

違法造形物の3Dプリンタによる製造を規制するための 3Dデータ照合技術に関する研究

Research on 3D-data Matching Techniques for Regulating Fabrication of Illegal Objects Using 3D-printer

茂出木 敏雄
MODEGI Toshio

[抄録]

3Dプリンタに関しては、拳銃などの危険物が製造されたり、猥褻物の3Dデータが Web サイトにアップロードされるという刑事事件が既に発生している。今後、3Dプリンタや3D スキャナの性能向上とともに低価格化が進むと、異業種や個人のモノ作りへのハードルが低くなり、新規な問題が引き起こされる懸念がある。現在、国内で市販されているスキャナ、プリンタ複合機、Adobe Photoshop®など民生・業務用を問わず殆どの2D画像処理機器やツールには、中央銀行偽造防止グループ(CBCDG)が開発した紙幣の偽造防止ソフトウェアが実装されている。これと同様に、紙幣に匹敵する違法造形物の形状認証と出力規制が行えるセキュリティ機能を3Dプリンタ出力系に実装することが、今後重要になる。本稿では、違法造形物の3Dプリンタ出力を規制するための基盤となる、3Dプリンタ出力用データに対して出力可否判定を行うため、3Dポリゴンモデルをブラックリストに登録されている3Dモデルや2D画像と照合する各種技術に関する研究事例を紹介する。

キーワード：

3Dプリンタ、違法造形物、ブラックリスト、特徴ベクトル、ハイブリッド照合、部分照合

[Abstract]

There were already two kinds of criminal cases related to 3D-printer applications: producing weapons (handguns) and uploading 3D-data for creating obscene figures (sexual organs). From now on, as performance and price-down of 3D-printers and 3D-scanners will be progressing, barriers to entry in maker-business for both consumers and workers in miscellaneous industries will become lower. This will cause another inexperienced problems related to 3D-printer applications. The similar security system for 2D-imaging equipment such as photo-copy machines has been developed by the Central Bank Counterfeit Deterrence Group (CBCDG). This deterrence tool has been implemented into miscellaneous 2D-imaging processors even in photo-editing software such as "Adobe Photoshop®". Therefore, we think the similar system will be required, where it can inspect 3D-data processing in front-end of a 3D-

printer and control rejecting to fabricate illegal objects whose social impact is equal to bank notes. In this paper, we present examples of researches on miscellaneous matching techniques of 3D polygon-model data for 3D-printer output with registered 3D-models or 2D-images in black-list database, in order to suppress fabricating illegal objects.

Keywords:

3D-printer, illegal object, black-list, feature-vector, hybrid matching, partially matching

1. はじめに

3Dプリンタは、従来の切削加工や金型を用いた製造方法では実現できないクリエイティブな3D形状の造形を可能にし、スキルや資金に乏しい素人や個人に対してもモノ作りへの参入を容易にした。そのため、2013年5月に米国で、個人により3Dプリンタが拳銃製造に悪用されるという事件が発生した。その直後の2013年7月に、国内の家電量販店でも個人用の3Dプリンタの販売が開始されている。これに対して、筆者らは、3Dプリンタに3Dスキャナを加えた3D複写機でモノの違法コピーや模造品が製造される危険性を感じ、モノに対する“電子透かし”のようなセキュリティ技術の開発に着手した。図1は、3Dプリンタ出力造形物（立方体）の内部へQRコードを立体造形した例である。密閉型のタイプでは出力造形物を破壊しない限りQRコードの存在を確認できないが、産業用のX線CTで撮影した断層像からQRコードが読み取れることを確認できている。

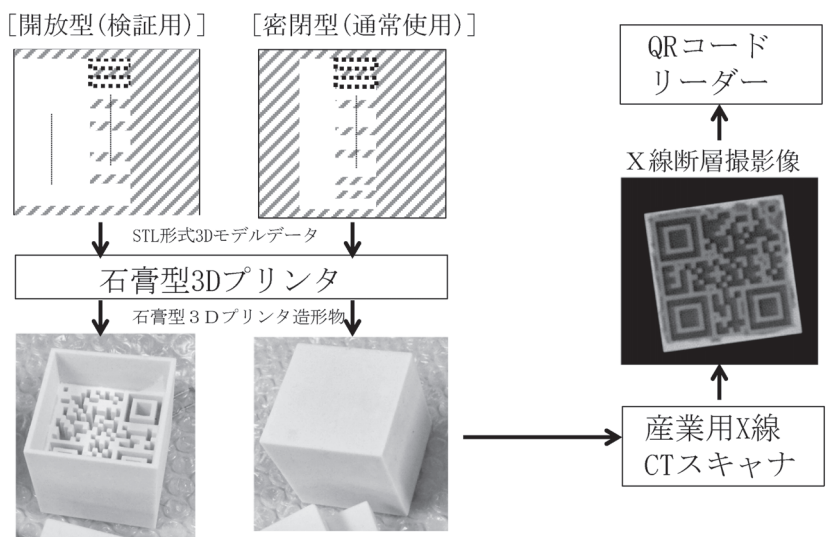


図1 X線CTで非破壊読み取り可能な3Dプリンタ出力造形物内部へのQRコードの埋め込み試作例

2D画像の分野において、カラーデジタル複写機が開発されていた1987年頃に、大規模な紙幣の偽造事件があったため、販売にあたり紙幣の偽造防止機能の搭載が検討された。現状では、国内で市販されているスキャナ、プリンタ複合機、Adobe Photoshop®など民生・

業務用を問わず殆どの2D画像処理機器やツールには、中央銀行偽造防止グループ(CBCDG)²⁾が開発した紙幣の偽造防止ソフトウェアが実装されている。これと同様に、出力データの形状認証と違法造形物の出力規制を行うセキュリティ機能を3Dプリンタ出力系に実装することが今後重要になると思われる。そこで、ウィルス対策ツールと同様に、違法造形物のポリゴンデータをあらかじめブラックリストに登録し、3Dプリンタ出力用ポリゴンデータに対してブラックリストと照合し、出力可否判定を行える3Dプリンタ出力規制システムの開発にも着手した³⁾。

3Dプリンタには、インターネットを介して情報だけでなく、モノを遠隔地に間接的に伝搬できる革新性を備えている(テレポーテーション機能⁴⁾)。そのため、これまで税関で規制されていた銃砲・刀剣などの危険物データが国境を越えて流布され、3Dプリンタによりモノとして容易に入手可能になるという問題が懸念される。更に、出力物の材料が樹脂であると、セキュリティゲートの金属探知機でも見逃されるという問題もある。もっとも、法人向けに金属材料が使用できる3Dプリンタも販売され始めており、金属製の銃砲・刀剣などが製造されるのも遠い話ではない。

筆者らが3Dプリンタのセキュリティ技術の開発に着手してから約1年後、前述の3Dプリンタ出力規制システムについて開発が進み、その成果につき文献⁵⁾⁻⁷⁾の通り対外発表を準備していた最中の2014年5月に、国内でも3Dプリンタによる拳銃製造の逮捕事件が発生した。その上、国内で猥褻物の3DデータがWebサイトにアップロードされるという逮捕事件も発生した(2014年7月)。米国では、2015年2月に、テレビのスポーツ中継で使用されたマスコット・キャラクタ“Left Shark”の3Dモデルが、“Shapeways”などのマーケットプレースにアップロードされるという著作権侵害事件も発生し、2015年9月に、TSA(米運輸安全局)鍵の空港検査用「マスターキー」の合鍵の3DデータがWebサイトにアップロードされる事件も発生している。今後、3Dプリンタや3Dスキャナの性能向上とともに低価格化が進むと、新規な問題が引き起こされる懸念がある。

表1 3Dプリンタ出力系にからむ各種リスクと対策

	A. 出力前段階 (PrePress)	B. 出力段階 (Press)	C. 出力後加工 (PostPress)
作業	CAD入力 3Dスキャナ入力 医療画像(CT/MRI)入力	3Dプリンタ出力	サポート材除去 表面加工・塗装・着色 金型作成、量産製造
想定されるリスク	<ul style="list-style-type: none"> ・3Dプリンタ出力用コンテンツの違法流通 ・3Dスキャナによる著作物の違法スキャン ・CADによる危険物・著作物の違法トレース入力 ・素人による人工臓器や臓器模型のデータ作成 	<ul style="list-style-type: none"> ・3Dプリンタ出力系への破損(トロイの木馬) ・危険物の出力(非行・治安悪化) ・著作権侵害物の出力 ・模造部品の出力 ・未承認人工臓器の出力 	<ul style="list-style-type: none"> ・出力部品の装着による間接的な装置破損 ・金型製造による危険物の大量頒布 ・金型製造による著作権侵害物の大量頒布 ・未承認人工臓器埋込みによる人的損傷
対策	<ul style="list-style-type: none"> ・既開発デジタルコンテンツ保護技術の流用(DRM、電子透かし) ・医用画像または医用画像処理フリーソフトの利用に関する法整備 	<ul style="list-style-type: none"> ・電子透かし読み取りによる出力規制 ・ブラックリストとの照合による出力規制(ポリゴン照合、特徴ベクトル照合) 	<ul style="list-style-type: none"> ・出力物にトラッキング用マークの付加(表面や内部にバーコード・電子透かしの付加) ・金型製造抑制用の造形物の付加

表1は、3Dプリンタによる制作工程を印刷業界の3P工程（PrePress, Press, PostPress）に当てはめて分けし、各々の工程で想定されるリスクと対策を整理したものである¹⁴⁾。まず、表1左端の3Dプリンタに渡される3Dポリゴンデータの流通に関する問題に対しては、既開発のデジタルコンテンツ向けのDRMや情報ハイディング技術を適用できる。一方、表1右端の3Dプリンタで出力される造形物に関する問題も3Dスキャナの高精度化に伴って、今後重要になる。例えば、前述の文献 1)で提案した造形物の内部に3D-QRコードを埋め込むなどの情報ハイディングやトレーサビリティ技術の新規開発が必要になる。最後に、表1中央は本稿の主題であり、前述の3Dプリンタ出力規制システムの開発等が必要になる。本稿では、この3Dプリンタ出力規制システムを実現するため、3Dプリンタ出力用ポリゴンデータに対してブラックリストと高速かつ高精度に照合する技術に関する研究開発事例を紹介する。

2. 提案する3Dプリンタ出力規制システムの概要

図2は本稿で提案する出力規制システムの基本構想図である⁶⁾。主要機能は、出力拒否すべき危険物や著作権侵害物のポリゴンデータを事前にブラックリストとしてDB登録しておき、入力された3Dプリンタ出力用データとDB登録されている全てのポリゴンデータとを照合し、適合するものが1件でも見つければ、3Dプリンタ出力系に出力拒否指令を出すものである。現状では単一の造形物の出力に平均数時間オーダーの時間を要するため、中央上の3Dプリンタ出力処理が開始されるとともに、同ポリゴンデータが中央下にも送られ、ブラックリストと順次照合される処理が並行して行われる。このポリゴンデータの照合技術が本稿の主題であり、詳細は次節以降で述べる。そして、ブラックリストと適合することが判明次第、出力中のプリンタジョブを中断させる制御を行う。

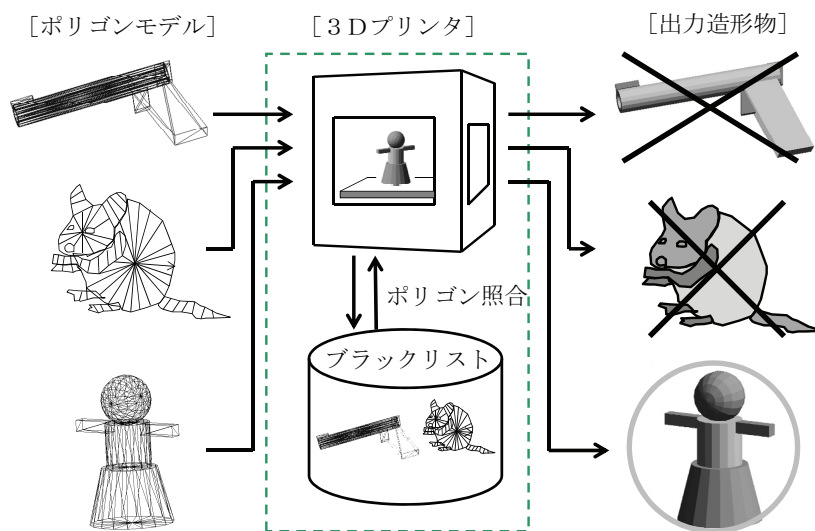


図2 3Dプリンタ出力規制システムの基本構想

ブラックリストは適宜追加登録される必要があり、特に著作権侵害物についてはその更新頻度が高くなることが予想される。そこでウイルス対策ツールと同様に、ネットワーク経由でデータベースを更新する方法が考えられるが、どのようなタイミングでデータベ

ス更新を行うかが問題になる。また、ブラックリストとの照合系を3Dプリンタ出力系に追加実装することは、フロントエンドPCや3Dプリンタ組み込みソフトの負荷が増大し、メーカー側との交渉を含めハードルが高い。そこで、ブラックリストとの照合系をクラウドで運用することを提案した⁸⁾⁹⁾。

図3にクラウド運用による3Dプリンタ出力規制システムの基本構想を示す。左下の3Dプリンタ出力用ポリゴンデータが既設3Dプリンタ出力系のフロントエンドに追加された増設プリンタ出力認証系に投入されると、後述のポリゴン削減処理を経て上側の3Dプリンタ出力データ認証サーバーにも転送され、出力可否の認証を受ける。もしクラウドより出力不可という認証通知書を受信すると、既設3Dプリンタ出力系に対して出力を中止するような制御が働き、前述と同様な規制を働かせることができる。この構成では、ネットワーク接続した増設プリンタ出力認証系を追加するだけで、既設の3Dプリンタ出力系に負荷を与えず、若干のソフトウェアの修正だけで実現できるため、導入ハードルが低いと考えられる。更に、ポリゴンデータをクラウドにアップロードする際、後述のポリゴン削減処理または特徴ベクトル変換処理により圧縮した形態で行われるため、転送負荷は殆ど問題にならない。

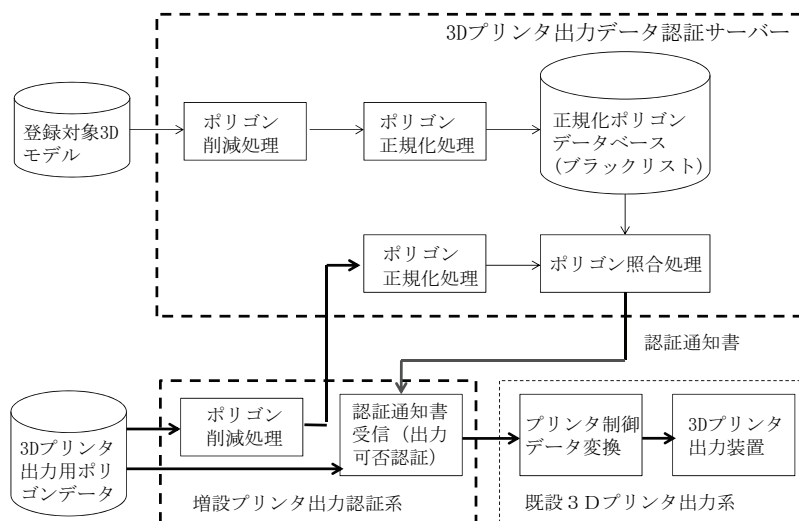


図3 クラウド運用による3Dプリンタ出力規制システムの基本構想

3. 提案するポリゴン照合方式とその問題点

3.1. ポリゴン照合の問題点と技術課題

図2で、プリンタ出力対象のポリゴンデータとブラックリスト内に登録されているDB登録ポリゴンデータとを照合するにあたっては次の7点の課題がある。

(1) 出力対象側とDB登録側の3Dモデルの各ポリゴンは必ずしも対応しておらず、総ポリゴン数は同一では無いことが少ないこと。曲面はポリゴン近似により表現されるが、ポリゴン分割密度が一意でないこと。

(2) 3Dプリンタ出力用データの代表的な形式であるSTLでは、各三角形の頂点座標の単

位は絶対寸法では無く、出力対象側とDB登録側とで一般にスケールが合っていないこと。

(3) 3Dモデルの角度は、モデル作成時に基本的に決められるが、プリンタの特性(精度・出力時間)を考慮してプリンタ出力段階で変更されることがあり、出力対象側とDB登録側とで一般に角度が異なること。

(4) 3Dプリンタ出力用データの代表的な形式であるSTLでは、あらゆる形状が三角形分割して記述されるため、3Dスキャナで収集したデータや曲面をもつモデルではデータ量および照合負荷が膨大になること。

(5) 3Dプリンタで製造された拳銃のように、部品にばらした状態で3Dプリンタ出力が行われることがある。その場合、出力対象側はDB登録側の一部品となり、部分照合の機能が求められること。

(6) 違法なフィギュアなどの3Dモデルは2Dのイラストや写真画像を基に制作されることが多く、事前に3DモデルをDB登録することは難しい。そこで、2D画像をDB登録し、出力対象側の3Dポリゴンモデルと次元の異なる照合の機能が求められること。

(7) ポリゴンデータは著作物であり、現行の著作権法では、違法造形物のポリゴンデータをブラックリストDBに無断で登録する行為自体に違法性の懸念があること。

3.2. ポリゴン対応付けによる簡便な照合方法

3.1節の(2)~(5)の課題を解決できる簡便な照合方法として、図4のように、DB登録側の全ての三角形と相似形な三角形を出力対象側モデルより探索して、ポリゴンの対応付けを行いながら照合する方法がある⁸⁾。両者のモデルが一致する場合、スケールや角度が異なっても、DB登録側の各三角形と対応する出力対象側モデルの三角形は相似形になり、3辺の比率や2頂点の角度が同一になる。即ち、3.1節の課題(2)(3)に対応できる。また、本手法では出力対象側モデルとDB登録側モデルのポリゴン構成が同一である必要があるが、ポリゴンのデータ量が多い場合、DB登録側および出力対象側の各々のモデルに対して、同一の比率でポリゴン削減処理¹⁰⁾を加えた上で、ポリゴン対応付けを行えば迅速な照合が可能になる。即ち、3.1節の課題(4)にも対応できる。

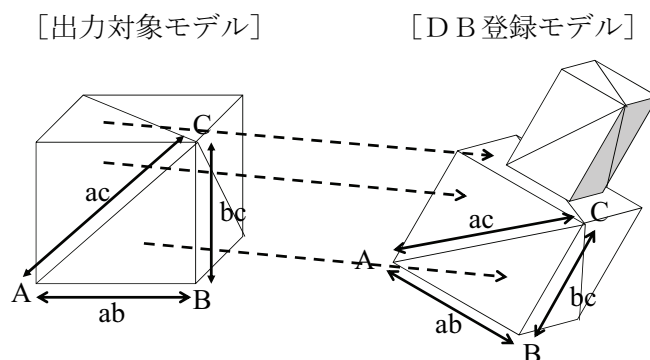


図4 ポリゴン対応付けによる簡便な照合方法

出力対象側モデルがDB登録側モデルの一構成部品であってもよく、対応する部品のポリゴン構成が同一であれば、同様にスケールや角度が異なっても、ポリゴンの対

応付けが可能になる。即ち、3.1節の課題(5)も解決できる。

しかし、出力対象側モデルがDB登録側のモデルを基にCADで再入力されたり、3Dスキャナでデジタル化されたものの場合、双方の部品のポリゴン構成が同一であるという前提は成り立たず、3.1節の課題(1)の問題によりポリゴンの対応付けを行うことができなくなる。

3.3. ポリゴン正規化による汎用的な照合方法

3.1節の課題(1)の問題に対応するため、図3に示されるように、ポリゴン照合を行う前に、DB登録側モデルおよび出力対象側モデルに対してスケールおよびアングルを一律な方向に揃えるポリゴン正規化処理を加える方法を提案した^{5)~9)}。正規化されたDB登録側モデルおよび出力対象側モデルの各ポリゴンを対応させれば、座標値差分でポリゴン照合することが可能になる。また、3.1節の課題(4)に対応するため、ポリゴン正規化処理を施す前にポリゴン削減処理¹⁰⁾を加えるようにした。

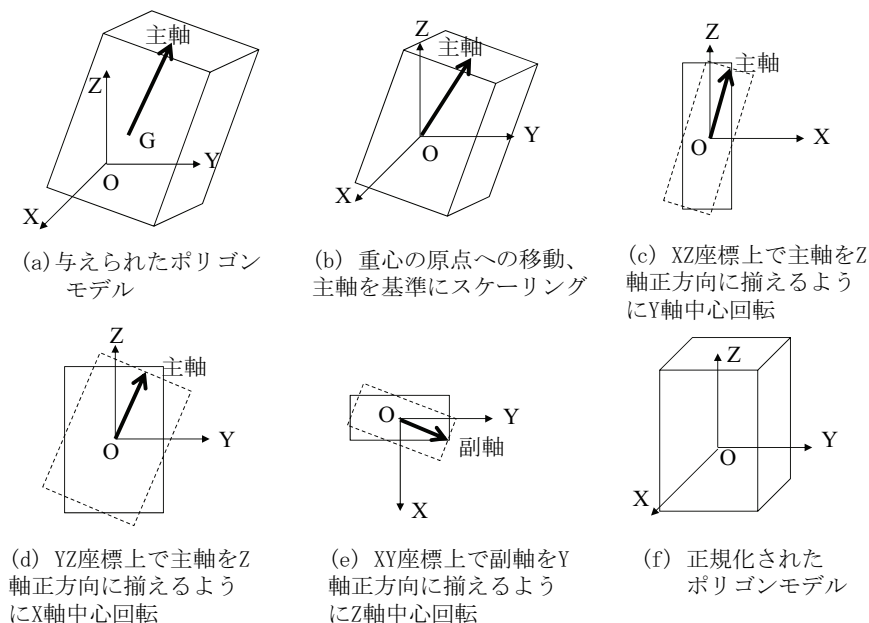


図5 提案するポリゴン正規化処理の基本

以下、図5に基づいて文献5)-9)で提案したポリゴン正規化処理の基本について説明する。図5-(a)において、与えられたポリゴンモデルの各三角形の midpoint の平均座標を重心座標Gとして算出し、重心から各三角形の midpoint までの最長距離を主軸として算出する。図5-(b)において、主軸の長さが基準長になるように全体をスケールさせ、モデル重心Gを原点Oに移すようにモデル全体を移動させる。図5-(c)において、XZ座標上で主軸をZ軸正方向に揃えるようにY軸中心にモデル全体を回転させる。続いて、図5-(d)において、YZ座標上で主軸をZ軸正方向に揃えるようにX軸中心にモデル全体を回転させる。図5-(e)において、XY平面上で原点Oから各三角形の midpoint までの最長距離を副軸として算出する。XY座標上で副軸をY軸正方向に揃えるようにZ軸中心にモデル全体を回転させることにより、図5-(f)に示される正規化されたポリゴンモデルが生成される。

続いてポリゴン照合処理について説明する。本処理は、出力対象側およびDB登録側で

各々正規化されたポリゴンどうしで照合を2段階で行う。これはDB登録されている複数のポリゴンデータとの照合を高速化するためである。第1の照合はアングルに依存しないラフな判定で、座標原点・スケールが揃った段階で、即ち図5-(b)の正規化処理の途上で、表面積または体積を算出して比較する。第1の照合で適合した場合のみ、図5-(f)の正規化処理が完了した段階で第2の座標値比較による高精度な照合を行う。

座標値比較も各ポリゴンの中点座標を比較する方法と、三角形の3頂点を比較する方法の2種が考えられ、出力対象側とDB登録側とで各ポリゴンが必ずしも対応しないことに留意する必要がある。そこで、出力対象側の各ポリゴンの頂点と最近傍のDB登録側のポリゴンの頂点を探索し、頂点間距離を算出する方法をとる。出力対象側の全てのポリゴンの頂点に対して、DB登録側の最近傍の頂点との頂点間距離の総和で適合するか否かを判定する。

3.4. ポリゴン分割による部分照合の実現とポリゴン照合方式の限界

前節で述べた手法により、3.1節の(1)～(4)の課題は解決できる。課題(5)については、DB登録側モデルに対して、図3におけるポリゴン正規化処理の前にポリゴン分割処理を加え、分割された各部品モデルの各々にもポリゴン正規化処理を行い、完成形モデルとリンクさせてDB登録する方法により解決できる。ポリゴン分割処理とは、単一の部品がポリゴンで囲まれた単一の閉領域であると仮定し、複数のポリゴン集合に分割するもので、各ポリゴン集合内の全ての三角形の3辺を共有する隣接三角形が同一集合内に重複せずに3つずつ存在するように分ける処理を行う。これにより、出力対象側モデルがDB登録されている部品モデルであれば阻止できる。しかし、出力対象側モデルがDB登録されている複数の部品モデルが合成された形態には対応できない。といて、あらゆる部品の組み合わせでDB登録することは現実的ではない。特に、構成部品の数が多くなると、実現困難である。そこで、出力対象側モデルに対しても、ポリゴン正規化処理の前にポリゴン分割処理を加え、分割された部品単位にDB登録モデルと照合する方法も考えられる。しかし、本方法においても次の2つの問題が発生する。

1) 細分化された多数の部品で構成されているモデルの場合、個々の部品単体には特徴が無く、違法性を判別することが難しくなる（各部品は適正なモデルでも使用される汎用品であると、適正なモデルを違法性ありと誤判定しやすい）。

2) 複合部品に対して分離不能な形態に連結させる改変が加えられるか、単体部品に対して分離可能な状態に分割する改変が加えられると、DB登録されている部品と整合性がとれず適合性を判定できなくなる。

以上のことから、ポリゴン照合方式では、3.1節の(5)の課題には完全には対応できず、更に3.1節の(6)(7)の課題が残る。

4. 提案する3Dモデルに対する特徴ベクトルを用いた照合方式

4.1. 特徴ベクトルを用いた照合方式の特徴

本稿で提案する3Dプリンタ出力規制システムを実現するためには、危険物あるいは著作権や肖像権等の侵害物など各種好ましくない造形物のポリゴンデータが登録されているブ

ラックリストDBを構築する必要がある。しかし、ポリゴンデータは著作物であり、ブラックリストDBに登録するためには著者から許諾を得る必要があり、危険物等については現実的には著作者から許諾を得ることが難しい。従って、著作権法等の改正が行われない限り、実用に供するブラックリストDBを構築することは困難である。そこで、音楽著作権管理等の分野で実用化されているフィンガープリント¹¹⁾と類似した特徴ベクトルに変換してブラックリストDBを構築する方法を提案する。

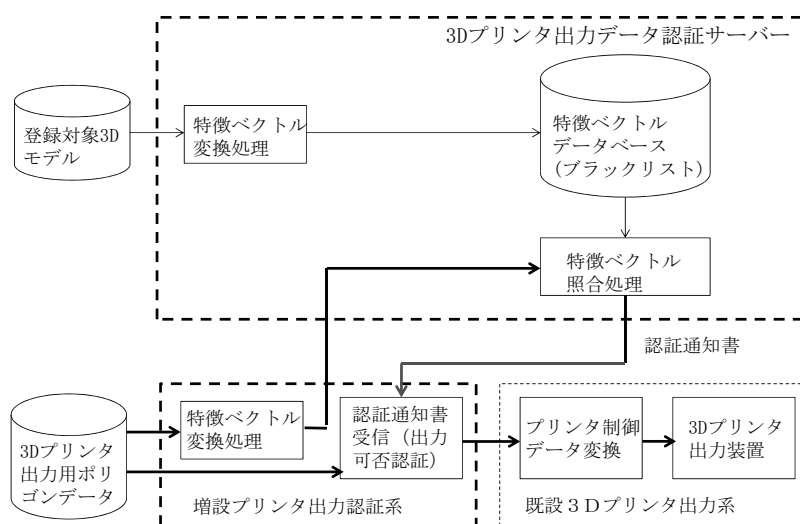


図6 特徴ベクトル照合による3Dプリンタ出力規制システム

特徴ベクトル(feature-vector)とは、フィンガープリント（電子指紋）、シグネチャ、Shape Distribution¹²⁾とも呼ばれ、個人を特定できる指紋と同様にコンテンツを識別できるコンパクトな情報である。3Dポリゴンデータを互いに識別可能な1次元情報に不可逆的に圧縮・変換するもので、以下の特徴があり、3.1節の7点の課題を全て解決することができる。

- (1) 原3Dモデルのポリゴン密度に比較的依存しない
 - ・ポリゴン密度の変化に伴い特徴ベクトルも多少変化するが、類似した形態になる。
- (2) 原3Dモデルのスケールに基本的に依存しない
 - ・前述のポリゴン正規化処理は不要になるが、スケールに依存した照合を行わせることもできる（下記部分照合の場合）。
- (3) 原3Dモデルの空間位置、アングルに依存しない
 - ・前述のポリゴン正規化処理は不要で、照合処理系が簡素化できる。
- (4) 変換される特徴ベクトル容量は原3Dモデルの容量に依存せず、顕著に小さい
 - ・前述のポリゴン削減処理は不要で、DB保管および照合処理の負荷が小さくなる。
- (5) 3Dモデルを構成する全ての部品の特徴ベクトルを包含させることができる。
 - ・3Dモデル全体と3Dモデルを構成する部品との部分照合が可能。
- (6) 2D画像からも同仕様の特徴ベクトルに変換できる。
 - ・特徴ベクトルを介して3Dモデルと2D画像間の次元を超えたハイブリッド照合が可能。
- (7) 特徴ベクトルから原3Dモデルを復元できない

- ・特徴ベクトルは著作物としての性質をもたず、著作権侵害の問題を回避できる。

図3の3Dプリンタ出力規制システムの基本構想図は、特徴ベクトルを用いると図6のように簡素な構成になる。また、同図右下の3Dプリンタ出力用ポリゴンデータを上側のクラウドにアップロードする際、特徴ベクトルに変換された形態で運用されるため、転送負荷が殆どかからず、クラウド側に著作物が残る心配もない。

4.2. 提案する3Dモデルに対する特徴ベクトル変換の基本方式

3Dポリゴンデータに対する特徴ベクトル生成技術に関する先行研究として、Osadaらによる“Shape Distributions”¹²⁾がある。この方法は、3Dモデルを分類する目的には有用であるが、形状識別性が十分とはいえず、本稿の形状照合の目的には適さない。そこで、文献 12)に記載の1次元ヒストグラムに変換する方法を基本に、最適な特徴ベクトルの生成手法を検討した。

文献 13)14)では、Osadaらの“Shape Distributions D1およびD2”¹²⁾を基に、2つの基本方式1と2を提案した。先行研究は、各ポリゴンの内部から任意の複数の点をランダムにサンプリングし、サンプル点間の距離や角度を算出して、距離や角度のヒストグラムを特徴ベクトルとして与える方法である。この方法では、サンプリングされる点の数や乱数発生方法により特徴ベクトルの形状が変わり再現性が無いという問題と、ポリゴン内部の任意の点を抽出していることから原3Dモデルの識別性が得られるような特徴ベクトルを生成するためには、かなり多数のサンプリング点を抽出する必要があり、処理時間を要するという問題がある。そこで文献 13)14)では、文献 12)の提案を加味し、再現性があり、少ない処理負荷で識別性の高い特徴ベクトルを生成する手法を提案した。

まず方式1として、与えられたポリゴンモデルより、各ポリゴンの面積が重量に比例すると仮定して重心を算出し、重心から全てのポリゴン中心までの距離を算出し、各ポリゴンの面積を加重した距離のヒストグラムを算出する。これにより、“Shape Distributions D1”¹²⁾と同様な特徴ベクトルを高速に算出できる。ただし、これだけでは、ポリゴンモデル内部が詰まっているか、空洞かの識別ができないため、重心から各ポリゴン中心までのベクトルと当該ポリゴンの法線ベクトルとのなす角について、同様にポリゴンの面積を加重した角度のヒストグラムを算出する。これら2つのヒストグラムを照合に使用する特徴ベクトル方式1とした。

続いて方式2として、図7-(1)に示されるように、与えられたポリゴンモデルより、ランダムに選択された2つのポリゴンの組み合わせに対して、一方のポリゴン中心から他方のポリゴン中心までの距離を算出し、他方のポリゴンの面積を加重した距離のヒストグラムを算出する。これにより、“Shape Distributions D2”¹²⁾と同様な特徴ベクトルを算出できる。そして、方式1と同様に、選択された2つのポリゴンの組み合わせに対して、一方のポリゴン中心から他方のポリゴン中心までのベクトルとそれを指す他方のポリゴンの法線ベクトルとのなす角を算出し、ベクトルが指す他方のポリゴンの面積を加重した角度のヒストグラムを算出する。これら2つのヒストグラムを特徴ベクトル方式2とした。本方式2は、方式1のように特徴ベクトルがポリゴンモデルの重心に依存しないため、モデルの一部の部品が欠損したり、改変されてモデルの重心がずれても、特徴ベクトルに顕著な変化が生

しないため、類似性の判定が的確に行えるという利点があり、方式1より優れていることが確認できている¹³⁾¹⁴⁾。

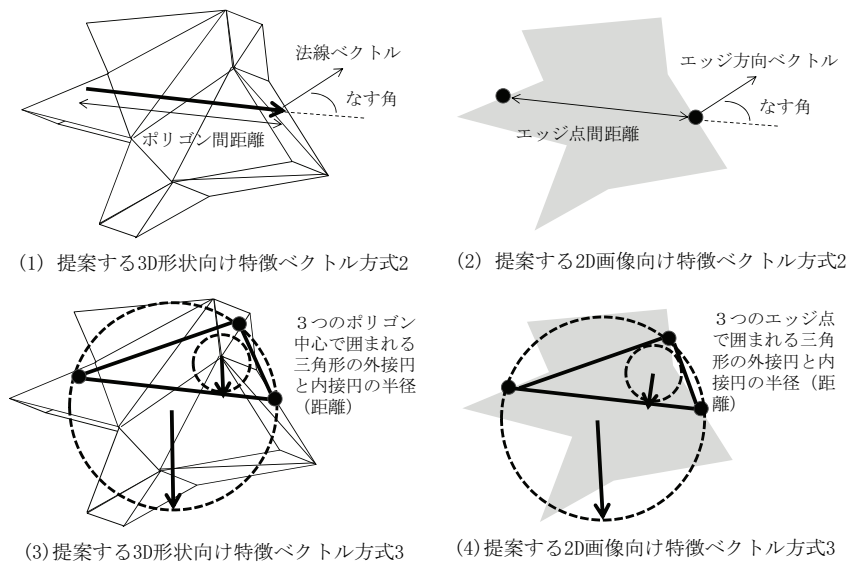


図7 提案する3D形状と2D画像向け特徴ベクトル方式

本方式2を用いて3種の3Dポリゴンモデルに対して特徴ベクトルに変換した結果を図8に示す。下段3つのグラフの各々、上側は距離のヒストグラム、下側は角度のヒストグラムを示す。下段に隣接する2つのグラフ間に示した2つの数値は、距離のヒストグラムおよび角度のヒストグラムどうしで正規化相関係数を算出した結果を%で示したもので、中央の3D球体モデル2に対して、左側の3D球体モデル1と右側の3D達磨モデルとでは正規化相関係数に大きな差が無く、識別できていないことがわかる。

4.3. 提案する3Dモデルに対する特徴ベクトル変換の改良方式

前節の問題に対して、Osada らの“Shape Distributions D3および A3”¹²⁾を基に改善を試みた¹⁸⁾。これは、与えられたポリゴンモデルより、ランダムに3つのポリゴンを選択し、ポリゴン中心間を結ぶ仮想的な三角形の面積や頂点角度を基に距離および角度分布を算出するものである。これにより、三角形の面積の平方根をとった距離分布においては形状の識別性の問題が改善したが、角度分布の識別性については、方式2より顕著に低下した。そこで、図7-(3)に示されるように、ランダムに選択された3つのポリゴン中心間を結ぶ仮想的な三角形の外接円と内接円の半径を求め、3つのポリゴン面積の平均値で加重した外接円と内接円半径のヒストグラムを算出する。これら2つのヒストグラムを従来の距離分布と角度分布に対応する3Dポリゴンモデルの特徴ベクトル方式3と定義した。前記仮想的な三角形の3辺の長さを a, b, c とすると、ヘロンの公式により三角形の面積 S は、 $d=(a+b+c)/2$ として、 $S=\{d(d-a)(d-b)(d-c)\}^{1/2}$ となり、外接円半径は $abc/(4S)$ 、内接円半径は S/d で算出できる。

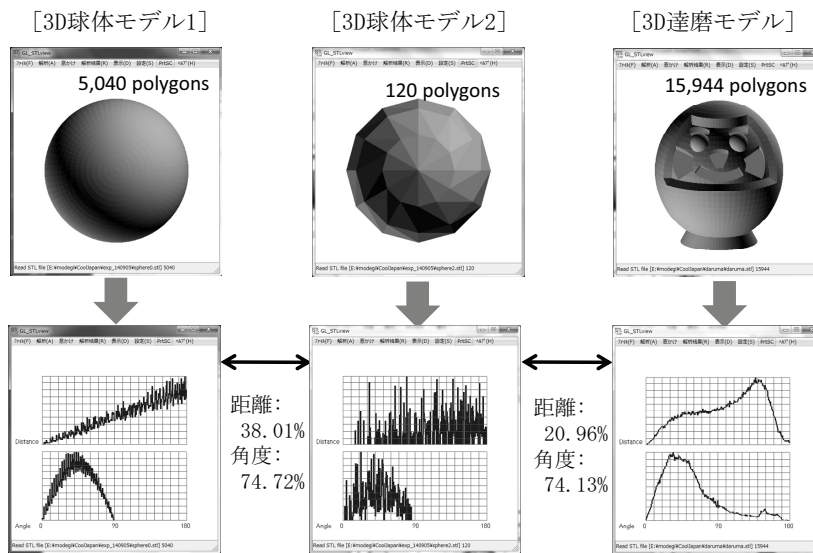


図8 3Dモデルの特徴ベクトル変換および照合事例1 (方式2)

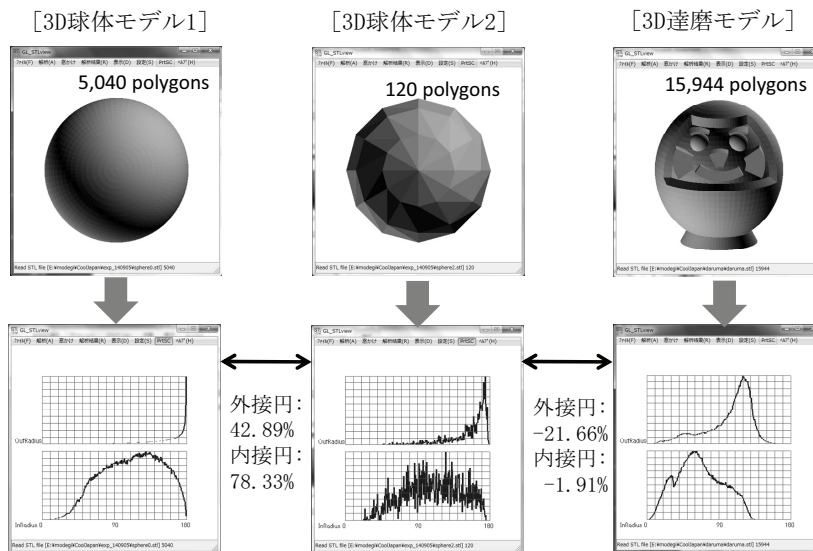


図9 3Dモデルの特徴ベクトル変換および照合事例1 (方式3)

前述の図8に示した3種の3Dポリゴンモデルに対して、本方式3を用いて特徴ベクトルに変換し直した結果を図9に示す。下段3つのグラフの各々、上側は外接円半径のヒストグラム、下側は内接円半径のヒストグラムを示す。内接円半径の上限は、外接円半径の上限の1/2になるように両者のスケールを合わせている。下段に隣接する2つのグラフ間に示した2つの数値は、外接円半径のヒストグラムおよび内接円半径のヒストグラムどうして正規化相関係数を算出した結果を%で示したもので、中央の3D球体モデル2に対して、左側の3D球体モデル1と右側の3D達磨モデルとでは正規化相関係数に顕著な差が見られ、高精度に識別できていることがわかる。

別の3種の3Dポリゴンモデルに対して、同様に本方式3を用いて特徴ベクトルに変換した結果を図10に示す。中央の3D模擬拳銃モデル2に対して、左側の部品が付加された3D模擬拳銃モデルとでは強い相関が見られ、右側の3D日本刀モデルとも弱いながら相関が見られ、ある程度の類似性が認められることがわかる。

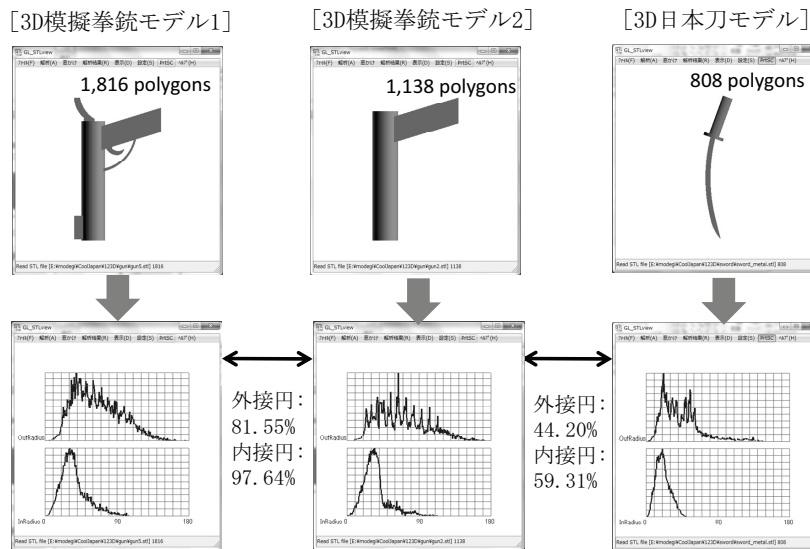


図10 3Dモデルの特徴ベクトル変換および照合事例2（方式3）

5. 提案する特徴ベクトルを用いた高度な照合方式

5.1. 特徴ベクトルを用いた3D/2Dハイブリッド照合の実現

前節で述べた特徴ベクトルを用いた3Dプリンタ出力規制システムにおいては、3Dポリゴンデータが事前に特徴ベクトルの形態でDB登録されている必要がある。しかし、違法なフィギュアなどの著作権侵害物は、写真やイラストなどの2D画像形態の著作物を基に制作されることが多く、事前に3DポリゴンデータをDB登録することが難しい。また、DB登録しても、同一の2D画像から多様な3Dポリゴンデータが制作されるため、形態が変わると見逃されてしまうという懸念がある。そこで、事前入手可能な2D画像形態の著作物をブラックリストとしてDB登録し、出力対象の3Dモデルとの類似性を判定する機能が要望される。文献 15)では、著作物侵害物の原画である2D画像を前節で述べた特徴ベクトルと同仕様の特徴ベクトルに変換し、3Dモデルと特徴ベクトルによるハイブリッドな照合を可能にする手法を提案した。

図11に2D画像から特徴ベクトルに変換した3D/2Dハイブリッドなブラックリストを用いて照合する拡張システムの構成を示す。

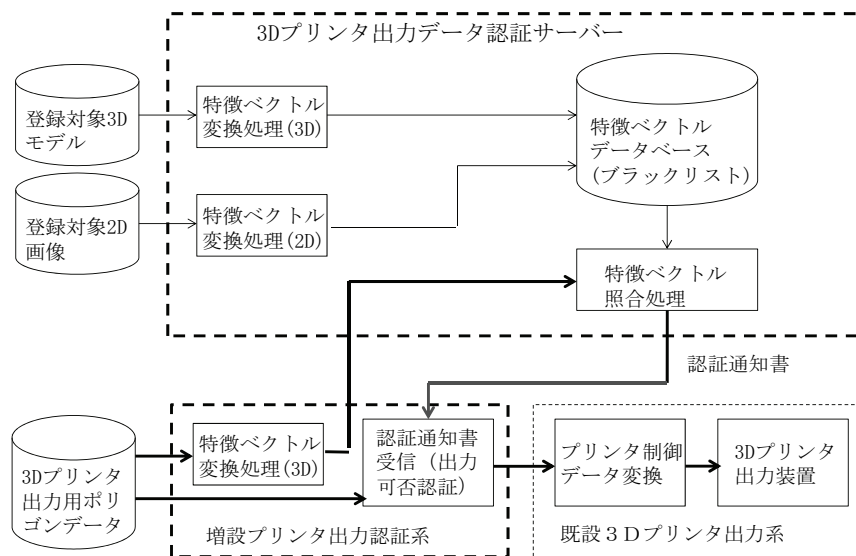


図11 3D/2Dハイブリッド・3Dプリンタ出力規制システム

5.2. 2D画像からの特徴ベクトル生成方法

前節で述べた特徴ベクトルと同仕様の特徴ベクトルを2D画像から算出する方法を文献16)17)で提案している。これは、図7-(2)(4)に示されるように、与えられた2D画像データに対してモノクロ階調画像に変換しエッジ抽出を行い、エッジを構成する画素（エッジ点）を3Dポリゴン中心に対応付け、各エッジ点に3Dポリゴンの面積と法線ベクトルに対応するエッジ強度とエッジ方向ベクトルを定義し、同様な算出を行う。画像のエッジ抽出は、8方向の3×3マトリックス群で構成されるPrewittフィルタを図12のように16方向に拡張して積和演算を行い、各画素において最大強度をもつ方向をエッジ方向ベクトルとし、その時の強度をエッジ強度と定義する¹⁷⁾。そして、エッジ強度が所定のしきい値以上の画素をエッジ点とし3Dポリゴン中心に対応付ける。

図7-(2)に示されるように、前述の特徴ベクトル方式2と同仕様の特徴ベクトルを算出するには、ランダムに2つのエッジ点対を選択し、一方のエッジ点から他方のエッジ点までのエッジ点間ベクトルの大きさ（距離）とそのベクトルの終点のエッジ方向ベクトルとなす角（角度）を算出する。そして、一方のエッジ点のエッジ強度で加重した距離および角度のヒストグラムを特徴ベクトル方式2として算出する。

ただし、算出される距離および角度が3D空間から2D空間に限定されるため、同様な形状で3Dポリゴンから算出される分布と、2D画像から算出される分布をそのまま比較すると不整合が生じる。そこで、2D画像から分布を算出する際に、3D球体と2D円形パターンの特徴ベクトルを一致させるように球面補正を施す¹⁷⁾。具体的には、エッジ点間ベクトルの大きさ（距離）を R 、最大距離を R_{max} とすると、エッジ強度に対し、 $R \cdot (R_{max}^2 - R^2)^{1/2}$ なる値を乗算しながら距離および角度のヒストグラムを補正する。

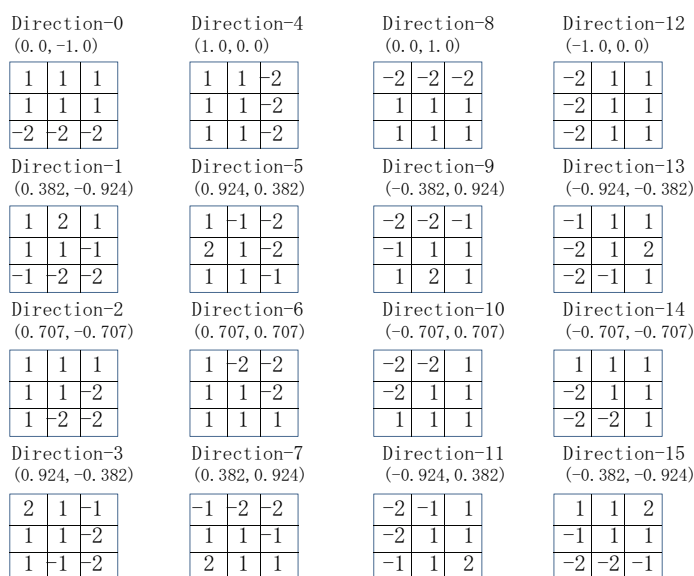


図12 独自16方向エッジ抽出フィルタ (Prewittの拡張)

2D画像から算出される特徴ベクトル方式2については、文献 18)の実験結果の通り整合性や識別性に問題がある。まず、角度分布については、Prewittフィルタを独自に16方向に拡張しているが¹⁷⁾、3Dポリゴンでは連続的な法線ベクトル、2D画像データでは16段階のエッジ方向ベクトルを基に算出されるため、両者の整合性が乏しいという問題がある。

これに対して文献 18)において、前述の特徴ベクトル方式3と同仕様の特徴ベクトルを2D画像から算出する方法を提案した。これは、図7-(4)に示されるように、与えられた2D画像データに対して同様にエッジ抽出を行い、ランダムに3つのエッジ点を選択し、3つのエッジ点間を結ぶ仮想的な三角形の外接円と内接円の半径を求め、3つのエッジ点強度の平均値で加重した外接円半径と内接円半径のヒストグラムを算出するものである。エッジ抽出は、前述の図12で示される16方向に独自拡張したPrewittフィルタを用いて行い、同様にエッジ強度とエッジ方向ベクトルが算出されるが、エッジ方向ベクトルはヒストグラム算出には使用しない。そのため、前述の方式2における角度分布の3D/2D間の不整合の問題は生じない。

本方式3の場合においても、算出される距離が3D空間から2D空間に限定されるため、2D画像から分布を算出する際に、3D球体と2D円形パターンの特徴ベクトルを一致させるように同様に球面補正を施す¹⁸⁾。具体的には、外接円と内接円の半径を R および r 、外接円と内接円の最大径を R_{max} および r_{max} とすると、エッジ強度に対し、 $R \cdot (R_{max}^2 - R^2)^{1/2}$ および $r \cdot (r_{max}^2 - r^2)^{1/2}$ なる値を乗算しながら外接円半径および内接円半径のヒストグラムを算出する。

図7-(3)(4)に示される特徴ベクトル方式3において、外接円半径や内接円半径を形状特徴パラメータとして選択した理由は次の通りである。3D球体と2D円形パターンの外接円半径は当該球体または円形の半径に一致する確率が顕著に高いため、外接円半径を形状特徴パラメータとして選択すると、分布形状は1ヶ所にピークをもつ形態になり、形状が多面体や多角形に逸脱するにつれ、複雑な形態をとり、形状表現の自由度が高くなる。一方、

内接円半径は、3Dポリゴンモデルが球体の場合や2D画像が円形の場合でも種々の値を取り、内接円分布は広範に広がった形態になるため、外接円分布に比べ形状の識別性は劣るが、外接円分布に比べ形状改変に対するロバスト性が高くなるため、両者を併用すると判別能力が拡大する。

5.3. 特徴ベクトルを用いた3D/2Dハイブリッド照合の事例

3D達磨ポリゴンモデルに対して、2D達磨イラスト画像および2D円形二値画像の各々を方式3の特徴ベクトルに変換して3D/2D間でハイブリッド照合した結果を図13に示す。図9・10と同様に、下段3つのグラフの各々、上側は外接円半径のヒストグラム、下側は内接円半径のヒストグラムを示し、内接円半径の上限は、外接円半径の上限の1/2になるように両者のスケールを合わせている。下段に隣接する2つのグラフ間に示した2つの数値は、外接円半径のヒストグラムおよび内接円半径のヒストグラムどうしで正規化相関係数を算出した結果を%で示したものである。図13の中央の3D達磨モデルに対して、左側の2D達磨イラスト画像との間では顕著な正の相関が見られるのに対し、右側の2D円形二値画像と間では相関が見られず、適切に識別できていることがわかる。

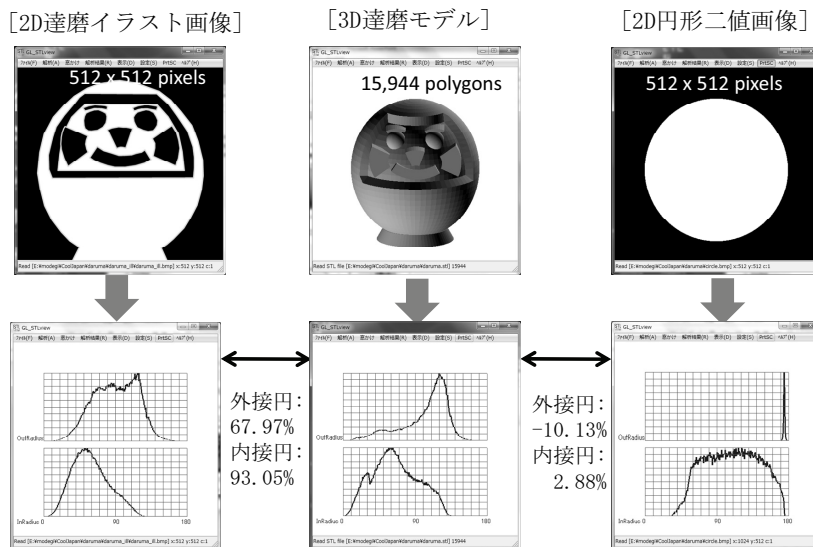


図13 2D画像の特徴ベクトル変換と2D/3Dハイブリッド照合事例1

また、3D球体モデル1に対して、2D円形投影画像および2D達磨投影画像の各々を方式3の特徴ベクトルに変換して3D/2D間でハイブリッド照合した結果を図14に示す。2D円形投影画像および2D達磨投影画像は、図8・9の左および右に示した3D球体モデル1および3D達磨モデルに対して、各々正面に投影したCGレンダリング陰画像である。図14の中央の3D球体モデル1に対して、左側の2D円形投影画像との間では顕著な正の相関が見られるのに対し、右側の2D達磨投影画像と間では相関が見られず、同様に適切に識別できていることがわかる。

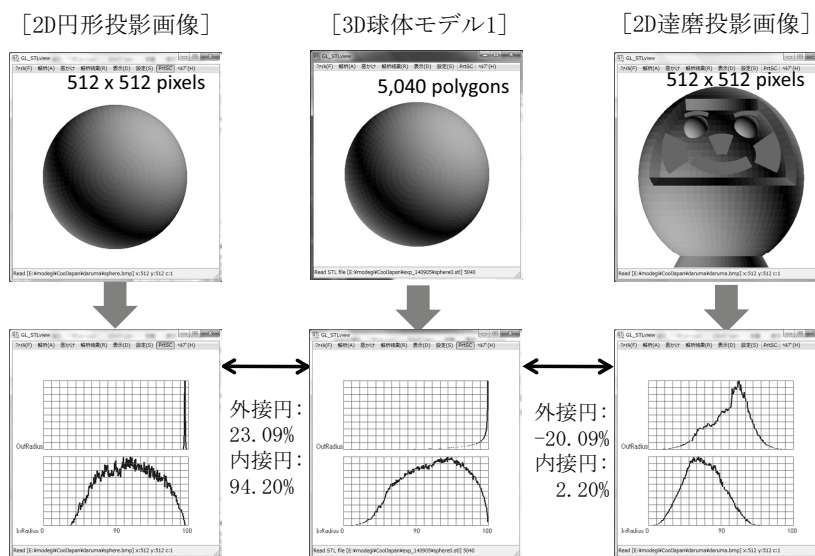


図14 2D画像の特徴ベクトル変換と2D/3Dハイブリッド照合事例2

5. 4. 特徴ベクトルを用いた3Dポリゴンモデルの部分照合の実現

最後に、現在開発を進めている特徴ベクトルを用いた3Dポリゴンモデルの部分照合技術¹⁹⁾について述べる。これが実現できると、3.1節の7点の課題を全て解決することになる。3Dプリンタは、複雑なフィギュアを表面の絵柄を含めて完成形態で一括出力できるという従来の製造方法では実現できない優れた特徴があるが、拳銃などの危険物の製造においては、部品単位にばらして3Dプリンタ出力される方法が一般的にとられる。理由としては、人手による調整が必要な精度が要求される可動機構があるためで、その他、3Dプリンタで出力できない金属材料部品・電子部品などが必要な場合、プリンタ出力サイズの制約から一括出力できない場合、完成モデルの形態が不安定で造形中に崩れやすい場合などにも、部品単位にばらして3Dプリンタ出力される。そのため、3Dプリンタ出力規制システムの実現において、ブラックリストに登録されている全体モデルと3Dプリンタ出力される部品モデルとの部分照合が要求される。

全体モデルが部品Aと部品Bという2つの部品で構成されている場合、前述の図7-(1)(3)で示される方式2および方式3により生成される全体モデルの特徴ベクトルは、部品Aのポリゴンから選択されて算出される特徴ベクトル成分と、部品Bのポリゴンから選択されて算出される特徴ベクトル成分と、部品Aおよび部品Bの双方のポリゴンから選択されて算出される特徴ベクトル成分の合成になる。即ち、方式2および方式3により生成される全体モデルの特徴ベクトルには、部品Aの特徴ベクトル成分と部品Bの特徴ベクトル成分が包含されている。全体モデルを構成する部品の種類が多くなっても、全体モデルの特徴ベクトルには、全ての構成部品の特徴ベクトルが包含されることになる。そこで、部品モデル（部品単体か複数の部品の複合形態かは問わない）の特徴ベクトル（ヒストグラム分布）の横軸のスケールを全体モデルの特徴ベクトルと整合させれば、全体モデルの特徴ベクトルの一構成成分になる。本節では識別精度が高い方式3に基づき説明する。

図15は文献¹⁹⁾で提案する特徴ベクトルを用いた3D形状の部分照合方法で、同図左端の

全体モデルおよび部品モデルの3Dポリゴンデータに対して、各々特徴ベクトルに変換した結果が中央上下のグラフである。各々上のグラフは外接円半径の分布、下のグラフは内接円半径の分布を示す。始めに、図中の横軸倍率の整合により、中央下側の部品モデルの各分布の横軸の半径のスケールを中央上側の全体モデルの分布に整合させる。これは部品モデルを全体モデルの構成部品として倍率設定して3Dプリンタに出力することに対応しており、両者を比較する際に実際に使用されるスケール比に合わせる必要がある。

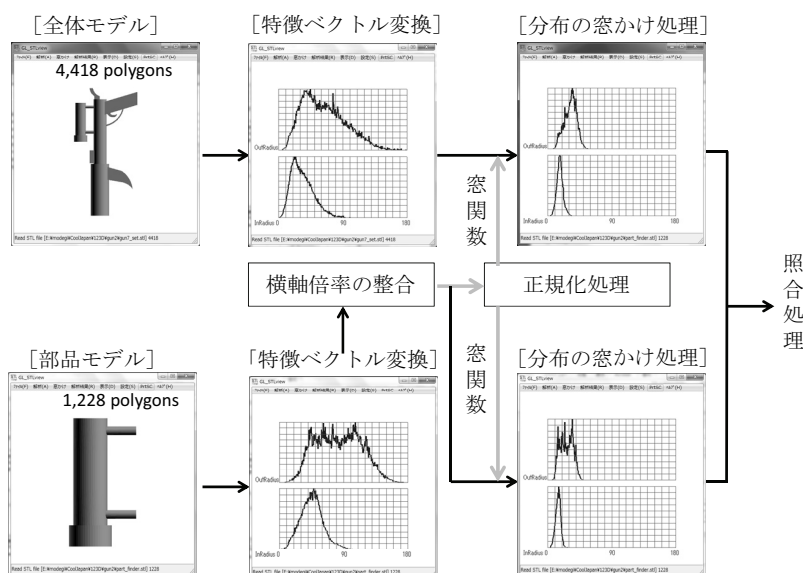


図15 全体モデルと部品モデルとのフィンガープリントによる部分照合

これにより、部品モデルの特徴ベクトルの各分布は左横方向に縮小され、全体モデルの分布に包含された状態になる。そして、図中の正規化処理により、整合させた部品モデルの分布の縦軸を0~1の範囲に正規化し、これを窓関数として、全体モデルと部品モデルの分布に対して各々重み付けを行う。そうすると、同図右端上側のグラフに示されるように、中央上側の全体モデルの分布より、右端下側の部品モデルに相当する成分を概ね抽出できる。最後に、右端上側の全体モデルの分布と右端下側の部品モデルの分布を照合する。尚、照合にあたっては、前述の正規化相関係数を用いると、部品モデルに相当する成分以外の他の部品の構成成分が多いと相関が低く誤判定されやすい。そこで、各々の分布で最大ピーク位置を検出し、その差異（距離）で類似性を判定する方法を提案する。具体的には、分布の横軸の外接円または内接円半径の最大値を M 、 $0 \sim M-1$ の範囲で、全体モデル側のピーク位置を P_a 、部品モデル側のピーク位置を P_p とすると、ピーク位置差分 D_p ($-300 \leq D_p \leq 100$) は、 $D_p = \{M/4 - |P_a - P_p|\} \cdot 400/M$ で与える。これにより、ピーク位置差分が正規化相関係数と同程度のオーダーの%値になる。

図15に示される模擬機関銃モデルと部品（ファンイダー）との部分照合事例では、外接円半径および内接円半径の正規化相関係数は各々87.1%、90.75%であり、ピーク位置差分は各々100%、96.67%であり適合と判断できる。比較対象として、図15中の横軸倍率の整合を行わない場合、外接円半径および内接円半径の正規化相関係数は各々81.96%、84.53%となり、ピーク位置差分は各々37.78%、88.89%となり、外接円半径のピーク位置差分によ

り不適合と判断できる。しかし、正規化相関係数では外接円半径および内接円半径とも、ピーク位置差分では内接円半径において、横軸倍率の整合を行わなくても高い相関が示され、今後改善を必要とする。

6. おわりに

本稿では、違法造形物の3Dプリンタ出力を規制する3Dプリンタ出力規制システムを実現するため、3Dプリンタ出力用ポリゴンデータに対してブラックリストと高速かつ高精度に照合する技術に関する研究開発事例を紹介した。3DポリゴンモデルをブラックリストDBに登録して、3Dプリンタ出力対象の3Dポリゴンモデルと直接照合するアプローチでは、解決できない課題が幾つか残る。そこで本稿では、ブラックリストDBに登録される3Dポリゴンモデルおよび3Dプリンタ出力対象の3Dポリゴンモデルとも特徴ベクトルに変換して照合する手法を主として提案した。この方法では、キャラクターのイラストや写真などの2D画像形態の著作物も同仕様の特徴ベクトルに変換してブラックリストDBに登録することができ、特徴ベクトルを介して2D画像と3Dプリンタ出力対象の3Dポリゴンモデルとの次元の異なる照合が可能になり、違法なフィギュアの製造を規制できる。文献 18)で報告した通り、2D画像と3Dポリゴンモデルとのハイブリッド照合において、本稿提案の改良を加えた特徴ベクトル方式を用いることにより、筆者らが準備したサンプルデータを用いた範囲において、所望の精度が得られることが確認できている。

また、3Dポリゴンモデル全体の特徴ベクトルには、構成部品単体の特徴ベクトルを包含しているという特性から、全体モデルと部品モデルとの部分照合を実現する手法についても提案した。現状では、筆者らが準備したサンプルデータを用いた範囲でも、所望の判定精度が得られない場合があり、特徴ベクトルの変換方式から特徴ベクトルの照合方法につき、更なる改良を加え、2D/3Dハイブリッド照合技術を含めて提案方式の実用性を検証する予定である。そして、クラウド型3Dプリンタ出力規制システムを構築し、3Dプリンタ受託出力事業者や3Dプリンタメーカーに提案する予定である。

引用文献

- 1) 今井政敬, 茂出木敏雄, 廣川慧吾, 櫻井快勢, 有吉俊雄, 加藤大樹: 「X線CTスキャナによる3Dプリンタ造形物内部の二次元コードの検出」, 『電子情報通信学会・技報』, EMM2013-87, Vol.113, No.291, pp.113-118, Nov.2013.
- 2) Banknotes & Counterfeit Deterrence System by CBCDG, <http://www.rulesforuse.org/pub/> (Accessed in January, 2016).
- 3) 茂出木敏雄: 「ポリゴン照合による危険物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『電子情報通信学会・総合大会・予稿集』, D-21-7, pp.198, Mar.2014.
- 4) 田中浩也: 『SFを実現する 3Dプリンタの想像力』, 講談社現代新書, Jun.2014.
- 5) 茂出木敏雄: 「ポリゴン照合による危険物と著作権侵害物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『電子情報通信学会・技報』, EMM2014-5, Vol.114, No.33, pp.23-28, May.2014.
- 6) 大日本印刷(株)プレスリリース(2014.5.28) http://www.dnp.co.jp/news/10099366_2482.html
- 7) 茂出木敏雄: 「ポリゴン照合による危険物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『日本印刷学会・春期研究発表会・予稿集』, A-17, pp.77-80, May.2014.

- 8) 茂出木敏雄：「総説：危険物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『日本印刷学会誌「特集：デジタルファブ리케이션」』, Vol.51, No.4, pp.246-255, Aug.2014.
- 9) 茂出木敏雄：「ポリゴン照合による危険物や著作権侵害物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『電気学会・電子情報システム部門大会・予稿集』, GS3-1, pp.1468-1473, Sep.2014.
- 10) Stan Melax: "A Simple, Fast and Effective Polygon Reduction Algorithm", Game Developer, pp.44-49, Nov.1998.
- 11) GracenoteMusicID, <http://www.gracenote.com/> (Accessed in January, 2016).
- 12) Robert OSADA, Thomas FUNKHOUSER, Bernard CHAZELLE, and David DOBKIN: "Shape Distributions", ACM Transactions on Graphics, Vol.21, No.4, pp.807-832, Oct.2002.
- 13) 茂出木敏雄：「3D形状の特徴ベクトル照合による危険物等の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『画像関連学会連合会（日本印刷学会・秋期研究発表会）予稿集』, PC-13, pp.73-76, Nov.2014.
- 14) 茂出木敏雄：「3D形状の特徴ベクトル照合による危険物等の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『電子情報通信学会・技報』, EMM2014-69, Vol.114, No.424, pp.15-20, Jan.2015.
- 15) 茂出木敏雄：「特徴ベクトルを用いた3D形状と2D画像のハイブリッド照合による著作権侵害物等の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『電子情報通信学会・総合大会・予稿集』, D-21-5, pp.188, Mar.2015.
- 16) Toshio MODEGI: "Proposal for 3D-Printing Regulation Technique in Fabricating Dangerous Devices Using Feature-Vector Based Matching Algorithm of 3D Shapes", Proc. of the First International Conference on Advanced Imaging, T505-04, pp.502-505, Jun.2015.
- 17) 茂出木敏雄：「3D形状の特徴ベクトル照合による違法造形物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『電気学会・電子情報システム部門大会・予稿集』, GS8-2, pp.1287-1292, Aug.2015.
- 18) 茂出木敏雄：「3D形状と2D画像のハイブリッド照合による違法造形物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『画像関連学会連合会（日本印刷学会・秋期研究発表会）予稿集』, A-16, pp.89-92, Nov.2015.
- 19) 茂出木敏雄：「特徴ベクトルを用いた3D形状の部分照合機能をもたせた違法造形物の3Dプリンター出力規制技術の提案」, 『電子情報通信学会・総合大会・論文集』, D-21-11, Mar.2016（発表予定）.