3次元CADモデルのための部品配置を考慮したサイノグラムを用いた部 分モデル検索

佐藤 渉† 片山 薫††

† 首都大学東京東京大学院 システムデザイン研究科 情報通信システム学域
 E-mail: †satou-wataru@ed.tmu.ac.jp, ††kaoru@tmu.ac.jp

あらまし 近年, CAD を用いたモデル設計が普及したことにより,3次元モデルの数が年々増加している. 蓄積され たモデルの管理や再利用のために,3次元モデルの検索技術への需要が高まることが期待され,3次元モデルの検索手 法に関する研究が数多く行われている.しかしながら,これまでに提案されてきた手法の多くが,3次元モデルの形 状識別を目的とした手法であるため,機械設計などで用いられる,複数の部品が組み合わさることで構成されるアセ ンブリモデルの識別が難しい.そこで我々は,アセンブリモデルを対象とした部分検索手法の提案を目的とした研究 を行った.提案手法ではまず,アセンブリモデルをメッシュデータからボクセルデータへと変換する.その際に,部 品に付与された材質情報を基にして,モデルを同じ材質を持つ部品群へと分割する.分割した部品群ごとに,様々な 視点に対して垂直な2次元平面へとモデルを投影することで得られる投影画像を計算し,投影画像に対してラドン変 換を施して得られるサイノグラムをモデルの特徴として用いる.サイノグラムの差を同じ材質の部品群ごとに計算し, 差の小さくなるサイノグラムのペアを,部品群同士の結合関係を考慮した上で検出することによって,部分的な部品 配置の一致を識別する.しかし,部品に付与される材質情報が統一されておらず,どの部品群同士が対応するかが不 明となる状況が想定される.そこで我々は部品群に含まれる各部品の体積と,部品群内の総部品数を基にしながら, 部品群の対応関係を推定した上でモデル間の部分的な部品配置の一致を識別する方法を提案する.評価モデルとして, 形状の異なる3種類のアセンブリモデルに対し,部品総数や部品配置が異なるモデルをそれぞれ25個用意して,提案 手法を実験的に評価した.

キーワード 3次元 CAD アセンブリモデル,部分検索,部品配置,投影画像,サイノグラム

1. はじめに

近年,製造業などでは CAD を用いたモデル設計が普及して おり,3次元 CAD モデルの数が年々増加している.蓄積され たモデルデータを効率よく管理するためには,モデルの検索技 術が必要となる.特に,モデルの部分的な構造の一致を識別す る方法があれば,より柔軟なモデルデータベースの横断が可能 となる.設計者がモデルデータベースから必要なモデルを検索 できれば,過去のモデルに含まれている設計のノウハウを活用 し,新しいモデルの設計をより効率よく行うことができる.こ うした背景から,3次元モデルの検索技術に関する研究が盛ん に行われているものの,そのほとんどは,モデルの形状,すな わち外観の情報を基にした検索技術となっている.しかしなが ら,機械設計などの分野で使用されるようなモデルは,複数の 部品が組み合わさることで1つのアセンブリモデルを構成して いることが多く,従来の外観による検索技術では,モデルの内 部構造を識別できず十分とは言えない.

そこで我々は、モデルの外観だけでなく、構成部品の配置も 考慮した3次元アセンブリモデルの部分検索手法を提案する. 図1に示す3種類のモデルを例に、本稿で取り扱う、アセンブ リモデルの部分一致検索について説明する.図1(a)をクエリモ デルとしたとき、図1(b)及び図1(c)のモデルは、クエリモデ ルと外観のみを比較した際には部分的に一致するモデルとなっ ている.図1(a),(b),(c)のモデルを展開して,内部部品が視認 できるようにしたものを,それぞれ図1(d),(e),(f)に示す.こ れらの展開図を踏まえて,図1(a)のクエリモデルと,図1(b) 及び図1(c)を比較するときでも,構成部品の形状のみを比較 する際には,クエリモデルに部分的に一致するモデルとなる. しかし,モデルの構成部品は材質情報も保有しており,図1に おいては便宜上,材質情報を部品色によって表現している.こ の部品材質も踏まえて,改めて図1(a)のクエリモデルと,図 1(b)及び図1(c)を比較するとき,図1(b)のモデルはクエリモ デルと構造が部分的に一致しているが,図1(c)のモデルは,黄 色で表された部品の位置が,クエリモデルとは一致しない.こ のため我々は,図1(b)のモデルは不一致モデルとして取 り扱う.

我々はアセンブリモデルの部分検索を実現するために,様々 な視点から得たアセンブリモデルの投影画像に対し,ラドン変 換を施して得られるサイノグラムの差を比較する手法を提案す る.サイノグラムの差を計算する際に,その負の値にのみ着目 することで,クエリモデルとは部品総数の異なるモデルであっ ても,部品配置が部分的に一致するようなモデルのみを識別で きる.

材質毎に,材質情報としてどのような識別子を用いるかは, モデルの製作者によって異なることが想定される.そこで本稿



(d) (a) の展開図(e) (b) の展開図(f) (c) の展開図図 1 本稿で取り扱う 3 次元 CAD アセンブリモデルの一例

では,アセンブリモデルに含まれる部品の体積及び部品数を基 に,材質情報の対応関係を推定した上で検索を行う.

提案手法を実験的に評価するために,形状の異なる Clutch, Die, Gear の3種類のモデルについて,部品総数や部品配置の 異なるモデルをそれぞれ 25 個用意した.評価実験により,提 案手法が部分一致するアセンブリモデルを識別可能であること を示す.

2. 関連研究

3次元モデルの検索に関する研究は盛んに行われている. Chen ら [2] は、いくつかの正十二面体の頂点から3次元モデル のシルエット画像を得て, "LightField Descriptor(LFD)" と呼 ばれる特徴を構成して3次元モデルの形状識別を行った. Zhu ら[3]は、様々な視点から3次元モデルの深さ画像を計算し、こ れらを学習データとした深層学習による検索手法を提案してい る. モデルの局所特徴から "Bags of visual-words(BoVW)" を 構成して識別を行う方法も提案されている. 古屋ら [4] は, モデ ルの深さ画像から、画像の特徴点を検出する "SIFT" [6] アルゴ リズムにより得た局所特徴を基に "BoVW" を構成してモデル 検索を行った. また, Bronstein ら [5] は, Laplace-Beltrami 作 用素の熱核を基として得た3次元モデルの局所特徴から BoVW を構成して識別に利用する "Shape google" と呼ばれる手法を 提案した.小坂ら [8] は,深さ画像から"KAZE" [7] アルゴリズ ムによって局所特徴を得て, BoVW を発展させた "Vector of Locally Aggregated Descriptors"をモデルの識別に用いる手 法を提案している. KAZE は、特徴点の検出に非線形スケール スペースを利用することで, SIFT においてモデルの輪郭がぼ やけてしまう点を改善したものである.このように、3次元モ デルの検索手法は数多く提案されているものの、これまでに挙 げた手法は、3次元モデルの形状識別を目的とした手法である ため,アセンブリモデルのような,内部構造を持つ3次元モデ ルの識別は難しい.

3次元アセンブリモデルを対象とした検索手法として、Desh-

mukh ら [9] は 3 次元モデルの構成部品を頂点としたグラフを 作成する手法を提案した. グラフ検索を利用することにより 部品の接続関係を考慮した検索を行うことができる. また Hu ら [10] は,アセンブリモデルの構成部品単位で LFD を構成し, 部品単位のマッチングを行うことでアセンブリモデルの識別を 行う手法を提案した. これらの手法では,部品材質を考慮した, 部品配置の識別までは行っていないため我々の提案する手法と は異なる.

3. 提案手法

本節では、本稿で提案する3次元 CAD アセンブリモデルの 部分検索手法について述べる.部分検索においては、クエリモ デルに包含されるモデルを検索する場合と、クエリモデルを 包含するモデルを検索する場合が考えられるが、本稿では前 者を前提とする.後者の場合でも、後述する差の方向を変更す ることで対応できる.本稿で提案する、3次元 CAD アセンブ リモデルの部分検索を行うアルゴリズムを Algorithm 1 に示 す. Algorithm 1 は、以下に示すステップによりデータベース モデルとクエリモデルの比較を行う.ステップ (1) については 3.1節にて、ステップ (2)(3) については 3.2 節にて、ステップ (4)(5) については 3.3 節において詳細を述べる.

(1) データベースモデル及びクエリモデルのサブアセンブ リの全ての組み合わせの中から,対応候補となる組み合わせを 探す.

(2) "Geodesic Sphere"の頂点座標から2次元平面への投 影画像を,データベースモデルとクエリモデルの各サブアセン ブリについて計算する.

(3) ラドン変換によって投影画像からサイノグラムを構成 する.

(4) 対応候補となるサブアセンブリの組について,サイノ グラム間の相違度を計算する.

(5) 得られた相違度を基に、データベースモデルとクエリ モデルのサブアセンブリの対応関係を決定して、そのときの相 違度をデータベースモデルとクエリモデルの間の相違度として 返す.

ここで,アセンブリモデル内で同じ材質ラベルを持つ部品の 集合をサブアセンブリと呼ぶ.また,アセンブリモデル m の サブアセンブリを集合 SA(m) として表し,m に含まれる部品 からなる集合を C(m) のように表す.同様に,サブアセンブリ $sa \in SA(m)$ について,C(sa) は sa に含まれる部品の集合を 表す.本稿では,C(sa) には同じ部品のみ含まれるものとする.

3.1 サブアセンブリの対応候補検出

データベースモデル m^d とクエリモデル m^q が与えられたと き、2 つのアセンブリモデル間の材質情報の対応関係が不明と なるため、まず m^d に含まれるサブアセンブリ毎に、 m^q のどの サブアセンブリが同じ部品を含んでいるかを判定する。サブア センブリ $sa^d \in SA(m^d)$ および $sa^q \in SA(m^q)$ について、 sa^d に含まれる部品 $c^d \in C(sa^d)$ の体積 $Vol(c^d)$ と、 sa^d に含まれ

Algorithm 1

ComputeAssemblyDissimilarity $(m^d, m^q, V^d, V^q, A^d, A^q)$
Input: データベースモデル m^d , クエリモデル m^q , Geosedic Sphere
の頂点座標集合 $V^d, V^q,$ ラドン変換の投影角度集合 A^d, A^q
Output: m^d, m^q 間の相違度 ad
1: $CSA \leftarrow \emptyset$
$2: \ CSAD \leftarrow \emptyset$
3: $ad \leftarrow \infty$
4: $CRP \leftarrow \mathbf{CorrespondSubassembly}(m^d, m^q)$
5: for all $sa^d \in SA(m^d)$ do
6: if $CRP[sa^d] = \emptyset$ then
7: return ad
8: end if
9: end for
10: $CSA \leftarrow MakeSubassemblyPairs(CRP)$
11: $F^d \leftarrow \mathbf{ComputeFeature}(m^d, V^d)$
12: $F^q \leftarrow \mathbf{ComputeFeature}(m^q, V^q)$
13: for all $v^d \in V^d$ and $v^q \in V^q$ do
14: for all $sa^d \in SA(m^d)$ do
15: for all $sa^q \in CRP[sa^d]$ do
16: $sngd((sa^d, v^d), (sa^q, v^q))$
$\leftarrow \textbf{CompareSinogram}(F^d(sa^d,v^d),F^q(sa^q,v^q))$
17: end for
18: end for
19: for all $csa \in CSA$ do
20: $sngd((sa^d, v^d), (sa^q, v^q))$ にサイズの等しい配列
$sd(csa,v^d,v^q)$ を初期化する.
21: for all $(sa^d, sa^q) \in csa$ do
22: $sd(csa, v^d, v^q)$
$\leftarrow sd(csa, v^d, v^q) + sngd((sa^d, v^d), (sa^q, v^q))$
23: end for
24: $csad' \leftarrow \mathbf{ArrayMin}(sd(csa, v^d, v^q), 1)$
25: $csad' \leftarrow \mathbf{ArraySum}(csad', 1)$
26: $CSAD[csa]$ の要素 $csad(v^d, v^q)$ として $csad'$ の最小値を
<i>SA</i> (<i>m^d</i>) で除算した値を追加する.
27: end for
28: end for
29: for all $csa \in CSA$ do
30: $d \leftarrow \mathbf{ComputeCorrespondDistance}(CSAD[csa], V^d, V^q)$
31: if $d < ad$ then
32: $ad \leftarrow d$
33: end if
34: end for
35: return ad

る部品総数 $|C(sa^d)|$ を, sa^q に含まれる部品 $c^q \in C(sa^q)$ の体 積 $Vol(c^q)$ 及び, sa^q に含まれる部品総数 $|C(sa^q)|$ とそれぞれ 比較する.体積比 $|Vol(c^q)/Vol(c^d) - 1|$ が閾値 t よりも大きけ れば, c^q は c^d とは異なる部品とみなし, sa^d は sa^q に含まれ ないとみなす.また, $|C(sa^d)|$ が $|C(sa^q)|$ よりも大きい時は, 明らかに sa^d は sa^q に含まれない. Algorithm 2 に, m^d と m^q のサブアセンブリ毎の対応を判定し,対応候補となるペアを格 納した集合 *CRP* を返すアルゴリズムを示す.

次に, CRPを基に, m^d のサブアセンブリに対して, m^q のサ







Algorithm 2 CorrespondSubassembly (m^d, m^q, t)

Input: データベースモデル m^d , クエリモデル m^q , 部品を識別する ための閾値 t(0 < t < 1)

Output: $m^d \ge m^q$ に含まれるサブアセンブリ毎の対応を表す集合 *CRP*

- 1: $CRP \leftarrow \emptyset$
- 2: for all $sa^d \in SA(m^d)$ do
- 3: for all $sa^q \in SA(m^q)$ do
- 4: **if** $|Vol(c^q)/Vol(c^d) 1| < t$ and $|C(sa^d)| \ge |C(sa^q)|$ where $c^d \in C(sa^d)$ and $c^q \in C(sa^q)$ **then**
- 5: add (sa^d, sa^q) to CRP
- 6: end if
- 7: end for
- 8: end for
- 9: return CRP

ブアセンブリが一対一に対応するような組み合わせを全て求め, 集合 *CSA* を構成する. この処理は, Algorithm 1 の 10 行目にお ける関数 **MakeSubassemblyPairs**(*CRP*) によって行う. 例 えば, *CRP* = { $(sa_1^d, sa_1^q), (sa_1^d, sa_2^q), (sa_2^d, sa_1^q), (sa_2^d, sa_2^q))$ } であるとき, 戻り値 *CSA* は, *CSA* = { $(((sa_1^d, sa_1^q), (sa_2^d, sa_2^q)))$, $((sa_1^d, sa_2^q), (sa_2^d, sa_1^q))$ } となる. 材質情報の一対一対応が取れ ず, |*CSA*| = 0 となる場合には, $m^d \ge m^q$ は異なるアセンブ リモデルと判断して, 処理を終了する.

3.2 アセンブリモデルの特徴量

ー般に、3次元モデルの空間上における位置や姿勢は製作者 によって異なるため、モデルの平行移動や回転に対して頑健な 特徴量が必要となる.そこでまず、モデルの仰角及び方位角方 向の回転に対して頑健な特徴量を得るため、ある視点に垂直な



図 5 投影ベクトル間の相違度計算概念図

Algorithm 3 ComputeFeature(m, V, A)

Input: 3 次元 CAD アセンブリモデル m, 投影画像を得るための Geodesic Sphere の頂点座標集合 V, ラドン変換の投影角度集合 A

Output: m の特徴量 F(SA(m), V)

1: for all $v \in V$ do

- 2: for all $sa \in SA(m)$ do
- 3: 視点 v からの sa の 2 次元平面への投影画像 p を得る.
- 4: 角度集合 A における p のラドン変換の結果を 2 次元
 配列 snqp に格納する.
- 5: F(SA(m), V)の要素 f(sa, v) として sng_p を追加する.
- 6: end for
- 7: end for
- 8: return F(SA(m), V)

2 次元平面へのモデルの投影画像を計算する.ここで,投影画 像計算の概念図を図 2 に示す.ここで使用する視点には,正多 面体を拡張して得られる "Geodesic Sphere" の頂点座標を利用 する.

次に,得られた投影画像に対してラドン変換を施し,サイノ グラムを構成する.ここで,画像に対する,角度 θ におけるラ ドン変換の概念図を図 3 に示す.サイノグラムは,図 3 におい て, θ を変化させながら投影ベクトルを計算し,得られた投影 ベクトルを,図 4 のように横に並べることで構成される.サイ ノグラムには,原画像の回転を角度方向の平行移動に変換し, 平行移動を動径方向のゆらぎに変換するという特徴がある.

通常サイノグラムは、 $0^{\circ} \leq \theta < 180^{\circ}$ の範囲で投影ベクトル を計算して構成されるが、サイノグラムの位置合わせによって 投影軸方向の回転に対応するために、クエリモデル m^{q} 側のサ イノグラムについては、 $0^{\circ} \leq \theta < 540^{\circ}$ の範囲で投影ベクト ルを計算する. Algorithm 3 に、3 次元 CAD アセンブリモデ ル m の特徴量抽出手順を示す. 前述の通り、 m^{d} については $|A^{d}| = 180$ となり、 m^{q} については $|A^{q}| = 540$ となる.

3.3 アセンブリモデル間の相違度

集合 *CRP* に含まれる m^d 及び m^q のサブアセンブリの対応候 補 (sa^q, sa^d) 毎に、サイノグラムの比較を行い、候補 (sa^d, sa^q) における相違度を計算する. この処理は, Algorithm 1 におけ る, 14 行目から 18 に相当する.

サイノグラム sng^{d} 及び sng^{q} の比較は, m^{d} 及び m^{q} の 3 次元空間上における位置や姿勢のずれを埋め合わせるために, sng^{d} を動径方向及び角度方向に移動させながら, sng^{q} との差 を投影ベクトル単位で計算することで行っている. sng^{d} 及び sng^{q} には, それぞれサブアセンブリ sa^{d} 及び sa^{q} の部品配置が 反映されており, 差の絶対値 $|sng^{q} - sng^{d}|$ は, 部品配置の異な りの度合いである相違度を表す. ここで, $C(sa^{q}) > C(sa^{d})$ で あるときには, 部品配置が部分一致していても, 差 $sng^{q} - sng^{d}$ には正の要素が残る. そこで, 差 $sng^{q} - sng^{d}$ において 0 より 大きい要素については全て 0 に置き換えてから, 相違度を評価 することにより, 部品総数が異なっていても部品配置の部分一 致を評価することができる. また, $|sng^{q} - sng^{d}|$ を $Vol(sa^{d})$ によって除算することで, 体積の大きいサブアセンブリによる 相違度計算結果が支配的となることを防ぐ.

ただし,候補 (sa^d, sa^q) について得られた相違度から,動径 方向及び角度方向に最もマッチする位置を求めてしまうと, サ ブアセンブリの対応候補 (sa^q, sa^d) 毎に位置や姿勢のずれの位 置合わせ結果が異なってしまうため, m^d 及び m^q の各サブア センブリの配置関係が失われてしまう. そこで, Algorithm 1 の 19 行目から 27 行目に示すように、サブアセンブリの対応 候補 (sa^q, sa^d) 毎に計算した相違度を, m^d 及び m^q のサブア センブリの一対一対応の候補 csa ∈ CSA に従い足し合わせて から,動径方向及び角度方向の位置合わせを行って得られた m^d 及び m^q の対応 csa における相違度を集合 CSAD[csa] に 追加することで,アセンブリモデル全体として m^d 及び m^q の 位置合わせを行っている. ここで,相違度を足し合わせる回 数は |SA(m^d)| に依存するため、離散誤差の蓄積を考慮して、 Algorithm 1 の 26 のように、位置合わせにより得られた相違 度を $|SA(m^d)|$ で除算している. また, Algorithm 1 における 関数 ArrayMin(a, dim) 及び関数 ArraySum(a, dim) はそ れぞれ,多次元配列 a の dim 次元における最小値を求める関 数及び, aの dim 次元の要素を総和する関数となる。例えば, サイズ $n_y \times n_x$ の配列 a に対して, ArrayMin(a,1) は, a の 各列ベクトルについて最小の要素を求めた,サイズ n_xのベク トルを返す. また, $\operatorname{ArraySum}(a,1)$ は, aの各列ベクトルに ついて,その列ベクトルの全ての要素の和を求めた,サイズ n_x

Algorithm 4 CompareSinogram (sng^d, sng^q)

Algorithm 5 ShiftMatching (pv^d, pv^q)

Input: サイズ |P| の投影ベクトル pv^d , pv^q **Output:** *pv^d*, *pv^q* 間の相違度ベクトル *pvd* 1: サイズ 2|P|+1 のベクトル pvd を初期化する. 2: for i = -|P| to |P| do $pv' \leftarrow \mathbf{shift}(pv^q, i)$ 3: $pvd' \leftarrow pv' - pv^d$ 4:for k = 1 to $|pv^d|$ do 5:6: if pvd'[k] < 0 then 7: $pvd[i + |P|] \leftarrow pvd[i + |P|] + \mathbf{abs}(pvd'[k])$ 8: end if end for 9: 10: end for 11: return pvd

のベクトルを返す.

投影点 $v^d \in V^d$ 及び $v^q \in V^q$ の全組み合わせについて、サ イノグラムの比較による相違度を求めたあとは、 $csa \in CSA$ の 中から,最も m^d, m^q 間の相違度が低くなるサブアセンブリ の対応関係を探す. このときの m^d , m^q 間の相違度が. その ままデータベースモデル m^d とクエリモデル m^q の最終的な相 違度となる. この処理を, Algorithm 6 に示す. Algorithm 6 における処理は, $csa \in CSA$ における, 投影点 $v^d \in V^d$ 及び $v^q \in V^q$ の全組み合わせについて, CSAD[csa]に格納された 相違度を基にして、相違度が最も低くなる投影点の組を、同じ 視点を重複して選ばないようにしながら探す処理となる.

4. 評価実験

提案手法を評価するために,GrabCAD [11] から取得した, 形状の異なる Clutch, Die, Gear の3種類のモデルを使用し た実験を行った. 各モデルの形状を図 6 に示す. Clutch, Die, Gear の各形状につき, 25 個のモデルを作成してアセンブリモ

Algorithm 6

ComputeCorrespondDistance($CSAD[csa], V^d, V^q$)

- Input: V^d 及び V^q より得た, m^d 及び m^q のサイノグラム毎の相違 度を含む集合 CSAD[csa], Geodesic Sphere の頂点座標集合 V^d , V^q
- **Output:** サブアセンブリの対応関係を csa とした際のアセンブリモ デル間の相違度 d
- 1: $d \leftarrow 0$
- 2: $W \leftarrow V^q$
- 3: while $W \neq \emptyset$ do
- CSAD[csa]内の最小値 $csad(v^d, v^q)$ を求める. 4:
- $d \leftarrow d + csad(v^d, v^q)$ 5:
- 6. $csad[v^d]$ の要素を全て取り除く.
- $csad[v^q]$ の要素を全て取り除く. 7:
- Wから要素 v^q を取り除く. 8.
- 9: end while
- 10: return pvd



(**b**) Die (a) Clutch (c) Gear 図 6 使用する 3 次元 CAD アセンブリモデル



(a) Clutch (\mathbf{c}) Gear (\mathbf{b}) Die 図 7 クエリモデルの部品配置

デルデータベース M^d を構成した.全てのデータベースモデル に対して、ランダムな平行移動と回転を加える.

図8から図12に、Dieモデルを例とした、各データベースモ デルの展開図を示す.これらのデータベースモデルは、クエリ モデルとの差異によって A から E の 5 グループに大別される.

図8に示すグループAおよび図9に示すグループBに属す るモデルは、クエリモデルとサブアセンブリ数が異なるモデル となる.図10に示すグループCおよび図11に示すグループ Dに属するモデルは、クエリモデルとはサブアセンブリ数が同 じであるものの,特定のサブアセンブリ内の部品総数が異なる モデルである.最後に,図12に示すグループEに属するモデ ルは、クエリモデルとはサブアセンブリ数が異なり、さらに特 定のサブアセンブリ内の部品総数も異なるモデルとなっている.







 (\mathbf{a}) die_A1 (**b**) die_A2 (**c**) die_A3 (**d**) die_A4 (\mathbf{e}) die_A5 図 8 データベースモデル (グループ A)







 (\mathbf{e}) die_B5

 (\mathbf{a}) die_B1 (\mathbf{b}) die_B2 (\mathbf{c}) die_B3 (\mathbf{d}) die_B4 図 9 データベースモデル (グループ B)

データベースモデルの名称における数字は、クエリモデルと の関係性を表している. A1, B1, C1, D1, E1 の5つのモデル が, クエリモデルと部品配置が部分一致する正解モデルとなり, これ以外のデータベースモデルについては、全てクエリモデル とは部品配置のみが異なる不正解モデルとなる.

クエリモデルとして, Clutch, Die, Gear それぞれに対して 図7に示すアセンブリモデルを用意した. Clutch, Die, Gear それぞれのクエリモデルについて、ランダムな平行移動と回転 を施したものを 10 個ずつ用意し,計 30 個のアセンブリモデル によって, クエリモデルの集合 M^q を構成した.

本稿では、提案手法の検索精度を、以下に示す "R-Precision" によって評価する.

R-Precision = <u>検索結果上位 R 件の</u>うちの正解数 R.

ここで、検索結果上位 R 件とは、全てのデータベースモデル M^d と、あるクエリモデル $m^q \in M^q$ との相違度を計算した際 の, m^q との相違度が低いものから R 件のデータベースモデル を指す.また,Rはあるクエリモデル $m^q \in M^q$ に対して, M^d に含まれる正解モデルの総数を表しており、本実験では前述の 通り, R=5となる.

実験は、ソースコードを MATLAB によって記述し、Intel Core i7 3.7GHz CPU, NVIDIA GeForce GTX 1070 Ti GPU, 32GB RAM, OS に Windows 10 Education を搭載したコン ピュータ上で MATLAB R2017a を実行して行った.

4.1 3次元 CAD アセンブリモデルの部分検索

我々は、前述のアセンブリモデルを用いた評価実験を行った.









(e) die_C5

(e) die_D5

(a) die_C1 (**b**) die_C2 (**c**) die_C3 (**d**) die_C4 図 10 データベースモデル (グループ C)







 (\mathbf{c}) die_D3 (\mathbf{a}) die_D1 (\mathbf{b}) die_D2 (\mathbf{d}) die_D4 図 11 データベースモデル (グループ D)



 (\mathbf{a}) die_E1 (b) die_E2 (c) die_E3 (d) die_E4図 12 データベースモデル (グループ E)

(e) die_E5

ここで、CAD モデルをメッシュデータからボクセルデータへ と変換する際のボクセルグリッドの大きさを 128×128×128 とし、データベースモデルの投影画像計算における Geodesic Sphere の頂点数を 162, クエリモデルの投影画像計算における Geodesic Sphere の頂点数を 26 として設定した. また, Algorithm 2 における, 部品を識別するための閾値 t を 0.2 として 設定した.

評価実験において、各クエリモデル及び各データベースモデ ルのサブアセンブリの対応候補を求めた際の |CRP| を表1に, |CSA|を表2にそれぞれ示す.ここで,表1及び表2の各行は クエリモデルの形状を, 各列は比較したデータベースモデルの グループをそれぞれ表す.表2より, Clutch をクエリモデルと した際には、データベースモデルの内 Die A から Die E 及び Gear A から Gear E のサブアセンブリとの対応候補を求めた際 の |CSA| が全て 0 となっていることが確認できる.また Die 及 び Gear をクエリモデルとした際にも,異なる形状を持つデー タベースモデルとのサブアセンブリとの対応候補を求めた際の |CSA| が全て0となっていることが確認できる. 従って表2か ら、サブアセンブリの対応候補を求めることで、異なる形状を 持つアセンブリモデルとの比較を除外できることが分かる.

図 13 から図 15 に, Clutch, Die, Gear のクエリモデルを使 用した際の相違度データを示す. ここで, 前述の通りサブアセ ンブリの対応候補を求めることで,異なる形状を持つデータ ベースモデルとの比較を除外できたため,図13から図15の相 違度データは、クエリモデルと同じ形状を持つデータベースモ デルとの相違度データのみを掲載している. 例えば図 13の横軸 におけるモデル名は Clutch A1 から Clutch E5 を表しており, Die A1 から Die E5 及び Gear A1 から Gear E5 については,

図 13 には掲載されていないものの,相違度は全て∞となって いる.また,相違度データは Clutch, Die, Gear のそれぞれ 10 個のクエリモデルとデータベースモデルを比較することで得ら れた相違度データの平均値である.加えて図 16 に,各クエリ モデル毎の R-Precision を示す.図 13 から図 15 から,全体と して正解である A1, B1, C1, D1, E1 のデータベースモデルの 相違度が,これ以外のデータベースモデルの相違度よりも低く なっていることが確認できる.また,図 16 から,姿勢パター ンによっては精度が低下してしまうことがあるものの,全体と して R-Precision の値が高いことが確認できる.従って,提案 手法が部品総数の異なるモデルであっても,部品配置の部分一 致を識別できていることが分かる.

図 17 及び図 18 に, Clutch, Die, Gear のそれぞれのクエリ モデルについて, データベースのグループ A からグループ E の各モデルとの相違度計算を行う際の特徴量抽出処理時間及び, 相違度計算処理時間をそれぞれ示す.図 17 及び図 18 から,提 案手法における処理時間の大半を相違度計算処理が占めている ことが確認できる.また, Clutch, Gear に比べ, Die モデルの 相違度計算処理時間が突出していることが確認できる.サイノ グラム間の相違度計算処理を行う回数は, Algorithm 1 におい て,比較を行うアセンブリモデル $m^d \in M^d$ 及び $m^q \in M^q$ 間 のサブアセンブリの対応候補数 |CRP| に依存する.このため, 表 1 における |CRP|の値が大きい Die モデルの相違度計算処 理時間が増大してしまう.

4.2 相違度の取り扱いによる識別への影響

3.3 節において述べたように,提案手法では,サイノグラムの比較により得た相違度に対して以下の処理を施している.

(1) Algorithm 4の7行目に示す、サブアセンブリ sa^dの
 体積 Vol(sa^d) による除算

(2) Algorithm 1 の 26 行目に示す, m^d のサブアセンブリ
 数 |SA(m^d)| による除算

これらの処理の有効性を確認するため,(1)(2)の処理をどち らか一方もしくは両方行わない場合での,検索精度である R-Precision を評価した.ここで,R-Precisionの評価は,10 個存 在する Clutch, Die, Gear それぞれのクエリモデルについて,1 番目のクエリモデルを用いて行った.図19 に,各処理パターン における R-Precision を示す.ここで,パターン1 では(1)(2) の処理をどちらも行い,パターン2 では(1)のみ行う.また,パ ターン3 では(2)のみ行い,パターン4 は(1)(2)のどちらも行 わない.図19 から,パターン3 及びパターン4 の R-Precision が低くなっていることが確認できる.このため,(1)の処理が 部分検索精度の向上に有効であることが分かる.また,パター ン2 については,パターン1 と比較して,Clutch をクエリモ デルとした際の R-Precision のみが低くなっている.このため, (2)の処理についても,影響は大きくないものの,部分検索精 度の向上に有効であることが分かる.

表 1 クエリの形状及び比較するグループ毎の |CRP|

		(Clute	ch			Gear								
	А	В	С	D	Е	Α	В	С	D	Е	Α	В	С	D	Е
Clutch	7	6	10	15	12	1	1	1	1	1	4	8	9	8	9
Die	1	1	1	1	1	13	13	17	17	13	1	1	1	1	1
Gear	3	2	5	6	5	1	1	1	1	1	4	4	7	7	6

表 2 クエリの形状及び比較するグループ毎の |CSA|

		(Clut	ch		Die						Gear					
	А	В	С	D	Е	А	В	С	D	Е	Α	В	С	D	Е		
Clutch	4	2	4	12	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Die	0	0	0	0	0	24	24	24	24	24	0	0	0	0	0		
Gear	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2		



図 13 Clutch をクエリモデルとした際の相違度データ



図 14 Die をクエリモデルとした際の相違度データ



図 15 Gear をクエリモデルとした際の相違度データ







図 17 クエリの形状及びグループ毎の特徴量抽出処理時間



図 18 クエリの形状及びグループ毎の相違度計算処理時間

5. 結論と今後の課題

本稿では,投影画像から計算したサイノグラムを用いた,3 次元 CAD アセンブリモデルの部品配置を考慮した部分検索手 法を提案した.また評価実験によって,提案手法が部品配置が 部分一致するようなアセンブリモデルの識別を行えることを示 した.しかしながら,アセンブリモデル間の相違度計算処理に 時間がかかるため,処理時間の短縮が今後の課題となる.また, 識別精度をより向上させるためにも,アセンブリモデル間の部 品配置の異なりをさらに明瞭にできる部分検索手法の提案が必





要となる.

文 献

- K.Katayama and T.Sato, "Matching 3D CAD Assembly Models with Different Layouts of Components using Projections", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E98–D(6), pp. 1247–1250, 2015.
- [2] D.Y. Chen, X.P. Tian, Y.T. Shen, M. Ouhyong, "On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval", Computer Graphics Forum, Vol. 22, No. 3, pp. 223–232, 2003.
- [3] Z. Zhu, X. Wang, S. Bai, C. Yao, X. Bai, "Deep Learning Representation using Autoencoder for 3D Shape Retrieval", Neurocomputing, vol. 204, pp. 41–50, 2016.
- [4] T. Furuya, R. Ohbuchi, "Dense Sampling and Fast Encoding for 3D Model Retrieval Using Bag-of-Visual Features", In Proceedings of the ACM International Conference on Image and Video Retrieval, CIVR '09, pp. 26:1–26:8. ACM, 2009.
- [5] A.M. Bronstein, N.M. Bronstein, L.J. Guibas, M. Ovsjanikov, "Shape google: geometric words ans expressions for invariant shape retrieval", ACM TOG, Vol 30, No. 1, pp. 1–20, 2011.
- [6] D.G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", International Journal of Computer Vision, Vol. 30, Issue. 2, pp. 91–110, 2004.
- [7] P.F. Alcantarilla, A. Bartoli, A.J. Davison, "KAZE Features", Computer Vision – ECCV 2012, Springer Berlin Heidelberg, pp. 214–227, 2012.
- [8] 小坂 龍一, 立間 淳司, 青野 雅樹, "複数視点画像の局所特徴量を 用いた三次元物体の部分検索手法",映像情報メディア学会技術 報告, Vol 37, No. 56, pp.23–26, 2013.
- [9] A.S. Deshmukh, A.G. Banerjee, S.K. Gupta, R.D. Sriram, "Content-based assembly search: A step towards assembly reuse", Computer-Aided Design, Vol. 40, No. 2, pp. 244– 261, 2008.
- [10] K.M. Hu, B. Wang, J.H. Yong, J.C. Paul, "Relaxed lightweight assembly retrieval using vector space model", Computer-Aided Design, Vol. 45, No. 3, pp. 739–750, 2013.
- [11] GrabCAD, http://grabcad.com/library/