



Title	作業分解手法を用いた腹腔鏡下S状結腸切除術における自動手術技術評価に関する研究
Author(s)	大淵, 佳祐
Description	配架番号 : 2979
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第16886号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16886
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99731
Type	doctoral thesis
File Information	OBUCHI_Keisuke_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医 学） 氏 名 大 淵 佳 祐

学 位 論 文 題 名

作業分解手法を用いた腹腔鏡下 S 状結腸切除術における自動手術技術評価に関する研究
(Studies on automated surgical skill assessment in laparoscopic sigmoidectomy using a task decomposition approach)

【背景と目的】

本研究は、腹腔鏡下 S 状結腸切除術（laparoscopic sigmoidectomy; Lap-S）の手術動画を対象に、作業分解手法（task decomposition approach）に基づく人工知能（artificial intelligence; AI）による自動手術技能評価モデルを開発し、その有用性を検証したものである。

従来、手術技能評価には OSATS（Objective Structured Assessment of Technical Skill）や GOALS（Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills）などが広く用いられ、本邦では日本内視鏡外科学会が実施する技術認定制度（Endoscopic Surgical Skill Qualification System; ESSQS）が外科教育および技能認定の中核的役割を担ってきた。しかし、これらの評価法は熟練した評価者の主観に依存する部分が大きく、評価者間のばらつきや、評価の客観性・再現性・効率性に限界があると指摘されている。

一方、AI 技術の急速な進歩により、画像や動画から手術操作を自動認識・定量化する研究が国際的に進展している。特にコンピュータビジョンを応用した AI による手術解析は、術者の動作や鉗子操作、術野変化を高精度に識別することが可能となり、主観的評価を補完する新しい客観的技術評価法として注目されている。

本研究では、Lap-S 動画を用いて手術操作を剥離（Dissection: D）、展開（Exposure: E）、手術無効（Invalid: I）の 3 要素に分類し、手術習熟度を反映する AI 自動評価モデルを構築するとともに、外科教育に有用な定量的指標（パラメータ）を確立することを目的とした。

【対象と方法】

2016～2019 年度の ESSQS 審査用 Lap-S 動画 87 症例（+2SD 群 26 例、-2SD 群 31 例）および国内 8 施設から収集した初学者（Novice）群 30 例を解析対象とした。動画は 1 秒あたり 30 フレームの映像を 30 フレームごとに静止画として抽出し、AI によるフレーム単位の分類を実施した。

全手術動画を作業分解し、各フレームを剥離（D）、展開（E）、手術無効（I）の 3 要素に分類した。D 時間は電気メスや超音波凝固切開装置、自動縫合器、剥離鉗子などが出気にしている時間、E 時間は把持鉗子のみが出現している時間と定義した。I 時間は、カメラ体外時間（Outside）を除外し、鉗子が描出されず手術が進行していない（No grasper）時間のみを抽出した。これらの各時間（DEI 時間）および D 時間と E 時間の切替回数（DE transition）を定量的指標として算出し、術者の熟練度との関連を解析した。

AI モデルは 2 種類構築した。① 手術鉗子 8 種類を自動認識し、各鉗子の出現状況から DEI を推定する Mask R-CNN（Region-based Convolutional Neural Network）ベースの鉗子認識モデル、② 手術画面全体を入力として鉗子情報に依存せず DEI を直接分類する Xception ベースの DEI 分類モデルである。

学習データはアノテーターおよび外科医 2 名によるダブルチェックのもと作成した教師データを用い、Precision、Recall、F1-score、および Pearson 相関係数で評価した。統計解析には EZR (Jichi Medical University Saitama Medical Center) を使用し、 $p < 0.05$ を統計学的有意とした。

【結果】

教師データ解析の結果、D 時間、E 時間、および DE transition は術者の習熟度を反映する指標であり、上級者になるにつれて D・E 時間の短縮および DE 切替回数の減少を示した。I 時間は中級者から上級者になる過程で初めて有意に短縮した。

鉗子認識モデルの全体 F1-score は 0.70 であり、DE 時間および DE transition は教師データと同様の傾向を示したが、Novice 群でばらつきが大きく、I 時間を過大推定する傾向を認めた。工程別解析では、Lap-S を 9 工程に分類したところ、内側授動 (Phase2)、外側授動 (Phase6)、直腸切離～吻合 (Phase9) において手術習熟度に有意差を認めた。

一方、画面全体を学習する DEI 分類モデルでは、F1-score 0.88、Pearson 相関係数 0.9 以上と高い精度を示した。Action recognition performance による視覚比較でも誤分類が少なく、教師データとの一致度が高かった。

【考察】

DEI 時間および DE transition は、術者の熟練度を反映しうる新たな客観的指標と考えられた。新規評価項目として DE transition を本研究で初めて提唱し、D と E の変遷の程度が手術評価へ有用であることが示唆された。上級者では 1 回の展開における剥離時間が長く、結果として DE の切替回数が減少することを示し、手術習熟に伴う作業構造の特徴を定量的に捉え得る指標であると推察された。

鉗子認識モデルに比して、DEI 分類モデルは高精度かつ汎用性に優れ、手術動画全体を解析対象とすることで安定した性能を示した。鉗子認識モデルの精度が低い要因として、未学習鉗子の存在や映像のブレ、鉗子のフレームアウトが主な要因と推定された。工程別解析の結果、内側・外側授動および直腸切離～吻合の工程が習熟度評価上で統計学的有意差がつきやすく、外科教育における重点学習領域を定量的に可視化できることが示唆された。

AI による動画解析は、主観的評価法を補完する客観的評価基盤として、外科技術標準化および教育効率化に寄与する可能性がある。今後、リアルタイム動画解析技術を応用することで、術中フィードバック型教育支援や、個々の術者の技能推移 (learning curve) の自動可視化が可能になると考えられる。

【結論】

作業分解手法を用いた Lap-S における自動手術技術評価において、D 時間、E 時間、I 時間、そして本研究で新たに導入した DE transition が手術習熟度評価に有用なパラメータであった。また自動評価に関して、画面全体を教師データに用いた DEI 分類モデルは高精度に DEI を判別し、自動手術評価が可能であった。