



投影型拡張現実を用いた腹腔鏡手術支援システムの構築

A Laparoscopic Surgery Support System Using Spatial Augmented Reality

謝淳¹⁾, 宍戸英彦¹⁾, 北口大地²⁾, 小田竜也³⁾, 北原格¹⁾

Chun XIE, Hidehiko SHISHIDO, Daichi KITAGUCHI, Tatsuya ODA, and Itaru KITAHARA

1) 筑波大学 計算科学研究センター (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

2) 国立がん研究センター (〒277-8577 千葉県柏市柏の葉 6-5-1)

3) 筑波大学 医学医療系 (〒305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

概要：腹腔鏡下手術が普及しつつあるが、既存のモニタを用いた情報提示方式では、術野や手術器具などが直接に見えず、その位置情報の把握しにくさによって事故の発生や作業効率低下などの問題が生じている。本研究は、この問題の解決を目指し、腹腔鏡映像と投影型拡張現実技術を利用し、患者体内の視覚情報を皮膚越しに透視するような直感的な見え方を実現するシステムの構築を試みる。

キーワード：拡張・複合現実、提示、作業支援・評価、医療

1. はじめに

腹腔鏡手術は、従来の開腹手術と比べて皮膚切開創が少なく、術後の疼痛が軽く、回復が早いといったメリットがあり、現代では低侵襲手術の一つとして普及しつつある。

一方、開腹手術のように直接に術野を目視できないため、モニタを用いて患者体内のカメラで撮影した映像を経由して術野の様子を確認する必要がある。しかし、カメラ視野が狭く、操作が直感的ではないなどの原因で、腹腔鏡手術は開腹手術より難易度が高い。よって、腹腔鏡手術は手術時間が長く、熟練まで時間が要するといった問題点が存在し、医療効率の低下とコストの上昇にも繋がっている。このような背景から、医療現場において学習と作業効率の向上を目的とする腹腔鏡手術支援技術の発展が重要視されている。

術者の作業を円滑にするために主に以下二つの課題がある：①患者体内の組織の様子、手術器具の位置等の術野情報を拡張する。②その情報を直観的に提示する。近年、術野のデータ収集と処理技術は大きく発展しており、手術中に患者体内のより豊富な情報が取得可能になった。一方、提示方式に関する大きな進歩は見られておらず、既存の提示方式では、映像を観察する視点と手術の様子を撮影するカメラの位置が離れていることや、カメラ視野が狭いことが原因となり、作業効率の改善が依然課題として残る。この課題を解決することは腹腔鏡手術支援にとって重要である。

腹腔鏡手術支援における投影型拡張現実 (SAR) は、患者体内の様子をプロジェクタで患者の身体表面に重ねて投影し、皮膚が透明になったような見え方 (シースルー) を実現する技術のことを指す。これまでに、本方法に関連する研究がいくつか存在し[1][3][4]、操作性の改善において一定の効果が認められている。しかし、技術的制約によって提示できる内容は非常に限られており、腹腔鏡手術支援に対する効果と将来性は十分検証されていない。近年、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) による提示方式も提案されているが[6][7]、SAR 方式と比べ、重いデバイスの装着が必要で術者に負担がかかる点は医療措置としては致命的であり、手術現場への導入を妨げる。よって、先端 SAR 技術と腹腔鏡映像処理技術を駆使した新たな腹腔鏡手術支援システムの需要が見込まれる。

本研究は腹腔鏡映像の情報処理結果を、SAR 提示方式によって、患者腹部のシースルーを実現するためのシステムを構築することで、腹腔鏡手術を支援することを目的とする。

2. 関連研究

従来の研究では、体表面に対する SAR 提示システムとその応用例が多数存在している。近藤ら[1]は人体模型に、内臓の CG を重畳表示することで、内臓の位置関係などの情報を直観的に提示するアプリケーションを提案した。これは、R.Raskar ら[2]が提案した 2-pass レンダリングを用いることで、ユーザ視点から見て幾何学的に正確な投

影結果が得られている。杉本ら[3]と志賀ら[4]は、ナビゲーション画像を現実空間の術野や体表面へ投影して実際の手術を行い、その経験と考察を報告した。牛木ら[5]は、プロジェクタを用いた患者腹部へ画像の重畳表示によって、腹腔鏡の撮影範囲を術者に提示するシステムを提案した。このシステムは、立体プロジェクタとステレオメガネを用いることで立体表示を実現したが、提示されるのは腹腔鏡の二次元映像で表す撮影範囲のみであるため、鉗子などの器具の位置や、術野の深度などが把握しにくく、腹腔鏡手術の支援効果が限られている。

3. シースルー投影

本章では、図1のようなシーンに基づき、シースルー投影の実現のための 2-pass レンダリングの仕組みについて述べる。ここでは、術者とプロジェクタの位置と姿勢、及び投影面である皮膚と体内の観察対象の形状情報が全て既知とする。

まずは、現実世界と同様な仮想空間において、術者と同じ位置・姿勢を持つ仮想カメラを用い、皮膚を越して隠れた物体を撮影する(図2.a)。そして、その撮影結果を、仮想的に皮膚に向けて逆投影する(図2.b)。この投影結果は術者視点から見れば、隠れた物体を直接に観察する際の見え方と同様である。しかし、現実世界では図2.bのようなプロジェクタが存在せず、実際のプロジェクタの位置・姿勢は術者と異なるため、正しい投影結果が得られるように投影画像を補正する必要がある。図2.cに示すように、現実のプロジェクタと同じ位置・姿勢を持つ仮想カメラを用いて、図2.bで生成された投影結果を再度撮影し、その結果を現実世界のプロジェクタの出力画像とする。最後に、現実世界のプロジェクタから図3.cの撮影結果を皮膚に投影する(図3.d)。これによって、術者視点から見れば、皮膚を越して体内の視覚情報の見えるシースルー効果が得られる。

上記の一連の処理を行うためには、術者とプロジェクタの位置と姿勢、及び皮膚と体内の観察対象の形状情報が不可欠である。これらの情報を如何に取得するかは、本研究

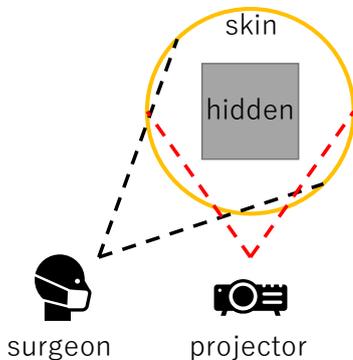


図1: シースルー投影のシーン。黄色の円は患者の皮膚を表しており、プロジェクションの投影面となる。灰色の矩形は皮膚によって隠され、術者から直接に観察できない患者の体内の視覚情報を表している。

のシステム開発において重要な課題である。

4. システム構築

4.1 モーショントラッキング

本研究は反射マーカに基づいたモーショントラッキングシステムを使用する。マーカ付きヘッドバンドを術者に装着することで術者の頭部の動き、即ち術者視点をリアルタイムで追跡することができる。

また、術者頭部の動きだけでなく、腹腔鏡下手術用の鉗子等の器具にマーカをつければ追跡も可能である。器具先端の挿入部にマーカをつけるのは不可能であるが、レジストレーションの際にハンドル部と先端にマーカを付け、手術時に先端のマーカを外しても、残りのマーカの剛体運動に基づいて器具先端の動きを推定できる。若しくは、ハンドル部から先端までの距離が既知であれば、事前に先端にマーカを付けずに同様な推定が可能である。

4.2 プロジェクタ・キャリブレーション

プロジェクタ・キャリブレーションとは、プロジェクタ

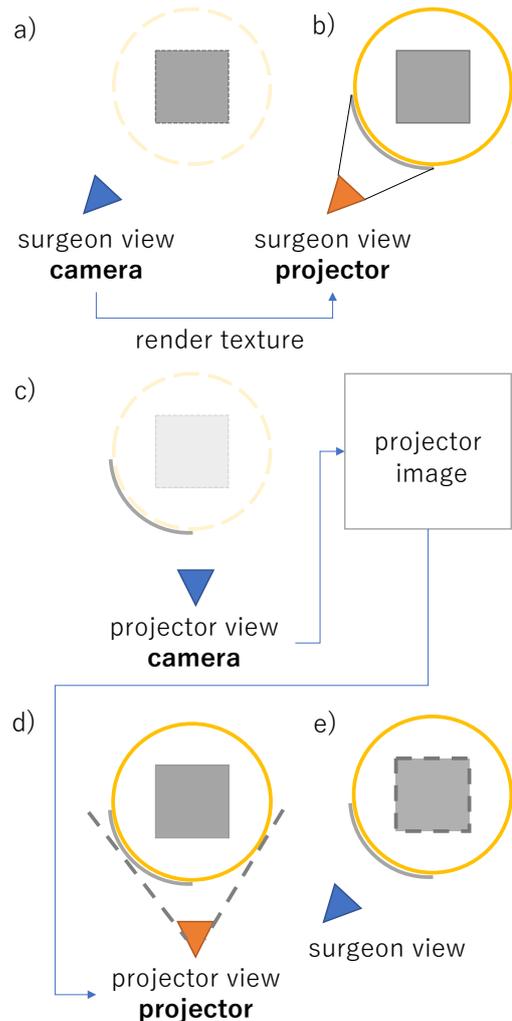


図2: 投影画像を生成するために仮想空間 (a, b, c) と現実空間 (d, e) で行われる処理の流れ。

と投影面の位置関係及び投影面の形状を計測するプロセスである。本システムでは、プロジェクタ・カメラ・システム (PROCAMS) [8] を使用してキャリブレーションを行う。PROCAMS は、内部パラメータと相対的な位置姿勢が既知なプロジェクタとカメラで構成されたステレオシステムである。キャリブレーションの際は、まずはコード化パターン[9]を対象物体に投影し、その結果を撮影する。撮影結果画像を解析することで、カメラ画素とプロジェクタ画素の対応関係を求める。そして、この対応関係を用いて三角測量法で投影面の三次元形状を推定する。さらに、投影面上の三次元座標とプロジェクタ画面上の二次元座標の対応関係からプロジェクタの射影行列を計算し、その結果を分解することで並進ベクトル \mathbf{t} と回転行列 \mathbf{R} 、即ちプロジェクタと投影面の相対的な位置、姿勢を求める。但し、このキャリブレーション結果の座標系は、PROCAMS を原点としおり、モーショントラッキングシステムと一致しないため、最後に手でモーショントラッキングシステムの座標系に合わせる必要がある。

5. システムの使用例

本章では、提案システムの使用例を CG シミュレーションで再現し、その効果について述べる。

5.1 術前診断データの提示

術前診断データ (CT, MRI など) は、手術前に血管や腫瘍の位置を把握するのに重要である。しかし手術中に血管や腫瘍は脂肪に埋もれていることが多いため、それらの

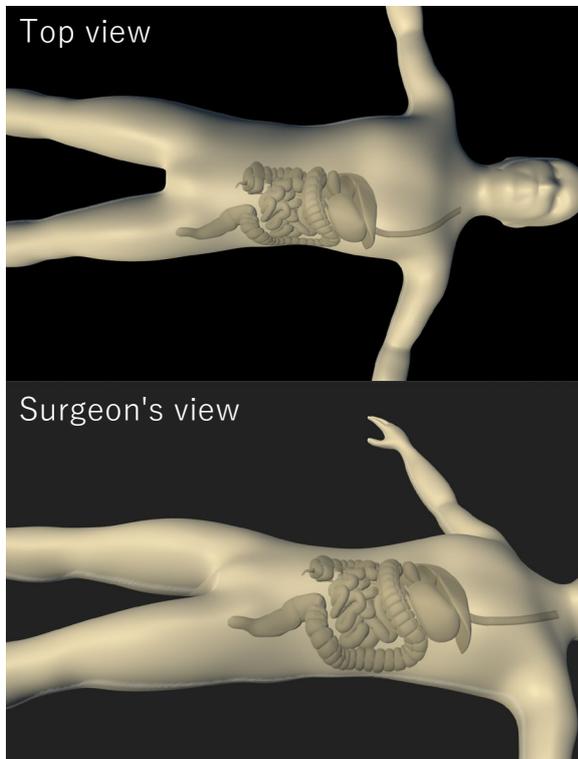


図 3: 術前診断データの SAR 提示を示す CG. 図中の内臓モデルは MRI や CT 画像の代用である。上: 患者の真上から見た歪んだ投影画像。下: 術者視点から見た幾何学的に正確な結果。

位置情報を体に重畳表示するとより把握しやすくなる。提案システムは、術者の視点移動に応じて歪み補正を施し、シースルー方式で三次元術前診断データを体に投影するため、上下左右だけでなく、血管や腫瘍の深度方向での位置関係も把握可能である (図 3)。

5.2 手術器具の挿入部の提示

手術器具を挿入する際に、先端が予想外の組織に誤接触し、臓器を損傷させる恐れがある。特に、腹腔鏡スコープの視野角が狭いため、挿入したはずの手術器具が画面内に現れずにあらぬ方向に行ってしまう際に、誤接触の危険度がかかり高い。そこで、手術器具の把持部の動きから先端の位置を推定し、図 4 に示すように、それを補助的に投影することで、術者が本来見えない手術器具の先端の位置を把握できるようになる。

5.3 腹腔鏡スコープ視野の提示

手術器具は、腹腔鏡モニタに映し出されている術野に向かって刺入するため、術野の位置を患者の体に投影することは、前述の手術器具の誤接触を防ぐには有意義である。提案システムは、腹腔鏡スコープの刺入角度と深度から撮影領域を推定し、その結果を色分けで投影することで術野の位置を提示可能である (図 5)。

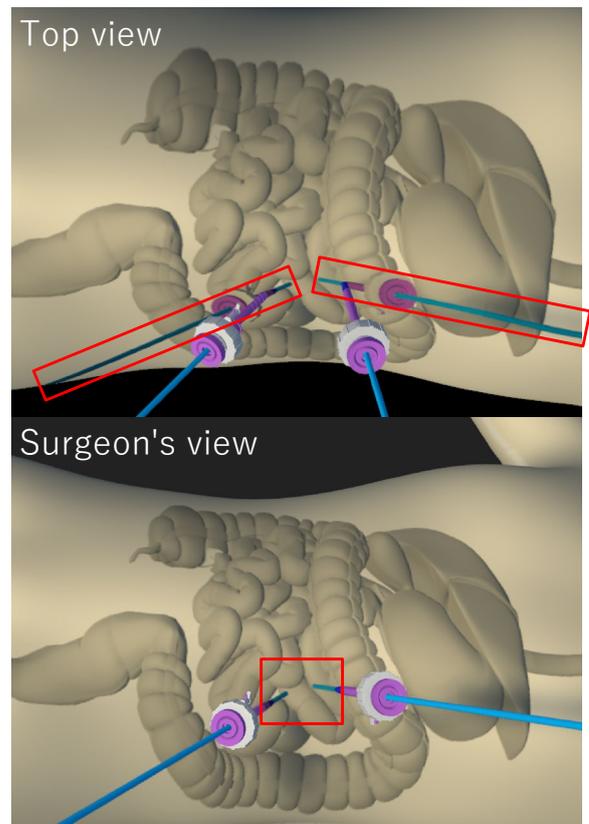


図 4: 手術器具の挿入部の提示を示す CG. 水色の棒は鉗子等の手術器具を示しており、赤い枠は SAR で投影された部分を示している。上: 患者の真上から見た歪んだ投影画像。下: 術者視点から見た結果。体に挿入した器具の先端は投影で補完されている。

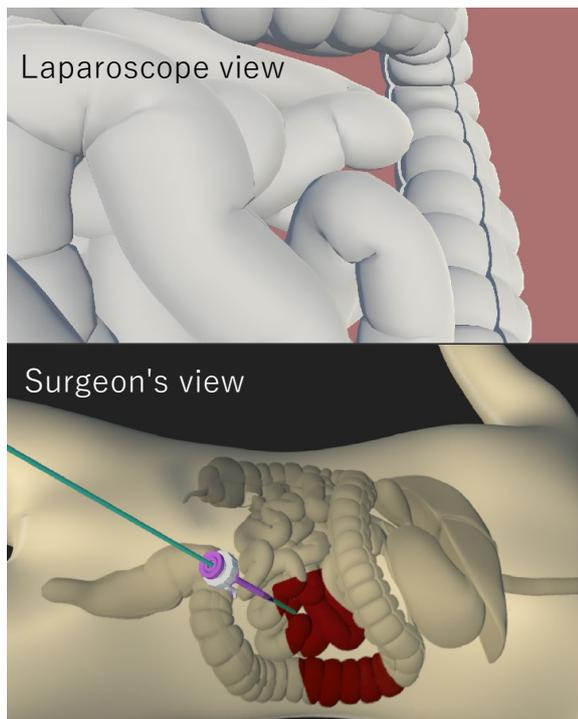


図 5: 腹腔鏡スコープ視野の提示を示す CG. 上: 腹腔鏡モニタ映像. 下: 術者視点映像. 緑色の棒は腹腔鏡スコープを示しており, 赤い部分は腹腔鏡モニタに映し出されている領域を示している.

6. むすび

本稿では, SAR 技術を用いた腹腔鏡手術支援システムを提案した. 提案したシステムは腹腔内の視覚情報を術者にシースルー方式で提示することを最初の目標とし, それを実現するためのモーショントラッキング及びキャリブレーション手法を本稿で紹介した. また, 術前診断データ, 手術器具の挿入部の位置, 及び腹腔鏡スコープ視野の位置情報を提案システムで提示する効果とメリットを, CG シミュレーションを用いて説明した. 本システムを通して, 腹腔鏡手術の術者は上記の情報を直感的に把握することが可能になり, 作業効率と安全性を向上に繋がっている.

今後は, PROCAM 座標系とモーションキャプチャーシステム座標系の位置合わせ, 及び術前診断データのレジストレーションを自動で行う手法を検討し, 現実世界の実験環境において提案システムの効果を検証する予定である.

謝辞 本研究は科研費 (21K21304) の助成を受けたものである.

参考文献

- [1] 近藤 大祐, 後藤 敏之, 河野 誠, 木島 竜吾, 高橋 優三, 「自由曲面への投影を用いたバーチャル解剖模型」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 10(2)p. 201-208, 2005
- [2] Ramesh Raskar, Matt Cutts, Greg Welch, Wolfgang Stuerzlinger, "Efficient Image Generation for Multiprojector and MuEtsurface Displays," Proceedings of the 9th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, 1998.
- [3] 杉本 真樹, 安田 秀喜, 幸田 圭史, 鈴木 正人, 山崎 将人, 手塚 徹, 小杉 千弘, 樋口 亮太, 植村 修一郎, 土屋 博紀, 平野 敦史, 「OsiriX による内視鏡外科手術・NOTES ナビゲーションの有用性—Wireless motion sensing 追従ナビゲーションと image overlay surgery—」, 日本内視鏡外科学会雑誌 13(6), 2008 年 12 月
- [4] 志賀 淑之, 杉本 真樹, 岩渕 敏久, 横山 大司, 大岩 祐一郎, 針生 恭一, 河野 義之, 大森 洋平, 新堀 萌香, 山本 隆次, 「プロジェクションマッピングを応用した泌尿器腹腔鏡手術 (mixed reality surgery) の経験」, Japanese Journal of Endourology, 28(2)p. 253-257, 2015
- [5] 牛木 卓, 小石 毅, 中口 俊哉, 林秀 樹, 津村 徳道, 三宅 洋一, “腹部投影方式による腹腔鏡下手術支援システム”, Medical Imaging Technology, Vol.24, No.5, pp. 394-400, 2006.
- [6] Birkfellner W, Figl M, Huber K et al, “A Head-Mounted Operating Binocular for Augmented Reality Visualization in Medicine” Design and Initial Evaluation. IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol.21, no. 8, pp 991-997, 2002
- [7] Zorzal, Ezequiel Roberto, et al. "Laparoscopy with augmented reality adaptations." Journal of biomedical informatics, Vol.107 (2020): 103463
- [8] D. Moreno and G. Taubin, "Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration," 2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, 2012, pp. 464-471, doi: 10.1109/3DIMPVT.2012.77.
- [9] Valkenburg RJ, McIvor AM, “Accurate 3d measurement using a structured light system,” Image and Vision Computing, Vol.16, no.2, pp. 99-110, 1998