

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K09095

研究課題名（和文）リモート医学実習のための医療情報の複合現実的統合および感覚統合技術の開発と応用

研究課題名（英文）Development and application of mixed reality integration of medical information and sensory integration technology for remote medical practice

研究代表者

金 太一（Kin, Taichi）

東京大学・医学部附属病院・特任准教授

研究者番号：90447392

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）：独自の複合現実技術を用いた仮想空間と現実空間との融合法を確立し、触覚情報支援手術シミュレータを開発した。完成した開発シミュレータの評価を実施した。評価項目は、作業時間、完成度、injury score、アドバイス数とし、開発シミュレータは3Dプリントモデルに劣らない実習教育効果を認めた。主観的評価においては、触覚情報と置換された視聴覚情報とに有意な相関を認めた。学習環境に関しては提案システムは講義よりも有意に優れていた。学習効果に関しては3Dプリントモデルに非劣性であった。以上より、開発シミュレータの医学教育的有用性を示すことができた。研究成果に関して論文発表と学会発表を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、汎用計算機を用いたウェブブラウザ上でのオンライン医学実習を可能にさせるシステムを開発した。特にオンライン上での再現が困難とされていた生体組織に対する触覚情報を視聴覚情報に置換することに成功した。これは先行研究にはない顕著な成果であった。また、提案手法は手術教育において、参考書を用いた医学講義よりもほとんどの点で有意に優れており、3Dプリントモデルを用いた手術実習に対しても非劣性であった。以上の成果をもって、これまで対面実習には及ばないとされていたオンライン医学実習を大きく飛躍させる可能性を有する研究であったといえる。

研究成果の概要（英文）：I developed a method for integrating virtual space with real space using our original mixed reality technology and a haptic information-assisted surgery simulator. Evaluation of the completed our development simulator was conducted. Evaluation criteria included task completion time, degree of completion, injury score, and number of advice instances. The development simulator was found to provide practical educational effects comparable to 3D print models. In subjective evaluations, a significant correlation was observed between haptic information and audiovisual information. Regarding the learning environment, the proposed system significantly outperformed lectures. Regarding learning effectiveness, it was non-inferior to 3D print models. Thus, it was possible to demonstrate the medical educational utility of the development simulator. Research results were disseminated through paper presentations and conference presentations.

研究分野：脳神経外科

キーワード：3DCG 手術シミュレーション オンライン医学実習

1. 研究開始当初の背景

授業や講義など教育のオンライン化が急速にすすんでいるが、オンラインでは触覚を体験できないことや、対面実習でしか得られない医療情報があるため、解剖学“実習”や病院“実習”のオンライン化は極めて困難であるとされている。本研究ではこの課題に対して複数の新規技術の開発をもって解決にあたる。具体的には、視聴覚および触覚の相対性に着目した触覚情報提示支援技術を開発する。また、実空間の患者情報と医用画像情報や参考書などの仮想情報とを融合する複合現実技術を開発する。開発技術を用いたオンラインシミュレータを開発し、その有効性や従来の対面実習との教育効果を比較する。提案手法が実現すれば、一部の医学実習において対面実習を凌ぐ教育効果を得られる可能性があり、これまで対面実習には及ばないとされていたオンライン教育の概念を覆す可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では上記の背景に記載した課題を解決すべく、下記の3つを達成する。

- (1) 大規模な装置を必要としないオンライン医学実習システムを開発する。
- (2) 視聴覚および触覚の相対性に着目した触覚情報提示支援技術を開発し、精度および教育効果を検証する。
- (3) 手術所見などの現実空間の医療情報と、医用画像や参考書などの仮想情報とを複合現実技術を用いて融合させる技術を開発し、精度や有用性を検証する。

3. 研究の方法

- (1) 令和3年度；現実空間と仮想空間とを融合する複合現実技術の開発と精度検証

手術所見と術前医用画像との位置合わせや重畳表示には、手術ナビゲーションシステムや手術顕微鏡の拡張現実システムなど大規模で高価なシステムが必要となる。本研究ではこれらの大規模システムがなくても、両者を融合表示してオンライン実習に活用できる技術およびシステムを開発する。更に教科書情報として正常解剖ポリゴンモデルを開発して融合させる。具体的には医用融合3次元画像をポリゴンモデルと頂点カラーマップに分離する。プロジェクション技術を用いて頂点カラーマップを仮想的にポリゴンモデルに投影することによって得られる位置姿勢量パラメータを、手術開頭の写真に適応する。これによって手術写真と術前医用画像とが位置合わせされることになる。正常解剖モデルの位置合わせに対してはiterative closest point法をベースにして独自開発する。完成した複合現実3次元コンピュータグラフィックスモデル(3DCG)に対して、脳腫瘍20症例を用いて誤差を検証する。提案手法の位置合わせ精度は2mm以下を目指す。画像処理ソフトウェアはAvizo®およびPhotoshop®を用いる。本法で開発した複合現実3DCGをオンラインで観察するためのビューワを開発する。開発エンジンはUnity®を用いる。研究実施場所は東京大学医学部附属病院手術室、同脳神経外科の研究室とする。また、令和4年度に研究開発予定の手術シミュレータに必要な正常解剖3DCGモデルを開発する。具体的には副鼻腔内、側頭骨、白質神経線維のポリゴンモデルを開発する。開発ソフトはMaya®およびModo®を用いる。

- (2) 令和4年度；視聴覚および触覚の相対情報を活用した触覚情報支援技術およびその手術シミュレータの開発と精度検証

鼻腔内骨性成分のドリル操作を対象とした手術シミュレータを開発する。ポリゴンモデル

による部分削除は、リアルタイムブーリアン処理法を新規開発する。骨硬度に関しては、倫理委員会承認後に頭蓋骨の硬度を測定する。東京大学工学部研究室に設置されている硬度測定器（大阪機工VN4 II）を使用する。4例の頭蓋骨骨片の複数箇所の皮質骨および海綿骨部のスラスト値および断面測定を実施する。この計測結果とCTのボリュームデータから算出した骨硬度および断面情報をカラーマップに変換する。聴覚情報はドリル音とする。骨ドリリング操作に精通した脳神経外科専門医3名に操作してもらい、パラメータをチューニングする。最後に令和3年度までに開発した複合現実モデルを搭載して情報統合手術シミュレータを完成させる。開発エンジンとしてUnityを用いる。

(3) 令和5年度；学生実習における有効性と精度検証

①提案複合現実モデルの精度検証

脳腫瘍15症例を対象に手術所見と術前医用画像との位置合わせ精度を検証する。複合現実モデル上の15箇所のtarget registration errorを測定する。対照は市販手術ナビゲーションシステムの位置合わせ精度とする。

②提案技術の教育効果の検証

研修医および医学部5年生10名を対象に、情報統合手術シミュレータの有用性と精度を検証する。モデル形状、手術器具の操作感と操作性、触覚支援技術の効果、オンライン実習におけるデータ通信量などに関して評価する。級内相関係数を用いた解析によって提案シミュレータの信頼性を評価する。

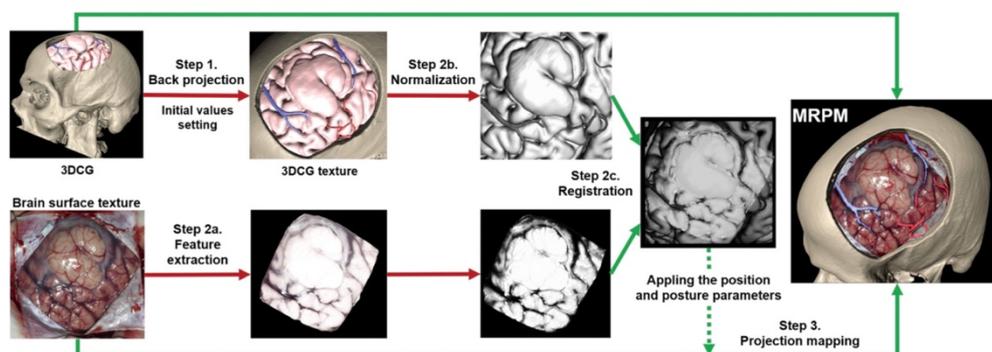
4. 研究成果

(1) 複合現実技術を用いた医用画像と現実空間との融合法の開発と評価

① 提案手法開発

仮想空間情報として医用画像から3次元再構成した3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)モデルを用い、現実空間情報として手術野を撮影した写真を用いた。プロジェクションマッピング法をベースに独自に開発した非線形位置合わせ法によって両者を融合させた(図1)。まず3DCGを2次元のテクスチャ情報に変換し、正規化処理後にグレースケール処理を実施した。術野写真にもグレースケール処理を施した。得られた2つの情報を正規化相互情報量にて座標系を一致させた。その座標情報を用いて3DCGへ術野写真をプロジェクションマッピングした。

図1. 仮想空間情報と現実空間情報との複合現実技術法による融合



②提案手法の精度評価

提案手法の位置合わせ精度に関して、悪性脳腫瘍(神経膠腫)15症例で評価を実施したところ、開頭ブレインシフト後の状態での術野と3DCGとの位置合わせ誤差は、術野の任意の16点にてtarget registration error (TRE) $1.19 \pm 0.14\text{mm}$ (mean \pm SE) であり、画像処理時間は平均16.58分であった。術中ナビゲーションシステムでの医用画像と術野との位置合わせ誤差は、開頭によるブレインシフトによって最大24mmの誤差が発生するといわれており、本研究での提案手法は極めて高い精度を達成したといえる。

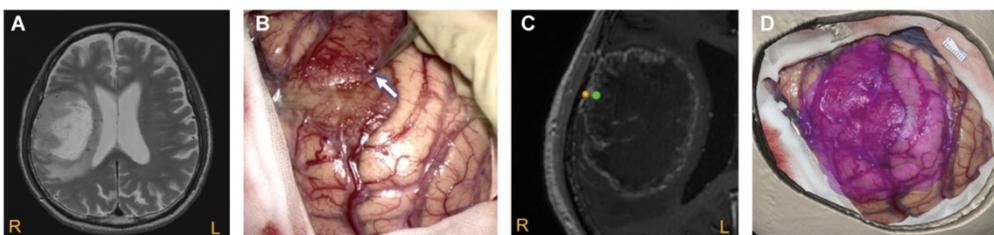
図 2. 提案複合現実手法の位置合わせ誤差

Case	TRE (mm)																Required time (min)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	0.18	0.25	0.20	2.49	3.01	0.36	0.51	1.36	0.24	1.45	1.27	2.94	N/A	N/A	N/A	N/A	16.32
2	2.44	1.54	1.82	2.22	0.35	3.26	4.27	2.35	2.31	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	16.22
3	0.42	0.29	5.01	12.45	0.89	0.19	0.09	0.86	0.30	0.28	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	17.13
4	0.33	0.33	0.39	0.57	0.36	0.26	0.50	N/A	N/A	16.55							
5	0.41	0.43	0.31	0.66	0.44	0.38	0.40	0.38	0.44	3.62	0.36	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	16.48
6	0.29	1.28	3.56	0.31	0.51	4.89	0.28	2.20	0.23	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	17.28
7	1.78	0.27	0.38	0.32	0.37	0.27	0.31	2.07	0.89	3.36	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	17.33
8	0.17	0.17	0.09	0.42	0.62	2.95	0.24	2.97	N/A	N/A	16.25						
9	2.11	0.40	0.54	2.57	0.29	0.28	0.21	0.26	0.38	0.10	0.52	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	16.38
10	0.28	3.03	0.27	2.49	0.15	0.55	0.42	2.62	0.15	2.51	0.30	0.24	1.52	3.87	N/A	N/A	17.07
11	1.55	4.25	9.53	10.00	1.02	1.67	1.62	0.43	0.70	0.30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	16.54
12	0.16	0.27	0.11	0.25	3.72	0.27	0.11	0.45	0.12	0.58	0.13	0.32	N/A	N/A	N/A	N/A	16.43
13	0.30	0.17	2.44	2.65	2.04	0.44	0.32	0.45	0.48	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	16.26
14	0.60	0.33	0.29	0.33	0.99	2.20	0.23	0.22	2.13	1.93	0.48	0.42	0.39	0.47	0.53	N/A	17.45
15	0.38	0.46	0.22	0.35	1.38	1.34	0.49	0.45	0.57	0.62	0.49	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	17.22

③提案手法の臨床的有用性

提案手法による複合現実技術を用いた手術支援の臨床的評価を実施した。典型例を図 3 に示す。本症例は右前頭葉に主座をおく長径 4cm の神経膠腫であり (図 3A)、開頭腫瘍摘出術が実施された。ブレインシフト後の開頭野をナビゲーションプローブで指し示した部位 (図 3B の白矢印) は市販の術中ナビゲーションシステムで指し示された部位 (図 3C の緑色) と約 7mm 程度のズレを認めた。提案手法による複合現実 3DCG でのその誤差は 0.77mm と術中ナビゲーションシステムよりも高精度であった (図 3C の黄色)。本研究成果に関して論文発表した (Koike T, et al. Oper Neurosurg (Hagerstown) 21(6): 549-557, 2021)。

図 3. 提案手法の脳腫瘍 (グリオーマ) 手術支援

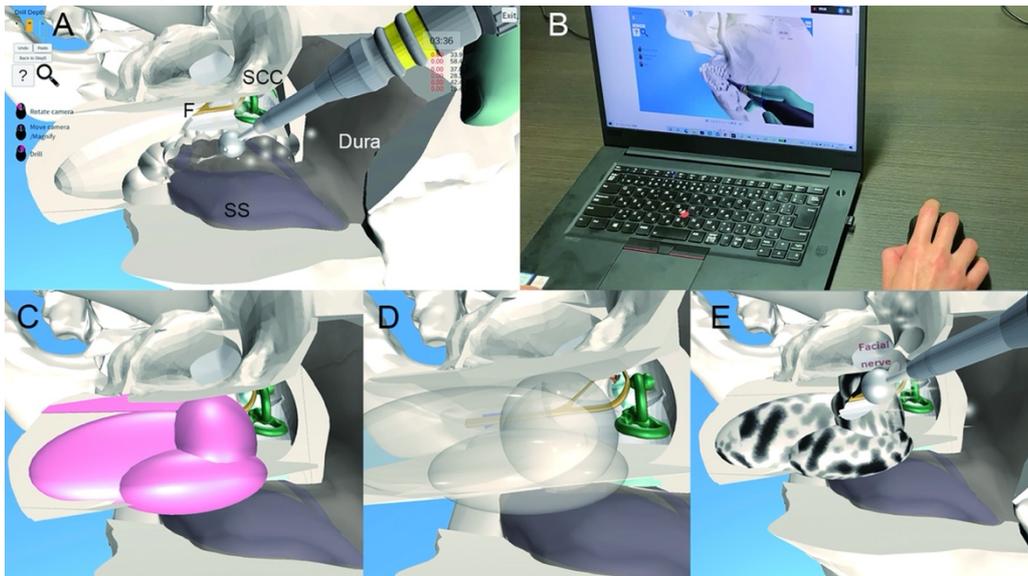


(2) 触覚情報支援手術シミュレータの開発と教育への活用

①手術シミュレータの開発

脳神経外科頭蓋底手術用シミュレータを開発した (図 4)。開発エンジンは Unity を用いた。手術シミュレータに必要な正常解剖 3DCG モデルを開発した。開発ソフト Maya および Modo を用いて、副鼻腔内、側頭骨、白質神経線維のポリゴンモデルを開発した。医用画像との位置合わせに対しては iterative closest point 法をベースにして独自開発した。骨の硬さに関しては、4 例の頭蓋骨片の複数箇所の皮質骨および海綿骨部のスラスト値および断面測定を実施した。この計測結果と CT のボリュームデータから算出した骨硬度および断面情報をカラーマップに変換した。また、硬さに比例して骨のドリル掘削音の周波数を変えた。開発システムは汎用ウェブブラウザ上でマウス操作のみで希少疾患手術のバーチャルリアリティシミュレーションが可能となった。ハイスpek的な計算機も不要でありノートパソコンやタブレット型コンピュータ下で問題なく動作することを確認した。

図 4. 開発したウェブブラウザ型シミュレータ



②開発シミュレータの評価

研修医 10 人を対象として開発シミュレータの評価を実施した。脳神経外科頭蓋底手術における側頭骨削除操作に関して、開発シミュレータ、講義、3D プリントモデルを用いた実習の全てを経験してもらい、その学習効果を評価した。評価項目は触覚情報から視聴覚情報への置換達成度、学習環境、学習効果の 3 群とした。結果は、視聴覚情報への置換達成度に関しては、シミュレータは講義と比較し有意に緻密骨と海綿骨の硬さの違いを認識することができた。また 3D プリントと有意差は認めなかった ($p=0.53$)。また、シミュレータで感じられた海綿骨の硬さは緻密骨を 10 とすると 6.8 の硬さに感じたとのアンケート結果であった (図 5)。これは実際の緻密骨と海綿骨の硬さの違いとほぼ同じであった。すなわち、視聴覚効果によって触覚を代用できたことになり、本研究での顕著な研究成果であった。学習環境においては、シミュレータは講義に比べ、フィードバック性 ($p=0.004$) と反復性 ($p=0.008$) に優れていた (表 1)。3D プリントとの比較では、学習環境適応に優れていた ($p=0.004$)。学習効果に関しては、シミュレータは講義と比較し 8 項目中 7 項目で有意に優れていた。3D プリントモデルとの比較では、8 項目中 4 項目で有意に優れていた。すなわち、仮想手術シミュレータが実体である 3D プリントに非劣性であることを示せた。以上の成果に関して論文発表した。(Kiyofuji S, et al. Oper Neurosurg (Hagerstown) 24(2): 194-200, 2023.

図 5. 緻密骨と海綿骨の硬さのアンケート

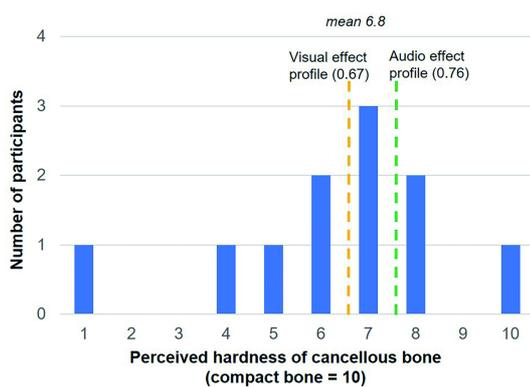


表 1. 学習環境の評価結果

Question	Simulator	LRS	D3DPM
Feedback	7.1* (95% CI 6.5-7.7)	4.7 (3.4-6.0)	9.1 (8.5-9.7)
Repetitive practice	7.7* (6.7-8.7)	5.8 (4.4-7.2)	8.2 (6.5-9.9)
Curriculum integration	8.4 (7.4-9.4)	7.4 (5.9-8.9)	9 (8.4-9.6)
Adjustment of difficulty	7 (6.0-8.0)	6.3 (4.9-7.7)	8.4 (7.2-9.6)
Adaptability to multiple learning environments	9.2** (8.5-9.9)	8.2 (6.8-9.6)	2.8 (0.4-5.2)
Clinical variations	5 (3.3-6.7)	4.8 (2.9-6.7)	6.3 (4.4-8.2)
Unharmful to patients	10 (10-10)	10 (10-10)	9.1 (7.1-11.1)
Adjustment to individualized learning	8.5 (7.1-9.9)	8.3 (6.7-9.9)	6.8 (4.6-9.0)
Clear goals	8.5 (7.3-9.7)	6.9 (4.6-9.2)	8.9 (8.1-9.7)
Face validity	9.1 (8.3-9.9)	8.1 (6.1-10.0)	9.4 (8.8-10.0)

CI: confidence interval; D3DPM: dissection course of 3D printed temporal bone model;

LRS: a lecture and review of slides

*: Score on simulator is statistically superior to LRS

** : Score on simulator is statistically superior to D3DPM

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kiyofuji Satoshi, Kin Taichi, Saito Toki, Koike Tsukasa, Takeda Yasuhiro, Uchida Tatsuya, Sato Katsuya, Shono Naoyuki, Niwa Ryoko, Furuta Yasuyuki, Saito Nobuhito	4. 巻 24
2. 論文標題 Invention of an Online Interactive Virtual Neurosurgery Simulator With Audiovisual Capture for Tactile Feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Operative Neurosurgery	6. 最初と最後の頁 194 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1227/ons.0000000000000474	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeda Yasuhiro, Hasegawa Hirota, Kin Taichi, Shinya Yuki, Kawashima Mariko, Furuta Yasuyuki, Suzuki Yuichi, Sekine Tetsuro, Saito Nobuhito	4. 巻 53
2. 論文標題 Hemodynamic changes during the obliteration process for cerebral arteriovenous malformations after radiosurgery	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neurosurgical Focus	6. 最初と最後の頁 E7 ~ E7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3171/2022.4.FOCUS2214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koike Tsukasa, Kin Taichi, Tanaka Shota, Sato Katsuya, Uchida Tatsuya, Takeda Yasuhiro, Uchikawa Hiroki, Kiyofuji Satoshi, Saito Toki, Takami Hirokazu, Takayanagi Shunsaku, Mukasa Akitake, Oyama Hiroshi, Saito Nobuhito	4. 巻 21
2. 論文標題 Development of a New Image-Guided Neuronavigation System: Mixed-Reality Projection Mapping Is Accurate and Feasible	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Operative Neurosurgery	6. 最初と最後の頁 549 ~ 557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ons/opab353	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金 太一
2. 発表標題 メタバース脳血管障害手術シミュレーションの現状と取り組み
3. 学会等名 STROKE204 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 金 太一
2. 発表標題 手術シミュレーションソフトウェアの開発と臨床応用
3. 学会等名 STROKE2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金 太一
2. 発表標題 3DCGを用いたグリオーマの手術シミュレーション
3. 学会等名 第32回脳神経外科手術と機器学会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金 太一
2. 発表標題 深層学習技術搭載3DCG手術検討ソフトウェアの開発と臨床応用
3. 学会等名 第26回日本臨床脳神経外科学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金 太一
2. 発表標題 バーチャルリアリティ手術シミュレーションの現状と今後
3. 学会等名 一般社団法人日本脳神経外科学会第82回学術総会 (招待講演)
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------