特集 拡張現実感（AR）

6 応用 3：医療分野におけるARの活用 臨床情報と臨床現場の接点

黒田知宏[*1] 黒田嘉宏[*2]
[*1] 京都大学 [*2] 大阪大学

はじめに

AR 技術の黎明期から，医療分野はその最も有力な適用先として期待されてきた．一方で医療分野では，当然ながら，小さな技術的エラーが直接生命の危険に繋がることから，研究例の多さに比して AR 技術が実用に供された例は必ずしも多くない．しかし，近年の医療安全に対する一般社会の要求の先鋭化，動物愛護運動の激化，医療者の情報技術受容の拡大が相まって，実用化への気運が高まりつつある．

現代の医療では，CT・MRI・PET といった多くの医用画像が用いられており，これらの画像から仮想生体像が構築され，各種 VR・AR アプリケーションに適用されている．特に近年，X 線検出器を 256 列並べたマルチスライス CT 装置や，磁場 3T（テスラ）の超高磁場 MRI 装置などが市場に投入され，1mm 以下の厚さのより精緻な 3 次元生体断層画像群が生成できるようになった．一方，一度に大量の画像が得られるようになることで，これを読影する放射線科医の負担は大幅に増大している．そこで，Radiologist Killer と呼ばれるこれらの機器からの画像群を大雑把に把握するための方法として，VR 表示[☆1]を行う PACS ビューワ（読影用端末）の利用が広がりつつあり，これが 3 次元仮想生体像，ひいては，VR・AR に対する診療現場の受容を拡大しつつある．

本稿では，医療分野での AR 技術適用例として，上記のような 3 次元仮想生体像を用いた手術ナビゲーションへの適用，臨床医学教育への適用について，筆者らの研究例を交えながら概説する．また，臨床現場でのコミュニケーション支援への適用可能性についても述べる．

手術ナビゲーションへの適用

--- 外科手術と AR ナビゲーション ---

本章では，AR の医療応用として最も古くから検討されている AR 手術ナビゲーション（AR surgical navigation）について述べる．AR 手術ナビゲーション

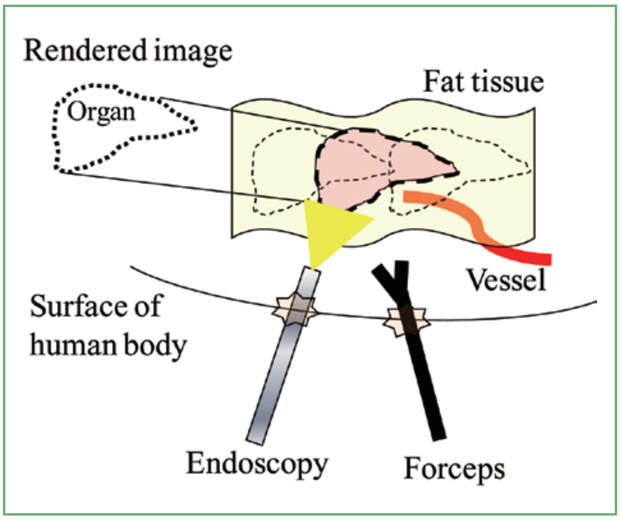


図 -1 AR 手術ナビゲーションの目的

は，図 -1 に示すように，計算機で生成された仮想臓器像を実際の術野[☆2]に重畳することで，脂肪などで隠れた部位の位置や形状を術者に提示し，安全な手術遂行を助けるものである．手術ナビゲーションの多くは，手術中実施されるため，術中ナビゲーション（Intra-operative navigation）とも呼ばれる．

外科手術は，図 -2 のように，大きく開腹手術と内視鏡手術に分けられる．開腹手術は，腹部の体表を大きく切開し，術者が直接術野を観察しながら処置を行う古来行われてきた手術である．一方，内視鏡手術は，体表に

☆1 医療分野で使われる「VR」は多くの場合この「VR 表示」を指している．VR 表示はボリュームレンダリング表示のことであると多くの PACS ビューワの解説に記載されているが，実際にはボリュームデータのポリゴンレンダリング画像であることが多く，必ずしも本来の意味でのボリュームレンダリング画像ではない．医療者にとってはいずれも内部が見える 3 次元画像であることには差がないことから，すべて同様に VR 表示と表現されている．また，医療関係者はこの表現方法こそが仮想現実感（バーチャルリアリティ：VR）であると理解している場合も多い．以上のように定義が非常に難しいことから，本稿ではあえて「VR 表示」とだけ記載する．

☆2 手術を行っている領域．切り開かれて直視下で操作されている，あるいは，内視鏡の観察下で鉗子（組織をつかむ道具）などを用いて操作されている人体内部の領域を指すことが多い．

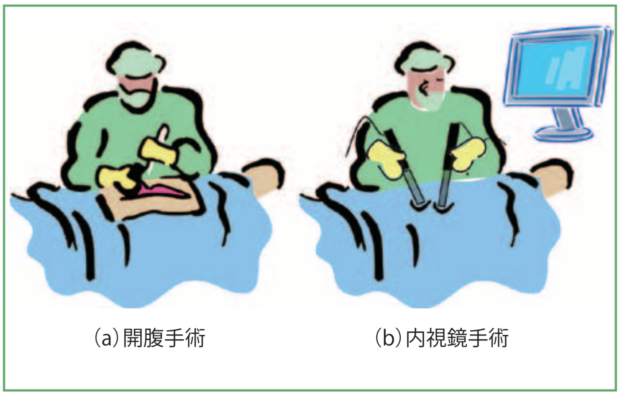


図-2　代表的な手術様式

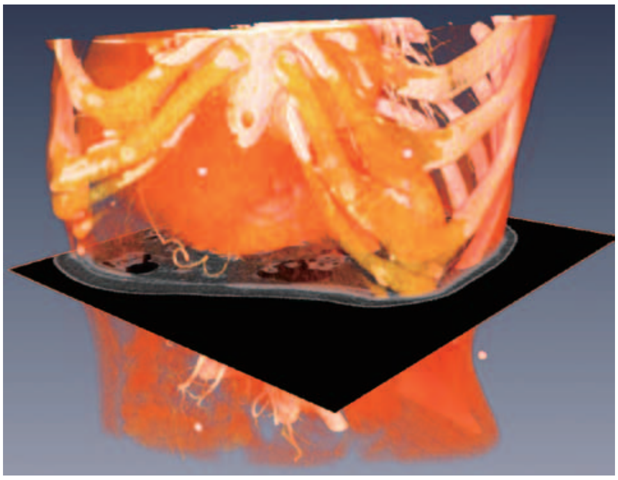


図-3　ボリュームデータ（X線CT）の可視化

小さな孔（ポート）を開け，術者の目の代わりとなる内視鏡カメラと術者の手の代わりとなる手術鉗子を体内に挿入し，モニタに映し出された体内映像を観察しながら処置を行う20世紀以降の手術である．

ARナビゲーションは，内視鏡手術の広まりとともに広まった．これは，内視鏡手術の方が開腹手術に比べ，画像提示や実空間の視点計測において技術的に格段に容易であったためである．内視鏡手術では，内視鏡用モニタを併用すれば術野に仮想生体像を重畳することができ，内視鏡先端の位置を推定すれば実空間の視点位置を得ることができる．一方，開腹手術では，術野に仮想像を重畳するためにヘッドマウンテッドディスプレイ（HMD）やプロジェクタなどを用いる必要があり，HMD型では，外科医に装着されたカメラの位置・姿勢を，ビデオプロジェクション型では，プロジェクタの位置・姿勢や投影面となる体表の形状を計測する必要がある．なお，これらの問題を回避するために，Isekiら[1]が行ったAR手術ナビゲーションの先駆的研究では，ハーフミラーを用いて脳神経外科手術のARナビゲーションを行っている．これらの理由から，その黎明期は開腹手術を対象に細々と研究開発が進められてきたARナビゲーション研究は，内視鏡手術が世界的に普及した20世紀末頃から爆発的に増加した．近年では，正確な位置あわせを試みてはいないものの，VR表示可能なフリーウェアPACSビューワを用いて，ARナビゲーション下で内視鏡手術を実施した，医師だけからなる研究グループによる実践例も報告されている[2]．

以降では，内視鏡手術におけるAR手術ナビゲーションに限って話を進める．

--- ボリュームデータの取得と可視化 ---

仮想像の生成に用いるボリュームデータは，一般的にX線CTやMRIから得られる．図-3は，X線CTで得られたボリュームデータを可視化した様子を示す．ボリュームデータは，手術室とは別室にある断層撮影装置で取得されることが一般的である．一部，Open MRIやC-Armなどの計測装置を手術室内に設置し，手術直前や術中に体内の情報を取得する方法も試みられているが，費用などの問題で適用できる施設は限られる．一方で，超音波画像は術中に取得可能なモダリティとしてさまざまな応用が検討されている．取得画像は2次元であるが，超音波プローブの位置姿勢計測と併用することで3次元像の生成に用いることができる．Bajuraら[3]は，妊婦の腹部に胎児の超音波画像を重畳した．Satoら[4]は，手術中に超音波画像を撮影し，乳がんの腫瘍領域を抽出して体表に重畳するシステムを構築した．Weinら[5]は，術前のX線CT画像から生成した超音波疑似画像と術中に取得した超音波画像とを照合し，完全自動の3Dレジストレーションを行っている．

--- 内視鏡カメラの3次元位置計測 ---

内視鏡手術においてARナビゲーションを行うためには，内視鏡先端の位置・姿勢を知る必要がある．3次元位置計測には，光学式・磁気式・ステレオ画像式等の位置計測法が用いられる．図-4に，ステレオ画像式で位置計測を行うために，マーカを取り付けた内視鏡スコープの例を示す．内視鏡の先端は体内に挿入されるため，マーカの取り付け位置は体外の内視鏡把持部付近となる．内視鏡が柔軟性を持つ軟性鏡の場合，先端位置の推定にさらに高度な方法が求められる．

磁気式の場合，体外に設置された磁場発生器と直径数ミリメートルのレシーバを用いることで，光学式やステレオ画像式では困難な柔軟性のある器具先端の位置・姿勢計測が可能である．しかし，磁気式は金属等による磁界の歪みによって計測誤差を生じる．Nakamotoら[6]は，磁気式と光学式のハイブリッドにより柔軟な超音波プロ

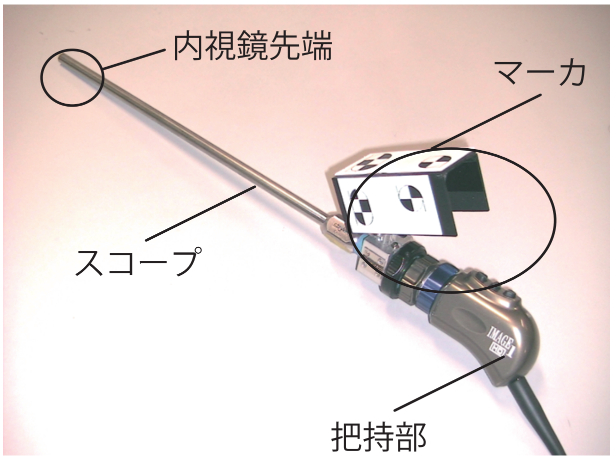


図 -4　内視鏡スコープと位置計測用マーカ

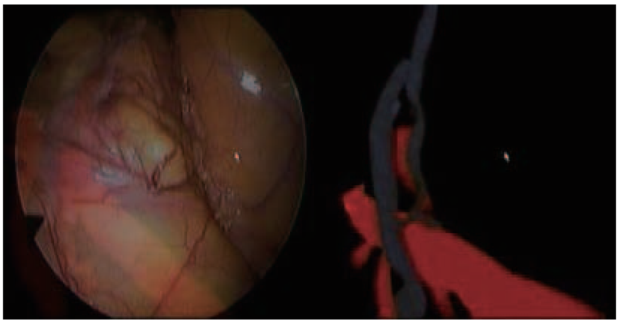


図 -5　血管情報の可視化と内視鏡画像への重畳

ーブの位置・姿勢計測を行い，肝臓の 3 次元超音波画像取得を行っている．

--- 人体の 3D レジストレーション ---

AR 手術ナビゲーションは，正確に位置あわせが行われた現実の人体と仮想人体を 1 つの内視鏡視野内で重畳して観察できるようにすることで実現される．したがって，AR 手術ナビゲーションでは，現実の人体と仮想人体の 3D レジストレーションを行う必要がある．これまでに多数の手法が提案されているが，未だ決定的な手法はなく，現在も研究開発が盛んに行われている．

ここで，Open MRI 等の計側装置を具備しない現在の一般的な手術室での，3D レジストレーションの制約を考える．まず，人体は非剛体である．したがって，体表で位置あわせを行った結果をもって体内の状況を推定することはできない．そこで，非剛体モデルを用いたレジストレーション手法が多く提案されているが，術中にレジストレーションや計測に使える時間は限られるため，一般に推定パラメータが膨大になる非剛体モデルを用いることは好ましくない．一方，剛体モデルを用いてレジストレーションを行う場合は，非剛体性を無視できるように目標の近くのマーカを位置決め目標として用いる必要がある．しかし，体内へのマーカ設置は困難であるので，位置決め目標には解剖学的ランドマークを用いるほかないが，解剖学的ランドマークとなるような血管分岐部などの解剖学的特徴点が，内視鏡の限られた視野内に数多く現れる可能性は低い．

上述のような制約下における，容易に位置決め可能かつ位置決め誤差に対するロバスト性が高い 3D レジストレーション手法として，筆者ら[7]は，直線形状を有する血管を解剖学ランドマークとして用いる方法を提案している．基準に点ではなく直線を用いているので，たとえば血管等の上の任意の 2 点以上を指定することで容易に位置決め可能であり，直線方向の自由度について位置決め誤差がなくなる．図 -5 に血管領域のボリュームデータの可視化と内視鏡画像へ重畳の例を示す．

--- 術中変化 ---

手術においては，仮想像を重畳する対象となる実世界の環境が動的に変化する．したがって，正しく仮想像を重畳し続けるためには，実世界の変化に応じて仮想世界を変化させる必要がある．そのためには，実空間の変化を計測し，これに併せて仮想空間を動的に変化させる必要がある．

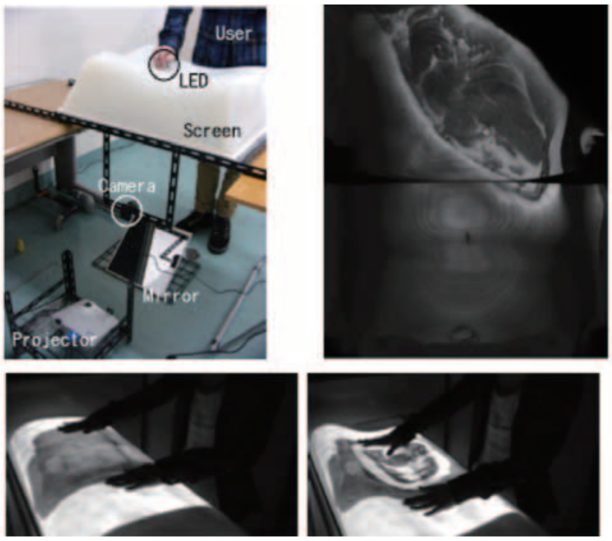
先述のとおり，術中の実空間の変化の計測には，Open MRI 等の計側装置を用いる方法のほか，術中に簡単に取得可能な超音波画像装置を用いる方法が多く提案されている．

--- 手術支援システムへの統合 ---

上記のような発展を遂げてきた AR 手術ナビゲーションを，術中支援情報を遠隔で制御するオーサリングシステムや統合手術支援システムに取り込む動きが，近年盛んになりつつある．また，AR ナビゲーション下でロボット手術を試みた研究例なども報告されている．このように，AR 手術ナビゲーションは徐々に研究の段階から実用の段階へと移りつつある．

教育への適用

臨床教育の現場では，長らく OJT（On the Job Training）を主体とした教育・訓練が中心的役割を担ってきた．しかし，医療費圧縮に伴う医療スタッフの枯渇，新臨床医療制度の導入，患者の権利意識の高まりなど，医療を取り巻く環境の変化から，これまでと同様の OJT を継続することは困難な状況になりつつある．加えて，動物愛護運動の高まりから，臨床現場での OJT の



左上：ディスプレイの構成　右上：断層面の表示結果
下：押し込み操作による断層面閲覧

図-6　人体型ARディスプレイ

図-7　プロジェクタ型ARによる遠隔指示

みならず，動物を用いた基礎技能教育すら困難になりつつある．これを補うものとして各種VRシミュレータや人形型シミュレータを用いたシミュレーション教育が注目を集め，多くのシミュレーション教育センタやスキルス・ラボが内外で設立・運営されるとともに，シミュレーションの高度化を目指した各種プロジェクトがEU Commissionの下で現在も行われている．

シミュレーション教育が広がる中で，AR技術は実体を伴う人体モデルと，基礎医学で学んだ解剖知識を結びつけるものとして注目を集めている．たとえば，Sielhorstら[8]はマネキン上にHMDを用いて子宮の様子を重畳した出産訓練シミュレータを構築し，Kondoら[9]はマネキン上にプロジェクタを用いて仮想臓器を重畳して示し，解剖教育に適用している．福塚ら[10]は柔らかい素材を用いた人体型のバックプロジェクションスクリーンを開発し，自由な断層面の閲覧や，超音波撮影の訓練などへの適用を目指している．図-6に開発したARディスプレイと表示画像を示す．

いずれの研究においても，マネキンなどの実体を用いて触感や操作インタフェースを与え，仮想像を用いて解剖情報を示す構成をしている．このアプローチは，すでに商品化されている，いわゆるVR手術訓練シミュレータの多くでも共有されており，実体と似た形状を持ったインタフェースを通じてモニタ上に映る仮想人体空間を操作することが通例である．できるだけ正確な力覚フィードバックを再現・提示する医用VRシミュレータ構築も進められているが，触感や力覚を実体に預けるアプローチは，仮想像と実体の表現力の長短を考慮すれば，適切な組合せであろう．

コミュニケーションへの適用

臨床現場において，医療画像は患者への説明資料として広く用いられてきている．3次元医用画像やVRシミュレーション画像は，患者への病態説明や手術計画説明などにおいて高い説明力を発揮するものとして期待されている．IBM Researchでは，ASME（Anatomic and Symbolic Mapper Engine）と呼ばれる電子カルテ情報を人体モデル（アバタ）上に結びつけて提示する環境を提案しており，その一実現例として，ディスプレイを通してマネキンを見ることでAR的にこれらの医療情報を提示するデモをCeBIT展示会で行っている．今後の医療情報の提示の方向性を示すものとして注目に値する．

一方，コミュニケーションは診察室だけで行われるものではなく，医師と医師，あるいは，医師とコメディカルと呼ばれる各種診療従事者の間でも行われている．これら専門家の間では，専門用語を用いて必要な情報を手短に伝えることができ，たとえ遠隔地にいる相手にも文字だけで必要な情報を伝えることができる．コンゴ民主共和国滞在中の英国の医師が同僚の医師からの携帯メールでの指示だけを頼りに，初めて行った腕の切断手術に成功したケースは大変有名であるが，指示を受ける側が医療者でない場合はそう簡単に事は運ばない．

末永ら[11]は画像取得に免許が不要な超音波画像診断装置を用いて遠隔画像診断を行う際に，遠隔地の非医療者に対して超音波プローブの当て方を指示するのにプロジェクタ型のARを用い，所望の画像を得ることに成功している（図-7）．このようにARは実空間上に指さして，あるいは，書き込んで情報提供を行うことに適していることから，非医療者がかかわるような遠隔医療などにおけるコミュニケーション手段として適用できる可能性が高い．

おわりに

本稿では，手術支援，教育支援，コミュニケーション支援の 3 つの観点で，臨床現場への AR 技術の適用の可能性について述べた．長らく研究レベルにとどまっていた AR 技術は，臨床現場を取り巻く社会環境の変化のなかで，実用的に利用されはじめている．

遠隔医療を実現するためには交換されるすべての情報を電子化する必要があり，電子カルテに代表される情報化された臨床空間は臨床現場で発生した多くの情報を電子化し，蓄え，伝送する高度なユビキタス情報空間である．情報化医療とも呼ぶべき時代を迎え，AR 技術はこれらの電子化された臨床情報を実世界である臨床現場に再度結びつける手段として，重要な役割を果たしていくものと期待される．

参考文献

1）Iseki, H., Masutani, Y., Iwahara, M., Nishi, Y., Suzuki, M., Dohi, T., Kawamura, H. and Takakura, K. : Volumegraphy（three-dimensional image-guided navigation）Clinical Application of Augmented Reality in Neurosurgery, VSMM, pp.97-100（1996）.
2）Sugimoto, M., Yasuda, H., Koda, K., Suzuki, M., Yamazaki, M., Tezuka, T., Kosugi, C., Higuchi, R., Takenoue, T., Yamamoto, S., Watayo, Y., Yagawa, Y. and Tsuchiya, T. : Virtual CO2 MDCT Pancreatography : A New Feasible Technique for Minimally Invasive Pancreatectomy in Intraductal Papillary Mucinous Neoplasms, Hepato-gastroenterology 55 (81), pp.270-274（2008）.
3）Bajura, M., Fuchs, H. and Ohbuchi, R. : Merging Virtual Reality with the Real World : Seeing Ultrasound Imagery with in the Patient, SIGGRAPH 26 (2), pp.203-210（1992）.
4）Sato, Y., Nakamoto, M., Tamaki, Y., Sasama, T., Sakita, I., Nakajima, Y., Monden, M. and Tamura, S. : Image Guidance of Breast Cancer Surgery Using 3D Ultrasound Images and Augmented Reality Visualization, IEEE trans. on Medical Imaging 17 (5), pp.681-693（1998）.
5）Wein, W., Khamene, A., Clevert, D., Kutter, O. and Navab, N. : Simulation and Fully Automatic Multimodal Registration of Medical Ultrasound, MICCAI2007(LNCS 4791), pp.136-143（2007）.
6）Nakamoto, M., Nakada, K., Sato, Y., Konishi, K., Hashizume, M. and Tamura, S. : Intraoperative Magnetic Tracker Calibration Using a Magneto-optic Hybrid Tracker for 3-D Ultrasound-based Navigation in laparoscopic Surgery, IEEE Trans. on Medical Imaging 27 (2), pp.255-270（2008）.
7）黒田嘉宏，金守恒志，滝内秀和，田ノ岡征雄，井村誠孝，黒田知宏，大城　理：AR 手術のための直線対応体内レジストレーション，日本バーチャルリアリティ学会論文誌 14 (4), pp.435-444（2009）.
8）Sielhorst, T., Obst, T., Burgkart, R., Riener, R. and Navab, N. : An Augmented Reality Delivery Simulator for Medical Training, Proc. Augmented Environments for Medical Imaging Including Augmented Reality in Computer-Aided Surgery, pp.11-20（2004）.
9）Kondo, D., Goto, T., Kono, M., Kijima, R. and Takahashi, Y. : A Virtual Anatomical Torso for Medical Education Using Free Form Image Projection, VSMM, pp.678-685（2004）.
10）福塚大介，黒田知宏，鍵山善之，井村誠孝，黒田嘉宏，大城　理：人体型ディスプレイ環境における断層面の決定，信学技報 109 (270), pp.29-32（2009）.
11）末永貴俊，飯野恵秋，黒田知宏，大城　理，千原國宏：遠隔超音波画像診断におけるプローブ操作教示システム，電子情報通信学会論文誌 J83-D-II (1), pp.324-334（2000）.

（平成 22 年 2 月 7 日受付）

本研究の一部は大阪大学グローバル COE プログラム「予測医学基盤」，および，科学研究費補助金（課題番号 21650224）の支援によるものである．

黒田知宏
tomo@kuhp.kyoto-u.ac.jp

1998 年奈良先端大情報修了．博士（工学）．現在京都大学医学部附属病院医療情報部副部長として病院情報システムの開発・運営に従事しつつ，医学研究科・情報学研究科准教授として医療・福祉情報学の教育・研究に従事．

黒田嘉宏
ykuroda@bpe.es.osaka-u.ac.jp

2000 年京都大学総合人間学部卒業．2005 年同大学院情報学研究科博士後期課程修了．同年京都大学大学院医学研究科特任助手．2006 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教．現在に至る．医用 VR，触覚情報処理に関する研究に従事．博士（情報学）．