

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K02837

研究課題名（和文）低侵襲化手術に必要な解剖学的知識の伝承をより効率化するための学習ツールの開発

研究課題名（英文）Development of Learning Tools to Efficiently Transmit Anatomical Knowledge Necessary for Minimally Invasive Surgery

研究代表者

高詰 佳史（Takatsume, Yoshifumi）

慶應義塾大学・医学部（信濃町）・特任助教

研究者番号：60816536

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年の手術の低侵襲化に伴い、外科医は内視鏡下の術野においても周辺組織の層構造を立体的に理解し、見えない部分にある血管や神経などを損傷する危険を予測することが重要となっている。本研究では両眼立体視可能でかつ術者が自由な視線で学習できる実写ベースの解剖教材の開発を行った。作成された実写ベースのレイヤー解剖コンテンツは空間再現ディスプレイ、VRゴーグルといった機器で再生することができた。解剖体を用いた臨床トレーニング同様の映像で、実際のトレーニングでは不可能な解剖の手順を逆にたどって人体構造を再構築することが可能な教材を作成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手術の技術向上には献体を用いた解剖トレーニングが最適であるが、貴重な献体を用いたトレーニングの機会は決して多くはなく、そもそも大学病院でない場合は解剖のトレーニング自体ができない場合もある。さらにその解剖も一度解剖をしてしまうと後戻りができず、一度進めてしまった手順を振り返ることはできない。貴重な献体の解剖結果を有効活用するため予めにも手術手技をくりかえし学習する手段が重要になる。本研究プログラムの成果は従来の解剖による学習より、より少ない経験でも知識の習得の促進が可能であり、解剖する機会が少ない医師のみならず、解剖の機会がない医師への教育効果も期待される。

研究成果の概要（英文）：With the recent trend towards minimizing surgical invasiveness, it has become crucial for surgeons to understand the three-dimensional structure of peripheral tissues in the endoscopic field and to predict the risk of damaging unseen vessels and nerves. In this study, we developed anatomical teaching materials based on real images that can be learned using binocular stereoscopic vision and the surgeon's free line of sight. The created real-image-based layered anatomy content can be played back on devices such as spatial reproduction displays and VR goggles. We successfully created teaching materials that allow for the retrograde reconstruction of human structures, which is impossible in actual training, using images similar to those used in clinical training with anatomical specimens.

研究分野：解剖学

キーワード：解剖学 教育 VR 空間再現 立体視 3D フォトグラメトリ

### 1. 研究開始当初の背景

人体の構造は複雑な3次元構造であり、体表から見ると何層もの層構造すなわちレイヤー構造を形成しているといえる。近年内視鏡手術やロボット手術などの高度な低侵襲治療が広まりつつあるが、それらの技術をより安全確実にを行うために、医師にはより正確な立体的な解剖学的知識と理解が求められるようになってきている。しかし2D映像や解剖書(アトラス)の図版は平面画像であり、解剖体を用いた臨床トレーニングでは体表から順行性にレイヤー構造を奥へたどることは出来ても、解剖の手順を逆にたどってレイヤー構造を再構築することは出来ない。

低侵襲性治療時に得られた手術映像は低侵襲故に術野は限定的で、また手術に失敗は許されないため、今見えている映像の奥に存在する血管や神経などの温存すべき重要構造の存在なども映像に映ることはなく、手術映像による教育だけでは臨床経験が浅い若手医師の学習のハードルは高くなっている。

手術の技術向上には献体を用いた解剖トレーニングが最適であるが、貴重な献体を用いたトレーニングの機会は決して多くはなく、そもそも大学病院でない場合は解剖のトレーニング自体ができない場合もある。さらにその解剖も一度解剖をしてしまうと後戻りができず、一度進めてしまった手順を振り返ることはできない。貴重な献体の解剖結果を有効活用するためにも予め手術手技をくりかえし学習する手段が重要になる。

手術手技に沿って写真撮影を行い、その手順を振り返ることはレイヤー構造の学習に効果的である。さらに左右視差で撮影された立体視画像を用いればなお効果的ではある。しかし、教材としての視野は当然撮影時の角度からの眺めのみになってしまい、手術中のように自由に細かく角度を変えて奥が深く狭い視野を見るということとはできない。そのような教材は写真よりも3Dモデルが得意としている。近年、3Dスキャナや写真計測技術による実世界の3Dモデル化が広がりを見せているが、狭い術野で細かい血管や神経といった重要な構造を正確に伝達することが必要な手術解剖領域での教育利用への研究は知られていない。こうした技術で実際の映像を用いて再構成された3DCGモデルを使った解剖教育への応用が期待される。

### 2. 研究の目的

近年の立体計測技術の発展には眼を見張るものがあり、職人の技術伝承への領域にもこの技術の活用が広まりつつある。本研究は解剖を多視点、多段階に撮影された高解像度の解剖画像群を用いて立体再構築を行い、外科医が安全に手術をすすめる上で必要な解剖学的知識を立体的に理解させ、若手医師の成長を大幅に加速することを狙いとしている。立体視を解剖教育に利用した例は少なくはないが、殆どがCGベースであったり、CT/MRIといった断層画像から構築されたポリウムデータを利用しており、自由な角度で観察することが可能であるが、生体や解剖体から得られる視覚情報からはかけ離れており、また、ポリウムデータを削ったり、CGでパーツを外したとしても、手術時に意識すべきレイヤー構造の再現にはならず手術手技の追体験には至らない。我々はこれまで解剖段階に沿って撮影された実写画像を用いて3D写真ベースのレイヤー構造の再現ができる教材を作成してきた。これはコンピュータ制御で高精度に同じ動作を繰り返すことのできるモーションコントロールカメラ(MMC)を用いて各レイヤーごとに様々角度からの静止画像を撮影する手法をとっていた。しかし静止画ではCGやポリウムデータのようにVR空間などで自在に覗き込めるように自由な角度での観察はできない。実際の手術では狭く奥深い術野を微妙に角度を変えて覗き込むことも必要となる。そこで本研究ではまず、多視点で撮影された解剖画像から写真計測技術によって実写をベースにした3Dモデルを作成できるか検証する。本研究のように手術解剖に注目して撮影した画像を写真計測技術により再構成することで立体ディスプレイやVRデバイス等に対応した自由視点で自在に覗き込めるように追体験させるコンテンツは他に類をみない。

本研究で開発する教材の手法は、汎用性は高く、外科系各科の指導者の目線に応じてあらゆる手術手技について応用が可能である。

### 3. 研究の方法

解剖は「臨床医学の教育及び研究における死体解剖のガイドライン」(日本外科学会・日本解剖学会)に沿って実施した。また、慶應義塾大学内での倫理委員会の承諾を得ている。

#### 手術解剖の実写ベースの3D解剖モデル作成の検証

本研究では、まず実際の手術手技において理解すべき解剖多視点かつ複数の剖出段階で3D立体視映像撮影し、これを元に写真計測技術を用いて立体構造の再構築を行い、作成された3Dモデルの再現性の確認を行い問題ないことを確認したうえで、3D立体視対応の手術解剖教材を開発する。

#### 習熟医の視線による3Dデータの取得

本研究では脳外科領域や、整形外科領域、救急科領域の手術手技を対象として撮影を行った。デ

一々の取得は慶應義塾大学医学部解剖学教室で行う。それぞれの習熟医が解剖体を用いて実際の手術の手順に沿うように解剖を行い、その各段階(レイヤー)ごとに数度刻みで全周撮影を行った。また各レイヤーの3Dデータを取得する間の解剖手技についても3Dカメラや、VR180カメラによる3D動画撮影によって記録を行った。

#### 自由視点3D解剖教材の作成

撮影されたレイヤー解剖の写真を写真合成手法を用いて3Dモデルを作成した。各レイヤーごとに作成された3Dモデルは重なるように配置し、多視点裸眼立体モニターなどで立体的に、解剖の手順を進めたり戻したりしながら、自由な角度で覗き込むように閲覧することができるようになった。またヴァーチャルリアリティ(VR)システムではVR180カメラによる周辺環境を含めた術者目線の3DVR動画と3Dモデルを同時に視聴することのできるソフトウェアを作成し、術者の手術手技とそのシーンにおける3D実写解剖モデルを閲覧することを可能にした。

#### 4. 研究成果

写真測量の手法によって作成された解剖体の3Dモデルを元の写真と同じ角度でキャプチャした複数枚の画像を比較した。元画像と3Dモデルからのキャプチャをオーバーレイ比較しても差がほとんど出ず、解剖した本人でも元の構造が保存されているものと判定できるものが作成できた(図1)。レイヤー間の共通点を残すように各レイヤーの3Dモデルを作成することにより共通部分を利用して後から位置合わせも可能になるので、MMCのような大掛かりなシステムは必要なく、手持ちのカメラで比較的簡便に3Dモデルを用いたレイヤー解剖コンテンツを作成することができることが分かった。

また本研究で3D教材作成に際し、ストロボ等光源の移動が起こってしまうと撮影対象の鏡面反射光と影の位置が撮影ごとに移動してしまうことにより、写真間の表面情報が異なってしまいうため、立体視やフォトグラメトリによる3DCG作成時に問題が起こることを確認した。これは未固定、およびシール固定法という湿潤な状態で遺体を保存する方法を用いたご遺体を撮影する際に顕著であった。通常この対策にはよく考えられたライティングをセッティングする必要があるが、この問題を解決するために、偏光板とストロボを組み合わせた簡便な撮影方法を提案した。この方法によりそもそもストロボから発生する鏡面反射を消すことに成功し(図2)、これにより大がかりなライティングのセットアップ無しで、手持ちのカメラ撮影でも3D教材作成用の撮影が可能となり、立体教材の作成の煩雑さを低くすることが可能になった。

最終的に脳外科領域、耳鼻科領域、婦人科領域、整形外科領域、救急科領域の3Dレイヤー解剖モデルを作成することができた。作成された実写ベースのレイヤー解剖コンテンツは空間再現ディスプレイなどの立体視対応デバイスで閲覧することやMR(複合現実)デバイスでも再生可能となった。また3Dレイヤー解剖モデルだけでなくVR180の3D動画を併用した教材の作成も進めた。単純にVR動画であれば周囲を見渡すだけで肝心の手術手技が小さく撮影される問題があるため、周囲だけでなく術野を拡大して確認できるように、適切な視差で撮影することのできる3Dカメラを作成し、複数の術野視点の3D映像を撮影し、切り替えることのできる多視点V180Rビデオの作成し、そこにフォトグラメトリによる実写3Dレイヤー解剖モデルを同時に視聴できるようにした。これは特に周囲との連携が重要な救急外科の手術手技を教材化した。習熟医の解剖を立体的に繰り返し振り返って学習することのできる教材が作成された(図3)。

図1:元画像(a)と3Dモデル(b)の比較

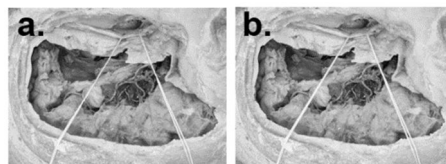
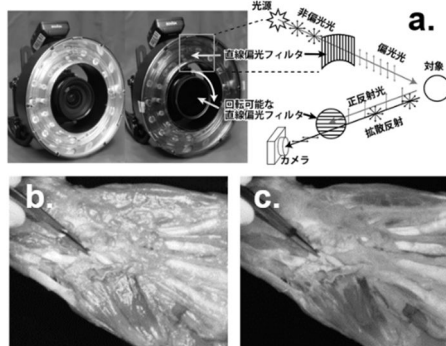
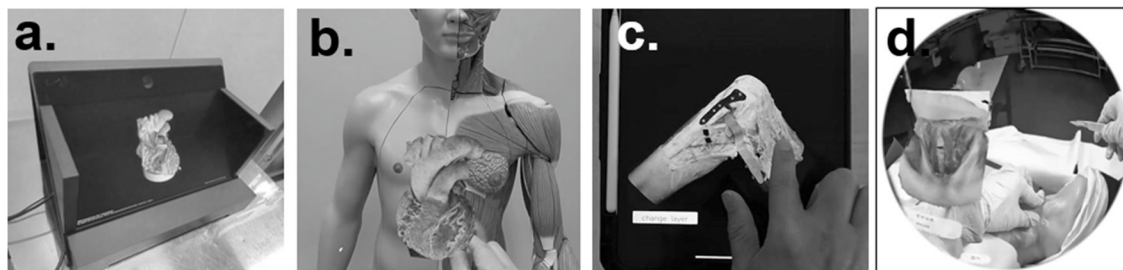


図2:偏光フィルタを用いた無反射撮影の工夫



a.無反射撮影の設定 b.無反射撮影をしない場合 c.無反射撮影した場合、鏡面反射がなくなっている

図3:作成された3D解剖モデルから作成された教材



a.空間再現ディスプレイでの使用 b.MR デバイスを使用した人体模型との融合 c.膝関節手術のためのレイヤー解剖教材 d.VR180の3Dビデオと3Dレイヤー解剖モデルを組み合わせた救急領域のVR教材

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takatsume Yoshifumi, Kajita Hiroki, Imanishi Nobuaki	4. 巻 36
2. 論文標題 A technique for decreasing reflection during cadaveric photography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Clinical Anatomy	6. 最初と最後の頁 946 ~ 950
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ca.24073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takatsume Yoshifumi, Nakase Junsuke, Oshima Takeshi, Kanayama Tomoyuki, Imanishi Nobuaki, Tsuchiya Hiroyuki	4. 巻 44
2. 論文標題 Development of an educational three-dimensional anatomical structure replication tool and its application to medial open-wedge high tibial osteotomy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Knee	6. 最初と最後の頁 150 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.knee.2023.08.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takatsume Yoshifumi, Sato Yukio
2. 発表標題 Challenge to learn life-saving surgical procedures with virtual reality video
3. 学会等名 The 6th World Trauma Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高詰佳史、佐藤幸男、今西宣晶
2. 発表標題 実写の立体視手術解剖教材をVRで作成する際の工夫
3. 学会等名 第22回日本VR医学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高詰佳史、今西 宣晶、堀口 崇
2. 発表標題 解剖の三次構造を効率よく学習するための取り組みと今後について
3. 学会等名 第129回日本解剖学会総会・全国学術集会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高詰 佳史，今西 宣晶，東 雅啓，松尾 雅斗，板宮 朋基
2. 発表標題 自由視点の実写レイヤー解剖教材の作成と利用
3. 学会等名 第54回日本医学教育学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高詰 佳史，佐藤 幸男
2. 発表標題 立体視に対応した実写VR教材撮影の問題点とその解決法の工夫
3. 学会等名 第50回日本救急医学会総会・学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高詰佳史，梶田大樹，今西宣晶
2. 発表標題 写真測量技術を活用した3D解剖学教材の可能性
3. 学会等名 第127回日本解剖学会総会・全国学術集会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	今西 宣晶  (Nobuaki Imanishi)  (00184820)	慶應義塾大学・医学部(信濃町)・准教授   (32612)	
研究 分担者	堀口 崇  (Takashi Horiguchi)  (70245520)	慶應義塾大学・医学部(信濃町)・講師   (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------