

薩摩琵琶の立体形状測定に関する研究

藤田純一*

Study of 3D Shape of Satsuma-Biwa

Junichi FUJITA

鹿児島県指定の伝統的工芸品である薩摩琵琶は、現在、作り手が途絶えており新しく製造することができない。しかも、設計図面や製造指示書が存在せず、復元も困難な状況である。薩摩琵琶の形状は自由曲面が多用されており定規などでは形状測定が難しく、3DスキャナやCTスキャナでしか測定できない。そこで、本研究では薩摩琵琶の復元をめざし、3Dスキャナでは不得手とされていた薩摩琵琶のような黒色反射物体の測定方法について研究し、3次元の形状データを作成する手法について検討した。

Keyword : 3Dスキャナ, 点群データ, CTスキャナ, 黒色反射, 薩摩琵琶

1. 緒言

現物はあるが、“設計図”が存在しない例として、古い工業製品は勿論であるが、工芸品や彫刻等、特に文化財に多くの例がある。本県内でも、図面が存在せず作り手が途絶えている工芸品としては、薩摩琵琶等がある。

現物の図面化を高精度にかつ効率的に行うには、何らかの方法で立体の形状を測定しなければならない。現在、立体的な形状を測定する手法としては、①門型測定機に代表される接触式アナログ測定、②CTスキャナに代表されるX線透過式デジタル測定、③3Dスキャナに代表される非接触式デジタル測定の3方式に大別できる。

ただし、各方式には長所と短所があり、①は超高精度な測定が可能だが、被測定物の形状が複雑な場合は測定に非常に時間を要する。②は比較的高精度な測定が可能だが、被測定物の大きさに制限があり、薩摩琵琶のような大きさであると、被測定物の透過データが取得可能な大きさのX線CTスキャナが必要である。③は①や②と比べると比較的低精度であるが、複雑な形状を非常に早く容易に測定することができる。今回の被測定物である薩摩琵琶は自由曲面が多いため、③の非接触式デジタル測定が適している。

しかし、3Dスキャナによる測定では、通常、黒色や光沢がある物体のスキャンは非常に難しい¹⁾。なぜなら、光線の鏡面反射や可視光線の全波長吸収が起こるためである。薩摩琵琶は図1に示すとおり、通常、木生地に漆塗り、金箔蒔絵が表面に施されており、黒色で光沢がある表面性状である。本研究では、黒色で光沢がある薩摩琵琶を、3Dスキャナで測定できる測定条件について検討した。

2. 3Dスキャナによる測定

2.1 被測定物と使用した3Dスキャナ

被測定物は、図1に示す薩摩琵琶とした。安田木枯と銘された琵琶で、全長975mm、全幅325mm、全高220mmである。測定には、Artec3D社製ハンドヘルド式スキャナEvaを使用した。



図1 薩摩琵琶

表1 測定機の仕様

項目	仕様
光源	フラッシュバルブ (非レーザー光)
3Dポイント精度 (最大)	0.1 mm
被写体長3D精度 (最大)	100 cmで0.03%
テクスチャ解像度	1.3 Mpixel
テクスチャ色深度	24 bit
作業範囲 (被写界深度)	0.4 - 1 m
最短距離撮影範囲(H X W)	214 × 148 mm
最長距離撮影範囲(H X W)	536 × 371 mm
撮影範囲 (角度)	30 × 21°
ビデオフレームレート	16 f/s
露光時間	0.0002 秒
データ取得速度 (最大)	2,000,000 点/秒

* 生産技術部

2.2 被測定物とスキャン角度

黒色光沢物体である薩摩琵琶を3Dスキャナでスキャンすると反射等の影響によりスキャンは困難である²⁾。一般的な対策として、被測定物表面への白色やグレーの粉末塗料スプレー塗布等もあるが、被測定物は文化財のため対応不可である。そこで、反射の影響の少ない最適な測定角度を検討した。

薩摩琵琶の表面を模した漆塗り黒色光沢部分と木目部分を持った測定サンプルを用意し、図2に示すようにスキャナ照射角度を水平から5度刻みで90度まで測定できる補助治具を作製した。測定環境は、スキャナと被測定物との距離700mm、室内蛍光灯下480lxで、外光が被測定物に当たらない状態で測定した。

補助治具を用い、それぞれの角度でスキャンした結果を図3に示す。スキャン角度が70度以下では黒色反射部分は全く測定できていなかったが、スキャン角度75～80度では良好に取得できることが分かった。しかし、80度の場合は



図2 測定サンプルと補助治具

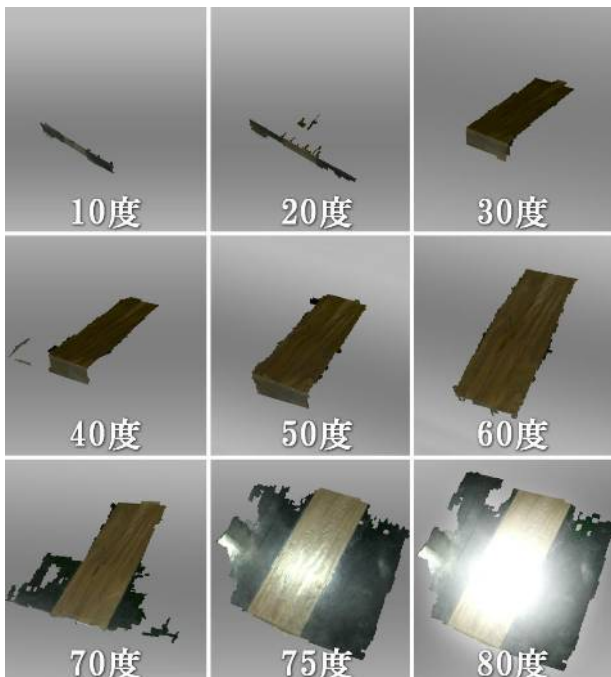


図3 スキャン角度と測定結果

測定機から発生する測定光が反射し、被測定物の表面模様がほとんど取得できなかった。表面模様は、複数の測定物を位置合わせをする際、特徴点として非常に重要な要素なので、75度を最適なスキャン角度とした。

2.3 測定方法の検討

使用した3Dスキャナは手持ち用の機器である。手持ちでの測定であれば、本来位置合わせ用のマーカを付加するのが通常の測定手法であるが、今回は被測定物が文化財のためその方法を行えない。そのため、マーカを使用せず測定精度を保つために以下の方法を検討した。

① 3Dスキャナを三脚に固定した状態で、被測定物を回転テーブルで回転させながら測定した。しかし、本3Dスキャナでは、手ぶれ補正機能が誤動作して測定できなかった。手ぶれ補正アルゴリズムは仕様上無効にできないため、3Dスキャナを用いた測定で最も一般的な、被測定物を回転テーブルに設置した測定ができなかった。

② 回転テーブルでの測定が不可なため、逆に3Dスキャナ側を動かす方法として図4に示す車輪付き三脚を使用した。被測定物を中心にして、半径700mmの距離と75度のスキャン角度を保つようにして、10cm/秒で車輪付き三脚を円弧移動して測定した。

車輪付き三脚を円弧移動させた段階で、回転テーブルを使った際に発生した手ぶれ補正エラーが同様に発生し、測



図4 車輪付き三脚による円弧移動

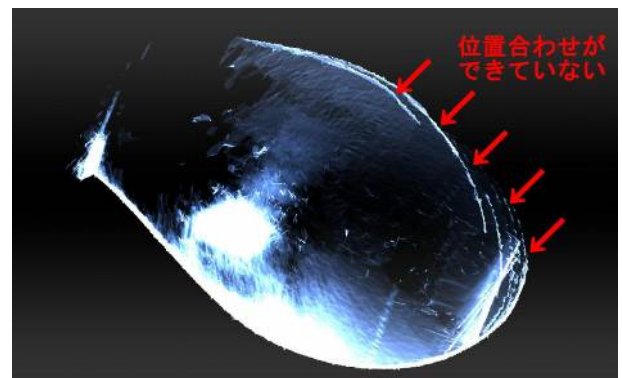


図5 円弧移動による測定結果（輪郭表示）



図6 レールによる直線移動

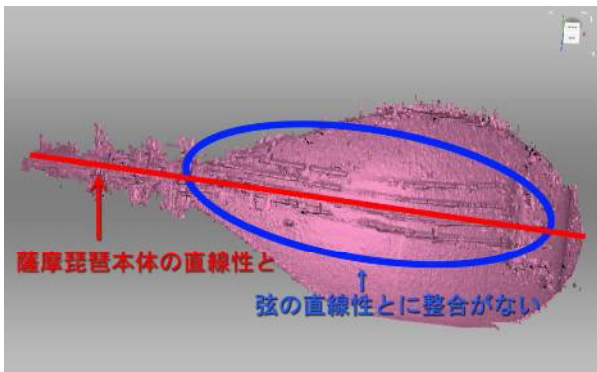


図7 直線移動による測定結果（ポリゴン表示）



図8 伸縮式一脚

定ソフトウェア内部での面の位置合わせが正確にできず、測定できなかった。測定結果を図5に示す。測定面同士の位置合わせが分かるように、位置合わせを行った面を輪郭で表示している。

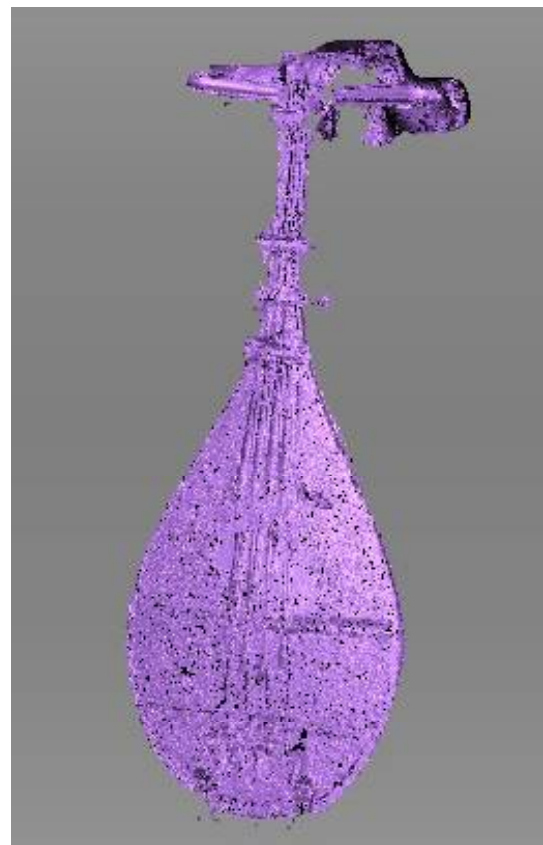
③ 三脚を移動させる際に図6に示すレールを用い、矢印の方向に3Dスキャナを直線的に移動させた。φ28mmの鉄製パイプ上を、キャスターを取り付けた台座を10cm/秒で直線移動させながら測定した。

測定結果を図7に示す。薩摩琵琶本体の形状と、薩摩琵琶に張ってある弦の直線性と整合が取れないスキャン結果となった。原因としては、弦が細すぎるため測定が部分的に途切れるなど不安定になり、その弦を特徴点として位置合わせを実行しようとして薩摩琵琶本体の測定に悪影響を与えたと考えられる。

④ 円弧移動を伴わず、かつ弦の影響をさけるため薩摩



図9 伸縮式一脚による直線移動

図10 測定した薩摩琵琶点群データ
(ポリゴン表示)

琵琶本体の正面から測定できる方法として、図8のような伸縮式一脚を用いた測定方法を検討した。

図9に示すとおり、測定精度を保つため、手持ちを補助するガイドとして伸縮式一脚を用いた。上下方向の移動速度は10cm/秒で、薩摩琵琶の全横幅が測定できるように、3Dスキャナとの距離を800mmにした。測定したデータを図10

に示す。課題であった黒色反射物体の測定が過不足なくできており、細かいノイズは後処理にて十分削除できるレベルであった。良好に測定できた要因として、直線移動だけで測定することで手ぶれ補正エラーの影響を受けなかったことと、特徴点となる弦の直線性と同じ方向で移動したことで弦の影響を受けにくくなり、位置合わせが正確になったと考えられる。

3. CTスキャンデータとの比較

今回の被測定物である安田木枯に関しては、内部構造や製造方法を検討するため、薩摩琵琶製作研究会により医療用CTスキャナで測定したCTスキャンデータがある。測定電圧120kV、測定電流100mA、測定スライスピッチは同機器最小の5.0mm間隔である。

3Dスキャンデータの測定精度検証のため、このデータを3次元CADデータとして再構築し、3Dスキャンのデータと比較した。

3. 1 CTスキャンデータの再構築

再構築は下記の手順で行った。

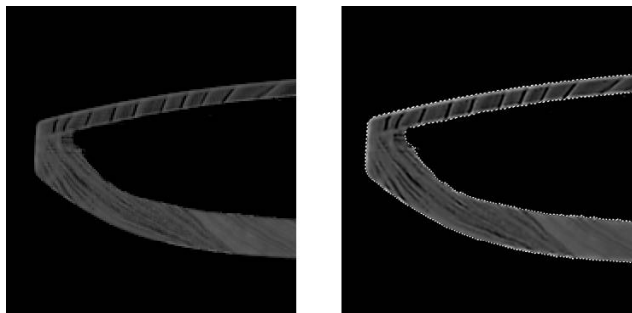
① DICOMデータのインポート

データは、医療用のDICOMデータ (Digital Imaging and Communication in Medicine: 医用画像情報と通信プロトコル国際的標準規格) であり、使用した画像処理ソフトはAdobe社製Photoshop CC2019である。

DICOMデータのインポートは、Photoshopのマクロ機能により196枚全ての画像に対し一括で処理を行い、連番も付加して保存された後、画像ファイルは再度、自動で1枚ずつPhotoshopに読み込まれ、オペレータ操作待ちの状態になる。画像データには、CTスキャナ内で薩摩琵琶を支える保持具が写っているため、手作業によりそれら保持具の部分を削除し、自動輪郭検出を実行した。

しかし、木目により画像の濃淡に影響が出ることや、経年劣化により薩摩琵琶自体に割れが入っているため、自動輪郭検出機能では、薩摩琵琶の輪切り輪郭を完全に検出できず、輪郭に不整合がある箇所を手作業で修正した。

また、各ファイルの輪郭データは共通の縮尺や原点を持



(a) 輪郭検出前

(b) 輪郭検出・補正後

図11 輪郭検出

たないので、このままでは各ファイルの縮尺や原点が不揃いになる。そこで、輪郭データの縮尺や原点の固定化のために、DICOMデータの最大外枠にあらかじめ共通基準輪郭を埋め込んだ。輪郭の検出・補正結果を図11に示す。

② 輪郭データをCADにインポート

作成した全ての輪郭データを、連番を保持したまま汎用ベクトルフォーマットであるAdobe社製Illustratorファイルで出力し、それを3D-CADにインポートした。

今回使用した3D-CADは、Robert McNeel & Associates社製RhinoCerosである。Illustratorフォーマットの輪郭データ1個をCADにインポートした画面を図12に示す。

各ファイル名は連番になっているので、CTスキャンピッチ5mmをその番号に掛けた値でZ方向へ移動する。つまり1枚目の画像はZ方向へ5mm移動、2枚目の画像はZ方向へ10mm移動の繰り返しになる。RhinoCerosのマクロ機能は変数が扱えないので、別途Excelなどで変数計算を行ったテキストファイルを作成し、それをマクロコマンドへ貼り付けた。輪郭データ196個を読み込みZ方向への移動するマクロ処理は約5分で終了した。立体的な形状に復元された薩摩琵琶を図13に示す。

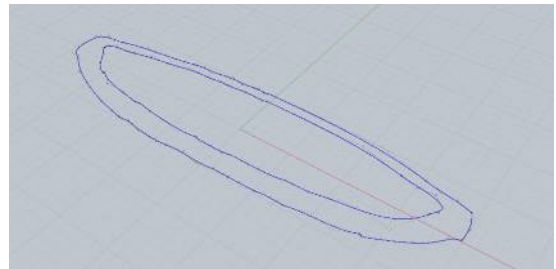


図12 輪郭データをCADにインポート



図13 CT輪郭データから作成した薩摩琵琶

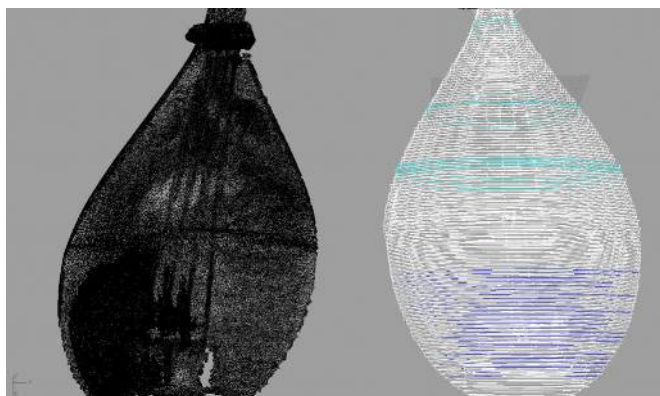


図14 3Dスキャンデータ(左), CTスキャンデータ(右)

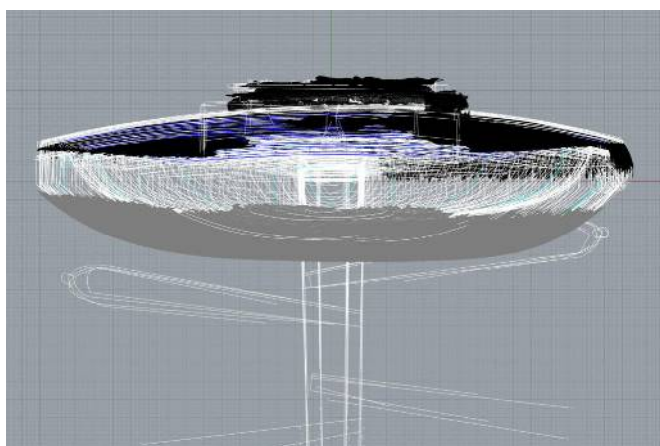


図15 両モデルを重ねて比較

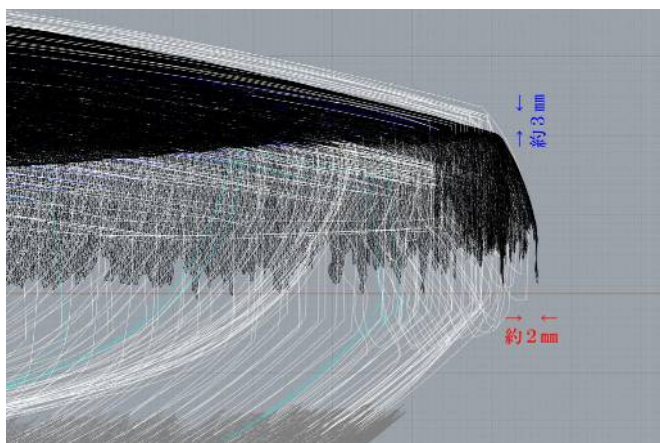


図16 両モデルを重ねて比較(拡大)

3. 2 3Dスキャナ測定精度の検証

CTスキャンと3Dスキャンの測定データをそれぞれを3次元CADデータ化することで、図14のように同じCAD平面上に置くことができ、寸法などを直接比較することが可能に

なった。図15に上面図における比較画像を、図16にその拡大画像を示す。黒色部分は3Dスキャンの上面データ、灰色部分は3Dスキャンの背面データ、白色の線分表示はCTスキャンのデータである。

CTスキャンデータと3Dスキャンデータを比較した結果、両者間には最大でXY方向で約2mm、Z方向で約3mmの差異が発生していることが分かった。薩摩琵琶の片側幅162.5mmと胴体奥行き90mmを考慮すると、XY方向で1.2%、Z方向で約3.3%の差異であった。

4. 結 言

従来、3Dスキャナで、黒色反射物体を測定するのは非常に困難であったが、今回検討した手法で以下のことが明らかになった。

- (1) 3Dスキャナを、被測定物に対し距離800mm、角度75度明るさ480luxで測定した結果、黒色反射物体である薩摩琵琶の測定が可能になった。
- (2) 伸縮式一脚を用いた測定機移動方法で、薩摩琵琶全体の3次元データを取得することができた。
- (3) 3Dスキャナで測定したデータと、CTスキャナで取得したデータを、同じCADプラットフォーム上で容易にデータを比較することができた。
- (4) 黒色反射物体である薩摩琵琶の3Dスキャンデータを、CTスキャンデータと比較した結果、XY方向で1.2%、Z方向で約3.3%以内の精度差で測定できた。

今後、黒色反射物体の3Dスキャンの測定精度向上のため幅20cm×奥行き30cm×高さ10cm程度の規定寸法サンプルを事前にスキャンし、その測定結果を元に寸法校正を行い、本スキャンを行うような手法を検討していきたい。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、文化財である薩摩琵琶の安田木枯を測定用にお貸し頂いた、薩摩琵琶製作研究会の会に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 市川富士人, 信州大学繊維学部技術部技術報告集, 3 (2015), p. 20
- 2) 高井利久, 電気製鋼, 79(2008), p. 308