

## 三次元X線CTによる内部構造の空間表現

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2023-11-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 加瀬, 裕貴 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/0002000118">https://doi.org/10.14945/0002000118</a>

静岡大学 博士論文

三次元 X 線 CT による  
内部構造の空間表現

2023 年 5 月  
光医工学研究科  
光医工学共同専攻

加瀬 裕貴

## 論文要旨

X線CTにおける断層像観察はすでに実用化されており、現在ではオブジェクト内部情報を含む三次元のボクセルデータを得ることが可能となっている。ここでは画像処理されたボクセルデータの観察時に、三次元オブジェクトを観察する特定の箇所はキーボードやマウス操作で確認したい位置や角度を指定し、三方向（軸位断、矢状断、冠状断）の断面をPCのモニター上で表示している。元来人間の目は視覚情報により三次元構造のオブジェクトの表面形状を二次元の光のパターンとして受け取り、オブジェクトを三次元のボリュームまたはパーツの構成として認識しているため、内部構造を含めた三次元情報をそのまま空間情報として理解することができないからである。拡張現実(Augmented Reality: AR)、仮想現実(Virtual Reality: VR)、複合現実(Mixed Reality: MR)を用いれば三次元情報を二次元情報に変換することなく表現することができ、医療分野でもこれらの活用が進んでいる。しかしX線CT画像のボクセルデータから三次元空間表現を行う際に、サーフェイスレンダリングでは密度情報を表現することができず、ボリュームレンダリングでは表面が不明瞭で人が感じる立体的な表現に欠けるため、オブジェクトを三次元的に理解しながら、確認したい箇所の内部構造を確認する表現方法は確立されていない。

本研究では、人間が認識しにくい、オブジェクトの内部構造を含む三次元データについて、AR、MRを使用することで直感的に理解できるような空間表現を目的として三次元表現に断面を加えた新たな内部構造の空間表現について提案し実証を行った。

まず、ARを利用した表現方法として、スマートフォンを利用したAR表現について提案し実証を行った。X線CTによって撮像された三次元データを仮想空間上のオブジェクトとして現実空間と重ね合わせて表現し、さらに観察したい箇所の任意の断面を自由な視点や方向で確認できるようにした。ただし、ここではサーフェイスレンダリングのみによる断面表示であり断面のピクセルデータは表示されず、CTの特徴である断層像が十分に観察できない課題が発生した。また、断面の位置・方向の指定操作はマウスや画面タッチ等による操作は指定が難しくまた接触であるため手術中などには向かず、仮想空間上のオブジェクトに非接触で直感的に相互作用する操作が必要であることが明らかとなった。

これらの課題点を解決するために、空間再現ディスプレイとモーションキャプチャーを使用したMRによる表現の検証を行った。断面内部の表示はサーフェイスレンダリングされたオブジェクトに対して任意の断面の位置・方向を決

定すると、DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) のボクセルデータ上から同じの位置・方向からの二次元方向の断面が生成して三次元表現と重ね合わせて表示される表現方法を提案し実証した。さらに仮想空間と現実空間の座標軸を一致させたモーションキャプチャーを組み合わせ、実際に仮想空間上のオブジェクトを掴んで動かすかのように、手のジェスチャーにより回転・移動し任意の断面の観察を可能とした。この提案手法はオブジェクトの内部情報を含むボクセルデータである三次元 X 線 CT での立体及び任意の断面表示の有用な三次元表現として、また CT 画像内の断層像を見ることができ所望の位置を容易に指定できる手法として有効であることが示された。

この表現は医療分野での手術前準備のための補助としても有効である。現在、3D プリンタを用いて成形している脳動脈瘤のコイル塞栓術で使用するマイクロカテーテルの成形時の準備時間や衛生面を考慮した成形の課題に対して、X 線 CT と同様にオブジェクトである人体頭部の内部構造を含む三次元データを得られる MRA (Magnetic Resonance Angiography) で撮像された脳動脈瘤について AR を利用して仮想空間上に表現を行い現実空間と等倍重ね合わせをする手法を検証した。医師が使いやすいデバイスを活用できるように、空間再現ディスプレイ、タブレット端末および AR デバイスを用いた。ここでは特に AR にて表現した仮想空間上のオブジェクトが、左右・上下・奥行き方向にて等倍であることについて検討し、現実空間と仮想空間のオブジェクトの大きさの差が 1 mm 以内となり実用が可能なが示された。

結果、X 線 CT データや MRA など内部構造を含む三次元データであるボクセルデータを二次元データに変換せずに三次元情報として正確に表現することが可能とした。また、本手法では二次元断面像を三次元表現と組み合わせることにより、内部構造の空間表現を損なうことなく人間が理解しやすい形で表現することが可能とした。さらに医師が手術等に活用する視点で有用な非接触での三次元空間中での観察位置などの指定も可能とした。

フォトンカウンティング X 線 CT など不可視情報の情報量が増加している現在、この表現方法はそのような情報を整理しながら、空間的な表現を支える基盤となると考えられる。

# 目次

第1章 序論.....	9
1.1 研究背景.....	9
1.2 研究目的.....	13
1.3 論文の構成.....	14
参考文献.....	16
第2章 X線CTの構成.....	17
2.1 はじめに.....	17
2.2 画像再構成法の基礎.....	17
2.3 多断面再構成法(MPR: Multi Planar Reconstruction).....	18
2.4 最大値投影法(MIP: Maximum Intensity Projection).....	20
2.5 DICOM データ.....	21
2.6 サーフェイスレンダリング・ボリュームレンダリング.....	21
2.7 拡張現実(AR)・仮想現実(VR)・複合現実(MR).....	23
2.8 関連研究.....	25
2.9 本章のまとめ.....	29
2.10 本研究の位置づけ.....	29
参考文献.....	30
第3章 拡張現実(AR)・複合現実(MR)を利用した内部構造の空間表現.....	32
3.1 はじめに.....	32
3.2 目的.....	33
3.3 実験.....	34
3.4 結果.....	38
3.5 結論.....	39
参考文献.....	40
第4章 複合現実(MR)での表現.....	41
4.1 はじめに.....	41
4.2 目的.....	41
4.3 提案手法.....	42
4.4 実験.....	49
4.5 結果.....	53
4.6 結論.....	54
参考文献.....	56
第5章 医療分野での活用の検討.....	57
5.1 はじめに.....	57
5.2 背景.....	57

5.3	目的	58
5.4	実験	59
5.5	結果	61
5.6	結論	63
	参考文献	65
第6章	結論	66

## 目次

図 1-1 CT 画像におけるピクセルデータ、ボクセルデータ .....	11
図 1-2 ファンビームによるスキャン機構[3] .....	12
図 1-3 マルチスライス CT によるスキャン機 .....	12
図 2-1 X線 CT における被写体と投影データの関係 .....	17
図 2-2 各軸における断層像 .....	19
図 2-3 DICOM ビューワー (Osirix MD(12.5.1)) による、軸位断 (Axial), 矢状断 (Sagittal), 冠状断 (Coronal) の表現 .....	20
図 2-4 投影経路長による MIP 強度の変化を示す図[2] .....	21
図 2-5 サーフェイスレンダリングとボリュームレンダリングの表現の違い .....	22
図 2-6 Mixed Reality および仮想の連続体の概念[10] .....	23
図 2-7 HoloLens を使用した股関節形成術シミュレータの 2 枚のスクリーンショット [15] .....	26
図 2-8 HoloLens に表示された手術用のプローブと骨切の基準点[16] .....	26
図 2-9 手術ナビゲーションとして MR が使用されている様子[17] .....	28
図 3-1 AR によってスマートフォンのカメラ映像に仮想上の視覚情報が重ね合わされる様子 .....	33
図 3-2 実験で使用されたニキシー管 .....	34
図 3-3 対象物とデバイスの位置関係 .....	34
図 3-4 AR 映像を表現するためのシステム .....	35
図 3-5 スマートフォンの画面上で対象物を三次元 AR マーカーとして認識する様子[36]	
図 3-6 カメラ映像に重ねて AR が表示される様子 .....	37
図 3-7 AR 映像において断面を表示させる際の位置関係及び境界面の働き .....	38
図 3-8 スマートフォンに AR 映像として表示される様子 .....	39
図 4-1 仮想空間に表示される、観察者の手、対象物、境界面、断面 .....	42
図 4-2 空間再現ディスプレイ (SONY ELF-SR1/BZ) における視線認識センサ .....	43
図 4-3 HoloLens の推奨動作距離と空間再現ディスプレイの推奨動作距離の違い .....	44
図 4-4 ヘッドマウントディスプレイ (HMD) による 3D-CG モデルの測定[4] .....	44
図 4-5 空間再現ディスプレイ (SRD) による 3D-CG モデルの測定[4] .....	45
図 4-6 Leap Motion Controller の概要及び装着図 .....	45
図 4-7 三次元 X 線 CT で撮像されたデータの構成図 .....	46
図 4-8 ボリュームレンダリングにおける表示方法と今回の表示方法における断面の表現方法の違い .....	47
図 4-9 座標軸とスケール単位の補正の流れ .....	48
図 4-10 断面内の座標点の位置変換およびスケール単位の変換 .....	49
図 4-11 断面およびオブジェクトの位置関係、他のレンダリング手法との比較 .....	50
図 4-12 ステンシルバッファなしの状態、0 と 1 とが定義された範囲の模式図、ステン	

シルバッファありの状態 .....	51
図 4-13 空間再現ディスプレイにおける仮想上の定規と現実空間の定規 .....	52
図 4-14 空間再現ディスプレイの前で掴むジェスチャーを実行し、MR 下でオブジェクトを動かす様子 .....	52
図 4-15 MR 下に手のモデル、対象物、断面が表示される様子 .....	53
図 4-16 空間再現ディスプレイ上に断面が表現される様子 .....	54
図 5-1 空間再現ディスプレイ、タブレット端末、ヘッドマウントディスプレイにおける AR 表現の構成図 .....	60
図 5-2 空間再現ディスプレイにおける AR の表示、タブレット端末における AR の表示、ヘッドマウントディスプレイにおける AR の表示 .....	62
図 5-3 空間再現ディスプレイ、タブレット端末、ヘッドマウントディスプレイにおける仮想上の定規と現実空間の定規 .....	63



## 表目次

表 2-1 仮想情報(VR), 拡張現実(AR), 複合現実(MR)という概念の類似点、相違点.24

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

不可視光を用いて、人間の視覚情報を超える情報を得ようとする研究は長年行われてきた。代表的なものが、X線を利用したイメージングである。X線は電磁波の一種であり、可視光に比べて波長が短く、物体を透過しやすいという性質を持っている。1895年にドイツ人のレントゲンによりX線が発見されて以降、X線イメージングは様々な分野で利用されている。X線の発見以降は写真乾板やフィルムを用いた記録方法が続けられおり、青や緑の波長領域に感度を持つ材料を感光材料として使い、X線のエネルギーを吸収し可視光波長域の蛍光として発光させてきた。しかし、フィルムへの記録では蛍光をそのまま捉えるだけであり、感度が低い。人間の目は適当な明るさでX線写真を見る時には1~2%の差を見分けることができる一方で、暗室透視の条件で20~40%の差がないと見分けられないという人間の視力の限界もある [1]。また、フィルムに記録されるためそれを現像する必要がある、リアルタイム性がないという課題点があった。1981年にはイメージングプレート(IP)が実用化され、X線イメージングに電子的な方法が導入された[2]。IPはX線などの放射線を潜像として一時的に記録し、光照射によって放射線の強度に応じた発光を生じる。この原理を利用し、IPにアナログ的に記録された二次元のX線画像を、レーザーで走査し、発光を時系列に光電変換し、電気信号に変えてデジタル画像化を行っている。このシステムはCR(Computed Radiography)と呼ばれ、現在広く普及している。IPを用いたCTもX線強度分布を一度潜像としてアナログ的に記録しており、デジタル化するまでにレーザーによる読み出しの手順を踏まえてならない。一方、1999年頃から直接変換型の検出器が開発された。X線を直接電気信号に変換するデバイスであり、アモルファスセレンなどを用い、X線照射により生じた電子、正孔のペアに対して高電圧をかけることにより、その電荷量を読み出す方法である。電荷の読み出しには薄膜トランジスタTFTを用いて、X線強度分布はピクセル化される。なお、X線を蛍光体で一度可視光へ変換したのちに、フラットに配列したフォトダイオードアレイによって電子化する方法もある。これらはそのディテクタ形状から、フラットパネルディテクタ(FPD)と呼ばれている。

X線が発見された翌年にはすでに、X線写真で前後の重なりを分けて観察し

ようという努力が始まっている。その一つが深さ方向の情報を得るために角度を変えて複数方向から撮影するという方法で、それがやがて立体撮影になり、あるいは断面撮影になってくる。1917年にRadonによって立体復元理論が提唱され、画像による立体の表現は医療分野にて研究されてきた。X線CT(Computed Tomography)が実用的な装置として提唱されたのは1968年に英国EMI社のGodfrey Hounsfield氏らによる発明であり、医療分野に大きな貢献を与えてきた。現在は医療分野だけでなく、非破壊検査分野やセキュリティ分野で広く活用されている。CTは基本的には被写体の薄い断面を再構築する方法であり、断層画像を表現できることにより、従来のX線透過像と異なり臓器などの組織の重なりがない方向での画像の生成が可能である。X線減衰の程度を複数回計算し、断面像のデジタル画像の再構成を行うが、画像を構成する個々のピクセルデータは断面の厚さを持つ箱状のボクセルデータ内におけるX線減衰係数の平均値をその値として持つ。図1-1は、DICOMデータとピクセル、ボクセルデータの関係性を示した図である。現在のCT装置の基本的なスキャン機構は、図1-2に示すファンビーム方式である。CTスキャン理論に忠実なスキャン構造は、ペンシルビーム操作によるスキャンと角度変更を繰り返す方式(第一世代)であるが、この方式では高速度化は不可能である。そこでファンビームにより被写体全体をカバーすることで平行走査をなくした方式(第3世代)が開発され、さらにスリッピングと摺動素子により電源供給を行い連続回転が可能となったことでヘリカルスキャンが実現された。そして検出器を複数列としたマルチスライスCT(図1-3)へと発展して、連続回転機構とあいまって列数(体軸方向の検出器幅)の増加に応じて高速化が実現された[3]。

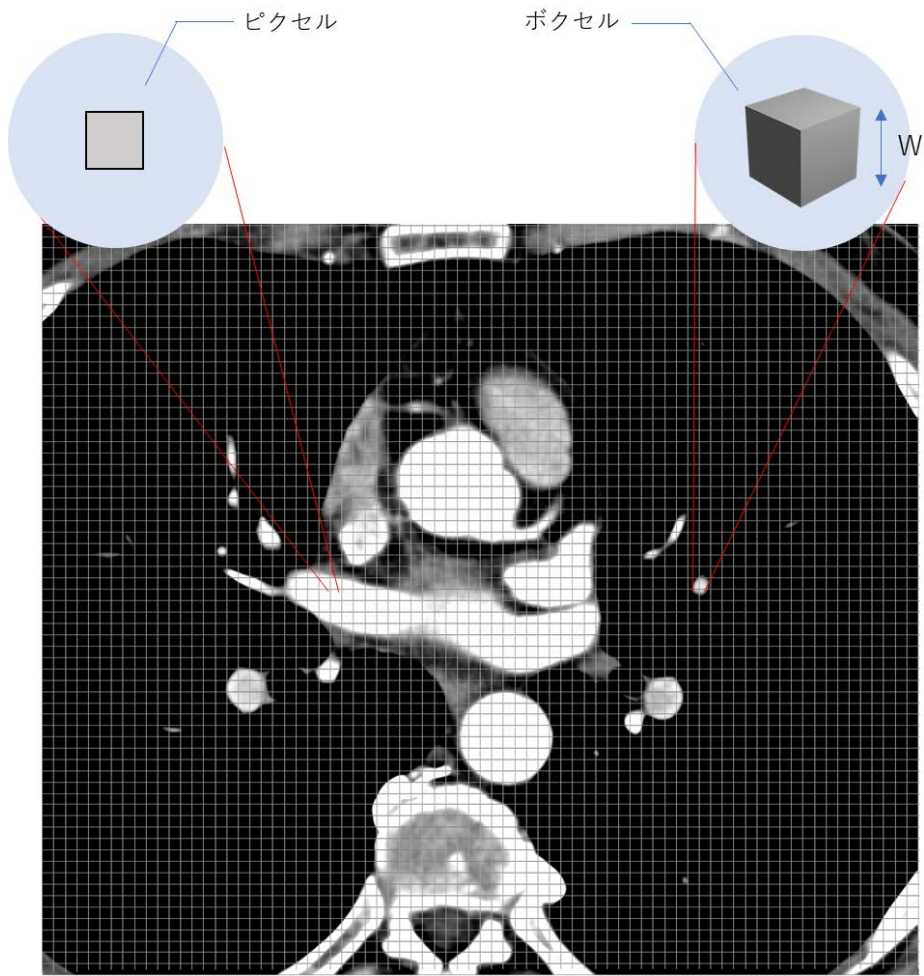


図 1-1 CT 画像におけるピクセルデータ、ボクセルデータ

(この図ではピクセルの大きさは実際より大きく描いている。)

(Pixmeo 社の DICOM サンプルデータ [4]) より心臓・冠動脈の X 線 CT 撮像データを使用)

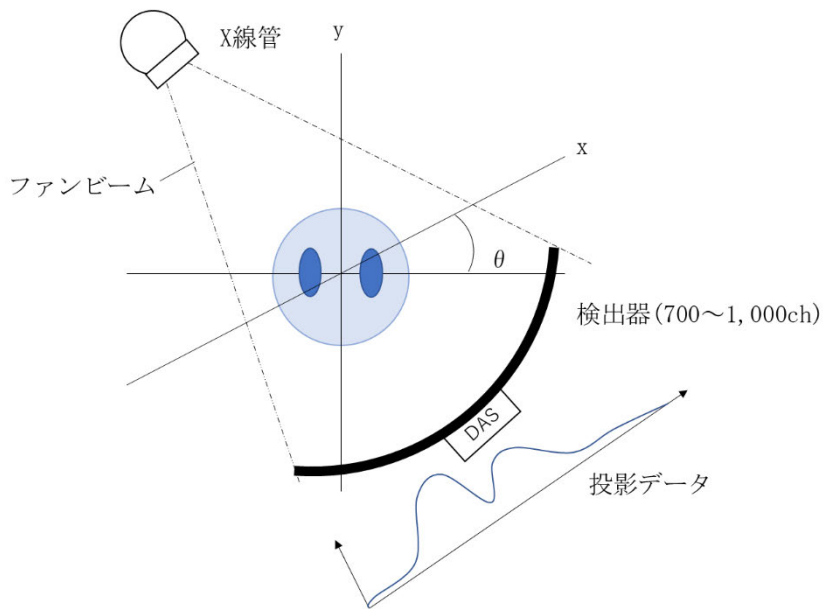


図 1-2 ファンビームによるスキャン機構[3]

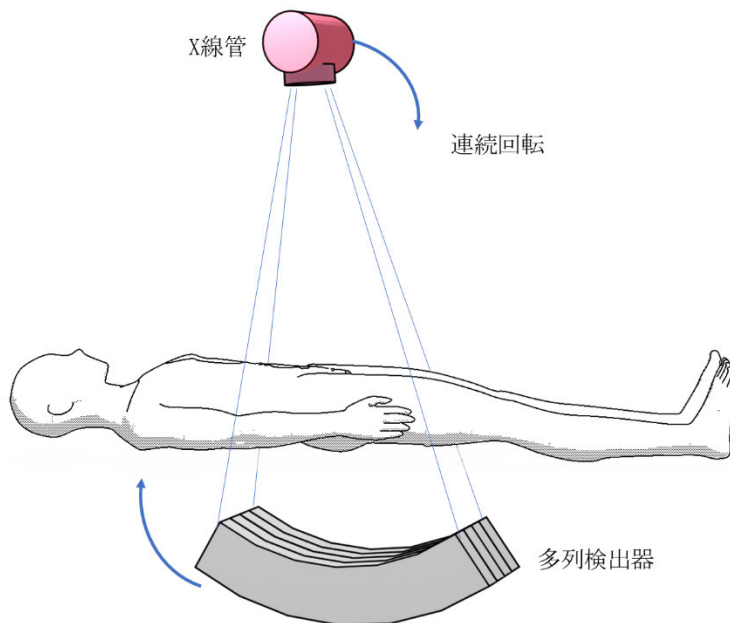


図 1-3 マルチスライス CT によるスキャン機

X 線 CT においてコンピューターの発展に伴い、軸位断の画像をもとに新たな断面の画像を再構成するソフトが開発されている。通常の X 線 CT 撮像では軸位断像 (Axial 像) が得られ、この軸位断像を連続的に撮影することで、対象とする全体像を把握するが、軸位断像のみでは体軸方向の形態と大きさを十分把握で

きないことも多い。このような場合直接冠状断像(Direct Coronal 像)や 直接矢状断像(Direct Sagittal 像)を撮影することもあるが、撮像物の向きを変更できない場合や被ばく量の増加の観点から不可能な場合がある。多断面再構成(MPR: Multi-Planar Reconstruction)では、冠状断像や矢状断像を任意方向で再構成することが可能である[5]。また他にも最大値投影法(MIP: Maximum Intensity Projection)と呼ばれる画像処理方法があり、原理としては、三次元的に構築された投影データに対し任意の視点方向に投影処理を行い、投影経路中の最大値を投影面に表示して行う方法もある。コンピューターによる画像再構成法が進むと、CT で撮像された投影データの連続体は DICOM(Digital Imaging Communication)と呼ばれるボクセルデータとして管理されることが一般的となり、ソフトウェアを通して画像を PC のモニターで表示し、観察したい箇所を確認する方法が医療分野、非破壊検査分野、セキュリティ分野で行われるようになった。

## 1.2 研究目的

不可視光による不可視物体の観察、特に X 線 CT における断層像の研究は進んでおり、1 回転につき、160 mm 幅 320 列(0.5 mm スライス幅)の断層画像が得られるようになるなど、より多くのデータセットが得られるようになった。その結果、多断面再構成法(MPR)、最大値投影法(MIP)など画像処理方法も増加し、投影データを様々な形で処理できるようになった。一方、画像処理されたデータを観察する時には特定の箇所について 3 方向(軸位断、矢状断、冠状断)を PC のモニター越しに断面を観察し、キーボードやマウス操作にて確認したい位置や角度を表示する形が主流である。それは、元来人間の目は視覚情報により三次元構造の表面情報を二次元の光のパターンとして受け取っており、物体を 3 次元のボリュームまたはパーツの構成として認識しているためであり、三次元情報をそのまま内部構造を含めた情報として理解することができないからである。近年、AR(Augmented Reality: 拡張現実)、VR(Virtual Reality: 仮想現実)、MR(Mixed Reality: 複合現実)による医療分野での活用が進み、手術前のシミュレーションソフトや教育用途向けのソフトウェアが開発されている。これらを総称した XR(Extended Reality/Cross Reality)上でコンピューターグラフィックス(CG)を利用した場合、三次元情報を二次元情報に変換することなく表現

することができるが、サーフェイスレンダリングを採用する場合には密度情報を表現することができず、ボリュームレンダリングを採用した場合には立体的な表現に欠けるため、撮像物を三次元的に理解しながら、確認したい箇所 of 内部構造の表示を両立する表現方法には確立されていない。本研究では、そのような課題を解決するため、断面の表現という点に着目し、AR・MR を用いた新たな内部構造の空間表現について提案し検証を行った。

### 1.3 論文の構成

第1章 本研究の背景及び目的について述べた。また、本章で構成について述べる。

第2章 本研究で取り扱う課題を明らかにするため、検出器やCT 画像再構成法、イメージング法等の原理、および三次元レンダリング方法、VR・AR・MR について述べる。

第3章 AR を利用した表現方法として、スマートフォンを利用した表現方法について提案し実証を行う。対象物をサーフェイスレンダリングすることで、対象物を現実空間に立体角である  $2\pi$  角で表現できるだけでなく、観察者が確認したい箇所の断面を自由な位置・方向で確認することが可能となった。

第4章 MR を利用した表現方法として、空間再現ディスプレイおよびモーションキャプチャーを使用した表現方法について提案し実証を行う。これはAR の提案に加え、三次元ボクセルデータである DICOM から二次元のピクセルデータである断面画像を出力し、サーフェイスレンダリングされたモデルの断面に重ね合わせて表示するという表現方法の提案、実証を行う。そして、モーションキャプチャーを利用して実際に対象物を手に掴んで自由に回転・移動をし、確認したい断面を自由に、直感的に操作することができるよう実装を行った。このようにして観察者が X 線 CT で撮像された対象物に対して空間的な把握を保ちつつ、内部構造を理解する表現方法の確立について述べる。

第5章 医療分野において手術前準備のための補助としての活用を目的として、脳血管動脈の AR 表現を提案し実証する。脳動脈瘤の治療におけるカテーテル手術は、脳動脈の形状に合わせてカテーテルを成形する必要がある

る。AR を利用しその成形箇所のガイドを作成することで、マイクロカテーテルのシェイピング形成の元となる針金の成形の補助となる表現を実現した。

第 6 章 本研究をまとめる。



参考文献

- [1] 飯沼 武 編, 舘野 之男 編, 日本エム・イー学会 編, “X線イメージング”, コロナ社, 2001, pp 10-11
- [2] 武部 雅汎, “放射線計測器としてのイメージングプレート”, 応用物理, 1995, 65巻, 6号, p. 601-607
- [2] Mahadevappa Mahesh 著, 陣崎雅弘 監訳, 百島祐貴 訳, “MDCTの基本パワーテキスト -CTの基礎からデュアルソース・320列CTまで-”, 株式会社メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2010, pp5-8
- [3] 日本放射線技術学会 監修, 市川 勝弘 編, 村松 禎久 編, “標準 X線CT画像計測 (改訂2版) ”, 株式会社オーム社, 2009, pp. 3- 4.
- [4] CEREBRIX, Pixmeo, DICOM Image Library, <https://www.osirix-viewer.com/resources/dicom-image-library/> (3 December 2022)
- [5] 古内 壽, 小野寺 大, 犬飼 健, 駒井 伸也, 笹野 高嗣, “X線CT多断面再構成画像に関する研究”, 東北大学歯学雑誌, 1999-12.

## 第2章 X線CTの構成

### 2.1 はじめに

本章では、X線CT再構成法の原理およびイメージング法、三次元レンダリング法、仮想現実(VR)・拡張現実(AR)、複合現実(MR)での表現について述べる。

### 2.2 画像再構成法の基礎

被写体を固定した直交座標系を  $x$ - $0$ - $y$ 、 $x$ - $0$ - $y$  座標に対して原点を中心に角度  $\theta$  回転した直交座標系を  $X$ - $0$ - $Y$ 、座標  $(x, y)$  における被写体の線減弱係数分布を  $f(x, y)$  とする。線減弱係数とは質量減弱係数と密度の積であり、物質の単位距離当たりの減弱の大きさを示す。

座標系  $x$ - $0$ - $y$ ・ $X$ - $0$ - $Y$  間の関係は次式のようにになる。

$$\begin{cases} x = X \cos \theta - Y \sin \theta \\ y = X \sin \theta + Y \cos \theta \end{cases} \quad (2.2.1)$$

図 2-1 に X線CTにおける被写体と投影データの関係を示す。

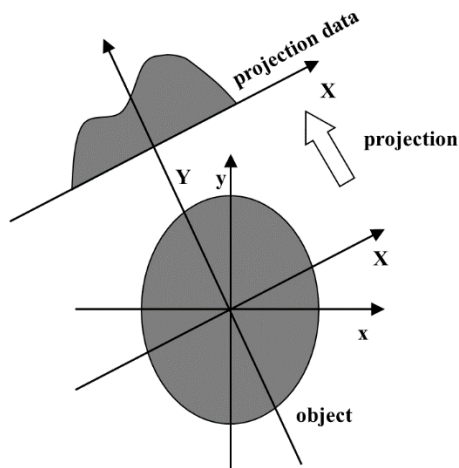


図 2-1 X線CTにおける被写体と投影データの関係

ランベルト・ベールの法則より、ある物質を透過する際の X線の減弱は以下のようなになる

$$I = I_0 e^{-\mu dx} \quad (2.2.2)$$

$I, I_0, \mu, d, x$  をそれぞれ、透過後の X 線強度、初期の X 線強度、物質の質量減弱係数、物質の密度、物質の厚みとする。質量減弱係数は原子番号とエネルギーに依存するため、上式は均質な物質と単色の光子束を想定している。

そして、Y 軸に平行に X 線を照射した場合の被写体の透過後の X 線強度は次式のようになる

$$I(X, \theta) = I_0 e^{-\int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dY} \quad (2.2.3)$$

これより X 線の減弱係数の積である X 線強度の減弱率の対数変換  $g(X, \theta)$  は、次式のようになる。

$$g(X, \theta) = \ln(I_0) - \ln[I(X, \theta)] = \ln \left[ \frac{I_0}{I(X, \theta)} \right] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dY \quad (2.2.4)$$

これを X 線 CT における投影データと呼ぶ。ラドンの定理（投影切断定理）は、各透過経路の減弱係数の和である投影データを被写体の周りから無限個取得することで、その集合から物体を再現できることを証明している。ただし、現実的に被写体は有限長であり、次式のようになる。

$$I(X, \theta) = I_0 e^{-\int_a^b f(x, y) dY} \quad (2.2.5)$$

$a, b$  は被写体の大きさによって設定される範囲である。さらにこれらの数値をサンプリングしたデータを取り扱う。

CT の画像再構成では、被写体を中心に各角度からの投影データを収集し、これを基に物体の内部構造を再現する。

### 2.3 多断面再構成法 (MPR: Multi Planar Reconstruction)

高性能なグラフィック処理を行う PC が量産され、高い空間分解能を持つ CT が現れ、CT によるイメージングのソフトウェアが確立されるようになると、それまで断層像のみで表現されてきた CT 画像が三次元情報として表現されるようになった。X 線 CT によって撮像された対象物において、平面または曲面に沿って実行できる一般的なグラフィック手法の一つに、多平面再構成法 (MPR) がある。再構成を行うためには、左右・前後・上下の直交軸を使用して患者ベースの座標

系を確立する必要がある。再構成平面は、これらの軸を基準にして定義され、図 2-2 のように軸位断像(Axial 像)、 冠状断像(Coronal 像)や 矢状断像(Sagittal 像)として断層像が形成される。各 CT 画像には特定のスライス厚があり、連続する画像間の距離はスライス間隔が発生する。そのため、軸位断像方向で撮像した場合には、冠状断像や矢状断像を形成する際に画像ピクセルにおいて補完処理が施される。図 2-3 は、脳腫瘍の患者の撮像データから Pixmeo 社のソフトウェア(DICOM ビューワー)である Osirix MD(12.5.1)を使用して各断層像を表示した際のキャプチャー画像である。このようにして医療従事者は三方向からの画像を観察することにより撮像物の確認したい箇所における三次元的位置・方向について空間的な把握を行っている。

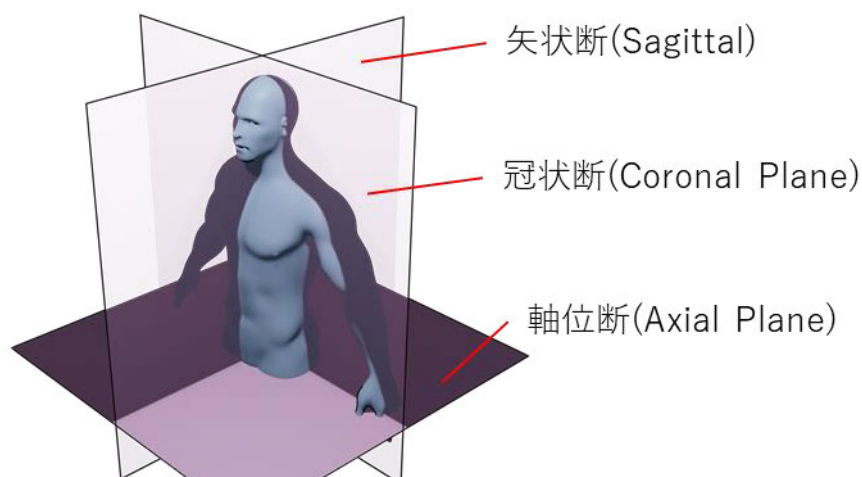


図 2-2 各軸における断層像

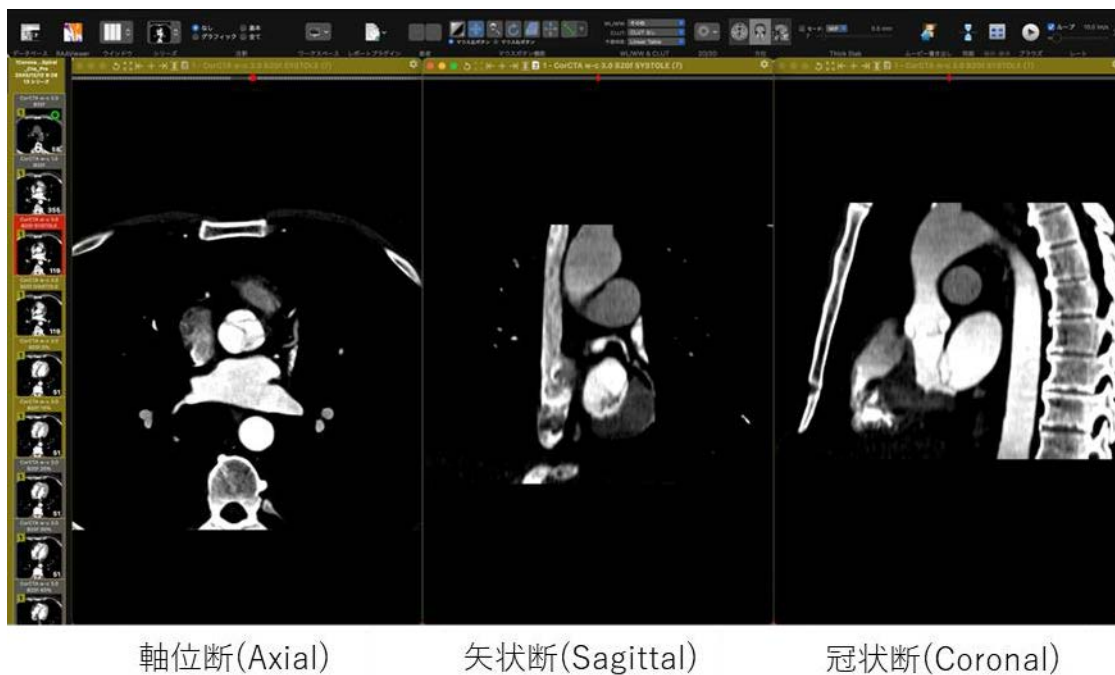


図 2-3 DICOM ビューワー(Osirix MD(12.5.1))による、軸位断(Axial), 矢状断(Sagittal), 冠状断 (Coronal)の表現

(Pixmeo社のサンプルデータより心臓・冠動脈のX線CT撮像データを使用)

## 2.4 最大値投影法(MIP: Maximum Intensity Projection)

他にも三次元ボクセルデータを二次元画像として表示する方法として、最大値投影法(MIP)がある。MIPは血管などの抽出に優れ、血管造影のような画像を得るために使用される。最大値投影処理は三次元的に構築されたデータに対し、任意の視点方向に投影処理を行い、投影経路中の最大値を投影面に表示する手法である。投影された画像はノイズの影響を受けにくく、少ないコントラストの画像でも明瞭な抽出が可能である。そのため、X線の透過像に比べ血管構造の表現においてコントラストの良いイメージングが可能である。MIP値の強さは投影経路中の最大値に左右されるため、図2-4のように投影経路が短い方より長い方が、高いサンプリングに遭遇する確率が高くなるため、MIP値が高くなる可能性が高い[1]。また、最大値の表示という特性から前後関係は判別不可能であり、投影角度を変えたり回転したりして観察するなどして前後関係を認識させる方法が利用されることが多い[2]。

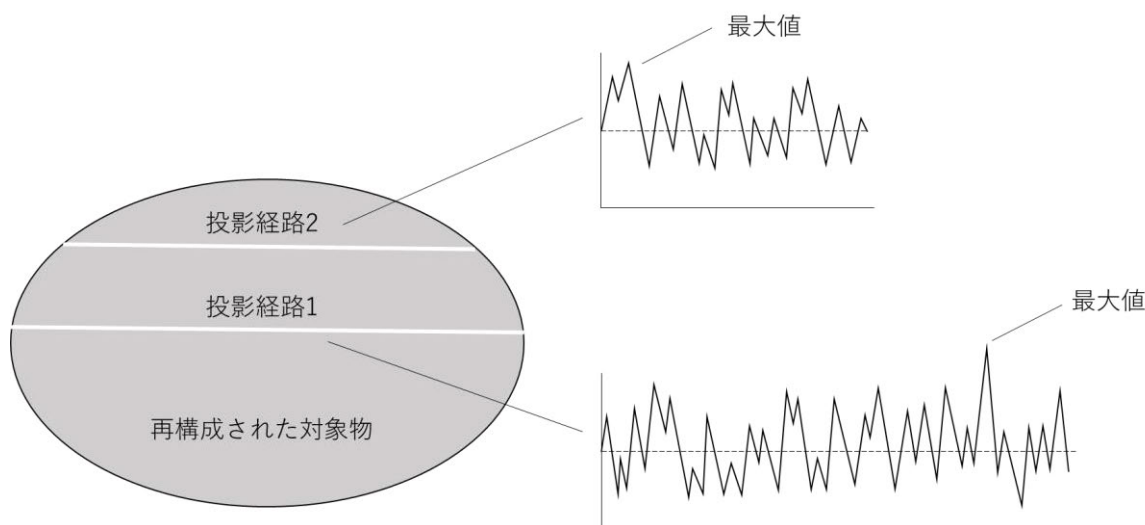


図 2-4 投影経路長による MIP 強度の変化を示す図[2]

(同一のノイズ分布で一樣に投影した場合、サンプリングサイズを大きくすると高いサンプリング値に遭遇する確率が高くなるため、投影経路長が長い方（投影経路 1）の MIP 値は短い方（投影経路 2）の MIP 値より高くなる可能性がある。)

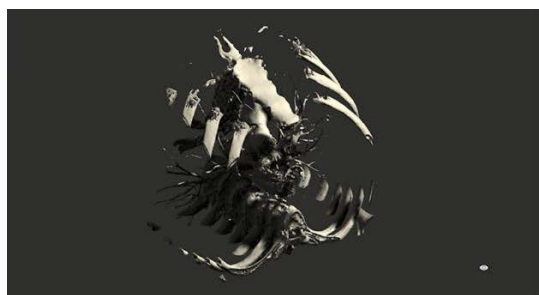
## 2.5 DICOM データ

DICOM は Digital Imaging and Communications in Medicine の頭文字で、CT・MRI・内視鏡・超音波など医用画像診断装置、医用画像プリンタ、医用画像システム、医療情報システムなどの間でデジタル画像データや関連する診療データを通信、保存、表示するための方法を定めた国際標準規格である。ACR（北米放射線学会）と NEMA（米国電機工業会）によって 1985 年に最初の規格 ACR-NEMA300-1985 が元となっており、1993 年に RSNA によって承認された規格が DICOM と名付けられた。多くの DICOM 規格の目的は、診断および治療に関する情報、画像、およびあらゆる種類の関連データの通信を可能にすることである。接続の拡張性、互換性、およびワークフローの最適化がされることを目的としており、現在医療目的の機器を製造しているほとんどの企業が DICOM 規格を扱うメンバーである [3]。

## 2.6 サーフェイスレンダリング・ボリュームレンダリング

コンピューターの性能の向上に伴い、投影像の連続データを三次元的に表示する表現方法も開発されている。一般的に、ボクセルデータを 3DCG として三次

元方向でレンダリングを行う際には、「サーフェスレンダリング」と「ボリュームレンダリング」の二種類の方法がある。「サーフェスレンダリング」はボクセル値の連続値において特定の結果の等値を選択し、リサンプリング係数によって定義する手法(Iso surface 法[4])であり、対象物の表層データをメッシュ化する方法である。「ボリュームレンダリング」は特定の視点方向から光線を投影し、物体と衝突した交点の位置を足し合わせて計算していく手法(レイキャスティング法[5])である。そのため、対象物の内部の様子をCT値が表す密度情報と不透明度を関連付けて確認することが可能となる。図 2-5 は心臓と冠動脈および周囲の肋骨や背骨を「サーフェスレンダリング」および「ボリュームレンダリング」にて同じ撮像データを用いて表現した図である。「サーフェスレンダリング」では、表層データを再現するものだけのため陰影や立体感が「ボリュームレンダリング」と比較して大きく、結果として対象物の内部の位置関係の把握が安易というメリットがある一方で、内部構造にある密度情報を表示することができず、骨や内臓や筋肉などの表面値を表現するためにはメッシュ化するボクセルデータの閾値を変更しなくてはならないというデメリットがある。一方、「ボリュームレンダリング」では対象物の内部情報が密度情報も併せて表示され、確認したい内部の構造より奥行き方向にある対象物の様子までもが重ねて表現されてしまう。そのため、特定箇所における情報を把握することができない。



サーフェスレンダリング



ボリュームレンダリング

#### 図 2-5 サーフェスレンダリングとボリュームレンダリングの表現の違い

(Pixmeo 社の撮像サンプルデータを使用[6]、サーフェスレンダリングは Osirix MD(12.5.1)にてレンダリング、ボリュームレンダリングは Unity(2021.1.25f1)にてレンダリングを行った。両者を Unity(2021.1.25f1)にて同じシーン上に配置して比較を行った。)

## 2.7 拡張現実(AR)・仮想現実(VR)・複合現実(MR)

医用画像の高度な可視化は疾病解析や手術計画、学術的なトレーニングに有用であるため、研究の動機となってきた。近年では、よりインタラクティブでリアルな医療体験を提供するための手段として、拡張現実 (AR)、仮想現実 (VR)、複合現実 (MR) が研究されている [7][8]。A Dictionary of Computer Science によると、仮想現実 (VR) は環境の創造と体験のことであり、主な目的は通常または容易に体験できない環境に参加者が存在することである。AR は VR に似ているが、仮想のイメージを現実世界のイメージに重ね合わせるもので、多くの場合シースルーヘッドマウントディスプレイを使用する [9]。「Mixed Reality」という概念は 1994 年にトロント大学の P. Milgram によって提唱されており [10]、その定義は図 2-6 のように現実環境と仮想環境の間を連続的な概念 (仮想の連続体) としてとらえ、拡張現実 (AR) と拡張仮想 (AV) が存在し、現実世界の情報を用いて仮想世界を構築するという概念である。つまり「Mixed Reality」の環境とは、現実世界と仮想世界のオブジェクトが単一のディスプレイで一緒に表示される環境、つまり、仮想性の連続体の両極の間のどこかにある環境であると述べている。



図 2-6 Mixed Reality および仮想の連続体の概念 [10]

日本で、「Mixed Reality」を「複合現実」として使用されたのは 1997 年からのキャノンの田村らによって推進された「複合現実感システムに関する試験研究」(旧通産省主導の研究開発プロジェクト) によってはじめて使用され、具体的な現実世界と仮想世界の融合技術や、複合現実感立体映像表示技術システムについて提唱された [11]。2023 年現在における AR・VR・MR の違いとしては表 2.1 のように示される。



表 2-1 仮想情報(VR), 拡張現実(AR), 複合現実(MR)という概念の類似点、相違点

(Jaquith & The Futurism Team, 2017[12]より一部引用)

概念	仮想現実(VR)	拡張現実(AR)	複合現実(MR)
映像端末	専用のヘッドセット またはスマートグラス	ヘッドセット (オプションとして立体ディスプレイを含む) またはスマートフォン等の技術	ヘッドセット (オプションとして立体ディスプレイを含む) またはスマートフォン等の技術
映像ソース	コンピューターグラフィックスまたはコンピューターによって生成された現実感のある映像	コンピューターによって生成された映像と現実世界の物体との組み合わせ	コンピューターによって生成された映像と現実世界の物体との組み合わせ
表現の環境	完全デジタル化	仮想と現実のオブジェクトが一貫して融合している	仮想と現実のオブジェクトが一貫して融合している
視点	仮想のオブジェクトが、仮想世界におけるユーザーの視点に応じて位置や大きさが変化する	現実の世界にしながら、新しい要素やオブジェクトが重なっているような感覚を味わう	現実の世界にしながら、新しい要素やオブジェクトが重なっているような感覚を味わう
仮想オブジェクトの識別	完璧にレンダリングされた仮想オブジェクトならば現実のオブジェクトと見分けがつかない	仮想オブジェクトは、使用者に追従しながら浮遊する文字など、その性質や振る舞いに基づいて現実のオブジェクトと識別することが可能。	完璧にレンダリングされた仮想オブジェクトならば現実のオブジェクトと見分けがつかない
相互作用	仮想のオブジェクトのみ相互作用が可能	現実のオブジェクトのみ相互作用可能。仮想オブジェクトはあくまで現実の拡張のみ	仮想と現実のオブジェクトの両方に相互作用が可能

このような技術の進歩により、不可視の情報を三次元的に、かつ自由視点で観察することが可能となった。近年においてARは、スマートグラスが使用されディスプレイ上にイメージ映像を重ねて表現したり、スマートフォンやタブレット端末が使用されカメラ映像を重ねて視覚的なイメージを表現したりすることで、現実空間に視覚的な補助を行うという方法で使用されている。VRでは主にヘッドマウントディスプレイが使用され、人間の頭の動きや移動距離に合わせてディスプレイ上に映像を表示することで、没入感のある体験を可能としている。また、コントローラー等の操作により表示される仮想上の対象物に作用できるようになり、その没入感を増している。MRでは、AR・VRの両方が複合的に体験できるフレームワークとして、立体表現が可能なディスプレイや、光学シースルー方式やビデオシースルー方式のヘッドマウントディスプレイが使用され、コントローラーやモーションセンサによって仮想・現実オブジェクトの両方に相互作用することが可能である。

## 2.8 関連研究

MRは、現在医療分野において、教育用のソフトウェア、手術計画の補助ツール、手術中のナビゲーションや遠隔診療の補助ツールなどの利用用途とする多くの研究が進められている。

教育用のソフトウェアでは、臨床乳房検査(CBE)の練習用検査において、触覚センサとMRを使用したトレーニングシステムが開発されている[13]。学習者の触診圧と触診範囲がリアルタイムフィールドバックとしてCG上に再現された患者のモデルの反応に表現されるようになっており、例えば痛みを伴う炎症部分に触れると患者が顔をしかめたり、学習者の問いかけに対しコミュニケーションを取ったりするようなシステムが行われている。また、患者別人工股関節手術トレーニングを目的として、Microsoft社のMicrosoft HoloLens[14]を使用して教育用途向け手術シミュレータが開発されている[15]。学習者はシミュレータ上で、図2-7のように、仮想上の骨盤・骨・筋肉・術前計画のデータを現実空間に合わせながら視覚化し、手術室の音響効果を追加し没入感を高めながらトレーニングを受けることが可能である。

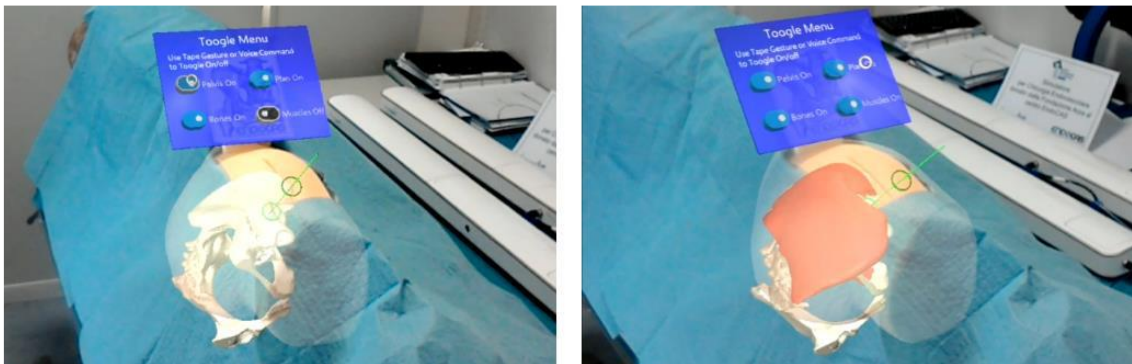


図 2-7 HoloLens を使用した股関節形成術シミュレータの 2 枚のスクリーンショット [15]  
 ( (左) 骨、骨盤、術前計画の可視化、筋肉は非表示 (不活性化)、(右) 仮想コンテンツ全体の可視化)

手術計画の補助ツールとしては、口腔顎顔面腫瘍手術における手術計画に MR が用いられ、その精度が評価されている [16]。口腔顎顔面領域は解剖学的に複雑であり、多くの重要な欠陥や主要な神経が存在する。そこで術者は HoloLens を使用して骨切りを行うライン上の基準点を確認し、図 2-8 のように、仮想上の手術用のナビゲーションプローブと基準点との距離を確認しながら、基準点を伝って骨切のラインの位置関係を把握することが可能である。

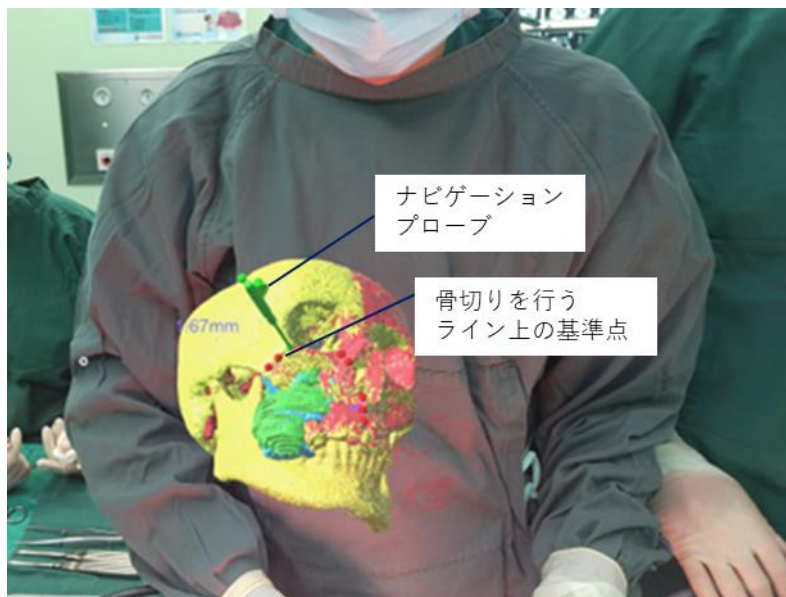


図 2-8 HoloLens に表示された手術用のプローブと骨切の基準点 [16]  
 (プローブの先端がマークした箇所から 1.67 mm 離れると、マークした箇所の色が緑色で表示される。)

手術中のナビゲーションツールとしては、腹部癌患者に対する手術において MR が解剖学的構造の視覚的な表現として用いられている [17]。このシステムでは、X 線撮像時に使用した不透過性のマーカーと同様に位置に AR のマーカーを使用することで、仮想空間上に再現される X 線 CT で撮像された患者の腫瘍およびその周辺のデータが、現実空間の患者の腫瘍の位置と自動で位置調整を行うことが可能となる。よって、手術中は図 2-9 のように MR デバイスを使用し、解剖学的な臓器や血管の位置を確認しながら手術を行うことが可能となる。他にも、腹腔鏡手術の術野と臓器の位置関係を可視化するナビゲーションシステムも開発されている [18]。手術器具をモーションキャプチャーで追跡し、器具と臓器の接触を評価し、接触による臓器の変形をシミュレーションしてプロジェクションマッピングにより可視化する MR 手術ナビゲーションシステムとして開発され、これにより腹壁に手術器具による変形を投影することが可能となる。

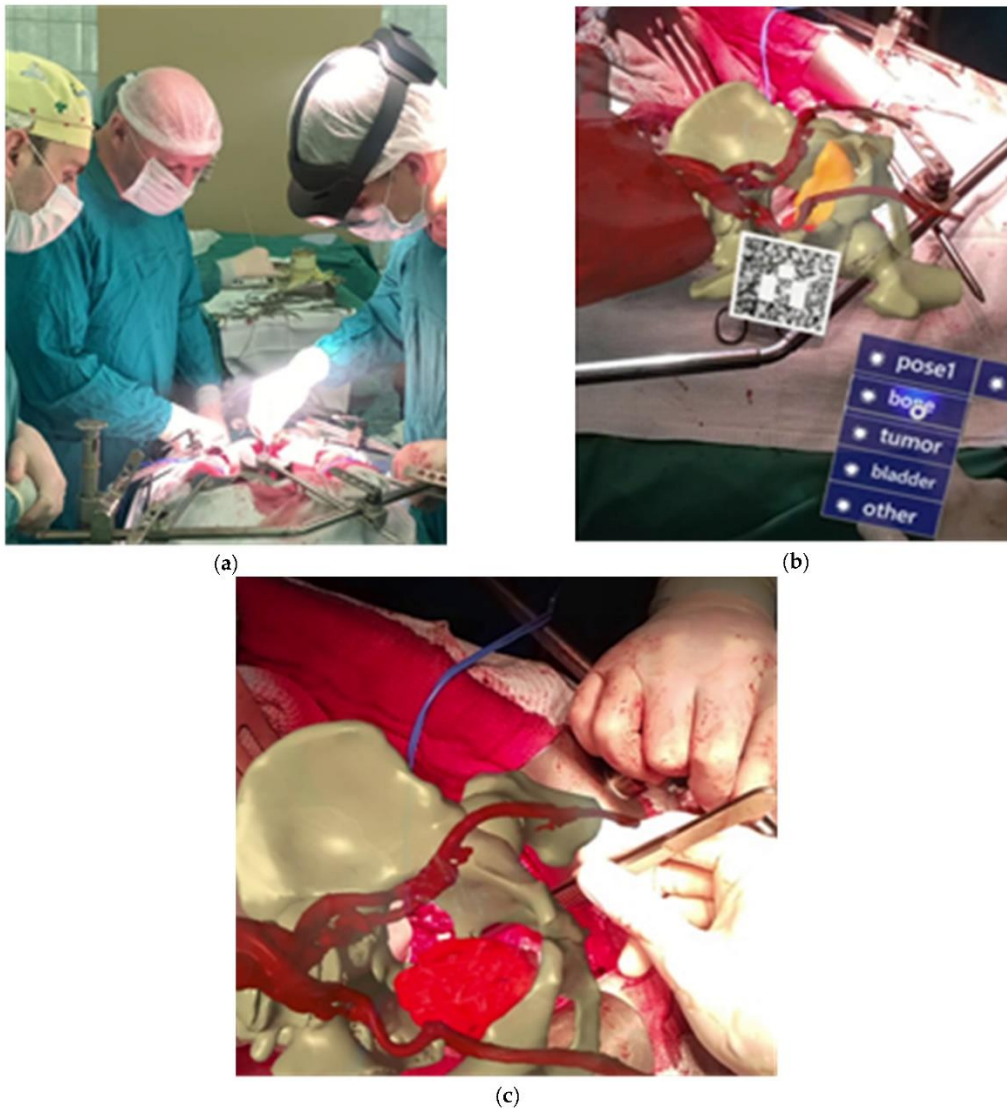


図 2-9 手術ナビゲーションとして MR が使用されている様子[17]

(a) MR デバイスを使用して勤務する外科医 (b、c) MR デバイスに表示される 3D 解剖学モデルと医師インターフェースの視覚化

MR は、他にも遠隔間での手術のトレーニングツールとしても有効である。多くの国々の農村部では医療従事者の確保と維持が問題となっている。インターネットによる通信機能を利用すれば HoloLens を使用した MR を用いた医療トレーニングは遠隔間でも実施可能である。例えば農村の緊急治療室の一人称ビューをカメラにてキャプチャーをして、MR を通じて遠方の指導者から遠隔的に指示をもらうことが可能となる。経験の浅い超音波検査者（医学部の学生）12 名を対象として、研修生が HoloLens を装着し、指導者による手のジェスチャーと

ともに音声指示に従うユーザー調査では、MR を使用した遠隔の超音波トレーニングが従来の対面のトレーニングを実行するための代替システムになる可能性があることが実証されている [19]。

## 2.9 本章のまとめ

本章では、X線 CT イメージングにおける画像再構成、イメージング法およびサーフェスレンダリング・ボリュームレンダリングによる三次元レンダリング法、AR・VR・MR についておよび医療分野での先行研究について述べてきた。不可視光によるイメージングシステムはコンピューターの発達とともに進んでおり、より多くのデータセットや表現方法が得られるようになった。具体的な例としては、多断面再構成法(MPR)、最大値投影法(MIP)など画像処理方法の増加やサーフェスレンダリングなどのレンダリング手法による三次元的な表現が可能となった。さらには、AR・VR・MR により三次元 X線 CT によって撮像された対象物が現実を重ねる形で表現されたり、没入感を持って表現されたりするようになった。MR は、現在医療分野において、教育用のソフトウェア、手術計画の補助ツール、手術中のナビゲーションや遠隔診療の補助ツールなどの利用用途として症状の空間的な認知や理解の促進を学習者や医療従事者にもたらしめている。2020 年には VR・MR 対応のヘッドマウントディスプレイを使用して画像診断を行う医療用画像処理ソフトウェアである Holoeyes MD が管理医療機器(クラス II)の医療用機器認証を取得しており [20]、今後の医療分野における不可視光による不可視物体の表現は新しい形へと向かおうとしている。

## 2.10 本研究の位置づけ

本研究の位置づけとしては、三次元 X線 CT で撮像されたデータのような、人間が認識しにくい不可視光による物体の内部構造について、物体の内部構造を視覚的に理解するための新しい表現方法を提案し、AR や MR を使用して実装を行った。さらに医療分野における手術前準備における補助として有効であることも示している。従来の二次元的な画像ではなく、三次元の撮像データを直感的かつ正確に理解できる方法を示すことで、特定箇所における不可視物体の内部構造を直感的に理解できるようにすることを可能とした。

参考文献

- [1] Jiang Hsieh, “Computed Tomography : Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances (Press Monograph) (THIRD EDITION) ”, Society of Photo Optical, 2009 p137-142
- [2] 金森 勇雄, 藤野 明俊, 丹羽 政美, “[診断画像検査法]改訂 X線CTの実践”, 医療科学社, 2015.
- [3] Mildenerger, P., Eichelberg, M. & Martin, E., “Introduction to the DICOM standard”, Eur Radiol 12, 920-927 (2002).
- [4] Bosma, M, Iso-Surface Volume Rendering: speed and accuracy for medical applications, University of Twente. (2000).
- [5] H. Ray, H. Pfister, D. Silver and T. A. Cook, Ray casting architectures for volume visualization, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 5, (1999)3.
- [6] CEREBRIX, Pixmeo, DICOM Image Library, <https://www.osirix-viewer.com/resources/dicom-image-library/> (3 December 2022)
- [7] Jungo Yasuda, Tomoyoshi Okamoto, Shinji Onda, Yasuro Futagawa, Katsuhiko Yanaga, Naoki Suzuki and Asaki Hattori, “Novel navigation system by augmented reality technology using a tablet PC for hepatobiliary and pancreatic surgery”, The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 14, (2018)14.
- [8] M. U. Sattar, S. Palaniappan, A. Lokman, N. Shah, U. Khalid, and R. Hasan, “Motivating Medical Students Using Virtual Reality Based Education”, International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET) 15, (2020)02.
- [9] Andrew Butterfield 編, Gerard Ekembe Ngondi 編, Anne Kerr 編, “A Dictionary of Computer Science (Oxford Quick Reference) (English Edition) 7th 版, Kindle版”, OUP Oxford, (2016), pp590
- [10] P. Milgram and F.Kishino, “A taxonomy of mixed reality visual display”, IEICE Trans On Information and Systems, (1994), Vol. E77-D, No.12, pp1321-1329
- [11] 田村秀之, “複合現実感研究プロジェクト”, 一般社団法人電子情報通信学会, 電子情報通信学会1997年総合大会, システムソサイエティ特別企画シンポジウム「人工現実感から複合現実感へ」, (1997), pp455-456

- [12] Jaquith, T., & The Futurism Team. “New realities: How VR, AR, and MR stack up.” Futurism.com January (2017).<https://futurism.com/images/vr-ar-and-mr-whats-the-difference-infographic-2/> (2022年12月4日アクセス)
- [13] A. Kotranza, D. S. Lind and B. Lok, “Real-Time Evaluation and Visualization of Learner Performance in a Mixed-Reality Environment for Clinical Breast Examination,” in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 18, no. 7, pp. 1101-1114, July 2012
- [14] “HoloLens” , Microsoft, <https://www.microsoft.com/ja-jp/HoloLens>, (2022年1月13日アクセス)
- [15] G. Turini, S. Condino, P. D. Parchi, R. M. Vigliani, N. Piolanti, M. Gesi, M. Ferrari, and V. Ferrari, “A Microsoft HoloLens Mixed Reality Surgical Simulator for Patient-Specific Hip Arthroplasty Training” , in Lecture Notes in Computer Science, Lecture Notes in Computer Science, 2018, pp. 201-210.
- [16] Tang ZN, Hu LH, Soh HY, Yu Y, Zhang WB, Peng X., “Accuracy of Mixed Reality Combined With Surgical Navigation Assisted Oral and Maxillofacial Tumor Resection” , Frontiers in oncology vol. 11 715484. 14 Jan. 2022
- [17] V. M. Ivanov et al., “Practical Application of Augmented/Mixed Reality Technologies in Surgery of Abdominal Cancer Patients,” Journal of Imaging, vol. 8, no. 7, p. 183, Jun. 2022
- [18] Xiaoshuai Chen, Daisuke Sakai, Hiroaki Fukuoka, Ryosuke Shirai, Koki Ebina, Sayaka Shibuya, Kazuya Sase, Teppei Tsujita, Takashige Abe, Kazuhiko Oka, Atsushi Konno, “Basic Experiments Toward Mixed Reality Dynamic Navigation for Laparoscopic Surgery” , Journal of Robotics and Mechatronics, 2022, vol.34, No.6, pp1253-1267
- [19] S. Wang et al., “Augmented Reality as a Telemedicine Platform for Remote Procedural Training,” Sensors, vol. 17, no. 10, p. 2294, Oct. 2017
- [20] “新サービス「Holoeyes MD」が医療機器認証を取得しました。” , Holoeyes株式会社, (2020), [https://holoeyes.jp/topics/md\\_medical\\_device\\_certification/](https://holoeyes.jp/topics/md_medical_device_certification/) (2022年12月4日アクセス)



## 第3章 拡張現実(AR)・複合現実(MR)を利用した内部構造の空間表現

### 3.1 はじめに

AR・VR・MRによる表現方法が進められてはいるが、現在は医療従事者による三次元 X 線 CT での投影データの確認方法は三次元のボクセルデータを PC のソフトウェアである DICOM ビューワー上にて軸位断・矢状断・冠状断の三方向にて画像、つまり 3 枚の 2D のピクセルデータとして確認する方法が主流である。そして、観察者は観察したいポイントをそれぞれの方向からの位置や角度から頭の中で空間的に把握を行っている。その原因の大きな理由としては、従来人間は、視覚による情報により三次元構造の物体を二次元の光のパターンとして受け取っており、内部構造の理解にあたっては、三次元情報そのものより画像として認識の方が認識しやすいからである。そもそも、人間が視覚情報から三次元空間の対象物を認識するときには、両目の位置関係に視差を利用して、左右の目の網膜上に別々に映る像を大脳皮質で認知することにより立体物の奥行きを認識している。つまり、視覚による情報により三次元構造の物体を二次元の光のパターンとして受け取っており、人間の視覚で三次元の物体を認識する際には、物体を視点固有の局所的特徴の集合として認知しながら、物体を三次元のボリュームまたはパーツの構成として認識している[1]。そのため三次元構造の立体物については特定方向の表層部分の情報以外の情報については従来認識しておらず、不可視部分の内部構造については認識を行っていない。AR・VR・MRにおける表現についても、基本的には撮像されたデータをサーフェスレンダリングやボリュームレンダリングにて全体を表現する形に留まっており、サーフェスレンダリングでは表層情報によるデータのため密度情報が表示することができず、ボリュームレンダリングでは確認したい内部構造の奥行き方向にある構造までもが重ねて表現されてしまうというデメリットのために、本質的に不可視部分の内部構造を三次元空間的に表現する形には至っていない。

そこで本研究では、断面像について着目し、AR・MRにて断面を自由な位置・角度から確認できることを目的とした。従来から PC の DICOM ビューワーで確認されている、撮影時に固定された三軸方向（軸位断、矢状断、冠状断）だけでな

く、立体角である  $2\pi$  角からの断面を自由に確認することができれば、特定の部位の構造を把握することが容易になる。対象物の内部構造が複雑になればなるほど、また精密であればあるほど、従来の三軸方向からの断面の観察をモニター上で確認しながらマウスやキーボード操作でその位置を変えながら行うことが難しく、読影に時間がかかってしまう。これらの要素が AR・MR によって解決されるためには、観察者が確認したい箇所について、その内部構造の様子が断面として任意の位置・方向にて表示される必要がある。

### 3.2 目的

本研究は、医療分野における表現方法を目的としているが、不可視光による不可視物体の内部構造の検査は非破壊検査分野やセキュリティ分野にも適用可能である。表現における最初の実験として、非破壊検査分野における物体での空間表現を試みた。三次元 X 線 CT によって撮像されたデータを表現する手法として、まず非破壊検査分野を対象とし、AR による表現について提案し実証を行う。図 3-1 に実証写真を示す。

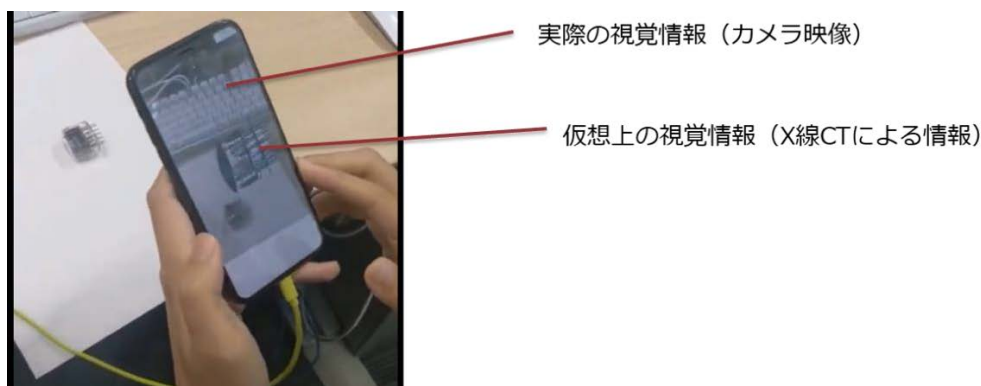


図 3-1 AR によってスマートフォンのカメラ映像に仮想上の視覚情報が重ね合わされる様子

対象物には三次元 X 線 CT による内部構造データと比較するために、可視光でも内部構造が確認できる物体として、図 3-2 のような真空管(ニキシー管)を使用した。

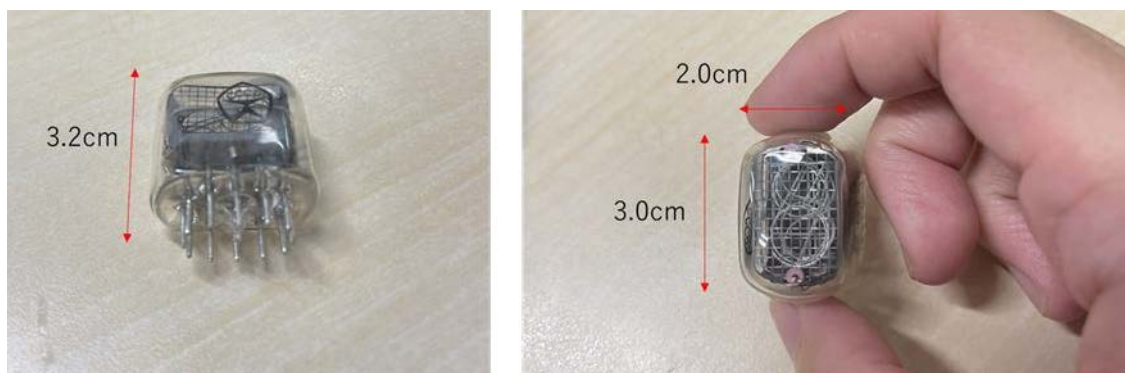


図 3-2 実験で使用されたニキシー管

(左写真：ガラス部分および電極、右写真：数字を模ったグリッド部分)

実験は以下の二点を目的とする。

1. 図 3-3 のように対象物の任意の内部構造をサーフェスレンダリングされたモデル及びその断面画像として立体角である  $2\pi$  角から確認することができるようにする。(対象物の内部を任意の角度から任意の奥行き方向で確認可能とする)
2. 内部構造の境界部分を表示しながら、かつ対象物のモデルの断面位置をスマートフォンの操作によって変化させることで、人間の目で観察しづらい対象物内部構造の位置関係を観察者が直感的に把握できるような形にする。

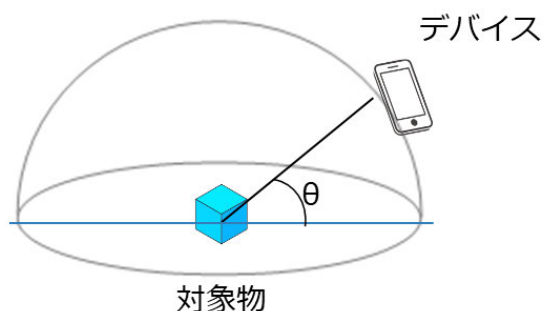


図 3-3 対象物とデバイスの位置関係

### 3.3 実験

システムの構成図を図 3-4 に示す。三次元 X 線 CT にて撮像が行われたデータはボクセルデータである DICOM 形式にて PC に保存した。PC ではサーフェスレンダリングにより DICOM データを三次元のメッシュデータとしてレンダリング

を行った。スマートフォン内にはゲーミングエンジンである Unity Technologies 社の Unity(2020.1.6)により作成された AR の表示を行うソフトウェアを実装した。AR を表示するデバイスはスマートフォン(iPhone12 ProMax)を採用した。これは、対象物の大きさが小さいため必然的に対象物とデバイスのカメラの位置を近づけなければならない、光学シースルー型のヘッドマウントディスプレイでは両目網膜像の視差量と輻輳の調節においてデバイス上の限界が生じ、ビデオシースルー方式のヘッドマウントディスプレイではカメラの光軸と表示デバイスの光軸が一致せず、立体感が正しく知覚されないためである。

本研究の実装として、スマートフォンの可視光カメラが対象物を三次元 AR マーカーとして認識すると、スマートフォンのスクリーン上にカメラ画像と作成されたサーフェイスデータ（点群・法線データ）が AR 画像として合成される形で実装を行った。サーフェイスレンダリングを行うにあたっては、ボクセルデータから等値面を選択する上でデータの閾値を設定する必要がある。そのため、医療では人体を撮像した場合には骨や筋肉や血管等の閾値に合わせることで、観察したい内部構造のみを表示する。今回は閾値をニキシー管の電極部分と数字を模ったグリッド部分のみを表示させるように設定をした。

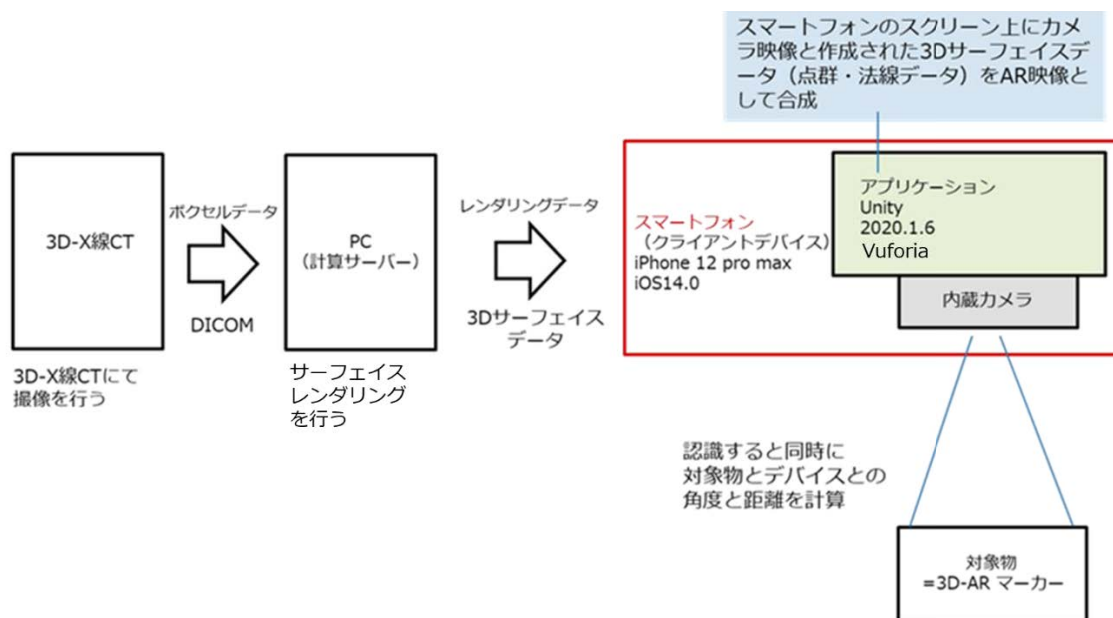


図 3-4 AR 映像を表現するためのシステム

メッシュ化された撮像データを現実空間に重ねて表示するためには、現実空間に重ねる位置を指定するマーカー (AR マーカー) が必要である。一般的に AR マ

ーカーとして使用されるのは QR コードや幾何学的なパターンといった、自然界には存在しない物体やデバイスのカメラで認識がされやすい物体が採用されることが多いが、今回はニキシー管の大きさが約 3 cm と小さいため、AR 映像と現実空間の物体(ニキシー管)とがスマートフォンのカメラの画角内に収まるように、対象物そのものを三次元 AR マーカーとして認識させることとした。

AR 開発用プラットフォームである Vuforia を利用し、図 3-5 のように対象物をモバイルデバイス内蔵のカメラで撮像すると、カメラの輝度情報から特異点を検出し、対象物そのものを AR マーカーとすることができる。これにより、カメラが認識した三次元 AR マーカーからデバイスと対象物との距離と方向を計算し、AR 映像を画面に表示することが可能となった。

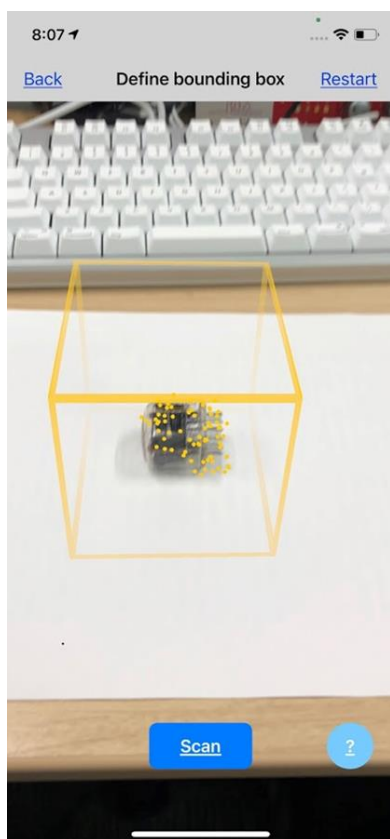


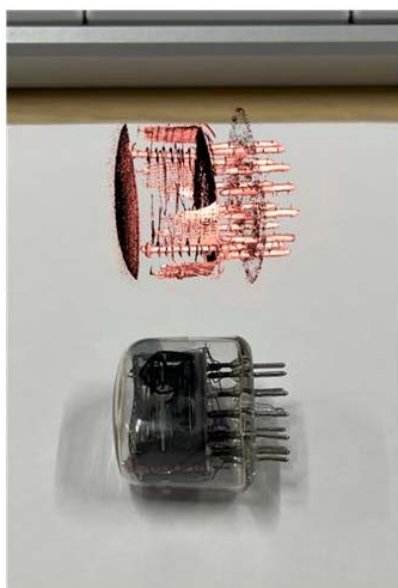
図 3-5 スマートフォンの画面上で対象物を三次元 AR マーカーとして認識する様子

対象物の位置に AR 映像を重ねて表現を行い、実空間に合わせる形で対象物のサーフェイスレンダリングされた画像を表現した。ただし、現実空間にある対象物の様子に重ねる形で AR 映像を表現すると、図 3-6(左)のように対象物そのものが AR 映像に隠れてしまうという問題点が生じたため、図 3-6(右)のように、

対象物の位置に AR 映像を重ねた表現と、対象物の上部の位置に AR 映像を重ねた表現の両方を行い、比較検討を行った。



対象物の位置にAR映像を重ねた図



対象物の上部の位置にAR映像を重ねた図

### 図 3-6 カメラ映像に重ねて AR が表示される様子

(スマートフォンのスクリーンキャプチャ)

(左：対象物の位置に AR 映像を重ねて表現した図

右：対象物の上部の位置に AR 映像を重ねて表現した図)

また対象物の任意の角度の断面画像を確認するために、図 3-7 のような方法を提案し、実装を行った。スマートフォンが現実空間の対象物を認識すると、AR 上で対象物の内部構造とともに、断面を表示するための境界面によって構成された立方体を透過させて重ねて表示を行った。境界面はスマートフォンの画面操作によって任意の方向に回転・移動することができ (1 本指でのスクロールで境界面を移動、2 本指でのスクロールで境界面から構成される立方体の回転)、立方体の境界面が仮想上の対象物と重なった場所で断面を自由に表示することを可能とした。また、断面の表現にあたっては、本来サーフェスレンダリングされたモデルでは対象物全体をメッシュ化して表現しているため、断面の表示を行うとすると、輪切りのような形で表現されてしまい、断面そのものの表示を行うことはできない。今回の実験では、Unity のシェーダー機能を使用することで、輪切りになった部分に対してメッシュ面を自動で形成するスクリプトを付した

ことで、断面を補完的に表示させることが可能とした。

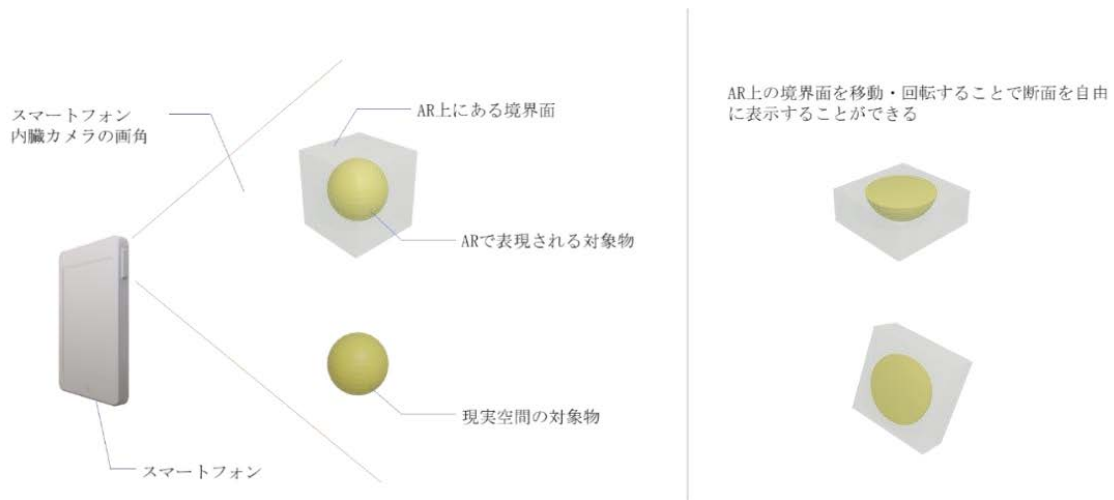


図 3-7 AR 映像において断面を表示させる際の位置関係及び境界面の働き

(左：スマートフォンおよび可視光カメラと現実空間の対象物、AR で表現される対象物と AR 上にある境界面の位置関係

右：AR 上の境界面の回転・移動により、AR で表現される対象物の断面を表示させる概念図)

### 3.4 結果

図 3-8 のように観察者が対象物の AR 映像をスマートフォンの画面にカメラ映像に合成することで表示しつつ、その断面の様子を観察者がスマートフォンの操作によって任意の位置方向・回転方向から確認することを可能とした。左図はスマートフォンのスクリーン画面であり、紫色の部分が断面として表示された。



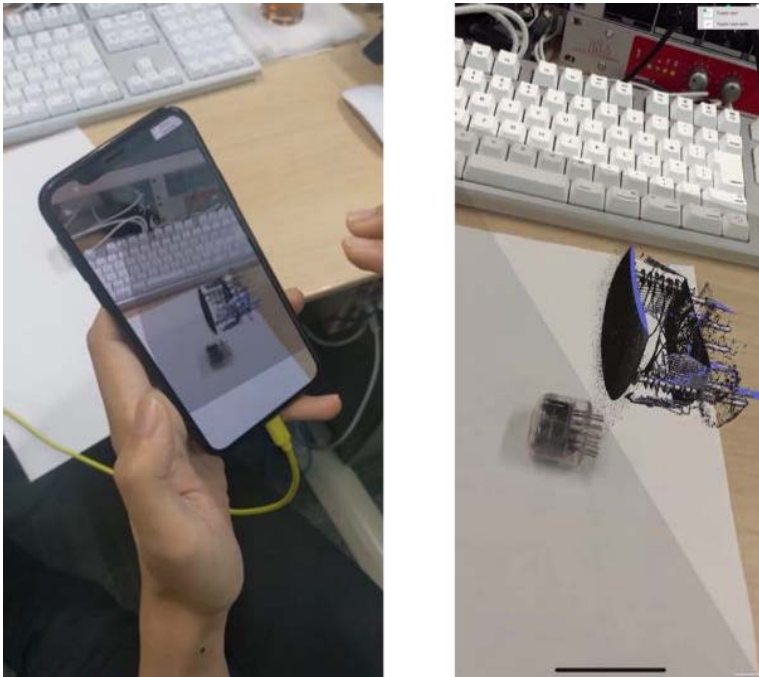


図 3-8 スマートフォンに AR 映像として表示される様子

(左：対象物をスマートフォンの可視光カメラで認識し、AR 映像がスクリーン上に表示される様子

右：AR 上の境界面を移動・回転することにより対象物の断面を表示させる様子、紫色の部分が断面)

### 3.5 結論

三次元 X 線 CT によって撮像された対象物を AR にて表示することで、人間に不可視の物体の内部構造に対し、断面を観察者の確認したい位置・方向にて観察することが可能となった。対象物全体をメッシュ化してサーフェスレンダリングを行って表現する方法ではなく、断面という表現方法を加えたことで、観察者が物体の内部構造を空間的に把握するのを補助する役割があると考えられる。一方、この実験によりいくつかの課題点が考えられた。

1. スマートフォンやタブレット端末を使用した AR 表示では、可視光カメラが表示できる画角が一度に AR で表現できる限界であり、表示できる情報量に限界がある。
2. 断面を表示するにあたっては、サーフェスレンダリングされた対象物を特定の箇所切断し、切断された箇所に対して Unity のシェーダー機能によ



り補完的にメッシュ面を表示させたため、断面の形状は確認できるものの、DICOM データで確認できるような断面の内部のピクセルデータは表示されていない。

3. 断面の位置・方向の操作にあたっては、スマートフォンの操作（一本指・二本指のドラッグ操作）によって任意に変更することができるが、スマートフォンの画面上で操作するという点が接触式かつ直感的な操作ではない。従来の PC の画面を確認しながらマウスやキーボードで操作するのと変わらず、本来は実際に手術中の衛生も考え仮想上に表現される対象物を非接触で手で持って移動・回転できるような形が理想である。

#### 参考文献

- [1] M. J. Tarr, H. H. Bülthoff, Image-based object recognition in man, monkey and machine, *Cognition* 67, (1998) 1-20.

## 第4章 複合現実(MR)での表現

### 4.1 はじめに

近年、MR 技術は多くの分野で革新的な進展を遂げており、医療分野においてもその適用範囲が広がっている。本章では、第3章で既に取り上げたARから発展し、三次元X線CTによる内部構造についてMRを使用した表現について述べる。第3章では、AR技術を用いて医療従事者が患者の病状や解剖学的な情報を視覚的に把握する手段を探求してきた。しかし、実際に臨床現場で必要とされるような精緻な観察を行うには、ARによる表現では限界がある。それは、従来医療従事者がDICOMビューワーソフトの画面を通じて提供される断層像を一枚一枚送って確認するように、観察者は三次元方向にデータの位置を自由に移動・回転させることで、望む視点位置・方向からの情報を得ることが必要であるからである。そのためには観察者は三次元方向でポインティングする操作を正確に行う必要があり、仮想上の対象物と作用することが求められる。また、手術室などの特殊な環境下では衛生状態の保持が重要であり、マウスやキーボードに触れることなく非接触で操作を行う必要がある。この問題に対して、MRを用いることで、観察者は仮想上の対象物を自由に移動・回転させることができ、確認すべき箇所を自由自在に選択することが可能となる。さらに、モーションキャプチャー技術を組み合わせることで、観察者の手の動きを追跡しながら操作を行うことができ、マウスやキーボードに触れることなく操作することで衛生状態の維持にも貢献することを期待した。

### 4.2 目的

MRでの表現について、以下の三点を目的とした。

1. 三次元X線CTで撮像された対象物がMRデバイス上に立体物として現実空間に合わさった形で表現される。観察者はディスプレイ上に表現される仮想上の対象物と現実空間にある対象物の大きさの差が1 mm以内で三方向(X, Y, Z方向)において確認することができ、物体を空間的に把握することができるようにする。これは、撮像用途にもよるが一般的には通常のCT撮像データを利用したMRP画像であっても3次元画像では30%のオーバーラップ(スライス幅1 mm,

再構成間隔 0.7 mm)があれば一般的に診断に活用な十分なデータが得られる[1]ことから、妥当な差の範囲として設定した。

2. 対象物がメッシュ化された三次元データとして仮想空間上に表現され、対象物の断面の位置を移動・回転することで全立体角の任意方向から確認することができるようにする。

3. 断面の位置の回転・移動にあたっては、キーボードやマウス操作ではなく、観察者が対象物の三次元データをあたかも実施に手で掴んだり動かしたり回転するような直感的な操作により行うこととする。図 4-1 のような境界面を設定し、境界面と触れた部分の断面を表現することで観察者は確認したい断面を自由に設定することができることとする。

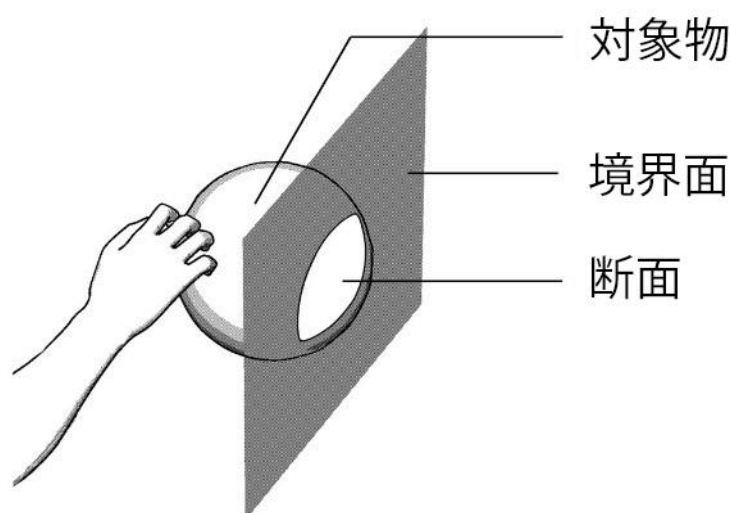


図 4-1 仮想空間に表示される、観察者の手、対象物、境界面、断面

### 4.3 提案手法

対象物の立体表示の正確性から MR デバイスとして SONY 社の空間再現ディスプレイ (Spatial Reality Display: SRD) (ELF-SR1/BZ) を採用した。その理由として、ヘッドマウントディスプレイに対し、空間再現ディスプレイの方が近接距離での表現に適しているからである。図 4-2 のように空間再現ディスプレイの前面ディスプレイの上方向には可視光カメラが搭載されており、観察者の顔の位置及び左右の目の位置を検出する。この情報を用いて、視線認識技術により、左右それぞれの目に最適な映像を生成し、裸眼で立体像を観察することが可能

である[2]。

図 4-3 はヘッドマウントディスプレイとして代表的な HoloLens と空間再現ディスプレイの推奨動作距離の違いを示している。HoloLens にて仮想オブジェクトのホログラムを表示する際には人体から 1m 以上の距離を開けることが推奨されている一方、空間再現ディスプレイでは人体から 0.3~0.75m での表示距離で仮想オブジェクトを表現することが可能である。またヘッドマウントディスプレイに対し空間再現ディスプレイの方が現実物体の表現において観察精度が正確であるためである。Ariwa らが行った実験[3]では、歯科用模型から作成された 3D-CG モデルを推奨されるワーキングディスタンス (1.0m 以内での観察) 下で使用した際に、タイポドン式上顎歯列模型から 3D-CG モデルを作成し、ヘッドマウントディスプレイと空間再現ディスプレイにおける表現を図 4-4、図 4-5 のようにノギスで計測し、その測定誤差を比較したところ、ヘッドマウントディスプレイにおける誤差が 0.29~1.92 mm、空間再現ディスプレイでは測定誤差が 0.02 mm~0.59 mm であった。

視線認識センサー (可視光カメラ)



図 4-2 空間再現ディスプレイ(SONY ELF-SR1/BZ)における視線認識センサ

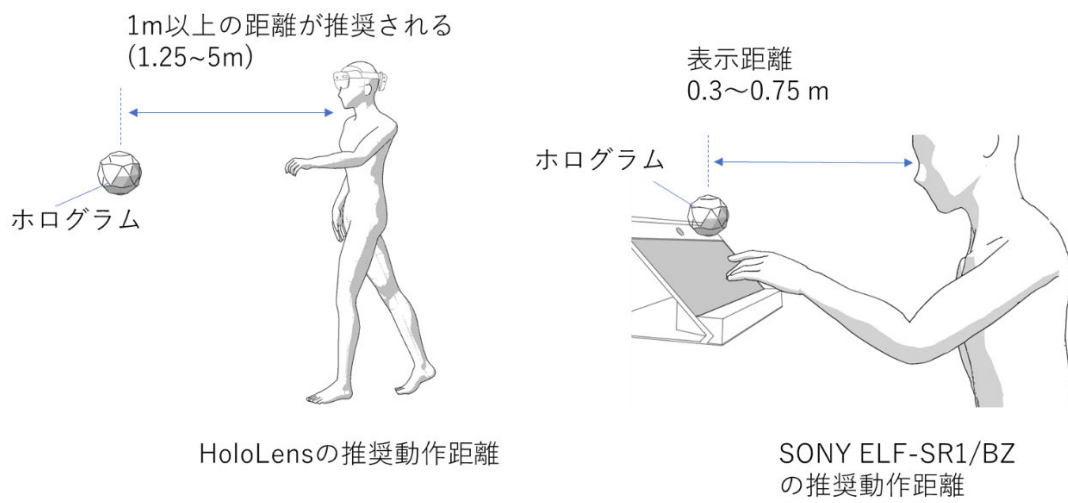


図 4-3 HoloLens の推奨動作距離と空間再現ディスプレイの推奨動作距離の違い

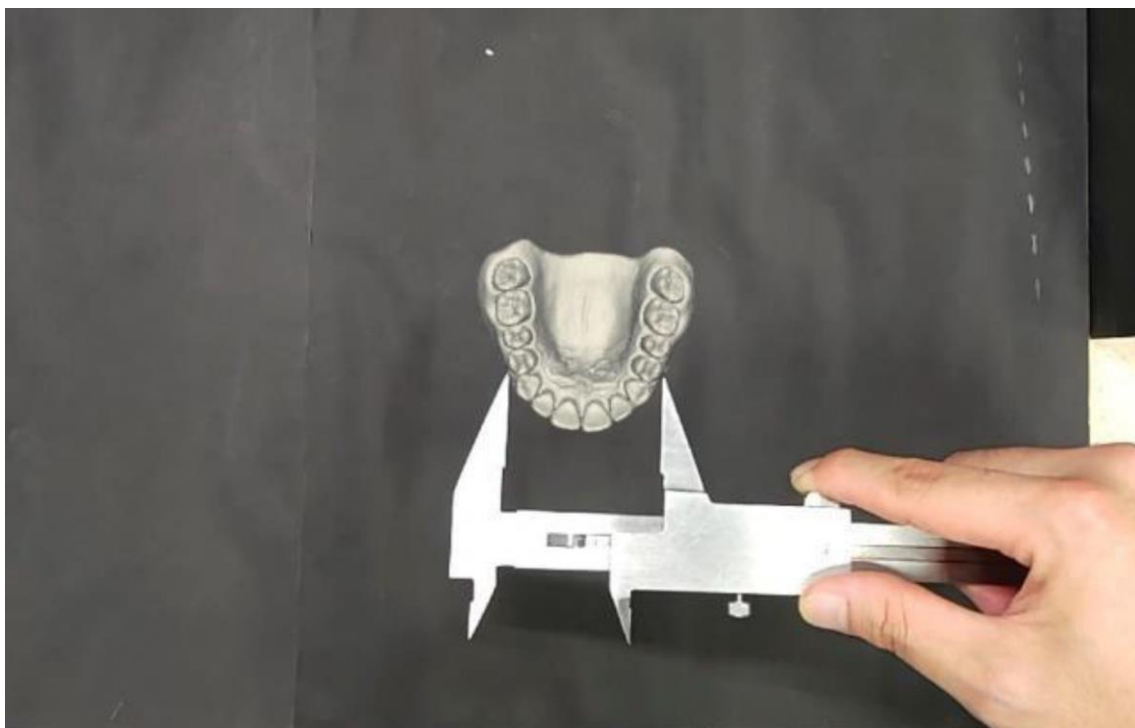


図 4-4 ヘッドマウントディスプレイ(HMD)による 3D-CG モデルの測定[4]



図 4-5 空間再現ディスプレイ(SRD)による 3D-CG モデルの測定[4]

観察者の実際の手の動きをキャプチャーし、仮想空間上に表現するにあたっては、Ultraleap 社の Leap Motion Controller[4]を採用した。Leap Motion Controller は図 4-6 左図のように 2 台の赤外線カメラと 3 個の赤外線 LED で構成されており、手や指を撮影し、画像解析により三次元空間における手や指の位置を特定することが可能である。これによりマウス操作やキーボード操作を使用せず、ジェスチャーでの直感的な操作が可能となる。今回の実験では赤外線カメラと赤外線 LED が手の動き全体を捉えることができるように、図 4-6 右図のように観察者の首に Leap Motion Controller を装着した。



図 4-6 Leap Motion Controller の概要及び装着図

(左：Leap Motion Controller に搭載される赤外線カメラ及び赤外線 LED)

(右：観察者の首に Leap Motion Controller が装着される様子)

構成については、図 4-7 のような構成を行った。

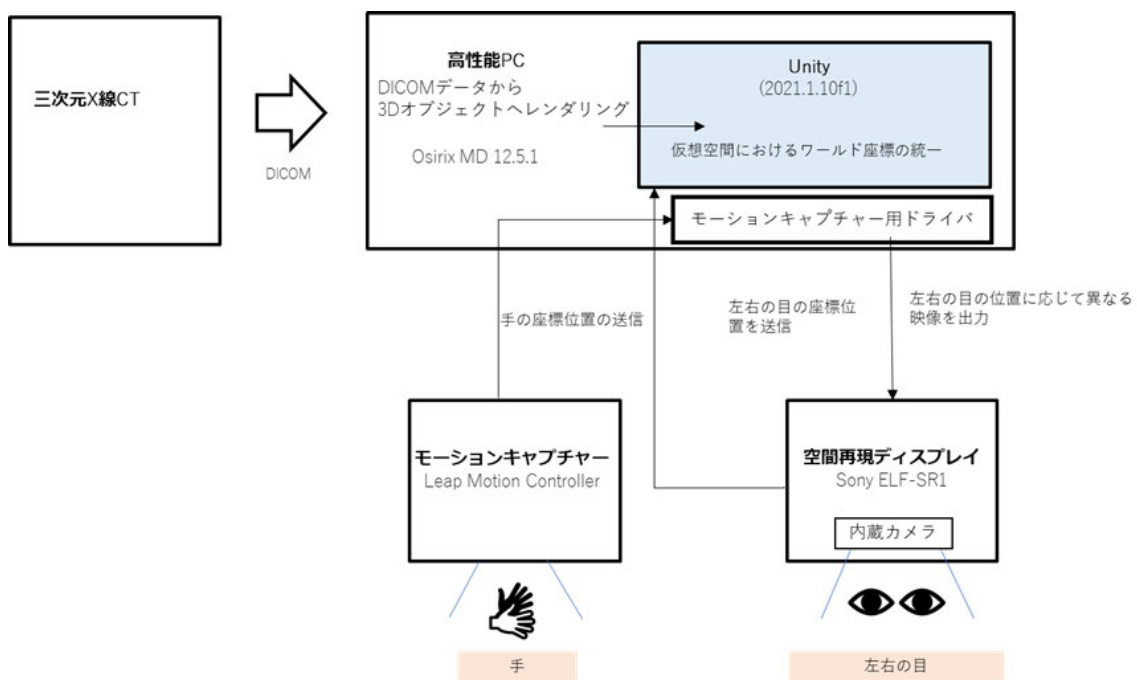


図 4-7 三次元 X 線 CT で撮像されたデータの構成図

三次元 X 線 CT によって撮像された DICOM データは PC に送信され、「サーフェイスレンダリング」によってメッシュ化を行った。Unity (2021. 1. 10f1) を使用し、メッシュ化されたデータは仮想空間上に表現した。PC に接続された空間再現ディスプレイ (SONY ELF-SR1) によって対象物のデータは立体的に表現する。また、PC にはモーションキャプチャー (Leap Motion Controller) が接続されており、手の位置やジェスチャーの様子をトラッキングした。空間再現ディスプレイは観察者の視線方向をリアルタイムに検出し、その情報を Unity に送信し、Unity からは左右の目の位置に合わせて異なる映像を出力することで、観察者の目には立体的に物体が表現されているように感じることができるよう実装を行った。キーボード操作やコントローラーでの操作は、PC モニターを注視した上下左右方向の操作には適しているが、奥行き方向を含む三次元的な操作について、直感的な操作をすることが難しく、また接触が必要である。本研究では、モーションキャプチャーから撮像された実際の手の動きを仮想空間上に再現し、対象物と作用させることで、対象物の AR を移動・回転する実装を行った。このようにして、観察者は実際には対象物を手に持っていない (非接触) にもかかわらず、コン



トローラーやキーボードの操作なしに、まるで対象物を手で掴み移動・回転を行うことができるような操作を非接触で可能とした。

また、仮想上の対象物が境界面に触れた際に、断面の様子を表示するように実装を行った。断面の表現について、確認したい断面を DICOM ビューアーで確認するような画像（ピクセルデータ）で確認するような表現を行うために、図 4-8 のように「サーフェスレンダリング」された対象物の断面に DICOM からなる二次元画像を重ねて表示するシステムを提案し実装を行った。断面を特定方向から三面図的に表示するのではなく、MR 化において観察者が自由に断面を移動・回転させることができるような形を実装した。ボリュームレンダリングが、特定の視点方向から光線を投影し、物体と衝突した交点の位置を計算して足し合わせていく手法に対し、今回の提案方法では、「サーフェスレンダリング」された対象物のモデルに対して観察者が断面の位置・回転方向を決定すると、DICOM のボクセルデータ上にも同様の位置・回転方向における二次元方向の断面が生成され、断面は「サーフェスレンダリング」された対象物のモデルに重ねて表示されるように実装を行った。

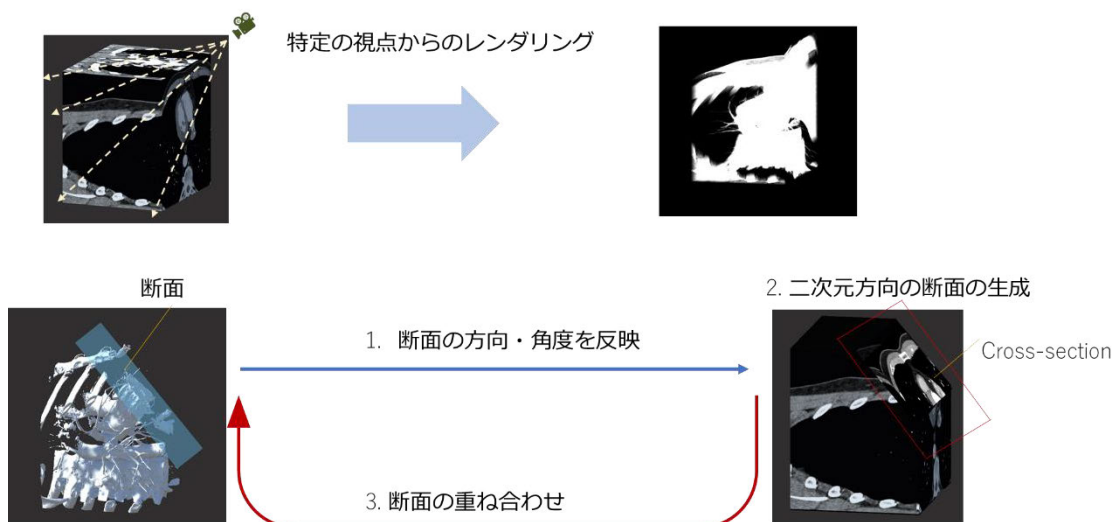


図 4-8 ボリュームレンダリングにおける表示方法と今回の表示方法における断面の表現方法の違い

この実装された手法の一番の特徴は、断面を表示する際に特定方向 (X, Y, Z 方向) ではなく、任意に断面方向を決定できるところにある。対象物を回転し境界面に断面を表示させるということは、対象物を固定してその断面の位置、角度



を求めるのと同義である。

三次元 X 線 CT で撮像された対象物を MR にて等倍に表現するためには、三次元 X 線 CT で撮像された DICOM ボクセルデータ、Unity 上の表示スケール、空間再現ディスプレイ上のスケールが一致する必要がある。図 4-9 のような軸およびスケールを変換する作業を行った。ボクセルデータである DICOM データから「サーフェスレンダリング」を行うにあたっては、Pixmeo 社の Osirix MD(12.5.1) を使用し、obj 形式に変換した後、Autodesk 社の Autodesk MAYA(2022.3) を利用してスケール単位をセンチメートル基準から Unity の基本的な単位であるメートル基準へ変換を行った。また表現にあたって座標軸の方向が異なるため、Z 軸が上方向を向く座標軸から Y 軸が上方向を向く座標軸へと変換を行った。Unity(2021.1.10f1) 下において、空間再現ディスプレイ上におけるスケールも同様にメートル基準として表示を行った。DICOM のボクセルを二次元ピクセル画像として表示をする際に、Unity を使用してボクセルデータから 1 辺 1024 ピクセルの 3D テクスチャを作成し、境界面時点でのシェーダーによる描画処理を行った。この手法により、すべてのデバイス・ソフトウェア上でのスケールを一致させることが可能となった。

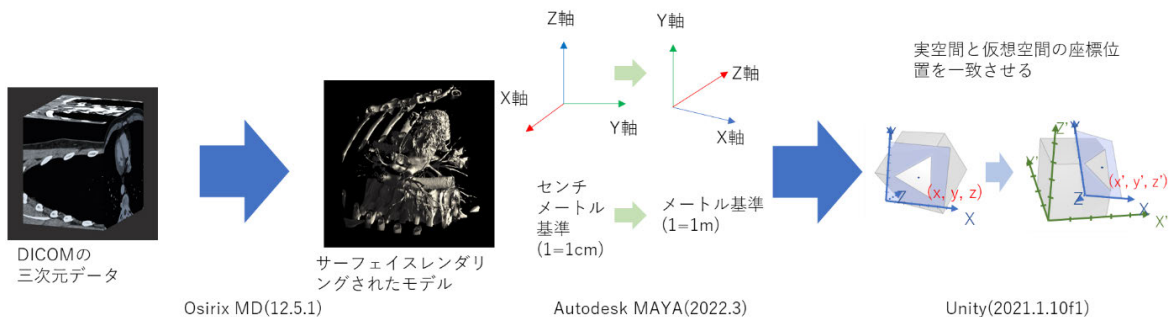


図 4-9 座標軸とスケール単位の補正の流れ

断面における二次元表現を行うにあたっては、Unity を使用し図 4-10 のような座標変換処理を行った。仮想空間上のワールド座標において、対象物が境界面に接すると、境界面上の特定の点に対し境界面を基準とする軸(X 軸, Y 軸, Z 軸)の面における  $(x, y, z)$  の点として変換し、更に対象物を基準とする軸(X' 軸, Y' 軸, Z' 軸)における特定の点  $(x', y', z')$  に変換を行った。これにより、観察者が確認したい断面のボクセルデータ上にあたる位置を計算することができる。

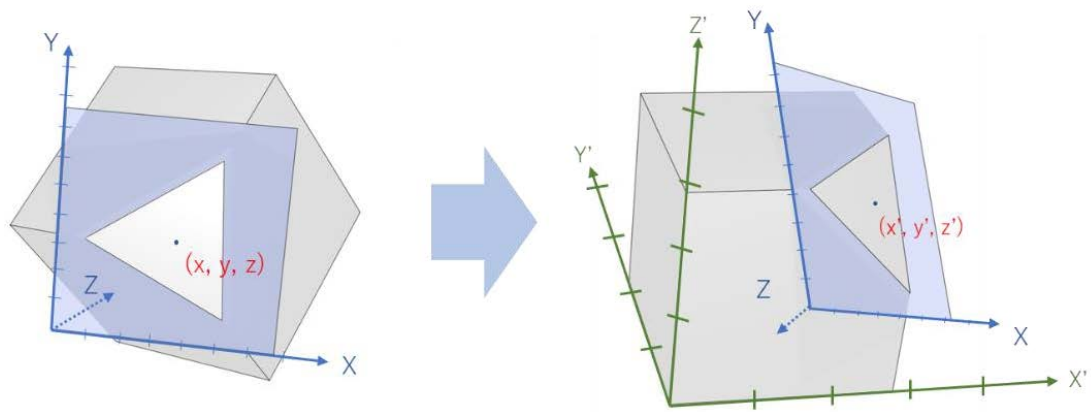


図 4-10 断面内の座標点の位置変換およびスケール単位の変換

#### 4.4 実験

本研究では、実際に人体の三次元 X 線 CT による撮像データが利用できる Pixmeo 社の DICOM Image Library 上の心臓のサンプルデータセットを利用した [5]。図 4-11 (A) は境界面と断面、表示・非表示のオブジェクトの関係を図示したものである。サーフェスレンダリングされたモデルは境界面より手前にあるときには非表示、奥行き方向にあるときには表示にすることで観察者は断面とその奥行き方向にある対象物のみを観察することが出来る。(B)～(E) は断面及び対象物におけるそれぞれのレンダリング手法における比較である。(B) は対象物に「サーフェスレンダリング」を行った時の断面、(C) は「ボリュームレンダリング」を行った時の断面、(D) は DICOM による二次元方向の断面、(E) は本研究の提案手法である、「サーフェスレンダリング」のオブジェクト断面に DICOM による二次元方向の断面を重ねて表示したものである。(B) は対象物の表層部がメッシュ化され、立体感や陰影の表現が行われているため奥行き方向における空間的な構造の把握がしやすいが、断面におけるデータはないため、断面におけるデータが総じて白く表現されてしまい、内部情報は表現されていない。(C) は CT 値の密度情報に応じて透明度が反映されており、内部構造を把握することができるものの、奥行き方向にある密度情報も同時に表現されてしまうため、どこに断面があるのかを把握することが難しい。(D) は DICOM のボクセルデータから二次元画像を生成したものであるが、二次元画像であるため三次元的な表現ができていない。そこで、新しい表現方法である (E) は「サーフェスレ

「サーフェイスレンダリング」を行った断面に DICOM による二次元方向の断面を重ね合わせた表現方法である。三次元データの断面の形状を参照して、奥側に二次元の断面画像の描写を行うかどうかを判定する処理(ステンシルバッファ[6])を取り入れることで、視点を基準として奥行き方向に「サーフェイスレンダリング」されたモデルが存在する場合には描写をし、存在しない場合には描写を行わないという処理を取り入れたことで、奥行き方向にある三次元データが断面画像によって見えなくなることを防いだ。この表現方法は、「サーフェイスレンダリング」、「ボリウムレンダリング」のそれぞれのメリット・デメリットを補完しつつ、内部構造も理解でき、奥行き方向の理解も行うことができる方法である。

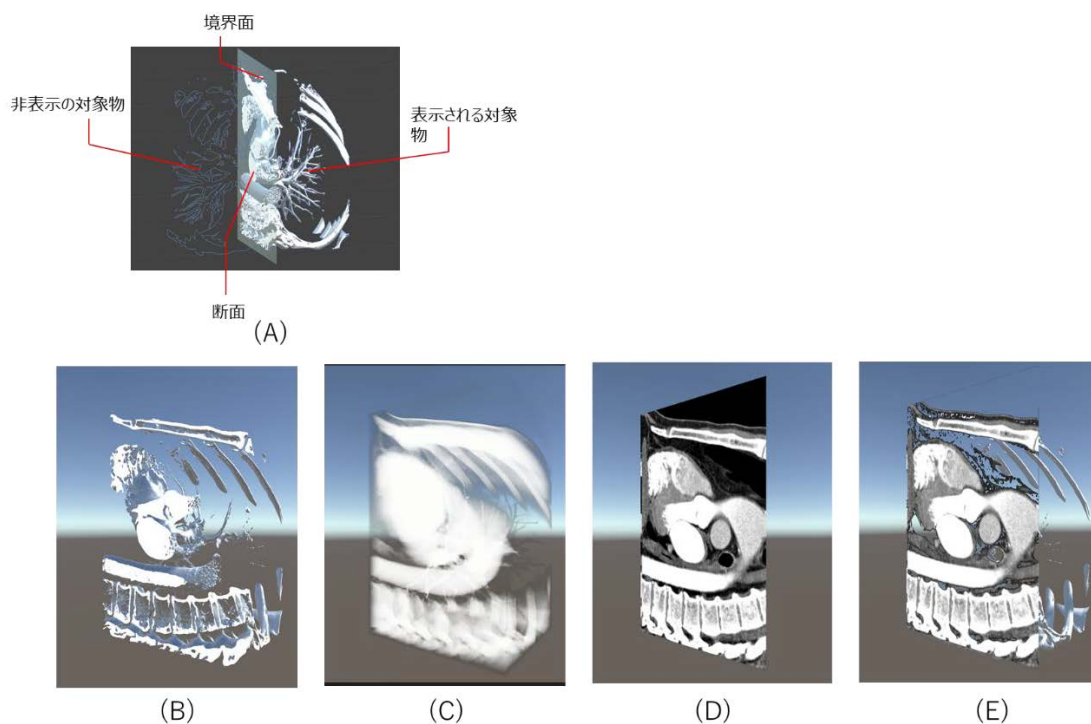


図 4-11 断面およびオブジェクトの位置関係、他のレンダリング手法との比較

(A)境界面と断面、表示・非表示のオブジェクトの関係図、(B)サーフェイスレンダリング、(C)ボリウムレンダリング、(D)DICOM による二次元画像、(E)サーフェイスレンダリングの断面に DICOM の二次元画像を重ね合わせた図

ステンシルバッファとは、同じ文字や記号、模様を描いたり塗ったりするために使用するテンプレートである「型板(かたいた)」のステンシルから由来しており、画像中のピクセルをマスクし、ピクセルを描画するかどうかを制御するこ

とで特殊効果を生み出すために使用される。ステンシルバッファ内でマスクをする範囲(描写をしない範囲)を0と定義し、マスクをしない範囲(描写をする範囲)を1と定義すると、1と定義した範囲にのみピクセルを描写すると指定することができる。図4-12に、ステンシルバッファなしの状態、0と1と定義された範囲の模式図、ステンシルバッファありの状態を示す。このようにして断面の描写範囲を指定することで、断面より奥行き方向にある仮想上の対象物が断面によって隠れてしまい、立体的な表現を損ねてしまうことを防ぐことが可能とした。

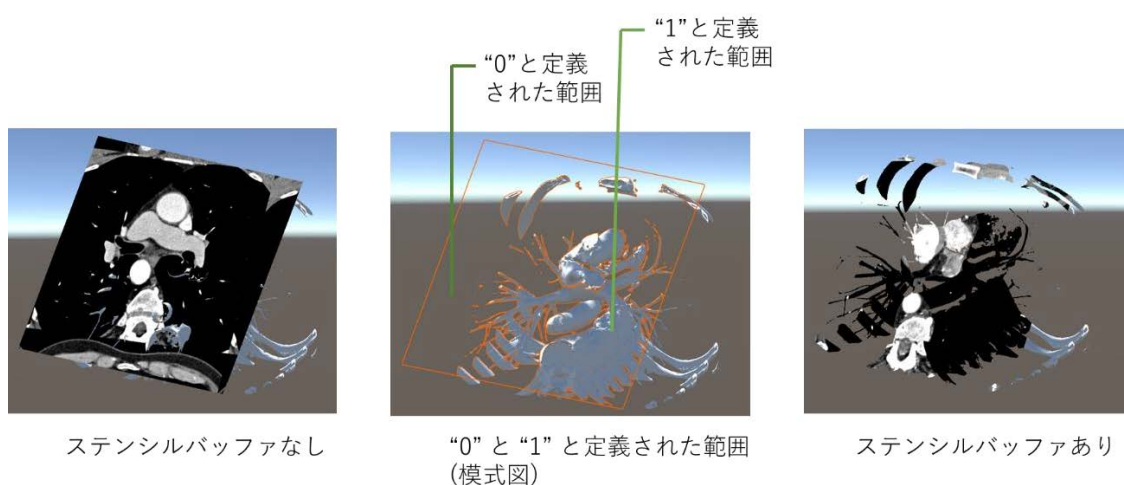


図 4-12 ステンシルバッファなしの状態、0と1とが定義された範囲の模式図、ステンシルバッファありの状態

また、空間再現ディスプレイを使用し、ディスプレイ上に表現される対象物と現実空間における対象物の大きさの差を検証した。仮想空間上に実空間と同じスケールの定規のオブジェクトを表示し、現実世界で実際に定規を重ね合わせることで正確性の検証を行った。観察者が断層像を確認するのに注視する必要な範囲を5 cmと想定し、ディスプレイに表示される仮想上の定規のオブジェクトと現実空間の定規における目盛位置を合わせた結果、二次元方向(左右上下方向)だけでなく、奥行き方向においても定規の最小目盛のサイズである1 mm以内の差にてARの表現を行うことが可能となった。本研究では実体のない仮想上の定規に現実空間の定規の目盛を合わせて読み取りを行ったことより定規の固定が困難であるため、目盛幅の最小単位の1 mmを読み取りの最小幅とした。図4-13にその様子を示す。



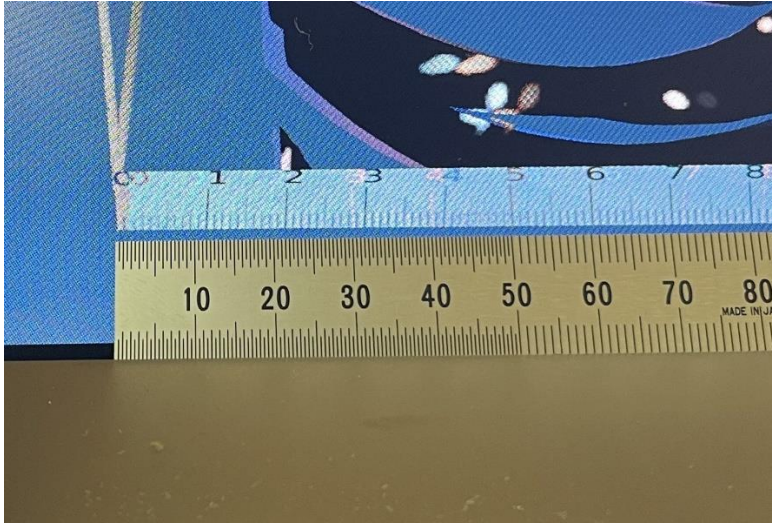


図 4-13 空間再現ディスプレイにおける仮想上の定規と現実空間の定規

さらに、空間再現ディスプレイとモーションキャプチャーを利用することで、観察者は仮想上の対象物を手のジェスチャーにより非接触で回転・移動することで断面を任意方向に観察することを可能とした。図 4-14 は実際に観察者がモーションキャプチャーを装着し、空間再現ディスプレイの前で掴むジェスチャーを行う図である。

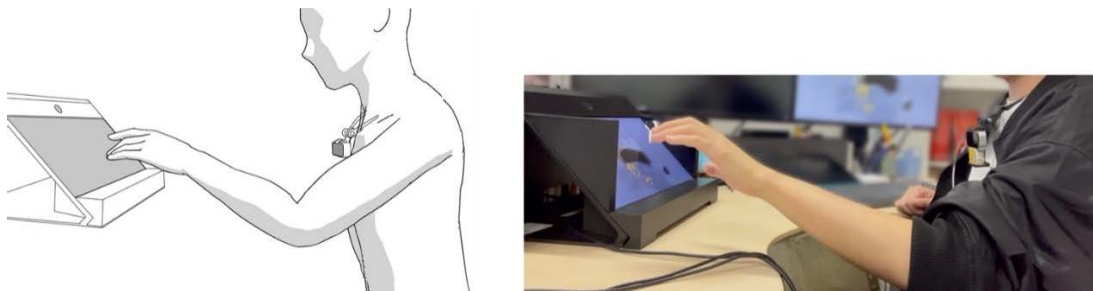


図 4-14 空間再現ディスプレイの前で掴むジェスチャーを実行し、MR 下でオブジェクトを動かす様子

(左：ジェスチャーを行う様子を模した図、右：実際に動作を行う写真)

観察者の手は図 4-15 のように空間再現ディスプレイ上にも仮想上の手として表現され、自由な位置・方向へ移動・回転を行うことが可能となった。仮想上の手、対象物、断面は同じ画面上に表示され、仮想上の手と対象物には当たり判定がついており、接触・掴む・かざすといった動作が現実世界の動作と同様に対象物に対して作用を行うように実装した。

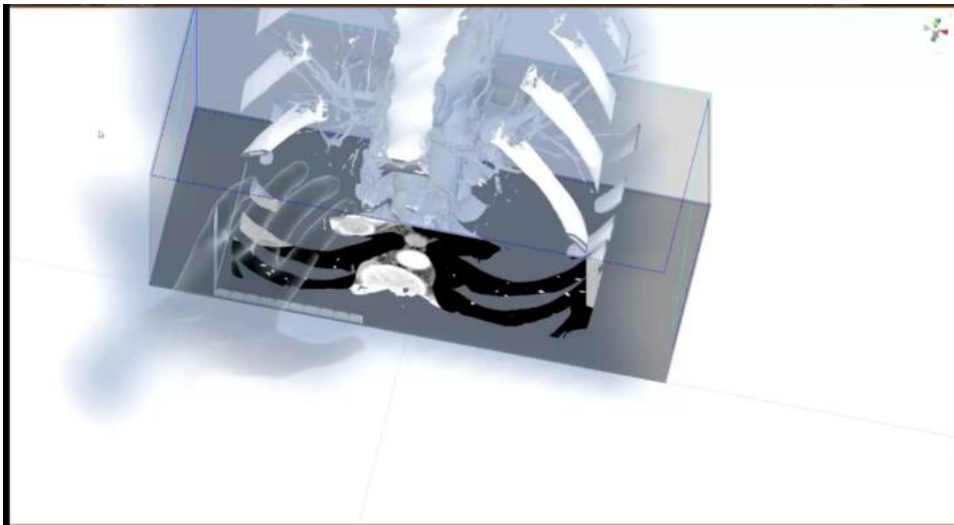


図 4-15 MR 下に手のモデル、対象物、断面が表示される様子

(この図は「Unity」上の画面のキャプチャー画面である。グレーの直方体部分が空間再現ディスプレイ上に表示される領域である、そして直方体のうち観察者に向かい合う面が境界面であり、断面が表示される面である。)

#### 4.5 結果

空間再現ディスプレイとモーションキャプチャーを組み合わせ、観察者が手のジェスチャーを使用して仮想上の対象物を回転・移動する手法が実証された結果、観察者は実際に被写体を掴むかのような感覚で、仮想上の対象物を自在に操作することが可能となった。さらに、境界面と仮想上の対象物が重なった際には、断面が視覚化されることで、観察者は断面の位置・方向を調整し、対象物の内部構造を立体的に把握することができることが示された。この断面表示による操作は、対象物の内部に隠れた詳細な情報を観察者が容易に理解する手段となり、特に非破壊検査などの領域での有用性が考えられる。実際に空間再現ディスプレイに表現される様子を図 4-16 に示す。この操作手法は、被写体を直感的に操作し、内部構造を確認するための効果的な方法であることが視覚的に示された。さらに、本研究では、仮想上の対象物だけでなく、境界面を操作する手法についても検討を行った。非破壊検査分野では被写体そのものを手でつかんで内部構造を確認することはあっても、医療現場などでは被写体そのもの、つまり人体を直接手で掴んで動かすことはあまりないため、内部構造を確認するには境界面のみを操作する手法が有用であると考えられる。両方の手法において

も、観察者にとって直感的な内部構造の表現を実現できることが示された。

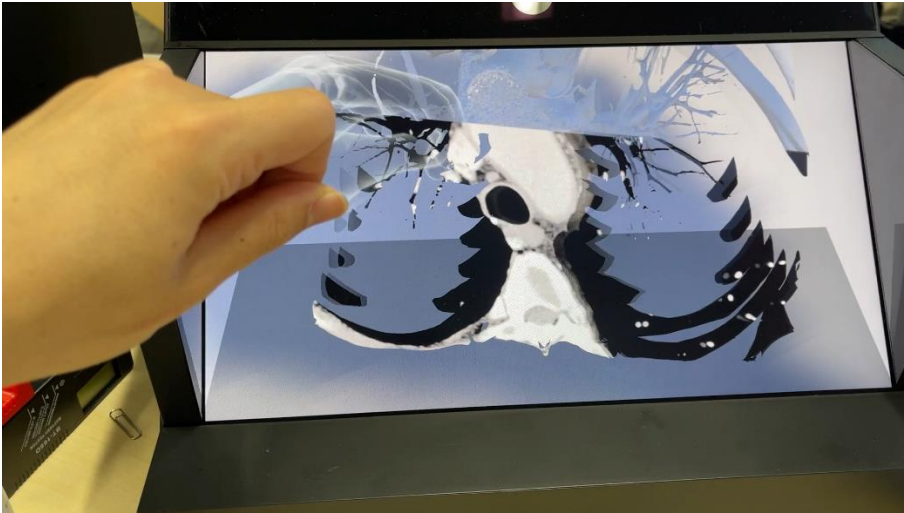


図 4-16 空間再現ディスプレイ上に断面が表現される様子  
(撮影者の視点から撮影)

#### 4.6 結論

三次元 X 線 CT により撮像された不可視の対象物の内部構造を明確に表現すること、また三次元ボクセルデータから生成される断面の位置・角度を自由にかつ容易に指定して正確に表現するにあたって、以下のことが示された。

1. 三次元 X 線 CT で撮像された対象物は「サーフェスレンダリング」され、仮想空間上に立体物として表現した。また空間再現ディスプレイを通して観察者は対象物を自由な方向から観察することができ、空間的に構造を確認することが可能となった。
2. 境界面を設定し、仮想上の対象物と境界面が重なった位置に断面を表示することで、観察者は「サーフェスレンダリング」によりメッシュ化されたデータにおける断面の位置を自由に回転・移動し内部構造を観察することが容易となった。断面には DICOM 画像からなる二次元画像が重ねて表示されているため、観察者は三次元により直感的に分かりやすい位置から必要な二次元断面を任意の方向から観察可能となった。
3. キーボード操作やマウス操作ではなく、モーションキャプチャーを使用した実装を行うことで観察者は仮想空間にある三次元 X 線 CT で撮像された対象

物がまるで現実空間に存在するかのように手を使って接触、掴む、かざすといった動作により、対象物を非接触でありながら実際に手で掴んで移動させるかのように移動・回転することが可能となり、手術中などの汚染を防ぐことが可能となった。そして境界面と触れた断面に DICOM データからの二次元方向の画像を重ねることで、断面を自由な位置・角度で視覚化することが可能となった。

結論として、提案手法は内部情報を含むボクセルデータである三次元 X 線 CT において有用な三次元表現として、また CT 画像内の断層像を見ることができる所望の位置を容易に示すことができる手法として有効であることが示された。



参考文献

- [1] Mahadevappa Mahesh 著, 陣崎雅弘 監訳, 百島祐貴 訳, “MDCTの基本パワーテキスト -CTの基礎からデュアルソース・320列CTまで-”, 株式会社メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2010, pp60-61
- [2] Sony, Spatial Reality Display, <https://www.sony.net/Products/Developer-Spatial-Reality-display/jp/> (14 November 2022)
- [3] M. Ariwa, T. Itamiya, S. Koizumi, and T. Yamaguchi, “Comparison of the Observation Errors of Augmented and Spatial Reality Systems,” Applied Sciences, vol. 11, no. 24, p. 12076, Dec. 2021
- [4] Ultraleap, Leap Motion Controller, <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/> (14 November 2022)
- [5] Pixmeo, DICOM Image Library, <https://www.osirix-viewer.com/resources/dicom-image-library/> (12 October 2022)
- [6] Kilgard, Mark J. “Improving shadows and reflections via the stencil buffer.” Advanced OpenGL Game Development (1999): 204-253.

## 第5章 医療分野での活用の検討

### 5.1 はじめに

AR・MR を利用した、不可視光による不可視物体の空間的な表現は、将来的な腫瘍の発見や症状の診断に役立つだけでなく、目下の医療現場において、手術前準備のための補助としても有効である。第3章で提案し実証した、X線により撮像された対象物を等倍でMR下に表現する取り組みを利用して、脳動脈瘤のARでの表現について研究を行った。

### 5.2 背景

脳動脈瘤とは、脳内部の中～小動脈に発生する薄壁の突起である。脳動脈瘤は、破裂してくも膜下出血(SAH)を引き起こす可能性があり、多くの場合、死亡率と罹患率が高くなる傾向にある。血管内修復または外科的修復は、動脈瘤性くも膜下出血(SAH)を防ぐための唯一の効果的な治療法である[1]。脳動脈瘤の手術には「クリッピング術」、「コイル塞栓術」そして「フローダイバーダー留置術」が多く行われている[2]。「クリッピング術」は頭蓋骨を切開して、脳の深部に到達し、動脈瘤を根本からクリップで挟むことで、動脈瘤への血流を遮断する方法である。「コイル塞栓術」は開頭しないカテーテル治療であり、足の付け根から管を入れ、その中にマイクロカテーテルを挿入し、動脈瘤の中まで誘導し、やわらかい金属のコイルを動脈瘤の中に入れて瘤を詰めるという治療法である。「フローダイバーダー留置術」は細かいメッシュ状のステントを母血管に留置することで、動脈瘤内の血液の流れを変え、血液がゆっくりと血栓化をして治療から6ヶ月～2年程度で完全に閉塞するようにする方法である。「コイル塞栓術」は「クリッピング術」に比べ開頭しない手術のため患者への侵襲が少ない手法であり、瘤の入り口が狭い際に特に有効である。また「フローダイバーダー留置術」と異なり、血液が「血栓化」するまで待つ必要がない。一方で、使用するマイクロカテーテルはミリ単位で動かす必要があり、脳動脈瘤を誤って破ってしまわないように慎重に操作する必要がある。

脳動脈瘤コイル塞栓術の治療で使用するカテーテルは、脳動脈の形状に合わせてカテーテルを成形する必要があり、その先端部のシェイピングが手術前に

重要なポイントである。実際にシェイピングを行う際には、

1. 針金を血管に沿って曲げる。
2. 針金にマイクロカテーテルを通して蒸気で温める。
3. ガイドワイヤーに沿ってマイクロカテーテルを血管内に挿入する。
4. ガイドワイヤーを取り除くと、マイクロカテーテルが血管にぴったりとはまり、その後、コイル塞栓術を行うという手順を行う。

現状行われている手段の一つとして、3D-MRA (Magnetic Resonance Angiography: 磁気共鳴血管撮影法) で撮像されたデータより、3D プリンタで脳血管動脈を作成し、カテーテルを作成するという手法がある[3]。3D プリンタで実寸大で作成するため、動脈瘤の立体構造が容易に把握でき、治療計画を立てる際にも有用であり、血管径、距離計測が正確に測定可能である。そのため初心者でも容易にカテーテルのシェイピングができるといったメリットがある一方、以下の課題点が考えられる。

1. 3D ソフトウェア、3D プリンタの導入・整備が必要である。
2. 使用する機材、素材、印刷のピッチサイズにもよるが、3D プリンタで脳血管動脈のモデルを印刷するためには、数時間の時間がかかるため、急を要する手術前準備のための補助として対応できない。
3. 3D プリンタに使用される素材は主に一般用の樹脂であるため、医療現場で必要とされる衛生が維持できない。(そのため、3D プリンタで印刷されたモデルをポリプロピレン製の袋に入れてその上から針金を当てるなどの処理が実際に行われている。)

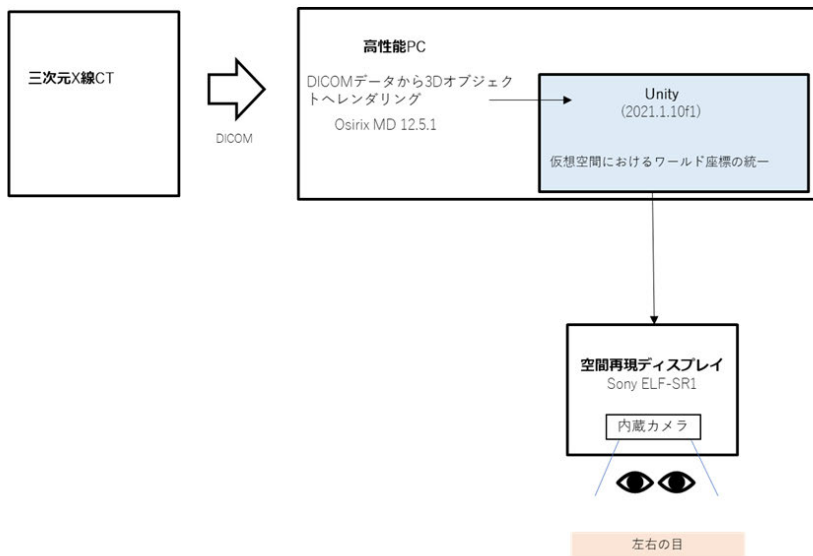
### 5.3 目的

前述の課題点を解決するために、AR を用いて脳動脈を表示し、手術前準備のための補助となる形で空間的に表現することを目指す。AR を用いることで、機材のメンテナンスが安易であり、レンダリング時間や転送時間を含めて数分で完成することが可能であり、またあくまでも現実空間に存在しない仮想空間上の対象物のため、ワイヤーが対象物に触れることがなく、衛生面での維持が容易というメリットがある。本研究では特に、AR の表現について現実の脳動脈と等倍で表現することを目的とした。

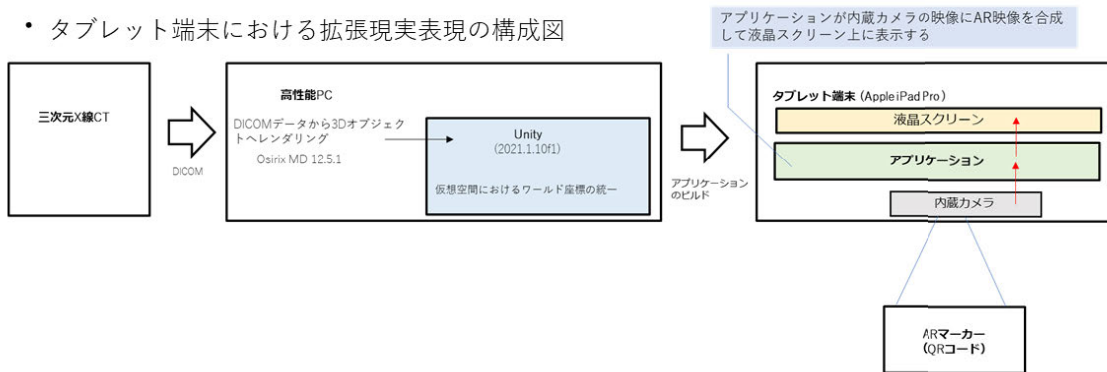
## 5.4 実験

空間再現ディスプレイ (Sony SONY ELF-SR1/BZ) ・タブレット端末 (Apple iPad Air 第四世代) ・ヘッドマウントディスプレイ (Microsoft HoloLens2) にて脳動脈の様子を AR にて表現を行った。データとして、Pixmeo 社の DICOM Image Library から取得した脳動脈の MRA のサンプルデータを用いた。図 5-1 にそれぞれの構成図を示す。第 4 章と同様に、Osirix を使用し三次元 X 線 CT にて撮像された撮像データを PC にてサーフェスレンダリングを行い、Autodesk MAYA を使用してスケール単位をセンチメートル基準から Unity の基本的な単位であるメートル基準へ変換を行った。座標軸の方向が異なるため、Z 軸が上方向を向く座標軸から Y 軸が上方向を向く座標軸へと変換する実装を行った。このような実装を行うことで、現実空間にある脳動脈と仮想上の脳動脈が等倍かつ方向が一致した状態で表現することを可能とした。そして、それらを共通の実装として Unity を使用してそれぞれのデバイス上に表現を行った。空間再現ディスプレイを使用した AR 表現では、可視光カメラが左右の視線位置を検出し、視線位置に合わせた立体表現を行い、現実空間に立体的に表現されるように実装を行った。タブレット端末における AR 表現では、Unity 上で作成されたソフトウェアがタブレット端末上単体で作動することができる (スタンドアローンにて作動可能) のため、AR を表示するための処理はタブレット端末上でのみ行うよう実装を行った。タブレットの可視光カメラが AR マーカーを認識すると、ソフトウェアが可視光カメラの映像に AR 映像を合成して液晶スクリーン上に表示するように実装を行った。AR マーカーについては、カメラの認識の良さから QR コードを採用した。また、ヘッドマウントディスプレイ (HoloLens2) における表現もタブレット端末と同様にデバイス単体で作動することが可能である (スタンドアローンにて作動可能) ため、デバイス単体で AR の表示処理を行った。ヘッドマウントディスプレイでは内蔵された深度センサと可視光カメラにより現実空間における自身の位置と周囲の環境を推定し、仮想上の対象物を現実空間に合わせて表示している。

• 空間再現ディスプレイにおける拡張現実表現の構成図



• タブレット端末における拡張現実表現の構成図



• ヘッドマウントディスプレイにおける拡張現実表現の構成図

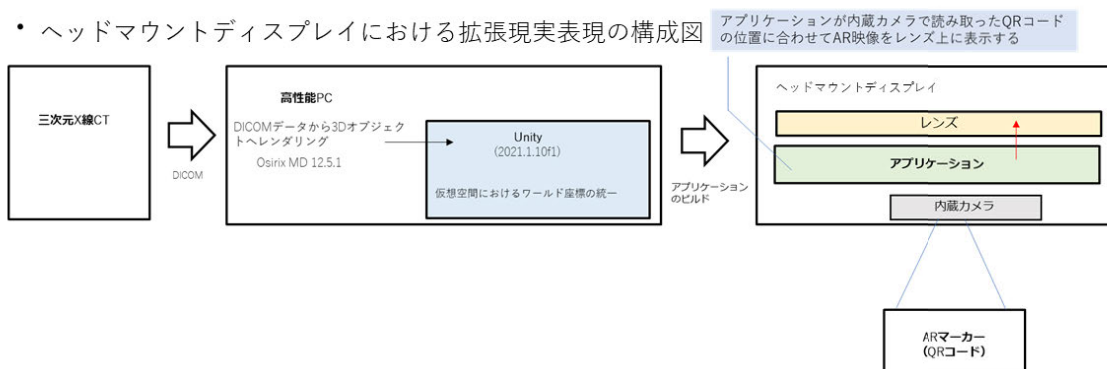


図 5-1 空間再現ディスプレイ、タブレット端末、ヘッドマウントディスプレイにおける AR 表現の構成図

## 5.5 結果

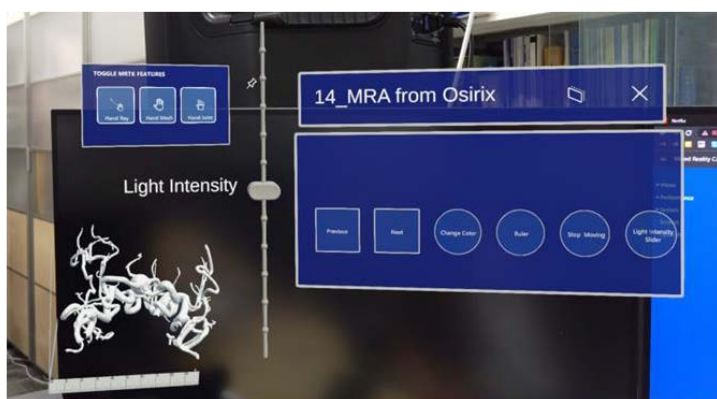
タブレット端末、空間再現ディスプレイ、ヘッドマウントディスプレイ上に表示された AR 映像を図 5-2 に示す。空間再現ディスプレイにおける表示は空間再現ディスプレイ上に表現される様子をスマートフォンで撮像した画像であり、タブレット端末における AR の表示はタブレット端末における画面のスクリーンショットであり、ヘッドマウントディスプレイ (HoloLens2) における AR の表示はバイザーと呼ばれるディスプレイ上に表示される画面のスクリーンショットである。実空間と仮想空間に配置される対象物が適切に等倍で表現されているかどうかを確認するために、X 軸、Y 軸、Z 軸方向に定規のオブジェクトを表示し、現実空間の定規と重ね合わせて確認することで表現における大きさの差を評価した。観察者が針金を当てるのに注視する必要な範囲を 5 cm と想定し、5 cm 間における定規のオブジェクトと現実空間の目盛位置を合わせた結果、定規の最小目盛のサイズである 1 mm 以内の差にて AR の表現を行うことが可能となった。なお、第 4 章と同様に実体のない仮想上の定規に現実空間の定規を合わせたため目盛の幅を最小の読み取り値とした。図 5-3 にその様子を示す。



空間再現ディスプレイにおける拡張現実(AR)の表示

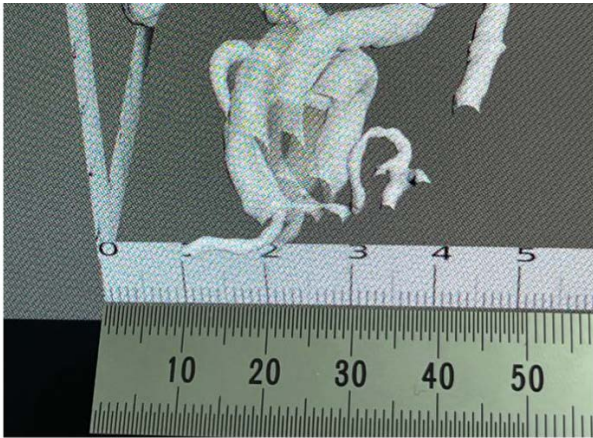


タブレット端末における拡張現実(AR)の表示

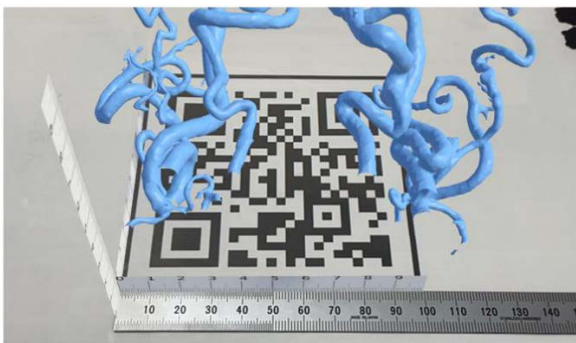


ヘッドマウントディスプレイにおける拡張現実(AR)の表示

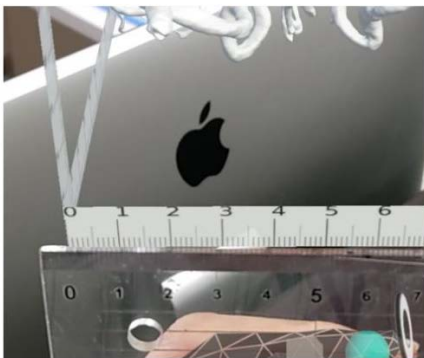
図 5-2 空間再現ディスプレイにおける AR の表示、タブレット端末における AR の表示、ヘッドマウントディスプレイにおける AR の表示



空間再現ディスプレイにおける仮想上の定規と現実空間の定規



タブレット端末における仮想上の定規と現実空間の定規



ヘッドマウントディスプレイにおける仮想上の定規と現実空間の定規

図 5-3 空間再現ディスプレイ、タブレット端末、ヘッドマウントディスプレイにおける仮想上の定規と現実空間の定規

(スマートフォンでの撮影のため、実際と異なるずれが観察されている)

## 5.6 結論

3D-MRA で撮像された脳血管動脈について AR を利用して表現することで、以下のことが示された。



1. AR を利用して、3D-MRA にて撮像された脳血管動脈をサーフェイスレンダリングし、タブレット端末・空間再現ディスプレイ・ヘッドマウントディスプレイで AR によって表現することで、観察者は実物が目の前にあるかのように自由な方向で対象物を確認することができ、針金成形の補助となる表現を実現した。

2. 脳血管動脈瘤の AR を使用した表現において、現実空間における患者の脳血管動脈と等倍(5 cm の距離における差を 1 mm 以内)にて表現を行うことが可能とした。

三種類のデバイスにおいて共通の実装を行い、AR 表現が示されたことで観察者は使用する現場に合うデバイスを選択することが可能となった。例えば、タブレット端末は持ち運びやすく、安価で入手可能という長所がある一方で、ディスプレイにカメラ映像と AR 映像が合成されて表示されてしまうため、人間の目の位置と離れて AR 映像が表現されてしまい、奥行き方向の感覚がつかみにくいというデメリットがある。空間再現ディスプレイではデバイスを人間が装着することなく肉眼で AR を確認することができ、また安定した立体表現が可能な一方で、持ち運びが難しくまた視野角も限られているという短所がある。ヘッドマウントディスプレイ (HoloLens2) では自由な視点から観察が可能であり持ち運びが可能という長所がある一方で、デバイスを頭部に装着しなくてはならず、光学シースルー方式のため、レンズ越しに表示される AR の明度の限界があるという問題がある。このような状況下で、脳血管動脈瘤の AR 表現は、医療現場における診断や手術前準備のための補助の向上に大きな可能性をもたらすと考えられる。各デバイスの利点と欠点を理解した上で、状況に応じて最適なデバイスを選択することが必要となるだろう。

参考文献

- [1] Authors: Robert J Singer, MD Christopher S Ogilvy, MD Guy Rordorf, MD, Section Editor: José Biller, MD, FACP, FAAN, FAHA Deputy Editor: Richard P Goddeau, Jr, DO, FAHA, “Treatment of cerebral aneurysms”, UpToDate, (2022), <https://www.uptodate.com/contents/treatment-of-cerebral-aneurysms>, (2022年12月6日アクセス)
- [2] 吉村 紳一, “安心の脳動脈瘤治療 —手術をしないカテーテル治療の最前線— (希望の最新医療シリーズ) Kindle版”, 桜の花出版取材班, (2016), pp1-26
- [3] 坂井 信幸, 江面正幸, 松丸祐司, 宮地 茂, 吉村 紳一, “脳血管内治療の進歩 ブラッシュアップセミナー 2017 アクセスのすべて -脳血管内治療成功の鍵- ”, 診断と治療社, 2018, p 144-148.

## 第6章 結論

本論文では、AR・MRを用いて三次元 X 線 CT おける不可視情報を空間的に表現する方法について提案し実証を行った。

第 3 章では、AR を利用した表現方法として、スマートフォンを利用した表現方法について提案し、X 線 CT で撮像された対象物のサーフェイスレンダリングデータを画面上にカメラ情報に重ね合わせて表現するだけでなく、断面情報についても表現することを実証した。また、第 4 章では MR を利用した表現方法では、空間再現ディスプレイとモーションキャプチャーを使用した表現方法について提案を行い、三次元ボクセルデータである DICOM から二次元のピクセルデータである断面画像を出力し、サーフェイスレンダリングされたモデルの断面に重ね合わせて表示するという表現方法を実証した。断面表示にあたっては、モーションキャプチャーによりまるで観察者が仮想上の対象物を手に持って移動・回転するかのよう、非接触で確認したい対象物の断面の位置・方向を自由に指定できるという表現を行い、三次元 X 線 CT による撮像データにおいて、MR における有用性を示すことが可能となった。また表現の精密性も実物と等倍で表現することができ、ディスプレイに表示される仮想上の対象物と現実空間における対象物の差を 1 mm 以内に収めることが可能となった。

第 5 章では、医療現場における手術前準備のための補助への活用を目的として、脳血管動脈瘤をタブレット端末、空間再現ディスプレイ、ヘッドマウントディスプレイの 3 つのデバイスを使用し、それぞれについて表現システムの実証を行った。結果、MRA で撮像された脳血管動脈の様子をそれぞれのデバイスにて等倍(表現における差を 1 mm 以内)にて表現することが可能となった。

これらの表現方法の研究は、AR・VR・MR が不可視の対象物に対する表現を行う際に必要な、内部構造の空間表現について基礎となる研究を行ったものである。現在マルチエナジー X 線 CT やフォトンカウンティング X 線 CT が製品化されるなど、不可視光による不可視物体へ獲得できる情報量は次々と増加している。マルチエナジー X 線 CT やフォトンカウンティング X 線 CT を使用すれば、エネルギーバンドごとの撮像データや物質弁別効果を利用したイメージングが可能となり、従来の密度情報だけでなく、造影剤の分布情報や血液の流れといった他のパラメータによる情報が獲得される。今回の研究はそういった情報を整理しながら、空間的な表現を支える基盤となると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、数多くの先生方に研究室のご指導を賜りました。中でも、指導教員の静岡大学大学院光医工学研究科光医工学共同専攻の青木徹教授に心から感謝申し上げます。御教授いただいた知識と経験は、私の研究に大きな影響を与えました。また、国内および海外での研究会への参加の機会を与えていただき、貴重な学びの場を提供していただきましたことにも深く感謝いたします。

また、副指導教員の浜松医科大学大学院光医工学研究科光医工学共同専攻の中村和正教授にも深く感謝いたします。中村先生からいただいた貴重なアドバイスと助言は、私の研究をより深める助けとなりました。

さらに、研究にあたっての構想や医療方面からの助言、指導をしてくださった浜松医科大学脳外科の黒住和彦教授と根木 宏明病院講師および望月悠一助教にも心から感謝申し上げます。共同研究を行うにあたって、臨床現場からの視点からのご意見を頂けたことは、研究の現実的な側面について私に洞察を与えてくださいました。また、三人からいただいた専門知識とご指導は、私の研究において重要な要素となりました。

また、研究室内での議論やご指導をいただきました静岡大学電子工学研究所の都木克之特任准教授、田端健人特任助教、および青木研究室の西澤潤一博士には、実験や計測、議論において数多くの協力を頂きましたことに感謝いたします。

さらに、株式会社 ANSeeN の社員の皆様にも心から感謝申し上げます。撮像装置の使い方などの技術面でのご教授をいただきましたことに感謝いたします。

最後に、研究にご協力頂いた青木研究室の皆様には有意義な研究を行えるよう協力して頂きましたことに心から感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり、多大なるご支援とご協力をいただいた皆様にも心からの感謝の意を表します。