



四肢切断処置 XR 学習システムの開発

Development of XR Learning System for Amputation

青木 大地¹⁾, 王 旭¹⁾, 下江 隆司²⁾, 村上 壮一¹⁾, 妹尾 拓¹⁾

七戸 俊明¹⁾, 安部 崇重¹⁾, 伊達 宏昭¹⁾, 金井 理¹⁾, 近野 敦¹⁾

Daichi AOKI, Xu WANG, Takashi SHIMOE, Soichi MURAKAMI, Taku SENOO,

Toshiaki SHICHINOHE, Takashige ABE, Hiroaki DATE, Satoshi KANAI, and Atsushi KONNO

1) 北海道大学 (〒 060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目, aoki@scc.ist.hokudai.ac.jp)

2) 和歌山県立医科大学 (〒 641-8509 和歌山県和歌山市紀三井寺 811-1)

概要: 本研究では、災害発生時の四肢切断におけるアクセシビリティの高い学習方法として、市販の HMD を用いたトレーニングシステムを提案する。本システムは講習モードと実践モードの 2 つのモードに分かれており、講習モードではモーションキャプチャにて撮影した外傷処置専門医による処置を AR アバターによって確認することが可能である。実践モードでは VR 空間にて四肢切断処置を体験することができ、コントローラの振動にて触覚提示を行う。実践モードについて、10 名の医師および看護師による評価実験を行った結果、振動による触覚提示が四肢切断処置の体験に有用であることが示唆された。

キーワード: 外傷処置, 医療教育, モーションキャプチャ

1. はじめに

若手外傷外科医の技量向上には、日本外傷診療研究機構が主催する JATEC コースなどの講習会がある。JATEC コースでは、模擬診療や e-Learning により、外傷診療に必要な知識や救急処置を学ぶことができる。また ASSET コースでは、ご献体を用いて外傷トレーニングを行うことができる。しかし、これらの講習会は参加人数や開催場所に制限があり、アクセシビリティが高いとは言えない。

また、触覚フィードバックを用いた学習システムとして、Phantom Omni などの力覚提示デバイスや、LapSim Haptic などの手術シミュレーターを用いたものがある [1, 2]。しかしこれらのデバイスは比較的高価であり、こちらもアクセシビリティが高いとは言えない。

本研究では、災害発生時の四肢切断におけるアクセシビリティの高い学習方法として、市販の HMD を用いたトレーニングシステムを提案する。今回は HMD として Meta 社の Meta Quest 3 を使用する。Meta Quest 3 は研究のみならず、ゲームやエンターテインメントなど幅広い分野で利用されており、手軽に入手可能である。本システムは講習モードと実践モードの 2 つのモードから構成されている。講習モードでは、モーションキャプチャにて撮影した外傷処置専門医による処置を AR アバターによって確認することが可能である。実践モードでは、VR 空間にてコントローラを用いて四肢切断処置を体験することができ、コントローラの振動にて触覚提示を行う。また実践モードについて、10 名の医師および看護師による評価実験を行ったので、その結果についても報告する。

2. 講習モード：専門医の処置を再現した学習支援

2.1 システム構成

本モードでは、専門医による四肢切断処置を任意の視点から観察することで、処置に対する理解を深めることを目的とする。撮影中の様子を図 1 に示す。処置の撮影には光学式モーションキャプチャとして、NaturalPoint 社の OptiTrack Prime41 を 12 台使用する。2 人の外傷処置専門医は、全身に 50 個のマーカが装着されたモーションキャプチャスーツを着用し、手術用の器具を用いて四肢切断処置を行う。また指の動作のキャプチャには、MANUS 社の Metagloves Pro および、StretchSense 社の Pro Fidelity Gloves を使用する。これらを用いて撮影された処置のモーションデータは、OptiTrack コントロールソフトウェアの Motive からプラグインを用いて Unity に送信される。Unity では既報 [3] の手法にて作成された人体モデルにストリーミングされ、Unity 内にて関節回転角を記録する。その結果を Meta Quest 3 のアプリとしてビルドすることで、VR 空間内での処置の再現を可能とする。

2.2 使用器具と四肢切断シミュレーター

本計画では専門医とともに使用器具のうち、メスおよび電動のこぎりについてもトラッキングを行った。マーカを取り付けた器具を図 2 に示す。メスについては、3D プリントにてマーカを取り付けるためのアタッチメントを作成し、トラッキングを行った。電動のこぎりについては振動によるマーカの脱落を防ぐため、シール式のマーカを使用した。

切断対象の四肢については、四肢切断シミュレーターを

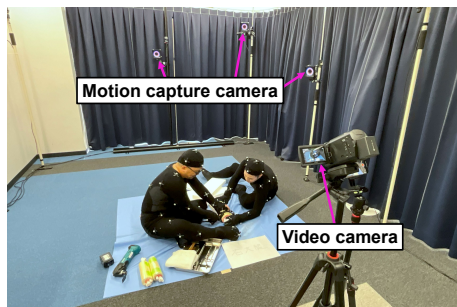


図 1: 専門医による四肢切断処置の実演。

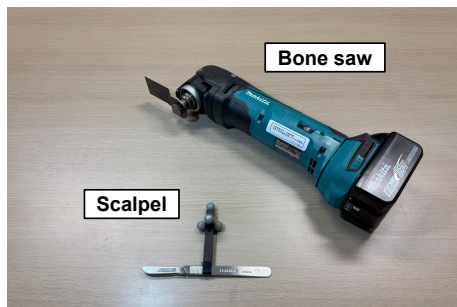


図 2: 撮影に使用した手術器具。

使用している。本シミュレーターは、皮膚、皮下組織、筋肉、骨の 4 層で構成されており、専門医の監修のもと、それぞれの組織に応じた素材が使用されている。皮下組織にはスポンジが使用されており、メスでの切開時には細かい抵抗感を感じることができる。また筋肉にはウレタン、骨には ABS 樹脂が使用されている。

2.3 AR アバターによる処置の再現

Meta Quest 3 上での講習モードのキャプチャを図 3 に示す。体験者はデバイスを装着することで、パススルーにて AR アバターを確認することができる。アバターや手術器具には Unity Recorder にて録画されたモーションデータが適用されており、体験者はアバターの処置を任意の視点から観察することができる。

2.4 現在の課題

講習モードでは、図 3 のように AR アバターを用いて専門医による処置を任意の角度から観察することが可能である。しかし、Unity の Humanoid Avatar 機能を用いて Motive からのモーションデータを再生しているため、自動補正によりアバターの手先位置が実際の手先位置とずれてしまう

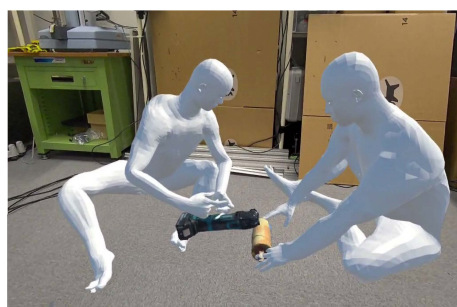


図 3: AR アバターによる四肢切断処置の再現。

ことがある。その結果、手術器具と表示にずれが生じてしまい、見た目が不自然になっている。この問題を解決するために、Motive からのモーションデータを Unity に送信する際に、手先位置の補正を行う必要がある。また現状の講習モードでは、切断対象である四肢切断シミュレーターは所定の位置に表示されているだけである。そこで、メスや電動のこぎりを用いて切断している際に、実際の四肢切断シミュレーターと同様に切断表現を行い、より臨場感のある体験を提供する必要がある。

3. 実践モード：四肢切断処置の体験型 VR 学習

3.1 システム構成と処置の手順

本モードでは、VR 空間にて四肢切断処置を再現することで、アクセシビリティの高い学習方法を提供することを目的とする。デバイスとしては、講習モードと同様に Meta Quest 3 を使用する。本モードにおける四肢切断の手順を以下に示す。手順は、実際の四肢切断処置において、専門医が行う手順を参考にしている。

1. 駆血帯の装着（駆血帯）
2. 皮下組織の切開（メス）
3. 筋肉の切開（メス）
4. 骨の切断（電動のこぎり）
5. 残った組織の切開（メス）

3.2 操作方法

本モードでは、Meta Quest 3 のコントローラトラッキング機能により、VR 空間で手術器具を操作する。体験者は、コントローラの A ボタンを押すことで、3 種類の手術器具（メス、電動のこぎり、駆血帯）を切り替えることができる。電動のこぎりでは、スティックを上下に倒すことで、電源のオンオフを切り替えることができる。また、B ボタンを押している間は切断位置のガイド線が表示される。体験者は、目の前に表示される指示文やガイド線を参考にしながら手術道具を操作することで、四肢切断を体験する。

各組織の切断表現には、Unity の Collision 機能を用いている。事前に Blender にて切断部位ごとに 3D モデルを分割しておき、Unity にて全パーツを配置する。切断時には、Collision 機能により各パーツと器具の接触を検出し、一定時間接触したら各パーツを削除することで切断を表現している。切断時の様子を図 4 に示す。

3.3 コントローラを用いた触覚提示

VR システムにおいて没入感を高めるためには、視覚に加え、触覚の提示が重要である。そこで、本システムでは Meta Quest 3 のコントローラを用いて、四肢切断時の触覚提示を行う。なお、コントローラに搭載されているモーターでは、切断時の抵抗感などの反力は提示できない。そこで本研究では、振動の振幅および周波数をカスタマイズできる Meta Haptics Studio を使用した。実際に四肢シミュレーターを切断した際の感覚をもとに、各部位の切断時に与える振動パターンを作成した。作成した振動パターンを図 5 に

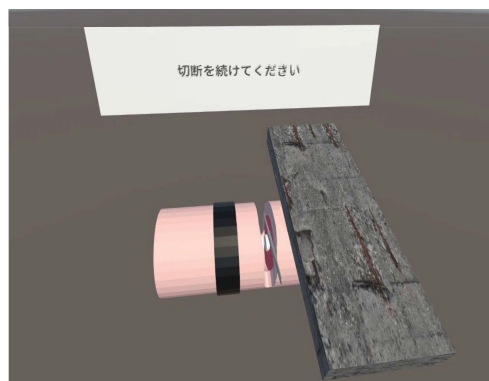


図 4: 実践モードにおける切断時の様子。

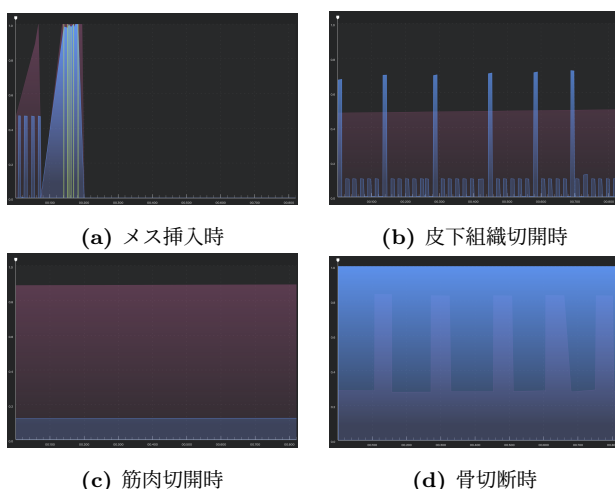


図 5: 切断部位による振動パターンの変化。

示す。メス挿入時の抵抗を表現するため、短時間で振幅が大きな強い振動を与えた。また、皮下組織切断時は断続的に振幅の大きな振動を与えることで、組織の切断感を表現した。電動のこぎりを用いた骨切断時には、コントローラの最大振幅を与えた。さらに 3D プリンタで作成した大腿骨モデルを実際に電動のこぎり切断した際の音声を録音し、切断時の音声として再生した。これにより視覚、触覚のみならず、聴覚も用いた四肢切断処置の体験を可能とした。

3.4 評価実験とアンケート結果

本モードの有用性を検証するため、10 名の医療従事者（医師 8 名，看護師 2 名）による評価実験を行った。評価実験では、被験者に本モードを体験してもらい、その後にアンケートを実施した。アンケート内容の一部を以下に示す。

1. 本システムでは、振動による触覚提示が行われています。実際に四肢切断経験がない場合でも、「何かを切っている」という感覚が体験できましたか？
2. 振動による触覚提示は、実際の四肢切断の手ごたえとは異なるものの、代用的な手段として学習効果があると感じましたか？

これらの設問について、6 段階評価（0：全くそうは思わない～5：非常にそう思う）を行った結果、図 6 のような回答が得られた。平均値はそれぞれ 3.7、4.0 であり、振動によ

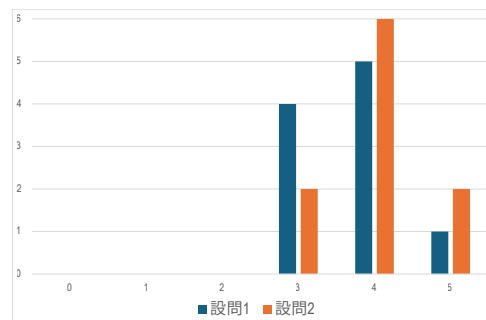


図 6: 医療従事者（10 名）に対するアンケート結果。

る触覚提示が四肢切断処置の体験に有用であることが示唆された。

4. おわりに

本論文では、災害発生時の四肢切断におけるアクセシビリティの高い学習方法として、市販の HMD を用いたトレーニングシステムを提案した。本システムは講習モードと実践モードの 2 つのモードから構成されており、講習モードでは専門医による処置を AR アバターを用いて任意の角度から観察することが可能である。実践モードでは、VR 空間にてコントローラを用いて四肢切断処置を体験することができ、コントローラの振動にて触覚提示を行う。また、実践モードについて、10 名の医師および看護師による評価実験を行った結果、四肢切断処置の学習について、振動による触覚提示が代用的な手段として有用であることが示唆された。

今後の展望として、講習モードでは手先位置の逐次的な修正を行うことで、手術器具との表示のずれを解消する必要がある。また講習・実践モードとも、モデルの切断シミュレーションを導入することで、より臨場感のある体験を提供する必要がある。

謝辞 本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Pinto, M. L., Sabater, J. M., Sofrony, J., Badesa, F. J., Rodriguez, J., and Garcia, N.: “Haptic simulator for training of Total Knee Replacement,” 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 221–226, 2010.
- [2] Våpenstad, C., Hofstad, E. F., Bø, L. E., Chmarra, M. K., Kuhry, E., Johnsen, G., Mårvik, R., and Langø, T.: “Limitations of haptic feedback devices on construct validity of the LapSim® virtual reality simulator.” Surgical Endoscopy, Vol. 27, pp. 1386–1396, 2013.
- [3] 青木 大地, 村上 壮一, 藤田 拓海, 下江 隆司, 金井 理, 伊達 宏昭, 妹尾 拓, 安部 崇重, 七戸 俊明, 近野 敦: “外傷処置の動作解析および表示システムの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025, 1P1-B08, 2025.