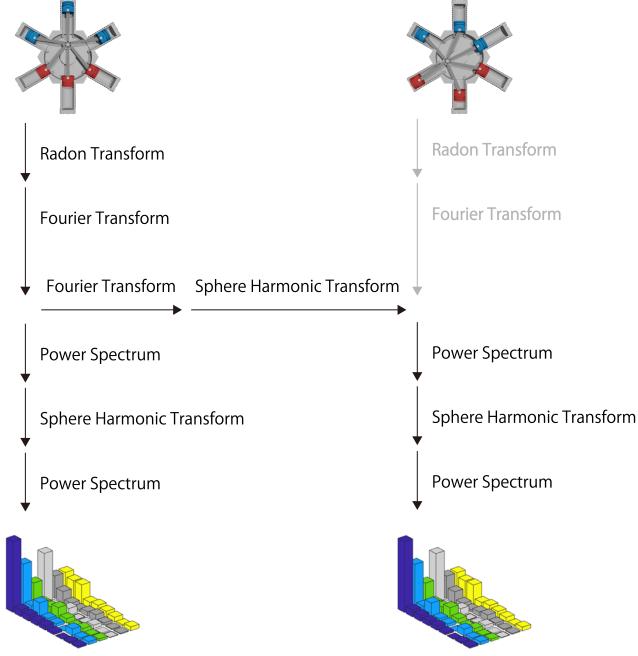


図 4: 手順の概念図

デルについて、レイアウト情報を考慮した検索手法を提案する。アニメーションのついたモデルに対しては、アニメーション内の一定時間ごとに既存手法を適用させることで対応することができるが、モデルに対して 3 次元ラドン変換処理を繰り返すため計算に時間がかかるという課題がある。そこで本稿では、3D モデルにおけるアニメーションの初期位置からのみ特徴量を計算し、ファイルに保存されたアニメーション情報を用いて各時刻における特徴量を再現することでボトルネックとなっているラドン変換処理を回避して処理時間の削減を実現する。

提案するアニメーションモデルの特徴量計算のアルゴリズムを Algorithm1 に、手順の概念図を図 4 に示す。提案手法では、以下の手順でアニメーションモデルの特徴量を計算する。

まず、Algorithm1 の 2~7 行目にて、アニメーションモデルに対して基準となる時刻における特徴量を計算する。4 行目では、既存手法と同様に、アセンブリモデルにおける部品に対して複数の視点から 3 次元ラドン変換を行う。3 次元ラドン変換は、モデルに対して一定間隔ごとの断面積を求める処理である。3 次元ラドン変換のアルゴリズムを Algorithm3 に示す。5 行目では、既存手法と同様に、ラドン変換結果に対してフーリエ変換を行う。ここで、のちの操作のために特徴量の振幅情報と位相情報を分離している。このようにして、基準となる時刻における特徴量が計算される。

次に、8~22 行目にて、各フレームにおけるアニメーションを再現する。アニメーションを再現するためには、各部品に対して平行移動と回転移動に対応する特徴量の操作を行う。平行移動は、得られたフーリエ変換結果の位相成分をずらすことによって部品が平行移動すると、ラドン変換結果が平行移動してフーリエ変換結果の位相がずれ

Algorithm 1 アニメーションモデルの特徴量計算

Input: アニメーションつきアセンブリモデル M
Output: 特徴量 F

- 1: 視点の計算
//基準となる時刻のアセンブリモデルに対して特徴量を計算する
- 2: **for** サブアセンブリ in 静止モデル **do**
- 3: **for** 部品 in サブアセンブリ **do**
- 4: 3 次元ラドン変換を行う
- 5: フーリエ変換を行う
- 6: **end for**
- 7: **end for**
//各時刻における特徴量を再現する
- 8: **for** フレーム in アニメーション **do**
- 9: **for** サブアセンブリ in 静止モデル **do**
- 10: **for** 部品 in サブアセンブリ **do**
- 11: フーリエ変換結果の位相をずらして平行移動を再現する
- 12: 球面調和変換で視点の情報を補完する
- 13: 対応する点の値をとって回転移動を再現する
- 14: 部品の特徴量の和を計算する
- 15: **end for**
- 16: その他のサブアセンブリの特徴量の和を計算する
- 17: 正規化する
- 18: パワースペクトルをとる
- 19: 球面調和変換を行う
- 20: パワースペクトルをとる
- 21: **end for**
- 22: **end for**
- 23: **return** 特徴量 F

Algorithm 2 提案手法の距離計算

Input: 静止モデルの特徴量 F_s , アニメーションモデルの特徴量 F_a
Output: 距離 $distance$

- 1: **for** フレーム in アニメーション **do**
- 2: 既存手法の距離計算を行う
- 3: **end for**
- 4: 距離の最小値を求める
- 5: **return** 距離 $distance$

Algorithm 3 3 次元ラドン変換 radonTransform3D

Input: 部品 $part$, 視点の集合 V
Output: 断面積の行列 a

- 1: **for** 視点 v in 視点の集合 V **do**
- 2: モデルの回転
- 3: **for** x 座標 in x 軸 **do**
- 4: 断面積を計算する
- 5: **end for**
- 6: **end for**
- 7: **return** 断面積の行列 a

るが、この性質を利用して部品の平行移動量に合わせて位相成分をずらすことによって部品の特徴量変化を再現する。平行移動による特徴量変化の再現の概要を図 5 に示す。回転移動は、移動量と対応する視点からの特徴量を用いることで再現する。アニメーションにより部品が回転したとき、回転した部品のラドン

変換・フーリエ変換結果は、回転前の部品にとっての視点が逆回転した状態におけるラドン変換・フーリエ変換結果と一致する。この性質を利用して、部品の回転移動量に合わせて視点を逆回転させることで部品の特徴量変化を再現する。回転移動による特徴量変化の再現の概要を図 6 に示す。この際、移動量と対応する視点の特徴量が存在するとは限らないため、球面調和変換を用いて既存のデータを球面上で滑らかに補間する。球面調和変換は、球面上で定義された関数 $g(\lambda, \mu)$ を球面調和関数 $Y_n^m(\lambda, \mu)$ と複素係数 s_n^m を用いて以下のように展開するものである。

$$g(\lambda, \mu) = \sum_{n=0}^M \sum_{m=-n}^n s_n^m Y_n^m(\lambda, \mu)$$

ここで、 λ は球座標の経度、 μ は ϕ を緯度として $\mu = \sin \phi$ によって定められるサイン緯度である。また、 n は次数、 m は位数であり、 M は展開の切断波数で次数 n の最大値となる。最後に、球面調和変換結果の各次数において以下のようにパワースペクトルを求める。

$$feature_n = \sum_{m=-n}^n \|s_n^m\|^2$$

16 行目以降は、静止モデルにおける特徴量計算と同様に、得られた特徴量を平行移動および回転移動に不变なものに変換する処理である。

ここまでで得られたアセンブリモデルの特徴量から 2 モデル間の距離を計算するアルゴリズムを Algorithm2 に示す。ここでは、アニメーションのない静止したモデルと、アニメーションのあるモデルの比較を想定する。2 モデル間の距離を計算するには、静止モデルの特徴量とアニメーションモデルの各フレームにおける特徴量に対して既存手法の距離計算を繰り返し、最も距離の値が小さくなるフレームでの距離を、2 モデル間の距離とする。アニメーションモデル同士の比較を行う場合には、既存手法の距離計算を双方のフレーム数だけ繰り返すことで対応できる。

5 評価実験

提案手法の評価をするため、アニメーション内の一定時間ごとに既存手法を適用させる方法と 4 章で提案した方法について比較実験を行い、処理に要する時間と検索の精度について評価を行う。以下、アニメーション内の一定時間ごとに既存手法を適用させる方法を手法 1、4 章で提案した方法を手法 2 と呼ぶこととする。

実験の設定としては、1 章で述べたように、クエリとして静止したモデルがひとつ、データベースとしてアニメーションを持ったモデルが複数与えられ、クエリと一致するレイアウトを持つモデルをデータベースから検索する。実験は、MATLAB R2021b にてプログラムを記述し、Intel Core i9 9900KF 3.6GHz CPU、32GB RAM、Windows 10 Pro を搭載したコンピュータ上で行った。

実験には GrabCAD [9] から取得したエンジンのモデルを使

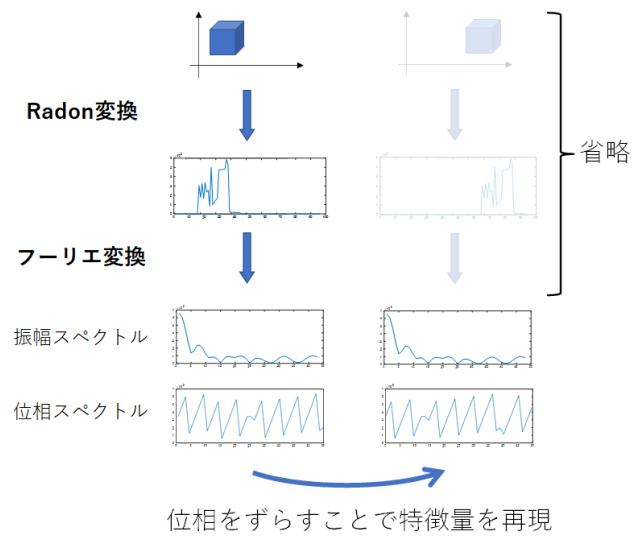


図 5: 平行移動の再現

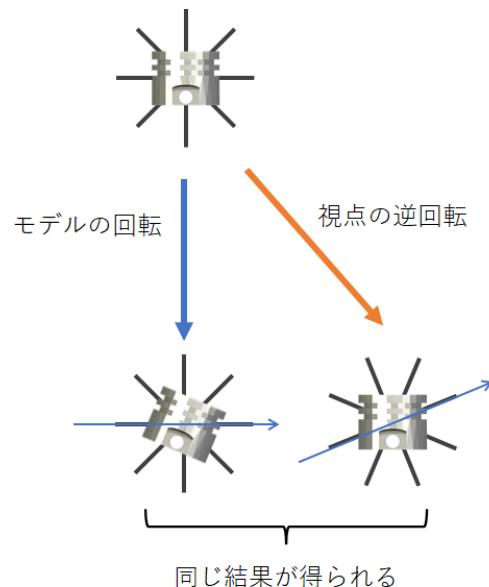


図 6: 回転移動の再現

用し、1 回転するアニメーションを付与した。実験には、図 1 で示したアニメーションモデルを用いた。また、データベースとなる各モデルにおけるサブアセンブリのレイアウトを図 7 に示す。これらは、互いに形状や部品の数、付与されたアニメーションは共通するが、部品に付与されたレイアウト情報が異なっている。クエリとなるモデルは、図 7a と一致するレイアウト情報を持つ。

まず、1 つのアニメーションモデルにおける特徴量計算において、手法 1 と手法 2 それぞれの処理時間を比較する。アニメーションを切り出すフレーム数を 1~5 の範囲で変化させ、フレーム数と処理時間の関係を評価した。そのほかのパラメータは、3 次元ラドン変換の断面数が 30、視点数が 32、球面調和変換の切断波数が 4、フーリエ変換結果の最大次数を 10 とし

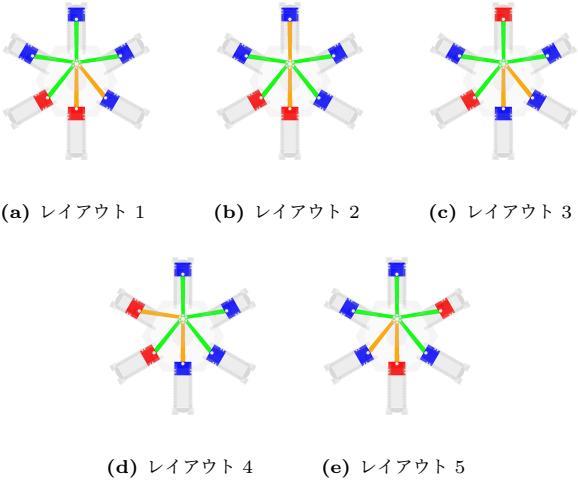


図 7: レイアウトの異なる 5 種類のデータベースモデル

表 1: 評価実験における実行時間 [s].

フレーム数	初期位置	1	2	3	4	5
手法 1	-	32.98	65.81	98.69	131.60	164.3844
手法 2	39.72	42.31	45.23	47.97	50.83	53.2042

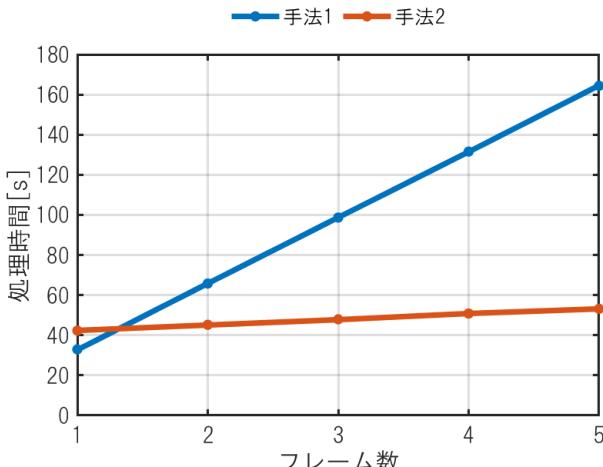


図 8: アニメーションモデルひとつあたりの特徴量計算時間

表 2: 評価実験における正答率 [%].

視点数	2	8	18	32	50	72	98
手法 1	0	37.5	37.5	62.5	75	100	100
手法 2	0	25	50	62.5	87.5	87.5	100

た。モデルは図 7a のレイアウトをもつモデルを用いた。実験結果を表 1 に、グラフを図 8 に示す。

表 1 より、手法 1 では比較するフレーム数に比例して実行時間が大幅に増加しているのに対し、手法 2 では初期位置での特徴量計算に時間がかかっているものの実行時間の増加が緩やかであることがわかる。したがって、フレーム数が多いほど手法 2 における高速化の効果が大きいことがわかる。このことから、提案手法を用いて各時刻における特徴量を再現することで、処理時間の削減を実現できているといえる。

次に、手法 1 と手法 2 の検索精度について比較する。上述のように、レイアウトの異なる 5 つのデータベースモデルからク

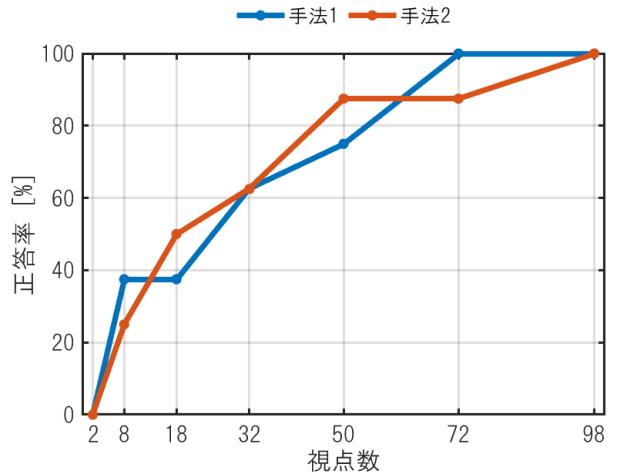


図 9: 評価実験における正答率

エリと一致するレイアウトを持つモデルを検索し、そのモデルを結果として出力する。検索精度の変化を見るため、3 次元ラドン変換を行う視点数を変化させながら実験を行った。そのほかのパラメータは、3 次元ラドン変換の断面数が 30、球面調和変換の切断波数が 4、フーリエ変換結果の最大次数が 10、フレーム数を 15 とした。実験は手法 1 と手法 2 のそれぞれについて 8 回行い、そのうちデータベースから正しいレイアウトのモデルを出力した割合を正答率として評価した。実験結果を表 2 に、グラフを図 9 に示す。

図 9 より、手法 1 と手法 2 の正答率の変化は同様の結果となっており、視点数 98 で 100% の正答率を達成していることがわかる。このことから、手法 2 でのアニメーションの再現による高速化の処理を行っても手法 1 での正答率と同様の結果が得られるといえる。

6 おわりに

本稿では、アセンブリ構造をもったアニメーション CAD モデルについて、レイアウト情報を考慮した検索手法を提案した。実験により、提案手法が既存手法と比較して処理時間を大幅に削減できることが示された。しかしながら、本稿における提案手法についても依然として処理時間が長く、大規模で複雑なモデルを扱う場合には実用的とは言えないため、さらなる処理時間の短縮が求められる。また、本稿ではアニメーションモデルに対して一定時間ごとに特徴量の比較を行っているが、アニメーションの変化量に合わせて比較する時間間隔を動的に変化させることができればより効率的にモデルの比較が行えるようになると考えられる。処理時間の短縮のほか、今後はそういったアニメーションの内容に応じた効率的な検索手法の開発に取り組んでいきたい。

文 献

- [1] Michael Kazhdan, Thomas Funkhouser, and Szymon Rusinkiewicz. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3d shape descriptors. SGP '03, p. 156–164, Goslar, DEU, 2003. Eurographics Association.

- [2] Panagiotis Papadakis, Ioannis Pratikakis, Theoharis Theoharis, Georgios Passalis, and Stavros Perantonis. 3d object retrieval using an efficient and compact hybrid shape descriptor. pp. 9–16, 01 2008.
- [3] Cheuk Ip and Satyandra Gupta. Retrieving matching cad models by using partial 3d point clouds. *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 4, , 08 2013.
- [4] Katia Lupinetti, Jean-Philippe Pernot, Marina Monti, and Franca Giannini. Content-based cad assembly model retrieval: Survey and future challenges. *Computer-Aided Design*, Vol. 113, pp. 62–81, 2019.
- [5] Takashi Miura and Satoshi Kanai. 3d shape retrieval considering assembly structure. In *Proceedings of Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2009.
- [6] Pengjie Wang, Rynson W.H. Lau, Zhigeng Pan, Jiang Wang, and Haiyu Song. An eigen-based motion retrieval method for real-time animation. *Computers & Graphics*, Vol. 38, pp. 255–267, 2014.
- [7] Mubbasis Kapadia, I-kao Chiang, Tiju Thomas, Norman Badler, and Jr Kider. Efficient motion retrieval in large motion databases. pp. 19–28, 03 2013.
- [8] Kaoru Katayama and Takashi Hirashima. A retrieval method for 3d cad assembly models using 3d radon transform and spherical harmonic transform. *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E103.D, No. 5, pp. 992–1001, 2020.
- [9] Grabcad, <http://grabcad.com/library/>.