

多視点開腹手術映像からの直下視点映像生成による 遮蔽問題の解消

高月 峻太郎^{*1} 謝 淳^{*2} 熊野 皓一郎^{*3} 北口 大地^{*3}

橋本 真治^{*3} 小田 竜也^{*3} 北原 格^{*2}

Ryotaro Takatsuki^{*1}, Chun Xie^{*2}, Koichiro Kumano^{*3}, Daichi Kitaguchi^{*3},

Shinji Hashimoto^{*3}, Tatsuya Oda^{*3}, and Itaru Kitahara^{*2}

Abstract --- 執刀医の頭と術野の間に複数台のカメラを配置する多視点撮影システム”Surgical Arena 360”について述べる. 外科手術現場では深刻な人材不足が問題視されており, 若手外科医教育の重要性が増している. 若手外科医の教育には手術映像が有用であるが, 開腹手術現場では従来の撮影法に課題が存在する. 従来行われている無影灯付近からの撮影では執刀医の頭や腕による遮蔽が発生し, 映像の視認性が低下するといった課題が存在する. 本稿では Surgical Arena 360 による上述した課題の解決法を紹介する. 撮影した画像群から生成した術野の3次元モデルから直下視点術野映像を生成する. 大学病院外科手術室での臨床実験を通じ, 提案方式の有効性を検証する.

Keywords: 開腹手術, Surgical Arena 360, 遮蔽問題, 直下視点映像, Structure from Motion

1 はじめに

本稿では, 開腹手術における遮蔽問題の解決を目的とした多視点撮影システム”Surgical Arena 360”について述べる. 外科手術の現場において, 将来的な人材不足が問題視されている. 平成 20 年の医師数を 1 とした医療従事者の増減率では, 外科の減少率が最も高くなっている [1]. 外科医に求められる高度な手技の習得には一定の期間を要するため, 若手外科医教育の重要性が増している.

外科医教育では, 手術を撮影した映像から新しい手技を学ぶ機会が多い [2]. 視覚情報を媒介とすることで, 時間や場所の制限を受けずに学習が可能となる. さらに, 同じ動作を複数回繰り返して視聴したり, 重要な場面を一時停止して細かく観察したりすることで, 対象手技をより深く理解することができる. また, 映像教材は教示者および観察環境に左右されることがなく, 複数人での共有も容易であるため, 知識の偏在化が起こりにくい. このような利点により腹腔鏡手術やロボット手術では, 若手外科医教育への手術映像の導入が進んでいる. 一方で, 術者が直接術野を視認して手術を行う開腹手術

では, 共有視野の確保が困難という問題により普及が進んでいない [3]. 腹腔鏡手術やロボット手術では, 術者の目となるカメラは腹腔内に入り術野を直接撮影するため, 観察したい箇所がもれなく視認可能な高品質な術野映像の撮影が可能である. 一方で, 開腹手術は術野が狭いため, 最も視認性の良い位置には術者の頭が存在することになる. 手術映像は, 図 1 左上に示すように, それ以外の位置から撮影されるため, 観察したい箇所が術者の身体(頭や手)および手術器具によって隠されてしまい, 結果として, 手術映像の品質が低下するというのが普及を阻む課題の一つとなっている.

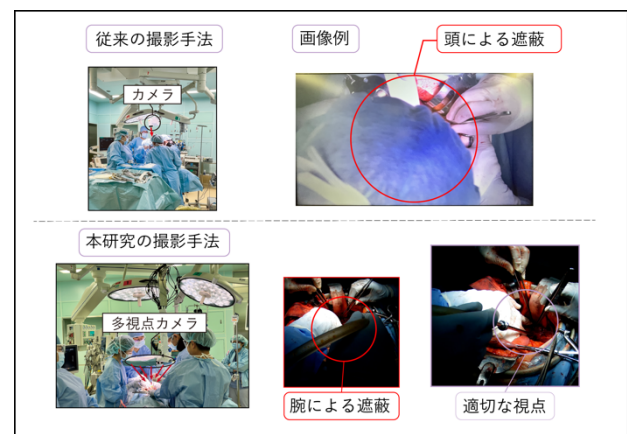


図 1. 従来撮影法と提案撮影法による遮蔽問題の解消

*1 筑波大学エンパワメント情報学プログラム

*2 筑波大学計算科学研究センター

*3 筑波大学医学医療系消化器外科

*1 Doctoral Program in Empowerment Informatics, University of Tsukuba

*2 Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

*3 Department of Gastrointestinal and Hepato-Biliary-Pancreatic Surgery, University of Tsukuba

図 1 に示すように、開腹手術現場での一般的な撮影状況は、術者の頭上にカメラが存在しており、また1台のカメラ(1視点)からの映像しか撮影されないため、術者の頭や腕が遮蔽になる場面が頻繁に発生する。清水らは、無影灯付近に複数台のカメラを設置し、術者の頭上から術野を撮影する手法を提案している [4]。しかし、術者の頭上からの撮影では、術者の頭や腕による遮蔽の可能性を取り去ることは困難である。遮蔽の少ない映像を撮影する方法として、術者の目線から術野を撮影するウェアラブルカメラの利用が考えられる [5]。しかし、術者の頭は固定されていないため映像のブレが発生し、映像記録としての利用は困難である。

本稿では、上述した開腹手術の映像撮影が有する課題の解消を目的とし、術者と術野の間に多視点カメラを配置する撮影システム“Surgical Arena 360”を提案する。本撮影システムは、図 1 左下に示すように、複数台のカメラを円状に配置し、術者の手元(術野)を撮影することで、遮蔽の発生しにくい撮影方法を実現する。また、多視点撮影により得られた画像群を入力とし、世界座標系におけるカメラの位置姿勢推定及び術野の3次元モデルを生成する。推定されたカメラ位置と術野の3次元モデルを用いて、直下視点からの映像を生成する。外科手術室での臨床実験により、本撮影システムの有効性を検証する。

2 関連研究

2.1 映像メディアによる外科医教育

外科医の教育において映像メディアが活用されている [6] [7]。Allison らは、様々な外科分野の研修医や教員を対象としたアンケートにより、映像メディアを用いた学習の重要性を評価した。結果として、回答者の90%が手術の事前準備に映像メディアを利用していることがわかった。研修医は YouTube と Surgical Council on Resident Education を多く利用している一方で、教員は学会の Web ページや市販のビデオを利用していた。また Mikael らは、映像メディアを用いたビデオコーチングの効果を検証した [8]。この研究はモントリオール大学の研修医を対象に実施され、まず犬の腸で側腸吻合をしている様子を撮影した。その後、ビデオコーチングを実施するグループ(SVC 群)と何も実施しないグループ(対照群)に分け、2 回目の側腸吻合を撮影した。評価は技術スキルのグローバル尺度である Objective Assessment of Technical Skills を用いて実施し、コーチング群の研修医に満足度調査を行なった。結果として、SVC 群は対照群と比較して、Objective Assessment of Technical Skills スコアを有意に増加させた。またすべての研修医が、ビデオコーチングが時間効率のよい教育

方法であることに同意または強く同意した。上述した先行研究から、外科医教育における映像メディアの重要性が示された。本研究では、映像メディアを用いた若手外科医の教育を目的とする。

2.2 開腹手術における遮蔽問題への取り組み

従来の開腹手術現場での撮影法には、術者の頭や腕がカメラに映り込み、重要な場面が撮影できない問題が存在する。北坂らは、手術映像における遮蔽問題に対して、複数台のカメラ映像を合成することで遮蔽物を除去した [9]。この研究では、遮蔽物を青色の動物体と定義し、遮蔽物の映っていない画像を特徴点群の対応関係を用いて合成することで、遮蔽領域を補完する。しかし、遮蔽物が特定の色を持つ物体であるため、細かい遮蔽物の除去は困難である。また、特徴点としてマーカーシールを用いており、実際の開腹手術映像を用いた臨床実験は実施していないため、複雑な腹部をどの程度補完できるかは検証されていない。清水らは、無影灯付近に複数台のカメラを設置し、多視点手術映像からの自動視点切り替え法を提案した。視点切り替えは、術野のセグメンテーションから計算されるフレームスコアに基づき、画像全体で観察される術野の面積が最大となるような視点を選択する。手術室での臨床実験を実施し、外科医による切り替えられたフレームの品質テストをすることで提案手法の有効性を検証した。しかし、術者の頭上にある無影灯付近にカメラを設置する撮影方法では、依然として執刀医の頭や腕による遮蔽を取り去りきることは困難である。本研究では、術者と術野の間に多視点カメラを配置することで、術者の頭や腕による遮蔽を回避する。

2.3 SfM(Structure from Motion)

SfM は、多視点画像間における対応点情報から、カメラの3次元位置とカメラパラメータを推定し、被写体の3次元点群を復元する手法である。具体的には、SIFT [10]などの画像特徴量を用いて全ての画像間での対応点探索を行い、特徴点の対応関係に基づいて画像ペアを選択する。また、5点法 [11]により選択したカメラペア間の相対的な位置と姿勢を算出する。計算された位置姿勢情報に基づいて、ステレオ視により対応点の3次元座標を推定する。3次元点の再投影誤差を用いたバンドル調整 [12]により、3次元点とカメラパラメータを最適化する。本研究では、SfM のアルゴリズムを用いて術野の3次元モデルを生成する。

3 Surgical Arena 360

図 2 左に示すように、複数台の RGB カメラを術者の手元を取り囲むように配置し、多視点手術映像を撮影する。カメラを円形に配置する利点としては、多視点画像間での対応点探索の精度を均等化しやすいこと、直

下視点の位置姿勢を計算しやすいことが挙げられる。図 3 に示すように、全てのカメラは円筒状に切り出された金属の板(リグ)に斜め下向きで固定される。図 2 右に示すように、リグ本体はアームを介して術者と術野の間に固定される。各 USB カメラは一台の PC に接続され、同期撮影プログラムのもとで動作しており、手技の映像を同じ時系列データとして保存する。

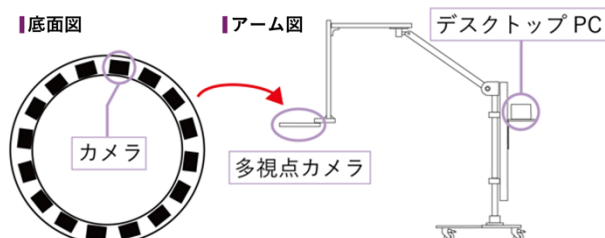


図 2. 多視点カメラ配置と、機材を固定するアーム全体図

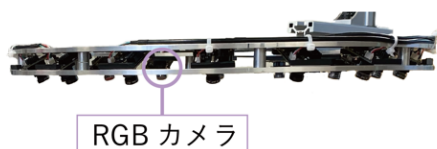


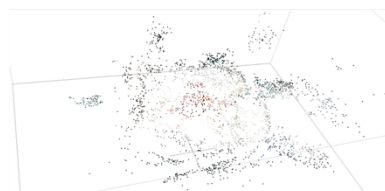
図 3. リグへの RGB カメラ固定の様子

4 開腹手術映像を用いた直下視点映像生成

4.1 術野の 3 次元モデリング

多視点画像群から直下視点映像を生成するために、SfM を用いてカメラパラメータと術野の 3 次元モデルを求める。SfM では、多視点画像間に対応点マッチングを行い、画像ペア間の相対的な位置・姿勢を推定する。その後、ステレオ視により対応点の 3 次元座標を計算し、バンドル調整によりカメラパラメータと 3 次元点座標を最適化する。上記手順により得られた疎な点群とカメラパラメータを用いて、各画像ペア間の深度マップから密な点群を獲得する。各 3 次元点を頂点とするメッシュを生成することで対象物体の表面形状を復元する。生成したメッシュにテクスチャをマッピングすることで表面形状に色情報を付与し、図 4 下に示すような術野の 3 次元モデルを生成する。

点群



テクスチャ付きモデル

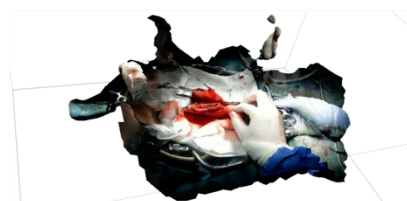


図 4. 術野の 3 次元モデル生成結果

4.2 直下視点映像生成

4.1 節で推定したカメラパラメータと術野の 3 次元モデルを用いて、直下視点映像を生成する。図 5 に示すように、各カメラの 3 次元座標 $\mathbf{c}_i (i = 0, \dots, N)$ を用いて直下視点の位置・姿勢を推定する。直下視点の 3 次元座標 \mathbf{c} は、全カメラの 3 次元座標値の平均で計算する。

$$\mathbf{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \mathbf{c}_i$$

姿勢情報については、まず全カメラの 3 次元座標 \mathbf{c}_i を用いて主成分分析 [13]を行い、平面を近似する。近似した平面に対する法線ベクトル \mathbf{m} を計算し、カメラの前方が法線ベクトルの向きになるような回転行列 \mathbf{R} を計算することで直下視点の姿勢を推定する。

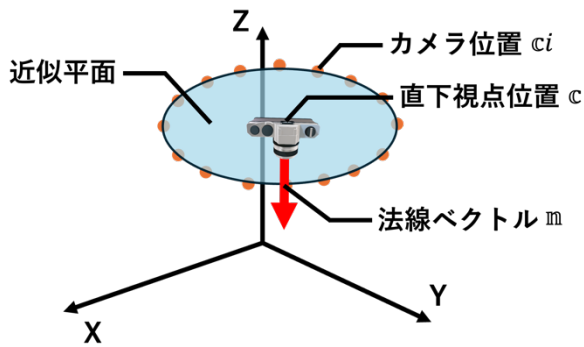


図 5. 直下視点撮影カメラの位置姿勢推定

5 検証実験

5.1 撮影機材

図 6 に示すように、本実験で使用する USB カメラは外径 50cm, 内径 40cm の円筒状に切り出されたアルミ板に固定されている。使用カメラは UCTRONICS 社製カメラ Arducam B0200 であり、フレームレートは 30fps(frame per second), 解像度は Full-HD(1920 画素 × 1080 画素), 視野角は 100 度で撮影される。カメラ台数は 16 台で、各カメラは 22.5 度の間隔で固定されている。

多視点撮影機材 (斜視図)

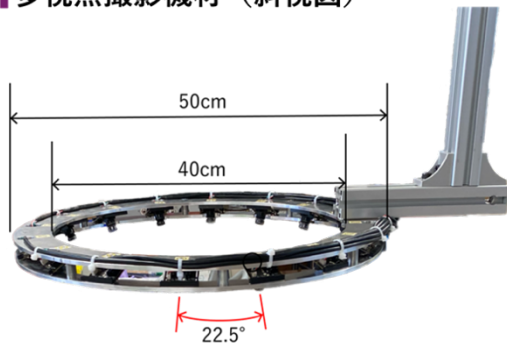


図 6. 多視点撮影機材の寸法

5.2 臨床実験に向けた事前準備

手術室への機材持ち込みには、様々な制約が存在する。術野は手術室の中で最も清潔にするべき場所であり、手術に対する安全性の確保が最重要である。術野に近い位置で撮影機材を固定するには、術野へのリグ本体やカメラ部品、微細な粉などの不純物の落下の可能性を限りなくゼロにする工夫が必要である。図 7 に示すように、カメラの部品落下への対策として 3D プリンタを用いてリグカバーを作成した。また、アクリルパネルを加工したレンズカバーを作成し、リグカバーに開いている穴からの部品落下を防いだ。アームの耐荷重がリグ

本体の重量の 10 倍以上であることから、リグ本体の落下可能性は低いと考える。

リグカバー装着前



リグカバー装着後



図 7. リグカバーの装着

5.3 臨床実験

2022 年 11 月末から 2024 年 12 月現在にかけて、筑波大学医学医療系消化器外科の方々のご協力のもと合計 4 件の症例を撮影し、本撮影システムの効果を検証した。外科手術室で本撮影機材を使用している様子は図 8 に示す通りである。

撮影した症例は胆管がんに関するもので、主に小腸縫合の場面を撮影した。撮影機材は執刀医の指示するタイミングで搬入し、各手術で合計 20 分から 30 分程度撮影した。実際に撮影した多視点手術画像群を図 9 に示す。任意視点において術者の頭や体による遮蔽が存在しておらず、ある視点では腕による遮蔽が存在するが、ある視点では鮮明な手術映像が撮影可能であることが確認できる。



図 8. 手術現場での多視点撮影システム使用風景

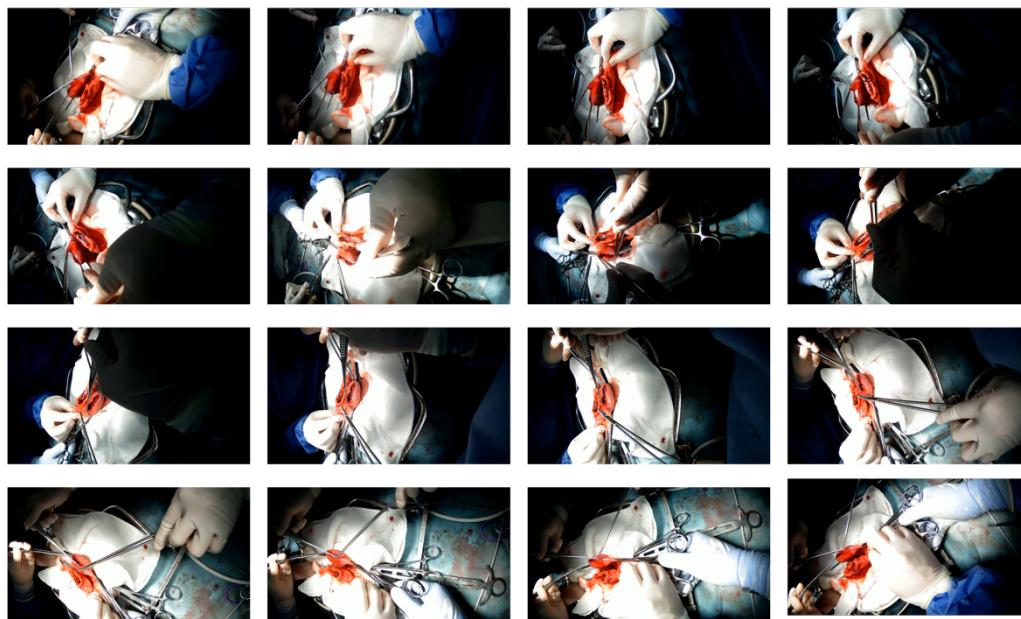


図 9. 多視点手術画像

5.4 直下視点映像生成

5.3 節で撮影した多視点画像群を用いて、直下視点映像を生成する。SfMソフトとしてMetashape [14]を用いた。対象とするシーンは、小腸縫合と腸間膜切除であり、実際に生成した画像を図 10 に示す。初期フレームでのキャリブレーション結果を全てのフレームに適用することで、同一視点からの映像を生成する。上述した臨床実験により、従来の撮影方法では遮蔽が発生していた場面でも、直下視点からの手技の様子が観察可能な撮影システムであることが確認できた。

■小腸縫合



■腸間膜切除



図 10. 直下視点映像生成結果

6 おわりに

本稿では、開腹手術現場で利用可能な多視点撮影システム”Surgical Arena 360”の構築と、同システムで撮影された画像群を用いた直下視点映像生成手法を検討した。

円筒状のリグに複数台のカメラを固定した撮影機材を制作し、リグカバーやアクリルパネルを装着することで、外科手術室での多視点撮影を実現した。また臨床実験で撮影された手術画像群から直下視点映像を生成することで、遮蔽のない映像生成に成功した。上記の結果から、開腹手術現場における本撮影システムの有効性が確認できた。

なお本研究の一部は JSPS 科研費 22K08791 によるものであり、筑波大学附属病院臨床研究倫理審査委員会により観察研究として承認を得て実施したものである(整理番号 R04-087)。

参考文献

- [1] 厚生労働省, 医師・歯科医師・薬剤師統計(旧:医師・歯科医師・薬剤師調査):結果の概要
- [2] 生熊頭, “執刀医目線での撮影による立体視映像がもたらす医学教育への効果に関する研究,” 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, 2013.
- [3] 坂本 一博, “消化器手術(大腸手術)アプロ

- 一チの変遷,” *日本外科系連合学会誌*, 第 48 卷, 第 4 号, pp. 510-511, 2023.
- [4] T. Shimizu, K. Oishi, R. Hachiuma, H. Kajita, Y. Takatsume and H. Saito, "Surgery Recording without Occlusions by Multi-view Surgical Videos," *VISIGRAPP(5:VISAPP)*, pp.837-844, 2020.
- [5] I. Abibouraguimane, K. Hagihara, K. Higuchi, Y. Itoh, Y. Sato, T. Hayashida, M. Sugimoto, "CoSummary: adaptive fast-forwarding for surgical videos by detecting collaborative scenes using hand regions and gaze positions," *Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces*, pp580-590, 2019.
- [6] P. Mota, N. Carvalho, E. Carvalho-Dias, M. J. Costa, J. Correia-Pinto, E. Lima, "Video-Based Surgical Learning: Improving Trainee Education and Preparation for Surgery," *Journal of surgical education*, 75(3), 828-835, 2018.
- [7] A. K. Rapp., M. G. Healy., M. E. Charlton., J. N. Keith., M. E. Rosenbaum., M. R. Kapadia., "YouTube is the Most Frequently Used Educational Video Source for Surgical Preparation," *Journal of surgical education*, 73(6), 1072-1076, 2016.
- [8] M. L. Soucisse., B. K., L. Sideris., P. Drolet., M. Morin., P. Dubé., "Video Coaching as an Efficient Teaching Method for Surgical Residents-A Randomized Controlled Trial," *Journal of surgical education*, 74(2), 365-371, 2017.
- [9] 奥田透生, 佐藤準, 豊田誠仁, 北坂孝幸, "開腹手術映像における遮蔽物除去手法の改善~ FFD による位置合わせ精度の評価~, " *学会技術研究報告; 信学技法*, vol. 117, no. 518, pp. 31-32, 2018.
- [10] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 199, vol. 2, pp. 1150-1157.
- [11] D. Nistér, "An efficient solution to the five-point relative pose problem," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 26, no. 6, pp. 756-777, Jun. 2004..
- [12] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, A. W. Fitzgibbon, "Bundle Adjustment - A Modern Synthesis," in *Vision Algorithms: Theory and Practice*, 2000, pp. 298-372..
- [13] K. Pearson, "LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559-572., 1901.
- [14] "Metashape," [Online]. Available: <https://www.agisoft.com/>. [Accessed 8 12 2024].