

## 小型ハンディスキャナを用いた歴史的建造物復元工事支援

竹内 啓五 石岡 宏晃 高山 和弘 宇野 康則  
(技術研究所) (技術研究所) (東京支店) (名古屋支店)

### Hand-held 3D Camera Used for Measuring Artifacts to be Reconstructed.

by Keigo Takeuchi, Hiroaki Ishioka, Kazuhiro Takayama and Yasunori Uno

#### Abstract

We used a 3D camera to measure a Shachihoko roof ornament on Sunpu-Jo castle, a famous Japanese castle in Sunpu-Jo Park, Shizuoka City. Every part of the castle, including the symbolic Shachihoko, is currently being reconstructed to be as historically accurate as possible. Because Shachihoko have very complicated shapes, accurately reproducing them is a time-consuming, labor-intensive process. Three-dimensional scanners are increasingly being used to reduce this time and labor.

We examined current commercial scanning solutions, including Xtion (Kinect). Although developed and marketed as a human interface for motion capture, the Xtion imaging sensor is capable of highly precise distance measurements. By modifying the software and hardware, we were able to successfully scan the entire form of a Shachihoko ornament. Furthermore, the resulting data can be used for CAD and 3D printer manufacturing operations.

#### 概要

我々は、駿府城公園の坤櫓復元工事において、その装飾品である鯨(しゃちほこ)を再現するための計測に三次元計測技術を適用した。鯨は日本の城の特徴的装飾品であり、屋根の上に配置される象徴的な彫像である。駿府城は現静岡市内にあった日本でも有数の城であり、現在その復元工事が進められている。一般に復元工事では、可能な限り史実に沿って再現することが求められる。今回の鯨のケースでも類似の像を参考にした複製が計画されたが、その形状が複雑な為、各部位の寸法を拾うことは非常に手間と時間を要する。このような場合、最近では三次元スキャナを適用する事例が増えてきている。

我々も、現在市販されているスキャナの適用可能性を検討し、最終的に Xtion(Kinect)での計測方法の適用を試みた。同装置は、モーションキャプチャによるヒューマンインターフェースとして開発・市販されているが、センサ部には高精度の距離画像カメラを内蔵している。今回このセンサをスキャナとして活用するため、ソフトウェアならびにハードを整備し、鯨の全体形状をとらえることに成功した。さらに、そのデータをもとに、CAD 情報のほか三次元プリンタを活用するなど製作支援を行う様々な情報加工を行った。

#### §1.はじめに

現在駿府城公園内において駿府城坤櫓(ひつじさるやぐら)復元工事(図 - 1)が進められている。

駿府城は、江戸時代初期に徳川家康により大修築が行われ、現在残っている城郭はその当時に形成されたとされている。中掘りの内側は駿府城公園として整備されており、築城当時の建造物を再現する試みとして東御門高麗門、東御門櫓門、東御門多間櫓、巽櫓等がすでに復元されている。



図 - 1 駿府城公園 坤櫓復元工事

今回の坤櫓の復元工事は、同整備の一環で当社東京支店・寺建築・住宅部、および名古屋支店にて施工が進められているものである。同工事においてもその細部を可能な限り史実に近い形で再現するために、様々な取組を行っている。同取組の一環として、その屋根部には当時の様子に近い状態で鯨を設置することが計画された。

同櫓のシンボリック的存在である鯨に対しては、現在駿府城公園内資料館内に展示されている鯨(図-2)を参考に再現することとなった。同鯨は、公園整備の際に堀の中



図-2 展示中の鯨



図-3 発掘当時の様子

に沈んでいたものを引き上げ(図-3)、同資料館に展示しているものである。同鯨は駿府城内の建造物に設置されていたと考えられることから、今回の櫓復元工事においてはこの鯨を元に再現した像の設置が推進された。

この作業における課題は、資料館内に展示中の鯨の寸法を正確に計測し、金型を製作するところにある。この課題に対し、従来は写真撮影・写真測量や型取りなどを介して各所の寸法をメジャー等で実測することで対応してきた。

しかし、近年このような事例に対し、形状スキャナの利用が盛んになりつつある。非接触で対象の実寸形状を取得できるため、今回の事例に限らず歴史的建造物等の観測への有効性は高い<sup>9)</sup>。そこで、今回当社技術研究所で試験運用<sup>9)</sup>を実施している超小型のスキャナシステムを用いて、同鯨の形状計測から、金型製作に必要な情報の作成までを実施した。

本報告は、その経緯を記すものである。

## §2.観測対象の鯨と観測装置

### 2.1 展示状態

観測対象となる鯨は、高さ約1.4m、ひれを含めた幅約0.9m、青銅製で重さ約500kgである。展示状態は、木製の台座の上に完全に固定された状態である。

鯨の周りを周回する事は可能であるため、ハンディ型のスキャナであれば観測が可能である。一方、据え置き型のスキャナで観測するには、自由度の低い空間であるため観測できない部分が多数発生することが予想された。

### 2.2 観測装置

現在、三次元形状スキャナは多数の装置が市販されており、今回もそれらの利用を検討した(表-1)。

表-1 市販されている主な三次元スキャナ

装置例	外観	観測範囲/精度/特徴
GLS1500		150m 範囲 精度 4mm 据置計測、観測時間 30 分~数時間
ARTEC3D		1m 範囲 精度 0.1mm ハンディ利用可 リアルタイム合成が可能
Kinect		3m 範囲を観測。精度非公開。 ハンディ利用可 標準機能で
Xtion		はないが形状リアルタイム計測・合成が可能

今回の計測対象の大きさや、周囲が計測装置を設置できるスペースが非常に少ないこと、一般展示中の施設であり計測にそれほど時間をかけられないこと、できるだけ費用を抑えて実施したいことなどから、今回は小型の距離カメラとして最近着目されている Xtion を利用した。この装置には、MicroSoft 社の Kinect と同じ PrimeSense 社の距離画像センサが搭載されている。ま

た、Xtion の場合は、Kinect よりも小型で、USB 給電で動作する点も評価された。

このセンサは、人のモーションキャプチャによるマンマシンインターフェースを実現するために開発された製品である。その基本機能はパターン投影による高精度でリアルタイムでの形状観測が可能な距離カメラとなっている。今回この距離カメラ機能を利用することで手軽な形状スキャナとして活用することが可能であることに着目した。

しかし、Xtion は形状スキャナとしては販売されている製品ではない。そのため出力データを形状データとして独自に利用するためには、PC 内に専用のプログラム環境を整える必要がある。MicroSoft<sup>®</sup> や OpenNI<sup>®</sup>、PCL<sup>®</sup>等の企業、団体が同センサから形状情報を抽出するプログラムを低価格、あるいはフリーで提供している。今回は PCL が提供する点群処理ライブラリを活用することで、形状スキャナとしてソフトウェアを実現した。さらに、計測時に操作が容易になるように、手元部分で操作ができるようにマウス機能を搭載したグリップ機構(図 - 4)も製作した。



図 - 4 ハンドグリップ加工

同センサは約 3m 範囲の物体形状を 1 度に距離画像点群として記録することができる。この点群データは三次元実寸座標を表す形状情報である。しかし 1 視点からだけでは死角が発生する。そこで、計測を連続的に行い、形状データ同士の位置合わせを実施することで、全体形状を構築している。

また、Xtion のメーカーからは計測精度を一般に公開はしていない。そこで、精度確認に関しては、当社技術研究所を中心に実験的に検証を進め<sup>⑧</sup>、今回の計測の目安であるうろこの状態を把握できる 5mm 程度の精度は確保可能と判断した。

## 2.3 計測

計測は、図 - 5 に示すように像の周囲を廻るように、スキャンを行う人と PC を持つ人の 2 名 1 組にて計測を実施した。計測に要した時間は、準備を含め約 1 時間程



図 - 5 計測の様子

度である。本体の計測は、約 5 分程度で完了しており、今回の装置の運用性能の高いことが確認された。

計測点群に対しメッシュ化を適用した結果を図 - 6 に示す。鯨の外形および表面の鱗や顔の凹凸を把握している様子が確認できる。

寸法に関しては、本体計測自体が不安定なメジャー計測しか実施できないためあくまで参考値であるが、本体高さ約 1400mm に対し、観測形状からの結果は 1390mm であった。

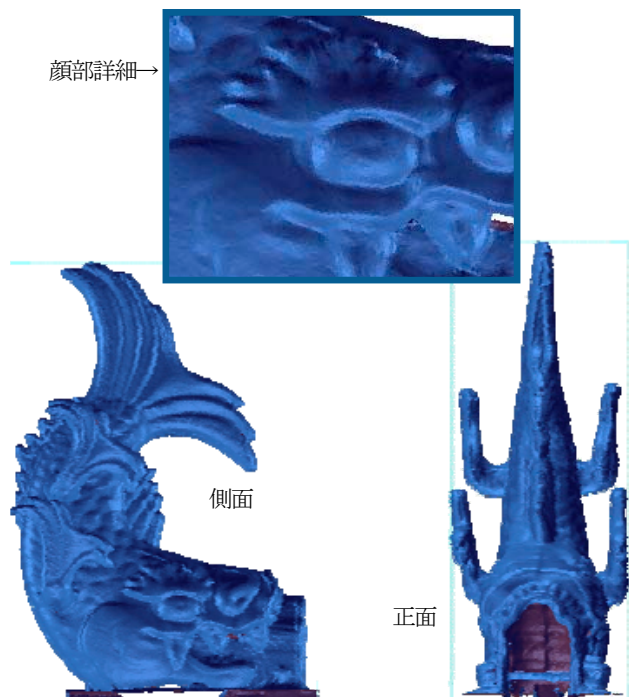


図 - 6 観測結果



### §3.金型の製作

#### 3.1 製作プロセス

今回の計測は最終的には櫓に取り付ける鯨を製作することが目的である。以下に今回の鯨の製作プロセスを示す。

##### 鯨製作プロセス

- ① 発掘青銅製鯨を三次元形状測定
- ② 三次元データからNC加工機にて鋳物原形を作成
- ③ 同原形(展示鯨)の劣化部及び不具合部を手作業にて修正
- ④ 対になる鯨(「阿吽」にて一対)を復元原形を参照して製作(1部手作業)
- ⑤ 鋳物原形からゴム型作成
- ⑥ ゴム型よりロストワックス型作成
- ⑦ ロストワックス型から砂型作成
- ⑧ 砂型に溶解した青銅を流し込む
- ⑨ 砂型解体後、パーツ組立
- ⑩ 研磨仕上後、塗装仕上
- ⑪ 金箔押し 完成

今回実施した三次元計測は、上記の主に①②の工程に大きく関わるものである。従来この工程は手作業で行われた。各部分のメジャー計測や型紙による型取りなどの手法しかなかったため、職人による多大な時間と労力を要するものである。この作業を約数時間程度に圧縮できたことは、今回の取組みの大きな収穫である。

さらに、計測データのメッシュ表現も、職人によるトレースにほぼ匹敵するか、あるいは人が実現する以上の再現性がある。

また、この情報を元に実際に金型を製作したが、これらの工程で利用した特長的なデータ加工について示す。そのために必要とされた様々なデータ加工を行った。

#### 3.2 各プロセスとデータの利用

今回設置予定の鯨は櫓の大きさとのバランスなどの理由から、資料館の原型よりやや小さめの高さ **1200mm** に縮小した大きさで金型を製作することとなった。そのためスキャナデータを同高さに合わせて **XYZ** 方向均等にリサイズしたデータを最終的なモデルデータとしている(図-7)。

このようなリサイズを、形状全体に適用できることは、今回のような形状計測データの特徴といえる。この作業を手作業で実施することは、今回のような複雑な形状に

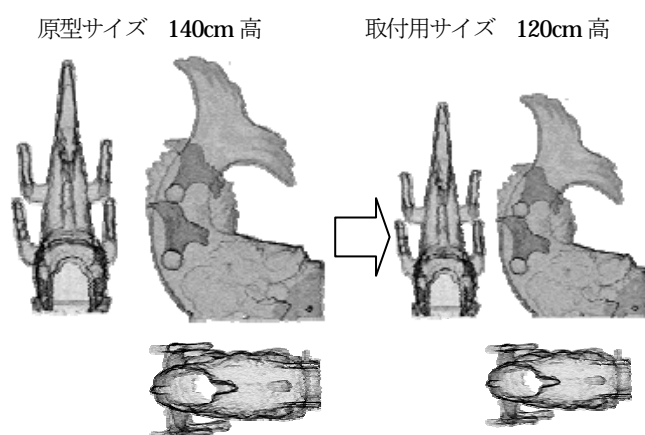


図-7 リサイズ 均等縮小



図-8 実大寸法図と鋳型原型

おいてはかなりの困難が予想される。

リサイズ後のデータを元に、図-8内左に示す実大寸法図の作成と同図内右に示す鋳物原型(鯨製作プロセス②)を作成している。

この鋳物原型は、展示物の複製であるため、その劣化部分も正確に再現してしまっている。特にうろこや鯨の表情の凹凸は、長年の風化やさびによって本来のシャープさが失われていると考えられるため、この点に関しては職人によりエッジの強調・修正を施している。

また、展示中の原型は元々左右別々に作成され、それを組み合わせて一体化させたものであったため、微妙に形状に差異があった。それらのバランス調整も職人の手作業にて実施している。

他の城郭でも同様であるが、鯨も狛犬のように「阿吽(あ・うん)」一対で設置される。今回の鯨も同様に阿吽の鯨を用意している。展示中の鯨は口をあけた「阿」であるため、口を閉じた「吽」については「阿」の原型を元に修正を行っている。



図 - 9 最終鯨铸件原型 「阿吽」



図 - 11 青銅で作成された鯨(塗装前)

以上の修正を元に最終的な铸件原型を用意した(鯨製作プロセス③④)。

このような修正も、形状計測データの反映があったため比較的軽微な修正で完了したと考えられる。この点においても形状計測による時短効果があったと認められる。

今回の三次元計測情報の利用に三次元プリンタ出力がある(図 - 10)。近年三次元プリンタ装置が急速に企業に導入されつつあり、今回のデータ加工の一環でもその出力を行った。主に作成したのは 1/5 と 1/10 サイズの鯨である。金型職人の作成支援はもちろん、関係各所への説明用の資料としても非常説得力のある資料として活用された。

铸件原型完成後は、鯨製作プロセス⑤～⑨に従いロストワックス法により青銅像を作成し(図 - 11)、最終塗装と金箔押し(図 - 12)の後、2013年8月30日に無事取付けを完了した(図 - 13)。



図 - 12 仕上塗装及び金箔押し



図 - 10 三次元プリンタ出力

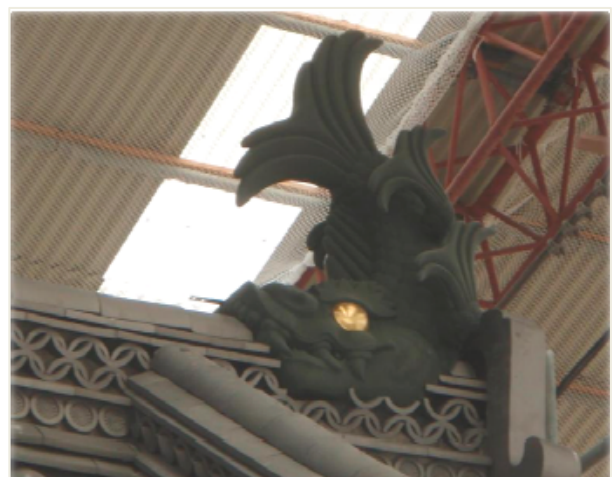


図 - 13 鯨設置状況

## §4.考察

今回の取組みは、鯨複製のため三次元スキャナを活用し、様々な金型作成支援を行ったものである。三次元スキャナ活用自体は決して目新しくはないが、特筆すべきは、比較的廉価に入手できる装置で今回のような複雑な形状の計測から、データの加工まで一貫して行った点にある。鯨の鱗等も正確に再現されており、取得形状の品質も十分使用に耐えるものであった。

スキャナの利用による時短効果は、本取組みでも明らかであり、リサイズなど従来困難であった修正もほぼ瞬時にできる点も、形状データならではの点である。

原型加工の鯨製作プロセス③④においては、実模型上での修正を行っているが、三次元モデル修正ソフトも市販されているため、技能が許せばこれらの修正もソフト上で完結すると考えられる。

さらに今回試行した三次元プリンタの事例でも明らかであるが、ソフト上の形状を実模型として出力が可能である。将来実際に取り付ける最終形状も出力できる可能性は十分考えられる。鯨製作プロセス⑤～⑨にいたる部分も三次元プリント技術が適用可能となると三次元スキャンの活用は今後大きく幅を広げる可能性が高まる。

### <参考文献>

- 1) 平井聖, “図説日本城郭大事典2”, 日本図書センター, 2000.2
- 2) 竹内啓五, 巽耕一, 山内裕之, 脇登志夫, 西村正三, “レーザースキャナを用いた「石垣修復システム」の開発”, 精密工学会秋季大会シンポジウム資料, pp.93-96, 2007-09
- 3) 味岡 収他, “軍艦島を事例とした近代化産業遺産のドキュメンテーションに関する新しい計測手法について” 2012 年日本建築学会学術講演梗概集 建築歴史・意匠, pp.245-246, 2012-09
- 4) 竹内啓五他, “鉄筋観測のための小型形状スキャナの適用性評価”, 2012 年日本建築学会学術講演梗概集 材料施工, pp.193-194, 2012-09.
- 5) "Kinect for Windows", <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>, 2013
- 6) "OpenNI", <http://www.openni.org/>, 2013
- 7) "PCL", <http://pointclouds.org/>, 2013
- 8) 深瀬勇太郎, 塚原裕一, “エレベータシャフトアスベスト封じ込めロボットへの形状センサの応用”, 第 19 回建設の自動化技術シンポジウム予稿集, pp73-78, 2011-01

## §5.おわりに

駿府城公園内駿府城坤櫓復元工事にて櫓に設置する鯨を再現するため、現存する出土品を三次元計測することで金型製作用のデータを作成した。

計測には市販の距離画像センサ活用し、ソフトとハードをスキャナ用に整備することで、ハンディスキャナとして十分活用できることを示した。

文化財・史跡の復元に対し、今回のような三次元計測が有効性を持つことが改めて確認された。特にハンドリングの容易な同装置の適用範囲は今後も増えるものと考えられる。

### 謝辞

同計測に際し、静岡市都市局都市計画部公園整備課にご協力いただきました。ここにあらためて感謝の意を記します。