

3Dレーザースキャナーによる人体模型のデジタル化

渡辺 定博¹, 片山 修¹, 二木 啓¹, 藤井ひろみ¹, 石原 逸子¹

¹神戸市看護大学

キーワード：人体模型 デジタル化 3Dスキャナー

Digitalization of Anatomical Models of the Human Body by 3D Laser Scanner

Sadahiro WATANABE¹, Osamu KATAYAMA¹, Akira FUTATSUGI¹, Hiromi FUJII¹,
Itsuko ISHIHARA¹

¹ Kobe City College of Nursing.

Key words: Human Anatomical Model, 3D Digitalization, 3D Laser Scanner

要 旨

人体模型は古くから教育の場で活用され、先人達の工夫が凝らされた貴重な財産である。昨今のデジタル教材の発達で使われることが減った人体模型を再活用するために、レーザー光を用いる3Dスキャナーを用いて人体模型のデジタル化を行った。レーザー光によるデータ取得により、模型の立体構造は細部まで正確に再現され、頭蓋骨、骨盤、椎骨などの骨格模型は、ほぼ実物と同等レベルの3次元デジタル画像として再現された。デジタル画像はモニター上で拡大・縮小・回転が可能であり、講義で十分に活用できるものとなった。一方でレーザー光による方法では、模型表面のテクスチャーを完全に再現することが難しいため、色や模様で立体感を表現している部位については、細かな構造の再現は不完全であった。

Abstract

Anatomical models of the human body have been used for educational purposes from long ago, and it is a valuable asset that embodies the ingenuity of our predecessors. Recently, the usage of anatomical models of the human body has been reduced due to the development of digital educational materials. In order to re-utilize the models, we digitalized several anatomical models by 3D scanners using by laser light. Based on the data acquisition through laser light, even detailed parts are reproduced accurately in the three-dimensional structure of the model. The skeleton model such as skull, pelvis, and vertebra were reproduced almost equal to actual body parts as three dimension digital images. As the digital images can be expanded, reduced and rotated on the monitor, they became good enough to use in lectures. On the other hand, it is difficult to reproduce the surface texture of the model completely using the laser light method. Therefore, the reproduction of the detailed structure was imperfect with regard to the parts where three-dimensionality is expressed with colors and patterns.

序 文

近年のICTの進歩に伴い、教育の現場では様々な場面でデジタル教材が活用されている。人体の構造を学ぶ解剖学においても、様々なデジタル教材が開発され（Hohne,2001；村上,2008；里田,2013；猪股,2015）、タブレット型端末を利用した講義や実習も行われるよ

うになっている。また、ネット上では解剖関連のコンテンツが閲覧できるサイトも多数存在する（Visible Body,2007；Digital Anatomist Project,2008；菅本,2014）。

このようなバーチャルな教材の活用が増える一方で、古くから存在する実物の人体模型を講義で活用する機会はかなり減っている。実物の模型の場合、数に限りがあるため学生が手にとって触れる機会は限られ、教

壇で多くの学生に提示しても近くの学生しかよく見ることは出来ないなど、教育効果に課題があることに加え、講義の際の運搬や損傷時の修理、保管場所の確保など、模型の維持管理にも手間や費用がかさむことなどが、その利用を妨げる要因となっていると考えられる。

人体模型については、江戸時代の本製の模型（片岡,2006）やキュンストレーキと呼ばれる紙製の模型（石田,1984）、ムラージュと呼ばれる蠟による模型（長門谷,2008）など、古典的な模型や特殊な模型に関して医史学的研究が報告されている。一方、現在使われている一般的な解剖教材としての人体模型に関しては、純粋な研究対象とされるよりも、模型製作会社が教育関係者などと協力して独自に開発してきた経緯がある（島津製作所創業記念資料館資料,2017）。このような先人達が苦労して作り上げてきた様々な人体模型には、教育効果を高めるための様々な工夫が凝らされており、自分の手にとって実感しながら観察できるメリットは捨てがたく、その利用価値が無くなったとは言いがたい。

一方で、既存のデジタル教材の多くは、作者が意図した形式にコンテンツがまとめられているため、様々な観点から観察や学習ができる便利な機能を備えている。その反面、表示機能が豊富に組み込まれており、メニュー画面上にいろいろな操作ボタンが配置され、それをクリックするとそれまでの表示画面の様子がガラッと変化したりするなど、実際の講義で利用する際には使いにくい部分も多い。

このような背景から我々は、古くから手元に保有している実物の人体模型を3次元的にデジタル化して、単純に模型のみを表示することにより有効活用する方法を試みてきた。ひとつの方法として、実物の模型を様々な方向からデジタルカメラで撮影し、専用ソフト（Strata Food 3D）を利用してコンピュータ上で3次元モデルに変換する方法を試みた（渡辺,2008）。Strata Food 3Dは比較的安価なソフトであることと、手持ちのデジタルカメラで撮影することにより簡便に模型を作成できる利点があり、実際に脳室の鋳型標本などから十分に実用に耐えうるデジタル模型を作成することが可能であった。しかし一方で、立体のシルエットをベースとして立体化するというソフトの原理がネックとなり、大きなへこみのある部分を立体化できないという大きな欠点があった。



図1 NextEngine社のレーザースキャナーNextEngine HD Pro

そこで今回、これらの欠点を克服する手段として、レーザー光を利用した立体スキャナーを利用する方法を試みた。この方法では、対象物に複数のレーザー光線を照射し、その光線のゆがみを利用して奥行きデータを取得するため、へこみのある構造でも3次元像として再構築することが可能となる。

材料と方法

使用した模型

今回使用した模型は、骨盤模型、頭蓋骨模型（各部の頭蓋骨に分解可能）、椎骨模型（2つの腰椎と椎間円板を含む）、脳と頭蓋底の模型（脳は各部を分解可能）の4種類である。

使用機器およびソフトウェア

3次元スキャナーは、NextEngine社のレーザースキャナーであるNextEngine HD Pro（図1）を使用した。スキャナーの操作は、ノート型パソコン（Intel Core i7、RAM 8.00GB、Microsoft Windows7 Home Premium（64bit版）搭載）にインストールしたソフトウェア（ScanStudio HD Pro）を用いた。ScanStudio HD Proは、スキャン操作および初期の画像処理を行うためのスキャナー付属の専用ソフトである。取得した画像の3次元化は、CADソフトのRapidWorks（NextEngine社 Ver.3.0.3）を用いた。

操作の概略

（1）スキャナー専用のターンテーブル上に模型を設置する。分解可能な模型の場合、組み立てた全

体像の他に部品毎のデータも個別に取得する。

- (2) スキャナーの設定により、ターンテーブルを一定の角度毎に回転させ、複数の角度からスキャンデータを取得する。一方向のスキャンに要する時間は、スタンダードモードで約1分30秒、ハイデンシティーモードで約3分である。例えば、模型全周を60度ずつ6回に分けて360度スキャンする場合は、モードによって9分ないし18分を要することになる。レーザー光が当たりにくい特殊な形態の部位については、さらに特定の角度からのスキャンを加える必要がある。
- (3) 立体表面のスキャンデータは、周辺部が少しずつ重なる小領域に分けて取得される。ScanStudio HD Pro上では、これら小領域毎のデータを寄せ集めて、周辺部の重なり具合を基準に大まかに相互の位置関係を合わせ、模型全体の形態を組み上げる。位置合わせの際には、隣接する2枚の画像を表示させ、相互に重なる場所に手動でマーカーを設置した後、ソフトのalign機能を使うことにより、簡易の位置合わせが行われる。マーカーは少なくとも立体上の異なる3ポイントを選んでそれぞれに異なるマーカーを設置する必要がある。また必要に応じて、各画像の不要部分の削除を行う（初期画像処理）。
- (4) ScanStudio HD Proで行った位置合わせは大まかなものであるため、細部の位置合わせを正確に行うために、初期画像処理後のスキャンデータをCADソフトのRapidWorksに転送する。
- (5) RapidWorks上でスキャンデータの精密な位置合わせを行う。分解可能な模型を複数の部品に分けてデータを取得したような場合は、必要に応じて各部品の位置合わせをこの時点で行う。
- (6) 最適化メッシュ処理など、3次元化処理に必要な処理を行った後、最終データをブラウザ上で閲覧できるファイル形式で書き出して保存する（icfファイル形式）。

シリコン樹脂による鋳型作成

椎骨模型における椎孔に関しては、外側からレーザー光線を当てる方法では椎孔内壁をスキャンできないため、椎孔の鋳型を利用する方法を用いた。鋳型作成には低粘度縮合タイプ型取り用シリコンゴム（信越化学工業株式会社、KE-14）を使い、椎孔に樹脂を

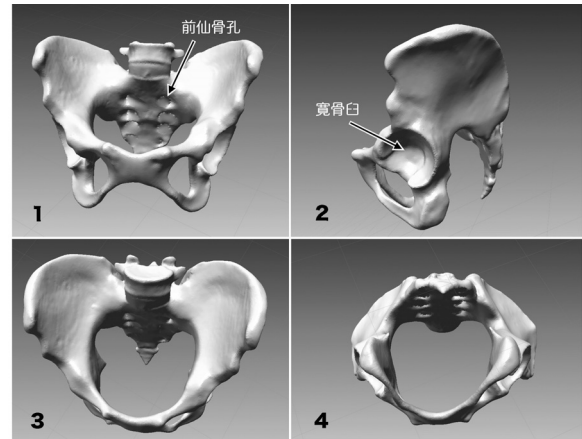


図2 骨盤模型のデジタル表示

1：前面、2：左側面、3：上面、4：下面

様々な方向に動かすことにより、骨盤各部の微妙な立体感を正確に把握できる

流し込んで室温で24時間硬化させた。椎孔の形に硬化したシリコンゴムを椎孔から取り出した後、その形態を3Dスキャナーでデータ化した。そしてあらかじめ取得しておいた椎骨全体のデータから鋳型のデータを引き算（ブーリアン演算）することにより、椎孔の内壁を含めた立体像を完成させた。

結 果

(1) 骨盤の模型

骨盤は一見その形を簡単に把握できそうに見えるが、骨盤全体の傾き具合と骨盤腔の位置づけなどに関して、2次元画像から感じ取るイメージと実物の立体イメージの間にはかなりの違いがある。

図2は、今回の手法でデジタル化した骨盤模型を様々な方向から見た画像である。画面上であらゆる方向に自由に動かしながら観察することで、自分で骨盤を手にとって観察するのと同じ感覚で、骨盤の立体感を認識することが可能であった。

寛骨臼や前仙骨孔周辺の微妙な凹みも正確に再現されており、大骨盤と小骨盤のイメージも画面上で動かしながら観察すると理解しやすくなった。なお、仙骨内部の椎孔の連なりである仙骨管については、レーザー光の到達できない管の内部を再現することができなかった。後述する鋳型を用いる方法を駆使すれば再現の可能性もあると考えている。

(2) 頭蓋骨の模型

成人の頭蓋骨は通常28個の骨が縫合によって組み合わされているが、特に頭蓋底部にある蝶形骨や鼻腔周辺に存在する篩骨は外側からは観察しにくい骨、学生には理解しにくい骨である。

図3は分解可能な頭蓋骨模型の全体像をデジタル化したものである。この模型を構成する個々の頭蓋骨を別々にデジタル化し、個別に表示するとともに、複数の骨を様々な組み合わせで表示することが可能となった。

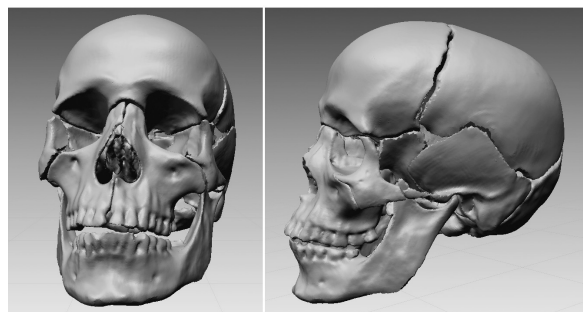


図3 デジタル化した頭蓋骨模型の全景

図4-1, 2は、蝶形骨を単独で表示した例であり、角度を変えて観察することにより、下垂体窩をはじめとするこの骨の特徴的な形を理解することができる。図4-3は、蝶形骨と篩骨を組み合わせて示した例であり、図4-4はさらにこれらに上顎骨を加えて同時に表示した例である。蝶形骨や篩骨といった外側から観察しにくい骨は、上顎骨や前頭骨などの外側から認識しやすい骨と組み合わせて表示することにより、頭蓋骨全体におけるこれらの骨の位置づけを理解しやすくなった。

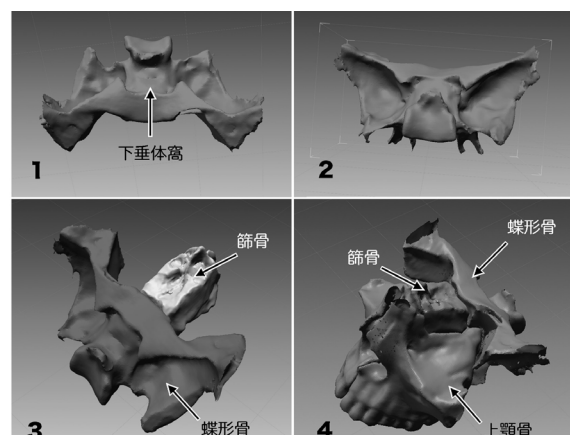


図4 蝶形骨と周辺の骨

1：蝶形骨上面、2：蝶形骨後面、3：篩骨+蝶形骨（右斜め後上方から見た）、4：篩骨+上顎骨+蝶形骨（左斜め前上方から見た）

篩骨や上顎骨との組み合わせで表示することにより、蝶形骨や篩骨の頭蓋骨内での位置づけを理解しやすくなる。

(3) 椎骨の模型

脊柱は椎骨の単純な積み重なりではなく、椎骨同士の特徴的な構造が相互に連結することにより構成されており、椎骨の基本構造を理解すると共に、椎骨同士の相互の立体配置を理解することも重要である。そこでまず、代表的な椎骨である腰椎模型のデジタル化を行った。

図5-1, 2は単独の腰椎模型をデジタル化した像である。画面上で自由に動かすことにより、椎体と7つの突起の位置関係や各部の大きさを容易に認識することが出来る。椎骨背側に存在する椎孔は、その内壁にレーザー光を当てることが出来ないため、方法で述べたシリコーン樹脂による鋳型作成とソフトのブーリアン機能を利用することにより、その形を正確に再現す

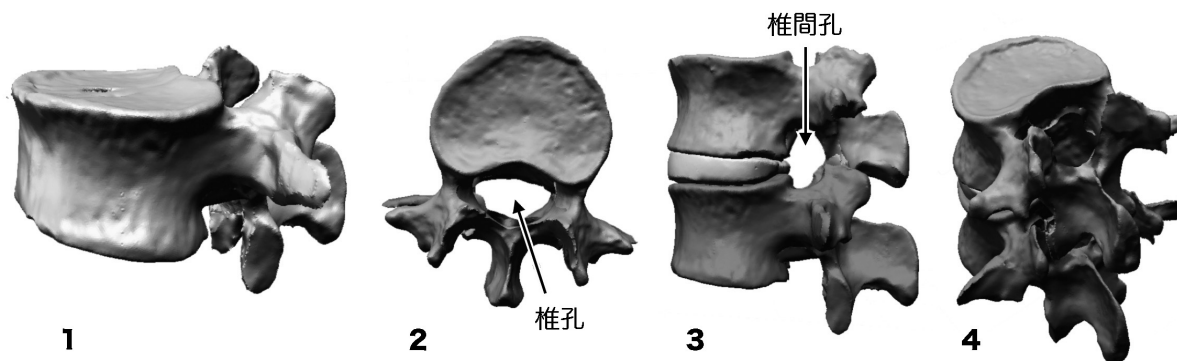


図5 椎骨のデジタル化

1：椎骨側面。骨表面の細かな凹凸まで再現されている。

2：椎骨上面。椎孔が再現されている。

3：椎骨の重なり。椎間孔が再現されている。

4：斜め後上方から見た椎骨。横突起や棘突起の関連性が良く観察できる。

ることができた(図5-2)。

図5-3, 4は2個の腰椎とその間の椎間円板を組み合わせて表示した例である。これら3つのパーツはあらかじめ別々にデジタル化してあるため、それぞれの構造は細かく再現されており、各椎骨の椎孔も正しく再現されている。この3つのパーツをRapidWorks上で位置合わせ機能を利用して相互の位置合わせを行うことにより、椎孔が縦に連なって出来るいわゆる脊柱管の一部を観察することも可能となった。この他にも、椎体や椎弓といった基本構造を理解するだけでなく、2個の椎骨を組み合わせた状態で観察できる椎間孔(図5-3)や、上・下の関節突起の相互関係(図5-4)などの重要な構造についても観察できるようになった。

模型をいろいろな方向に動かしてみることで、各部の現実的な位置づけを理解することで、脊柱を構成する上での椎骨同士の結合状態という基本概念を深く理解できるようになった。

(4) 脳と頭蓋底の模型

脳とそれを収める頭蓋底の立体構造を理解する模型として、脳の半球と頭蓋底部を組み合わせた模型(図6-1)のデジタル化を行った。

図6-2は内頭蓋底の様子を上から観察した例であるが、内頭蓋底を構成する前頭蓋窩、中頭蓋窩、後頭蓋窩といった脳を受ける基本構造の立体感がうまく再現されている。さらに脳と頭蓋底を組み合わせた立体像(図6-3)では、脳の前頭葉が前頭蓋窩に、後頭葉が後頭蓋窩に乗る形で収まる様子が観察でき、脳と頭蓋底の位置関係を理解するのに有用なモデルとなった。

一方、脳の表面に存在する代表的な回と溝は、それ自体の立体形状は今回のデジタル化でもきちんと再現されたが、その表面にテクスチャーとして描かれている血管の様子に関しては再現が不十分で、場所によっては血管の走行を正しく追うことが不可能であった(図6-1の元の脳表面の血管と図6-4のデジタル化を行った脳表面の血管を比較すると、後者では血管がうまく再現されていないことがわかる)。CADソフトであるRapidWorksは、立体としての構造を再現する能力は高いが、表面の色や質感を表すテクスチャーに関しては正確に再現する能力に限界がある。このために、凹凸の少ない表面にテクスチャーとしてカラーで

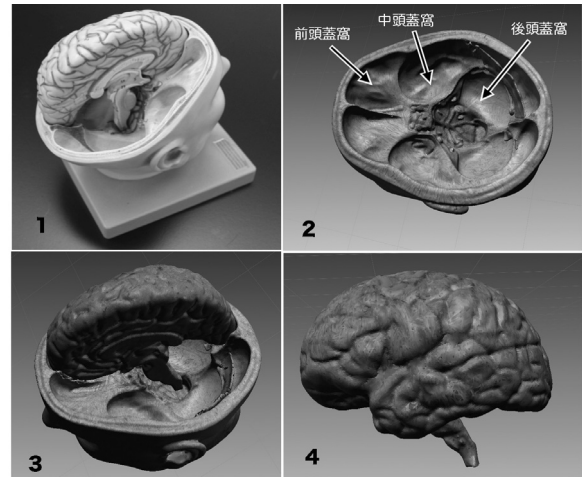


図6 脳とそれを受ける頭蓋底の模型

- 1: 実物模型のカメラによる撮影像。脳の半球(小脳を省く)とそれを受ける脳底部の様子が分かるように配置してある。
- 2: 1の模型から脳を外し、頭蓋底を上から見下ろしたデジタル像。前、中、後頭蓋窩が階段状に配置されている様子が明瞭に観察できる。
- 3: 脳と頭蓋底の関係を斜め上方から見たデジタル像。前頭葉が前頭蓋窩に乗る様子などがよくわかる。
- 4: 脳のみをデジタル化したデジタル像(小脳を省く)。代表的な回や溝は立体として再現されているが、さらにその表面に描かれている血管の様子は、テクスチャーが乱れて正確に再現されていない。

描かれた構造に関しては、デジタル化で正確に再現することはできなかった。

考 察

方法の比較

今回用いたNextEngine HD Proというスキャナーは、立体の形態を正確に計測して再現することを目的としており、複数のレーザー光を立体表面に照射しながら移動させ、表面の凹凸に応じてレーザー光線が歪む様子を基に立体構造を再現している。以前に報告したデジタルカメラとStrata Foto 3Dというソフトを用いる方法(渡辺,2008)の場合は、ターンテーブル上にキャリブレーションマット(目印となるドットを印刷したマット)を敷き、その上に乗せた模型とマットを様々な角度から撮影し、ドットの向きの変化と模型のシルエットの変化を目安として元の立体を再現している。シルエットに反映できない凹んだ構造については、立体構造そのものを正確に再現するのではなく、テクスチャーを利用してあたかも立体構造があるかのように見せる方法が用いられている。しかしテクスチャーでは補完できない深い溝や大きな凹みについては、形態

を再現することが不可能であった。今回のスキャナーによる方法では、レーザー光線を直接当てることのできる構造であれば、その形態を立体として再現することができる。従って、頭蓋内腔の様子や骨盤の寛骨臼など、StrataFoto 3 Dによる方法で再現できなかった凹みも正確に再現することが可能となった。

一方、NextEngine HD Proによる模型表面のテクスチャーの取得は、スキャナー本体に備わったLEDライトで対象物を照明し、ターンテーブルの角度を変えながら静止画像として撮影した画像を立体表面に貼り付けることにより行われる。基本的にはStrata Foto 3 Dの場合と類似の方法ではあるが、おそらくプログラムの基本的な考え方の違いからか、テクスチャーを正確に再現することができなかった。この問題は、対象物へどの方向からも均一な光を当て、撮影の角度を変えた時に模型表面の色調や明るさが変化しないように設定することでかなり改善される可能性がある（メーカー技術者との私信）。しかし現実問題として、このように均一な照明を当てることは非常に難しく、このあたりはNextEngine HD Proでテクスチャーを取得する上での限界であろう。

対象物の大きさに関しては、NextEngine HD Proは、スキャナー本体から対象物までの最大距離が約1mであり、大型の対象物を一度にスキャンすることは不可能である。例えば実物大のトルソ（胴体模型）や全身の骨格模型のような大きな模型のデジタル化には向いていない。一方Strata Foto 3 Dの方は、大型のターンテーブルを用意するなど撮影条件を整えば、かなり大型の模型にも対応可能と考えられる。

費用面では、Strata Foto 3 Dが定価6万円であるのに対してNextEngine HD Proは約60万円（付属ソフトScanStudio HD Pro込み）と高価である。作業効率の面でも、Strata Foto 3 Dの場合、ソフト上でのマスク処理（対象物とキャリブレーションマット以外の背景画像を除外する作業）に要する作業時間が撮影枚数によってかなり異なるが、立体のデジタル化まで数時間程度で終えることも可能である。このようにStrata Foto 3 Dの方が費用や効率面では有利であるが、この方法の場合、大きな凹みを再現できないという欠点があり、必ずしもすべての模型のデジタル化に有用とは言えない。

テクスチャーによる凹みの再現性がどの程度可能であるか、あるいはどの程度の大きさの模型をデジタル

化するかなど、対象とする模型の条件に応じて方法を使い分ける必要があると考える。

デジタル化のメリット

人体模型を使う際には、模型のどの部分をどのように活用するかは学生や教員の個人によって異なり、また同じ模型であっても学ぼうとする視点や教える内容によってその使い方が変わる。実物の人体模型を使う利点は、その場その場に応じて臨機応変に模型を使うことができることであろう。今回のデジタル模型の場合は、実物として存在していた模型を単純にデジタル化しただけであるため、直接自分の手で触れることこそできないものの、それ以外の部分では現実の模型を使っていた時とほぼ同じレベルで使うことが可能である。

一方、デジタル化した模型のデータは、模型毎に個別のファイルとして保存することができるため、パソコンのデスクトップに複数のファイルを同時に展開することが可能となる。従って、関連する複数の模型を同時に並べて表示することが可能であり、例えば今回の例では、単一の椎骨の像と複数組み合わせた椎骨の像を同時に観察することにより、椎骨の基本構造とその連結による脊柱の構成の仕方を理解しやすくなった。しかも両方の画像はその画面上で自由に回転、拡大、縮小が可能であることも利点となる。また分解可能な模型の場合では、異なった分解状態の模型を同一画面上に同時に表示することが可能であり、頭蓋骨の分解模型で示したように、元は頭蓋骨としてひとつの組み合わせだった模型を、複数の異なった分解レベルの模型として表示することにより、相互の骨の位置関係を理解することが容易になる。

このように、実物模型をデジタル化することは、単に立体をデジタル表示することが出来るようになるだけでなく、実物模型ではかなえられなかった表示方法も可能となる点は、この方法のメリットではないかと考える。

今後の展望

実物模型に関しては、数に限りがあり、教壇近くの学生しかよく見ることが出来ないことや、運搬や損傷時の修理、保管場所の確保といった模型の維持管理に問題があることなど、利用に際して様々な問題点があった。

今回作成したモデルでは、一部の模型を試験的に大学のサーバー上に載せることにより、学内LAN経由でも閲覧できることを確認した。従って、学生側の情報端末の環境が整備されれば、教員と学生個人が同時に同じ画面を閲覧できるようになり、数の問題や距離の問題は解決可能となる。さらに、学外からも模型にアクセスできるようにすれば、学生は自宅からも模型を使った学習が可能となり、教員も学外での模型の利用が可能となる。また模型の維持管理に関しても、デジタル模型のデータのバックアップやサーバー上のファイル管理をしっかりと行えば、問題点はなくなると考える。

デジタル模型の有効活用という観点では、複数の教育施設で所有する様々な異なった模型をネット経由で共有することが可能となれば、必ずしも手持ちの模型全てを自らの手でデジタル化する必要はなくなり、入手困難な模型などについても有効活用ができるようになるものと考えている。

近年活用の機会が減ってきたと思われる人体模型ではあるが、このように実物模型をデジタル化することには様々な点でメリットがあり、再び活用の幅を広げることが可能となるものと考えている。

謝 辞

本研究は平成24年度神戸市看護大学共同研究費（重点研究）の助成により行ったものである。また椎骨の模型については、平成27年度の本学研究演習の課題として学生が取り組んだものである。

利益相反

本研究では、利益相反に関して申告すべき内容は含まれていない。

文 献

Digital Anatomist Project (2008). (<http://www9.biostr.washington.edu/da.html>) (2017年12月25日閲覧)
 Hohne, KH et al. (2001). VOXEL-MAN 3 D-Navigator: Brain and Skull, Springer.
 猪股玲子, 亀澤 一, 駒崎伸二 (2015). 医学教育におけるデジタル教材システムの開発とその効果的な活用

法の検討, 埼玉医科大学雑誌 42:51-53.
 石田純郎、ムルダール ベレム・ヨップ、ボイケルム ハルム (1984). フランス人解剖学者オズー作のキュンストレーキについて, 日本医史学雑誌 30 (1) :56-61
 片岡勝子、洲崎悦子、安嶋紀昭 (2006). 江戸時代に制作された木骨, 特に星野木骨について, 解剖学雑誌 81 (1) :7-12
 村上徹 (2008). CGで見る筋肉図典 筋ナビ, ラウンドフラット.
 長門谷洋治 (2008). ムラージュをめぐる, 日本医学史雑誌 34 (2) :294-303
 里田隆博、戸原玄 (2013). CGと機能模型でわかる！摂食・嚥下と誤嚥のメカニズム, 医歯薬出版.
 島津製作所創業記念資料館資料 (2017). The Moment 第二章「二人の島津源蔵 (2)」, (<https://www.shimadzu.co.jp/visionary/moment/chapter-02/04.html>) (2017年12月25日閲覧)
 菅本一臣 (2014). TEAMLAB BODY, (<http://www.teamlabbody.com/3dnote-en/>) (2017年12月25日閲覧)
 Visible Body (2007). (<http://www.visiblebody.com/start>) (2017年12月25日閲覧)
 渡辺定博 (2008). 人体模型の3次元デジタル表示の試み, 形態・機能 6 : 127-134.

