

# 3DCAD アセンブリモデルの部分空間に基づく部分一致検索

山地 陽太<sup>†</sup> 平島 栄志<sup>†</sup> 片山 薫<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京都立大学大学院システムデザイン研究科 〒192-0065 東京都日野市旭が丘6-6

E-mail: <sup>†</sup>{yamaji-youta, hirashima-takashi1}@ed.tmu.ac.jp, <sup>††</sup>kaoru-@tmu.ac.jp

**あらまし** 近年、製造業や建築業での 3DCAD の導入が進み、多くの 3 次元モデルデータが制作されている。これに伴い、3DCAD モデルの検索についての研究も多くなされている。しかし、複数の部品から成る 3DCAD モデルの多くは、アセンブリ構造と呼ばれる階層関係の情報を持っているが、多くの研究ではこれらの情報が利用されていない。また、あるアセンブリモデルの一部として含むようなアセンブリモデルを検索する部分一致検索は、完全一致検索と比べてあまり研究がなされていない。そこで本研究では、アセンブリ構造の階層ごとに、部品一つ一つを基底とした部分空間を求め、サブアセンブリごとに部分空間間の距離を計算することで類似度とし、アセンブリ構造を保ちながら部分一致検索を行う手法を提案する。本稿では複数のモデルについて、部分一致するモデル 5 個と部分一致しないモデル 20 個で検索を行い、提案手法の評価を行った。

**キーワード** 3DCAD アセンブリモデル, 3D ラドン変換, 部分一致検索, 部品配置, 部分空間

## 1 はじめに

CAD (Computer Aided Design) とは、コンピュータ上で設計を行うためのコンピュータ支援設計ツールである。その中で 3DCAD は、3D モデルを利用した 3 次元の設計を可能とし、製造業や建築業、アパレル業で多く用いられている。近年では、3D プリンター用のデータとしても利用され、私たちにも身近なものとなりつつある。こうした 3DCAD の普及による 3DCAD モデルの増加に伴い、ユーザーが必要とするモデルを柔軟に検索する技術が求められる。本研究では、3DCAD モデルを対象とした、検索手法の提案を行う。

3DCAD で設計を行った製品の多くは、複数の部品モデルで構成されたアセンブリモデルである。アセンブリモデルは、単一の 3D モデルである部品を最小単位とし、サブアセンブリと呼ばれる任意の部品の集合を持つ。さらに、任意のサブアセンブリの集合を新たなサブアセンブリとすることで、アセンブリ構造と呼ばれる階層構造を持つモデルとなっている。図 1 は、サブアセンブリを色分けして示した 3 階層アセンブリモデルの例である。サブアセンブリは主に、組立品や同じ働きをする部品集合などによって分けられ、設計者にとって重要な情報の一つである。しかし、3DCAD モデル検索技術の多くは、モデルに含まれる部品の位置情報や表面形状によって検索を行っていて、アセンブリ構造のような構造情報は利用されていない。

本研究では、モデルの位置情報や表面形状だけでなく、アセンブリ構造を考慮した 3DCAD アセンブリモデルの部分空間に基づく部分一致検索手法を提案する。本研究で扱う部分一致検索では、完全モデルをクエリデータとし、完全モデルに内包されるような部分モデルを検索する。ここでの内包とは部分モデルを構成するサブアセンブリすべてが完全モデルと一致することを指す。図 2 にその例を示す。図 2 は、サブアセンブリをそれぞれ色分けしたものを示している。図 2(a) がクエリデータ

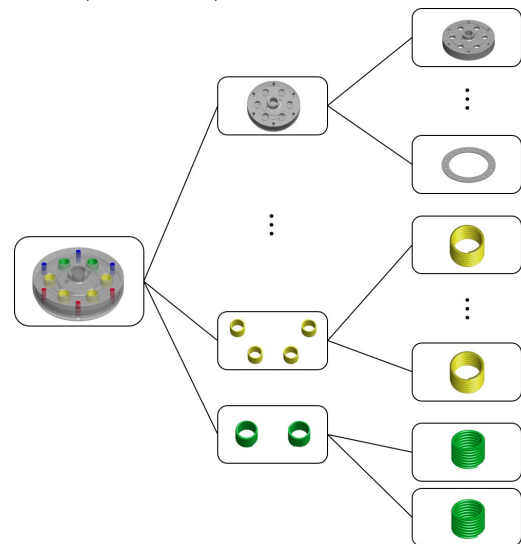


図 1: 3 階層アセンブリモデルの例

のとき、2(b) は、黄色で示したサブアセンブリが欠損しているが、それ以外のサブアセンブリはすべてクエリデータと一致している。一方で図 2(c) は、緑色で示したサブアセンブリの部品配置が、どのように回転させてもクエリデータと一致しない。図 2(b) のように部分的に構造が一致しているモデルを部分一致モデル、図 2(c) のように一致しないモデルを部分不一致モデルとして扱う。

本研究では、3DCAD アセンブリモデルの部分一致検索を行うため、モデルを構成する各部品について 3D ラドン変換を行うことで得られた 1 次元配列ベクトルを基底として、サブアセンブリごとに求められた部分空間によって類似度計算を行う手法を提案する。データベースモデルのサブアセンブリ部分空間が、クエリモデルのサブアセンブリ部分空間に含まれているか否かによって、完全一致だけでなく部分一致の判断が可能となっている。本研究では、クエリモデルとデータベースの複数の

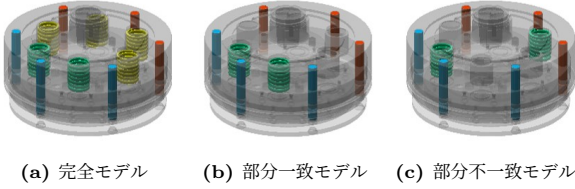


図 2: 検索の目的となる部分一致モデルの例

モデルとの類似度によるランキング付けを行い、ランキング上位のモデルが部分一致モデルとなることを部分一致検索とする。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では関連研究について述べる。第 3 章では提案手法の詳細について解説する。第 4 章では実験結果とその考察について述べる。最後に、第 5 章で本研究のまとめを述べる。

## 2 関連研究

3D モデルの検索手法は様々な研究が行われてきた。本節では、それらの研究で提案された検索手法を示す。典型的な検索手法として、Chen ら [2] や Ma ら [3] のように、3D モデルの 2 次元平面への投影から特徴量を求め検索を行う手法や、Li ら [4] のように、球面調和による特徴量計算を行う検索手法が挙げられる。しかし、これらの手法は 3D モデルの形状に注目したものであり、構造を考慮した検索を行うことは難しい。

Nie ら [5] は、3D モデルを標準的な幾何学モデルの集合に分解し、ナレッジグラフを作成することで、物理的な構造情報を利用した検索を行った。Zhu ら [6] は、モデルを 2 つの部分に分割しながらモデル間の類似度計算と対応付けを行う処理を再帰的に行うことで、部品の詳細な対応を計算する検索を行った。しかし、これらの手法は物理的な構造情報にしか注目していないため、アセンブリ構造のような設計段階で利用される知識的構造は考慮されていない。

Han ら [7] や Lupinetti [8] らは、部品の物理的情報や接触関係、部品の役割などの情報から、モデルの設計上意味のある集合に構造化を行い、それを属性情報を持つ隣接グラフや木グラフとして表現することで知識的構造を利用した検索を行っている。これは、モデルのデータから知識的構造を表現し検索を行う手法であり、実際に与えられるアセンブリ構造を利用した検索は行っていないため、本研究で提案する手法とは異なる。

平島ら [1] は、実際に与えられるアセンブリ構造から、サブアセンブリに含まれる部品をまとめてサブアセンブリで 1 つの特徴量とすることで、アセンブリ構造を考慮した部分一致検索を行った。この手法では、サブアセンブリに含まれている部品の情報が失われてしまっているため、詳細な部分一致検索を行うには不十分である。

## 3 提案手法

本章では、本論文で提案する 3DCAD アセンブリモデルの部分空間に基づく部分一致検索手法について記述する。本稿の部分一致検索では、モデルを構成する部品の形状、配置、アセ

---

### Algorithm 1 ComputeAssemblyPartialSimilarity

---

**Input:** 完全モデル  $M_q$ , 部分モデル  $M_d$ , 完全モデル視点データ  $V_q$ , 部分モデル視点データ  $V_d$

**Output:** 類似度  $sim$

// 3D ラドン変換を用いた特徴量計算

```

1: for all  $sa_q \in M_q$  do
2:    $(F_q(sa_q), VL_q(sa_q)) \leftarrow \text{ComputeFeature}(sa_q, V_q)$ 
3: end for
4: for all  $sa_d \in M_d$  do
5:    $(F_d(sa_d), VL_d(sa_d)) \leftarrow \text{ComputeFeature}(sa_d, V_d)$ 
6: end for
// 部分空間に基づくモデル類似度計算
7:  $sim \leftarrow \text{ComputeCombination}(F_q, F_d, VL_q, VL_d)$ 
8: return  $sim$ 

```

---

ンブリ構造の全てがクエリモデルに内包されるようなモデルをデータベースから検索する。本稿で提案する 3DCAD アセンブリモデルの部分空間に基づく部分一致検索を行うアルゴリズムを Algorithm1 に示す。Algorithm1 は、以下によって示すステップによって構成される。

- (1) 3D ラドン変換を用いた特徴量計算,
- (2) 部分空間に基づくモデルの類似度計算

ステップ (1) については 3.1 節, ステップ (2) については 3.2 節で詳細を述べる。

### 3.1 3D ラドン変換を用いた特徴量計算

提案手法では、3D モデルのアセンブリ構造を利用した検索を行うため、階層的な特徴量計算を行う。本研究では、上層を製品モデル、中層をサブアセンブリ、下層を部品とした 3 階層のアセンブリ構造を持つモデルに対しての検索を行う。そのため、クエリモデル  $M_q$  とデータベースモデル  $M_d$  が与えられたとき、それぞれのモデルに対して、各サブアセンブリを構成する部品について 3D ラドン変換を行い特徴量の計算を行う。特徴量計算のアルゴリズムを Algorithm2 に示す。

本手法で扱う 3D ラドン変換は、モデルの中心を通るさまざまな軸で軸に垂直な平面で区切られた空間で積分を行う。このとき、平面での分割数をサンプリング数とする。これにより、ポリゴンと呼ばれる 3 角形の面の集合で定義されている 3D モデルの各部品データから 1 次元配列ベクトルの集合を特徴量として得る。図 3 に 3D ラドン変換のある軸での積分の概念図を示す。本手法では、モデルを中心とする球面に均一な視点を用意し、視点とモデルの中心を通る直線を 3D ラドン変換を行う軸とする。図 4 に灰色の点を視点として例を示す。それぞれの軸では、部品間の相対位置を保つためにモデルの直径を積分範囲として積分を行う。こうして、モデルのサブアセンブリごとに得られる特徴量  $feature$  は、(視点数)  $\times$  (部品数)  $\times$  (サンプリング数) の 3 次元配列である。

3D ラドン変換の結果から 2 つのモデルの形状を比較する際、異なるモデル同士の比較ではモデル全体の姿勢が揃っていないことがある。また、部分的な構造の一致を検索する部分一致では、モデルの全体形状が異なることもあるため、形状から 3D

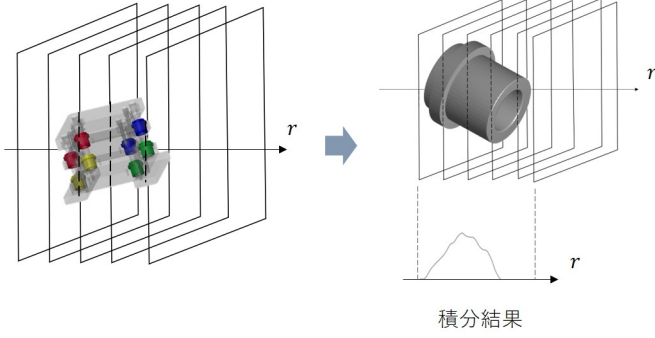


図 3: 3D ラドン変換のある軸での積分の概念図

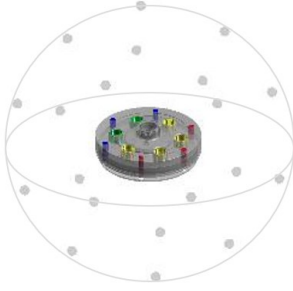


図 4: 3D ラドン変換を行う視点集合の例

#### Algorithm 2 ComputeFeature

**Input:** サブアセンブリデータ  $SA$ , モデルの視点情報  $V$

**Output:** 部品の特徴量  $feature$ , 部品の体積  $volume$

```

1: for all  $p \in SA$  do
2:   for all  $v \in V$  do
3:      $feature(v, p) \leftarrow$  3D ラドン変換
4:      $feature(v, p) \leftarrow \frac{feature(v, p)}{Sum(feature(v, p))}$ 
5:   end for
6:    $volume(p) \leftarrow$  部品全体の体積の計算
7: end for
8: return  $feature, volume$ 

```

モデルの姿勢を合わせることも難しい。そのため、モデルの比較には対応する視点の組み合わせ決定が必要となる。

### 3.2 部分空間に基づくモデルの類似度計算

クエリモデルとデータベースモデルそれぞれで計算した特徴量を用いて部分一致類似度の計算を行う。類似度計算のアルゴリズムを Algorithm3 に示す。本手法では、モデルの部品単位の詳細な情報を用いた類似度計算を行うため、サブアセンブリに含まれる各部品の特徴量ベクトルを基底とした部分空間を求め、部分空間に基づくモデルの類似度計算を行う。3.1 節ではある視点での部品の特徴量は、要素数がサンプリング数である 1 次元配列のベクトルであることを示した。サンプリング数を  $N_s$ 、クエリモデルのあるサブアセンブリに含まれる部品数を  $m$ 、データベースモデルのあるサブアセンブリに含まれる部品数を  $n$  ( $0 < n \leq m < N_s$ ) とする。このときクエリモデルは、サブアセンブリに含まれる部品の特徴量ベクトルを基底とした  $N_s$  次元空間上の  $m$  次元部分空間  $\mathcal{P}$  と定義することができる。

また、データベースモデルは  $N_s$  次元空間上の  $n$  次元部分空間  $\mathcal{Q}$  と定義することができる。本手法では、これらの部分空間の類似度を二つの部分空間のなす角度である正準角を用いて定義する。正準角の計算方法を以下に示す。はじめに、QR 分解を用いることで各部分空間の基底ベクトルの正規直交基底ベクトルへの変換を行う。QR 分解は、以下に示すように両列を正規直交基底  $\Psi$ ,  $\Phi$  と上三角行列の  $R_p$ ,  $R_q$  の積に分解する。

$$\Psi R_p = \mathcal{P}$$

$$\Phi R_q = \mathcal{Q}$$

部分空間  $\mathcal{P}$  と  $\mathcal{Q}$  でそれぞれ求められた正規直交基底  $\Psi$ ,  $\Phi$  の射影行列  $P$  と  $Q$  は

$$P = \sum_{i=1}^m \Psi_i \Psi_i^T$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \Phi_i \Phi_i^T$$

で求めることができる。次に  $PQP$  (または  $QPQ$ ) について特異値分解を行う。

$$[U, \Sigma, V] = \text{SVD}(PQP)$$

$\Sigma$  は、 $PQP$  の特異値行列であり、 $\Sigma$  の第  $i$  番目に大きい特異値  $\lambda_i$  が第  $i$  正準角  $\theta_i$  の  $\cos^2 \theta_i$  となる。このとき、正準角はクエリモデルのサブアセンブリ部分空間に対するデータベースモデル部分空間の角度であるため、データベースモデルのサブアセンブリがクエリモデルのサブアセンブリに部分一致する場合、すべての正準角が 0,  $\cos^2 \theta_i$  が 1 となり、2 つのモデルの部分一致度が高いほど、 $\cos^2 \theta_i$  の値は大きくなる。本手法では特異値行列  $\Sigma$  から  $\cos^2 \theta_i$  の平均を求め、サブアセンブリ間の類似度とする。2 つの 2 次元部分空間間の正準角の例を図??に示す。

3.1 節で、3D ラドン変換を行う姿勢はモデルを中心とする球面に均一な視点で決めることを述べた。そのため、部品数の異なるクエリモデルとデータベースモデルでは、モデルの中心座標が異なる場合がある。そこで、中心座標のずれによる位置の変化を防ぐため、部品の特徴量ベクトルをシフトさせながら類似度の計算を行い、最も類似度の高い位置をクエリモデルとデータベースモデルの対応する位置とする。このとき、平行移動はすべてのサブアセンブリ部品で同じなので、Algorithm3 の 2 行目でモデル全体の特徴量部分空間の比較によって対応する位置を決定している。シフトさせた際の特徴量は図 6 に示すように、特徴量ベクトルの要素数が同じになるように 0 配列を追加したものを用いる。

3.1 節では異なるモデル同士では位置や向きが同じとは限らないと述べたのと同様に、異なるモデル同士では部品やサブアセンブリの対応関係が分かっているとは限らない。そのため本手法では、Algorithm3 に示すように、視点のすべての組み合わせごとに、サブアセンブリのすべての組み合わせで類似度計算を行う。その後、各組み合わせで類似度の和を計算したときに、最も類似度が大きくなる組み合わせを採用する。Algorithm3 で



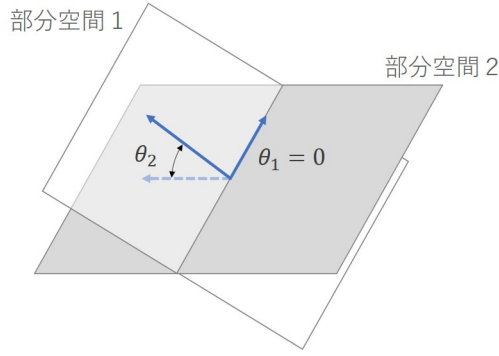


図 5: 2 次元部分空間同士の正準角の例

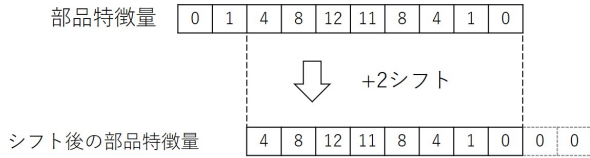


図 6: シフトさせた特徴量の例

#### Algorithm 3 ComputeCombination

**Input:** クエリモデルの特徴量  $F_q$ , データベースモデルの特徴量  $F_d$ ,  
クエリモデル部品体積  $VL_q$ , データベースモデル部品体積  $VL_d$

**Output:** 部分一致距離  $sim$

```

1: for all  $(v_q, v_d) \in V_q \times V_d$  do
2:    $shift \leftarrow F_q(v_q)$  と  $F_d(v_d)$  の類似度計算からシフト量の計算
3:   for all  $(sa_q, sa_d) \in M_q \times M_d$  do
4:      $(poss, index) \leftarrow VL_q$  と  $VL_d$  から部品の体積による部分一致の判定
5:     if  $poss == true$  then
6:        $sim_{sa}(SA_q, SA_d) = 0$ 
7:     else
8:        $sim_{sa}(SA_q, SA_d) \leftarrow$  サブアセンブリの類似度計算
9:     end if
10:  end for
11:   $sim_v(v_q, v_d) \leftarrow sim_{sa}$  の線形組み合わせ最大和
12: end for
13:  $sim \leftarrow sim_v$  の線形組み合わせ最大和
14: return  $diff$ 

```

は 11 行目にて割り当て問題を解くことでサブアセンブリの類似度の組み合わせ最大和を求め、この視点の組での類似度としていく。全ての視点の組で類似度の計算が終了した Algorithm3 の 13 行目では、同様に割り当て問題を解くことで視点の類似度の組み合わせ最大和を求め、モデル全体の類似度としている。

Algorithm3 の 4 行目から 6 行目では、サブアセンブリを構成する部品の体積の比較から、部分一致することのないサブアセンブリの組の判別を行う。部分一致モデルでは、データベースモデルはクエリモデルに内包されるため、データベースモデルの方が部品数が多い場合や、体積の一致する部品が含まれていない場合では、部分一致しないことがわかる。このような場合、類似度を 0 とし類似度計算を省略する。これは、すべてのサブアセンブリの組み合わせで類似度の計算を行う本手法の処理時間の削減として非常に効果的な手段である。

表 1: 実験に用いたアセンブリモデルの詳細

	ポリゴン数	サブアセンブリ数	部品数
die	79552	5	39
clutch	350509	5	55
engine	50444	5	59
pump	512710	5	29
bogie	251108	5	73

## 4 評価実験と考察

本章では、本稿で提案する 3DCAD アセンブリモデルの部分空間に基づく部分一致検索手法について実験の評価を行う。実験では、ラドン変換を行う際の視点数とサンプリング数を変化させたときの処理時間と検索精度を計測し、評価を行った。4.1 節では、データベースモデルの視点数を変化させて実験を行う。4.2 節では、クエリモデルとデータベースモデルのサンプリング数を変化させて実験を行う。

本稿の実験では、1 個のクエリモデルと 25 個のデータベースモデルを用意し、クエリモデルとデータベースモデルの類似度計算を行う。データベースは、部分一致するモデル 5 個と部分一致しないモデル 20 個によって構成される。このとき、検索精度は類似度計算の結果を降順に並べた際の上位 5 個のデータベースモデルに、実際に部分一致するモデルが含まれる割合として定義される。検索時には、すべてのモデルについてランダムな平行移動と回転を 3 次元空間上で行った。

実験では、die, clutch, engine, pump, bogie の 5 種類のアセンブリモデルそれぞれでクエリモデルとデータベースモデルを用意し、類似度計算を行った。サブアセンブリごとに色分けをしたクエリモデルの透過図を図 7 に示す。各クエリモデルデータの詳細を表 1 に示す。図 7(a) の die モデルを例としたデータベースモデルを図 8 に示す。データベースモデルは、クエリモデルと部品数、サブアセンブリ数が異なるモデルである。図 8 の各モデルを図 7(a) のクエリモデルと比較すると、図 8(a), (f), (k), (p), (u) のデータベースモデルがクエリモデルに部分一致し、それ以外は部分一致しないことがわかる。これらのモデルは、上層を製品モデル、中層をサブアセンブリ、下層を部品モデルとした 3 階層のアセンブリモデルである。

実験は、ソースコードを MATLAB によって記述し、Intel Core i9 3.6GHz CPU, 32GB RAM, OS に Windows 10 Education を搭載したコンピュータ上で MATLAB R2021b を実行して行った。

### 4.1 視点数を変化させた実験

データベースモデルの特徴量計算を行う際の視点数を変化させて実験を行い、処理時間と検索精度について評価を行う。実験では、クエリモデルの視点数を 80 に固定し、データベースモデルの視点数を 40, 60, 80, 100, 120, 140 と変化させた。このとき、両方のモデルでサンプリング数は 80 とした。処理時間の結果を図 9、検索精度の結果を図 10 に示す。図 9 の処

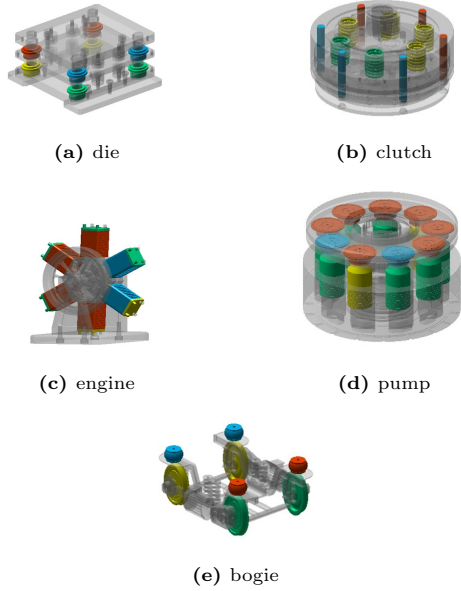


図 7: 実験に用いた 5 種類のクエリモデル

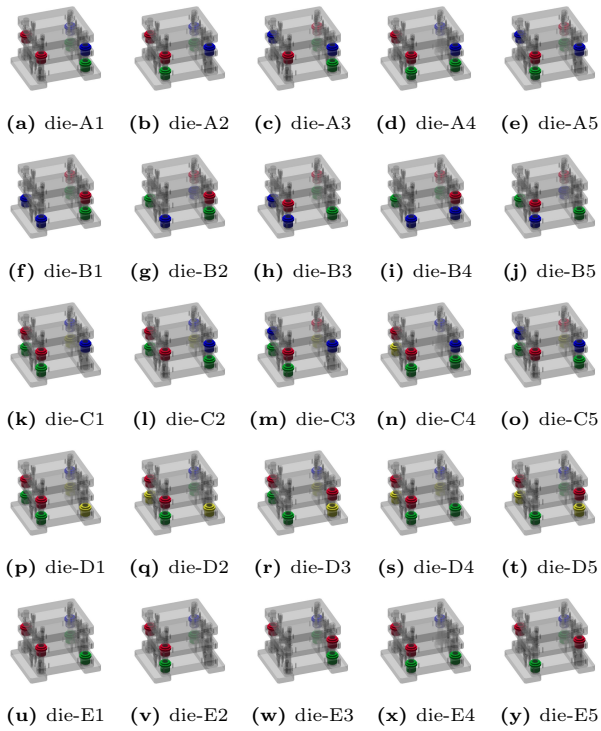


図 8: die モデルを例としたデータベースモデル

処理時間は、データベースモデルの特徴量計算と類似度計算にかかった時間の合計である。処理時間の内訳を表 2 に示す。

表 2 から、類似度計算にかかる時間は、特徴量計算にかかる時間と比較して大幅に長く、検索の処理時間の大半が類似度計算によるものということがわかる。図 9 から、処理時間は視点数に比例することがわかる。これは、視点数が増加すると視点の組み合わせ決定のための類似度計算の回数が増加するためである。このとき、die モデルで処理時間が長いのは、他のモデルと比べて部品の形状や大きさのばらつきが少ないため、Algorithm3 の 4 行目から 6 行目の部品の体積比較による処理

表 2: 視点数を変化させたときの処理時間の内訳

	40	60	80	100	120	140
die 特徴量	1.05	1.56	2.08	2.60	3.12	3.64
die 類似度	75.18	108.96	145.60	183.17	220.49	257.16
clutch 特徴量	2.89	4.33	5.77	7.20	8.65	10.09
clutch 類似度	38.62	58.00	77.55	96.51	116.76	135.63
engine 特徴量	0.96	1.44	1.91	2.39	2.87	3.35
engine 類似度	33.09	49.33	65.70	81.63	98.09	114.81
pump 特徴量	5.07	7.58	10.10	12.63	15.16	17.69
pump 類似度	28.95	43.41	58.00	72.33	87.06	101.62
bogie 特徴量	2.01	3.01	4.01	5.02	6.02	7.03
bogie 類似度	30.62	46.07	61.41	76.85	92.40	107.64

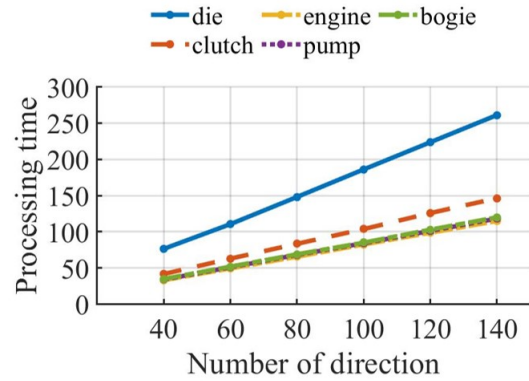


図 9: 視点数を変化させたときの処理時間

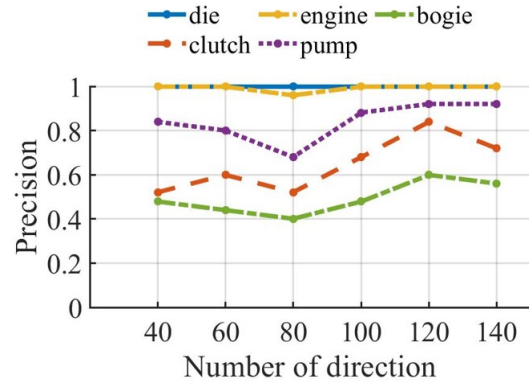


図 10: 視点数を変化させたときの検索精度

時間の削減がされづらいからである。

図 10 から、視点数の増加によって検索精度が向上していることがわかる。このとき、die, engine モデルが少ない視点数でも検索精度が高いのに対し、clutch, pump モデルは少ない視点では検索精度が低いのは、die, engine モデルと比べて clutch, pump モデルのように回転対称性が高いモデルでは、正しい視点の組み合わせ決定のために多くの視点数が必要だからである。視点数を増やしても bogie モデルでは検索精度が 6 割を超えない原因として、すべての部品の大きさがモデル全体の大きさに対して小さいため、部分空間の基底として十分な特徴量が得られなかったことが考えられる。

## 4.2 サンプリング数を変化させた実験

クエリモデルとデータベースモデルの特徴量計算を行う際のサンプリング数を変化させて実験を行い、処理時間と検索精度について評価を行う。実験では、クエリモデルとデータベースモデルの視点数を80に固定し、サンプリング数を80, 100, 120, 140, 160と変化させた。処理時間の結果を図11、検索精度の結果を図12に示す。図11の処理時間は、データベースモデルの特徴量計算と類似度計算にかかった時間の合計である。処理時間の内訳を表3に示す。

表2から、類似度計算にかかる時間は、特徴量計算にかかる時間と比較して大幅に多く、検索の処理時間の大半が類似度計算によるものということがわかる。図11から、処理時間はサンプリング数に比例することがわかる。これは、サンプリング数が増加すると部分空間の次元数が増加するため、類似度計算のQR分解や特異値分解の処理時間が増加するためである。このとき、dieモデルで処理時間が長いのは、視点数を変化させたときと同様に他のモデルと比べて部品の形状や大きさのばらつきが少ないためである。

図12から、サンプリング数の増加による検索精度の変化がほとんど見られないことがわかる。このとき、サンプリング数は部分空間の次元数なので、提案手法では部分空間の次元数は検索精度に影響しないと言える。die, engineモデルではサンプリング数の変化に関わらず十分な検索精度が出ているのに対して、clutch, pump, bogieモデルで検索精度が不十分である原因については、4.1節で述べたように、clutch, pumpモデルの回転対称性が高いこと、bogieモデルの形状では部分空間の基底として十分な特徴量が得られなかったことが考えられる。

## 5 おわりに

本研究では、3DCADモデルのアセンブリ構造を考慮した部分一致検索手法を、部品空間の比較に基づいて行う新たな部分検索手法の提案を行った。実験から、モデルの対称性によって、十分な精度の検索を行うために必要な特徴量計算の視点数が異なるが、部分一致検索が可能であることを示した。一方で、モデルを構成する部品の形状による検索の不安定性や、処理時間

表 3: サンプリング数を変化させたときの処理時間の内訳

	80	100	120	140	160
die 特徴量	1.87	2.18	2.57	2.88	3.23
die 類似度	108.13	184.79	275.41	458.70	583.93
clutch 特徴量	4.98	5.59	6.27	6.90	7.63
clutch 類似度	57.48	97.18	142.52	236.83	298.74
engine 特徴量	1.78	2.12	2.60	2.95	3.35
engine 類似度	47.26	80.66	117.58	181.91	237.21
pump 特徴量	8.61	9.70	11.04	12.23	13.52
pump 類似度	42.70	68.94	103.30	172.39	221.07
bogie 特徴量	3.38	3.69	4.02	4.39	4.28
bogie 類似度	43.09	62.79	96.04	135.57	153.90

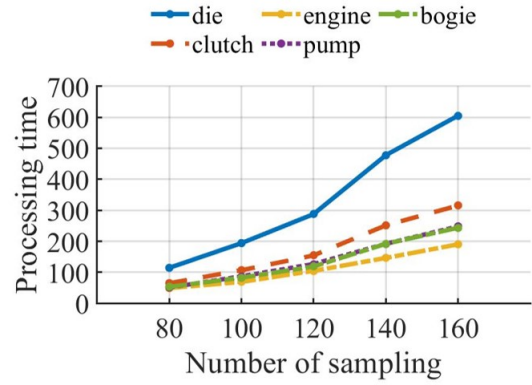


図 11: サンプリング数を変化させたときの処理時間

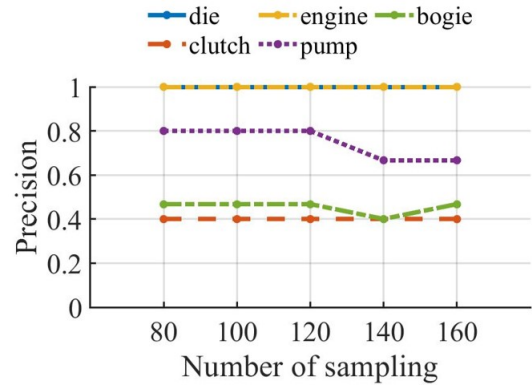


図 12: サンプリング数を変化させたときの検索精度

の高速化などの課題が挙げられる。本稿の提案手法で行っている部分空間を用いた類似度計算では、正規直交基底の計算や特異値分解についてのアルゴリズムの高速化は行っていないため、これらにより高速な検索手法を検討することができる。

## 文 献

- [1] 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.E103D, NO.5:992-1001, 2020.
- [2] Ding-Yun Chen, Xiao-Pei Tian, Yu-Te Shen and Ming Ouhyoung, "On visual similarity based 3d model retrieval," The Eurographics Association and Blackwell Publishers, Volume 22 (2003), Number 3, 2003.
- [3] Jinlin Ma and Ziping Ma, "3d radon transform for shape retrieval using bag-of-visual-features," The International Arab Journal of Information Technology, Vol.17, No.4:471-479, 2020.
- [4] Jia Li, Zikuan Li, Huan Lin, Renxi Chen, and Qi-uping Lan, "Spherical harmonic energy over gaussian sphere for incomplete 3dshape retrieval," IEEE ACCESS, VOL.8:183117-183126, 2020.
- [5] Weizhi Nie, Ya Wang, Dan Song, and Wenhui Li, "3d model retrieval based on a 3d shape knowledge graph," IEEE ACCESS, VOL.8:142632-142641, 2020.
- [6] Chenyang Zhu, Renjiao Ti, Wallace Lira, Ibraheem Al-hashim, Kai Xu, and Hao Zhang, "Deformation-Driven Shape Correspondence via Shape Recognition," ACM Transactions on Graphics, Vol. 36, No. 4, Article 51. Publication date: July 2017.

- [7] Zhoupeng Han, Rong Mo, and Li Hao, "Clustering and retrieval of mechanical cad assembly models based on multi-source attributes information." *ROBOTICS AND COMPUTER-INTEGRATED MANUFACTURING*, VOL.58:220–229, 2019.
- [8] Katia Lupinetti, Franca Giannini, Marina Monti, and Jean-Philippe Pernot, "Multi-criteria retrieval of cad assembly models," *JOURNAL OF COMPUTATIONAL DESIGN AND ENGINEERING*, VOL.5:41–53, 2018.