



プレスキャンエコー画像を用いた 複合現実ガイド下深部静脈穿刺の概念実証

Proof of Concept for Mixed Reality-Guided Deep Vein Puncture Using Pre-Scan Ultrasound Images

宮部亮, 檜垣彰典, 中村隆英, 黒川 慶昇, 仁志川 知晃,
堀江 里佳子, 三好 徹, 川上 大志, 東 晴彦, 玉置 俊介, 西村 和久,
一色正晴, 山口修

Ryo MIYABE, Akinori HIGAKI, Takafusa NAKAMURA, Keisho KUROKAWA, Tomoaki NISHIKAWA, Rikako HORIE, Toru MIYOSHI, Hiroshi KAWAKAMI, Haruhiko HIGASHI, Shunsuke TAMAKI, Kazuhisa NISHIMURA, Masaharu ISSHIKI and Osamu YAMAGUCHI

所属 1 愛媛大学大学院 医学系研究科 (〒791-0295 愛媛県東温市志津川 454, miyabe.ryo.gn@ehime-u.ac.jp)
所属 2 愛媛大学大学院 理工学研究科(〒790-0825 愛媛県松山市道後樋又 10-13, i520304m@mails.cc.ehime-u.ac.jp, isshiki.masaharu.mm@ehime-u.ac.jp)

概要: 深部静脈穿刺の合併症を回避する方法として一般的にリアルタイムエコーガイド下穿刺が推奨されているが, 非直観的であり必ずしも安全な手法ではない. 我々は事前に穿刺部位をスキャンした超音波画像から 3D 血管モデルを構築し, ヘッドマウントディスプレイにより患者の体表面に重畳表示する複合現実ガイド下深部静脈穿刺法を開発した. 本手法の実現可能性について循環器内科医師を対象としたカダバートレーニングを通じて検証した.

キーワード: MR, 中心静脈穿刺, 画像セグメンテーション, 血管超音波検査

1. はじめに

中心静脈穿刺は, 高カロリー輸液や薬剤注入, 採血, 静脈圧測定および血管内治療や検査などの目的で, カテーテル先端を中心静脈(上大静脈など)に留置する手技である. 本手技は医師の基本技能の一つであるが, その習熟には時間を要し時に致命的な合併症を生じうる. 直接走行を視認できない深部静脈を穿刺するため, 従来は骨や筋肉などの体表の解剖学的な目印を手がかりに血管の位置を推定して穿刺するランドマーク法が用いられていたが, 近年では超音波断層像を用いた超音波ガイド法が主流となっている. 超音波ガイド法には, ①穿刺前にプレスキャンを行い静脈の性状, 深さ, 動脈との位置関係を明らかにしてから穿刺する方法(作図法)と, ②超音波断層像で標的静脈と穿刺針を観察しながらリアルタイムに穿刺を行う方法(リアルタイム超音波ガイド下穿刺法)の二通りがあり, いずれかまたは両方の使用が強く推奨されている[1, 2]. しかし超音波ガイド法を用いた手技でも合併症は生じており, 死亡例も散見されている[3].

超音波ガイド法のうち作図法は事前に穿刺点・血管走行を図示するので手技を行う際に穿刺針のコントロールのみに専念できるが, 体表部から血管までの距離や周囲の構造物(動脈や細動静脈)が 3 次的に交差している部分に

対しては効果が限定的であり, 実際に隣接した血管を誤穿刺した報告が挙げられている[3]. リアルタイム超音波ガイド下穿刺法は体内での穿刺針と血管の位置関係を逐一確認しながらの手技が可能だが, 超音波断層像の表示位置(エコー機器の画面)と実際の穿刺位置(人体表面)が一致していない点が問題である(図 1). 術者はエコー機器の画面と穿刺位置を交互に確認しながら穿刺手技を進めなくてはならないため認知負荷が生じ, 標的の血管内以外に穿刺針の先端が位置した状態に気付かず手技を進めた結果合併症が生じる.

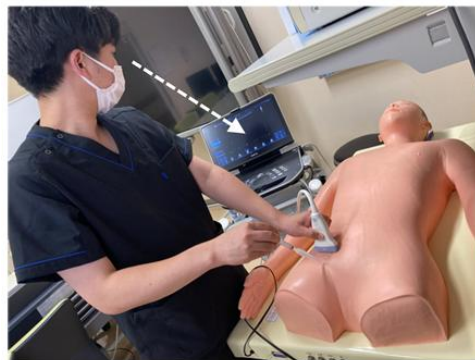


図 1.従来のリアルタイムエコーガイド下穿刺

この問題の解決に Mixed Reality (MR) 技術が有用と考えられる。穿刺対象を視界におさめたまま血管走行を示す超音波断層像の情報をオーバーレイすることで、視界の移動に伴う認知負荷を軽減できると考えられる。

我々は穿刺前に患者データ(血管エコー画像)から作成した血管の三次元モデルを体表面上に重ねて表示させることで、安全かつ確実な中心静脈穿刺を可能とする複合現実アプリケーションを考案した(図2)。



図2.複合現実を用いた新たな穿刺方法

2. 背景

2.1 関連研究

医療における MR 技術の有用性は手術シミュレーションやトレーニングの分野では証明されており、医療従事者や学生のトレーニング・教育や、心臓解剖学の学習や ECMO・Impella 挿入などの複雑な操作・手順を要する手技のシミュレーションに利用されている[4]。医療従事者が行う手技や処置の補助として利用されているものは主に Augmented Reality(AR)機器であり、現実世界の環境に仮想的な要素を重ね合わせて統合することで手技や処置の効率化を図るデザインのものが多い。すなわち、本研究と同様にシースルーAR やパススルーAR を使用して、異なる画像モダリティを現実と統合し、複雑な処置の精度を向上させるものである[5]。循環器科領域での実臨床における活用例としては手術中にリアルタイムで外科医を支援することを目的とした拡張現実や複合現実システムを使用した手術ナビゲーションも有用であることが明らかとなっている。MR 機器を患者が装着する場合には、VR 機器を用いた心臓血管疾患の教育や、処置中の distraction(麻酔補助)、リハビリテーションプログラムの補助などに用いられており、不安・痛み・せん妄を軽減し、早期のリハビリを促進する可能性が示唆されている[4]。

2.2 先行研究

MR を用いた穿刺補助としては Head-up display (Hololens) 上に二次元のエコー画像をリアルタイムに表示して大腿動脈穿刺を補助するもの[6]、電磁場発生装置内でエコープローブを操作することで位置関係を明確に視覚化する

もの[7]、CT 画像のモデルをオーバーレイし、X 線不透過性マーカーを使用してリアルタイムナビゲーションを行うもの[8]が報告されている。これらと比較して我々の手法はブレスキャンのエコー画像から3Dモデルを作成する点で、より簡便で侵襲の低いシステムにより実装できる。

エコー画像からの立体化に関しては Smistad らが動脈を自動でセグメント化し、再構築する手法を提案している[9]。大腿動脈を楕円形モデルとして認識するアルゴリズムを作成し、カルマンフィルタを用いた追跡を行い 3 次元の動脈モデルをリアルタイムで構築する手法を報告している。

3. 方法

3.1 エコースキャン

右大腿動脈を触診し、鼠径靭帯より尾側でおおよその穿刺部位を決定する。穿刺部位が中心になるよう皮膚の上に縦横 100mm*50mm の直方体の型紙を載せ、皮膚ペンを用いてエコースキャンを行う領域のマーキングを行う(図3)。メトロノームで 60bpm のガイド音を鳴らしながら尾側から頭側に向かって用手的に 10mm/sec の速度でエコープローブを移動させながらスキャンを行う(図4)。

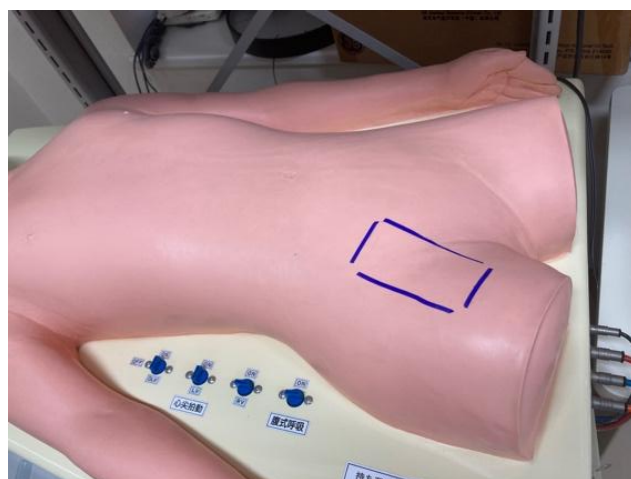


図3.スキャン域のマーキング

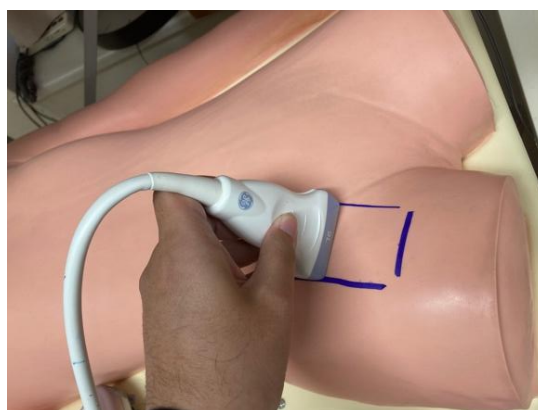


図4.エコープローブによるスキャン

3.2 エコー動画からの立体化

撮像した動画を 5mm 間隔で静止画として切り出す(総数 21 枚)(図5)。画像処理ソフト(Gimp/Inkscape)を用いて血管

の輪郭を手動でトレースし、動脈・静脈・背景の3領域を赤・青・黒に塗り分ける(図6)。次に隣接する2枚の画像を1組として処理を行い、各画像から赤色および青色の領域のうち、最も面積の大きい連結成分を抽出する。

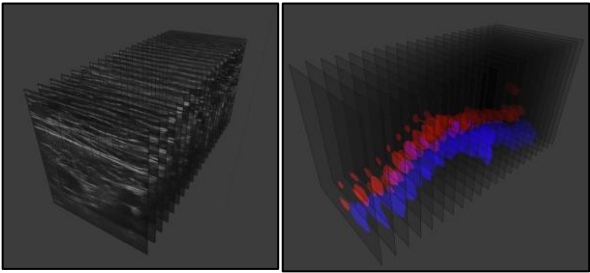


図5

Python の OpenCV ライブラリ等を用いて抽出された領域の輪郭線を取得し、隣接する輪郭を構成する点群が同数になるよう補完する。点群マッチングにより1対1で対応させる。奥行きを5mmずらしつつ、マッチングした点と隣の点で3角ポリゴンを生成する(Open3Dを使用)。最終的に色や法線ベクトルを計算してplyファイルとして3Dモデルを出力する(図7)。

3.3 アプリケーションの作成

3Dモデルを指先のジェスチャー操作のみで自由に動かすことが可能なアプリケーションを使用した。片手でのピンチ操作ではモデルを好きな位置へ移動させることが可能であり、穿刺のガイドとなる赤い矢印モデルと組み合わせて穿刺点を決定する。

4. 結果

実際の使用感を評価するため、カダヴァートレーニング(提供いただいた献体を使用して行う手術手技のトレーニングや研修)で中心静脈穿刺を含む臨床医療を日常的に行っている循環器内科領域を専門とする医師を対象としてデモンストレーションを行い、作成したシステムについて評価・検討した(図8)。

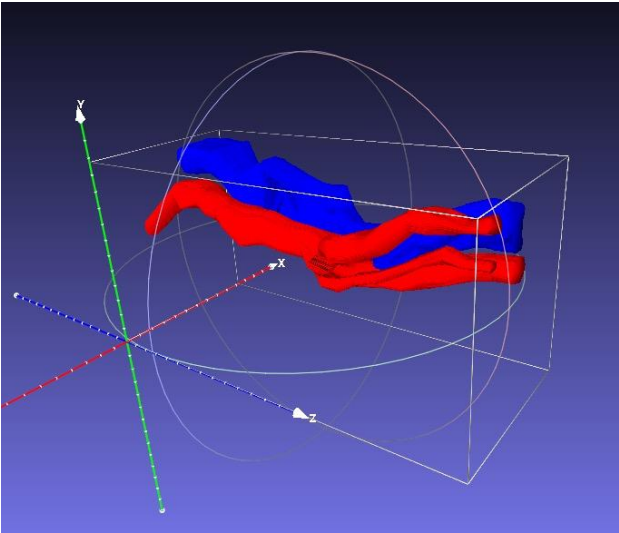


図7

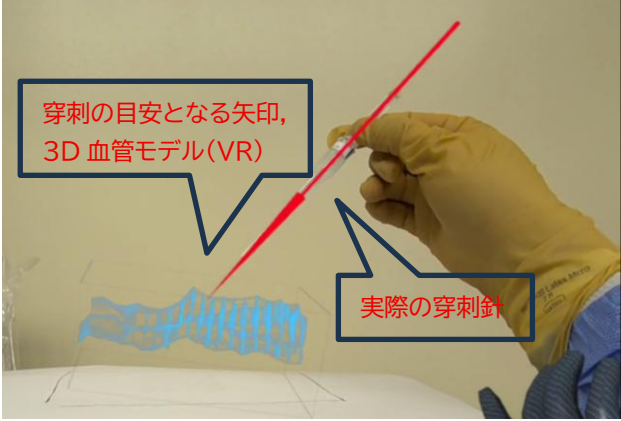


図8.アプリケーション使用時の視界

デモンストレーション後にHMDを装着した状態での手技についてのアンケートを行った。(回答者13人)。設問数は5問で、それぞれ5段階(1が良くない評価,5が良い評価)で評価した(表1)。

質問の結果はガイドライン表示やXR技術の導入に対してポジティブな評価が多数を占めており、一部使いにくい、邪魔であるといった意見は見られたが大半のユーザーに対してはシステムの実用性が高いことが伺えた。

表1.アンケート調査の結果

評価	1	2	3	4	5
① 穿刺ガイドライン表示は必要ですか？	0	1(8%)	1(8%)	6(46%)	5(39%)
② MRグラスを装着しての手技は不便でしたか？	0	2(15%)	3(23%)	7(54%)	1(8%)
③ 穿刺の際に3Dモデルが邪魔に感じましたか？	0	2(15%)	1(8%)	6(46%)	4(31%)
④ MRガイド穿刺は将来有用だと思いますか？	0	0	1(8%)	3(23%)	9(69%)
⑤ MRガイド穿刺があると安全だと思いますか？	0	1(8%)	2(15%)	5(39%)	5(39%)

(1が良くない評価,5が良い評価)

5. 考察

本研究では、プレスキャンした超音波画像から作成した3D血管モデルをMRで患者体表に表示する新たな深部静脈穿刺ガイド法の概念実証を行った。循環器内科医を対象としたアンケート調査では本手法の将来性や安全性向上への期待が示され、「ヘッドセット装着による不便さ」および「3Dモデルの邪魔感」に関してはいずれも肯定的評価が多数を占めた。一方、アンケート評価参加者は13名と小規模であり統計的な検証には不十分であり今後のより大きなスケールでの検証が望まれる。また、本検証ではご献体の血管とは異なる血管モデルを擬似的に使用して手技を試みているため、実際に穿刺やカテーテル挿入が可能かどうかは動物実験を含めた基礎研究により証明する

必要がある。ユーザーインターフェースについても改良の余地があり、血管モデルの動静脈による色分けや透明度の調整、ガイドラインの非表示切り替えや、皮膚表面への自動位置合わせなどが要望として挙げられた。いずれにせよ、現時点では臨床現場への導入障壁が比較的低いことが期待される結果であった。

実臨床に本手法を導入するためには大腿血管のプレスキャンエコー画像から自動的に3Dモデルを作成するパイプラインを構築する必要がある。現在我々はエコー断層画像から動静脈の輪郭を自動抽出するための機械学習モデル構築のための教師データ作成を進めている。自動3Dモデル作成が可能となった後は、CTデータから構築した血管3Dモデルをリファレンスとして精度評価を行う予定である。本手法は総大腿静脈の穿刺を想定して開発しているが、動脈穿刺や内頸静脈穿刺など多様な穿刺手技への展開を検討している。

参考文献

- [1] Daniel H NCRM, et al. Ultrasonic locating devices for central venous cannulation: meta-analysis. *BMJ*. 2003;327:361.
- [2] Lamperti M, Bodenham AR, Pittiruti M, Blaivas M, Augoustides JG, Elbarbary M, et al. International evidence-based recommendations on ultrasound-guided vascular access. *Intensive Care Med*. 2012;38:1105-17.
- [3] Takaku F, et al. Analysis of deaths related to the complications of “Central Venous Catheterization”. *Medical Accident Investigation and Support Center Japan Medical Safety Research Organization*. 2017.
- [4] Jung C, Wolff G, Wernly B, Bruno RR, Franz M, Schulze PC, et al. Virtual and Augmented Reality in Cardiovascular Care. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2022;15:519-32.
- [5] Annabestani M, Olyanasab A, Mosadegh B. Application of Mixed/Augmented Reality in Interventional Cardiology. *J Clin Med*. 2024;13.
- [6] Alonso-Felipe M, Aguiar-Pérez JM, Pérez-Juárez M, Baladrón C, Peral-Oliveira J, Amat-Santos IJ. Application of Mixed Reality to Ultrasound-guided Femoral Arterial Cannulation During Real-time Practice in Cardiac Interventions. *J Healthc Inform Res*. 2023;7:527-41.
- [7] Davrieux CF, Giménez ME, González CA, Ancel A, Guinin M, Fahrer B, et al. Mixed reality navigation system for ultrasound-guided percutaneous punctures: a pre-clinical evaluation. *Surg Endosc*. 2020;34:226-30.
- [8] Christian Uhl DB, et al. Mixed-Reality-Assisted Puncture of the Common Femoral Artery in a Phantom Model. *Journal of Imaging*. 2022;8:47.
- [9] Smistad E, Lindseth F. Real-Time Automatic Artery Segmentation, Reconstruction and Registration for Ultrasound-Guided Regional Anaesthesia of the Femoral Nerve. *IEEE Trans Med Imaging*. 2016;35:752-61.