HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Evaluation of Laparoscopic Surgical Skill Using Surgical Instrument Motion Analysis and Machine Learning
Author(s)	晏, 凌波
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第17045号
Issue Date	2026-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k17045
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/100098
Type	doctoral thesis
File Information	Lingbo_Yan_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（情報科学）　　氏名　晏　凌波

学　位　論　文　題　名

Evaluation of Laparoscopic Surgical Skill Using Surgical Instrument Motion Analysis and Machine Learning

（手術器具動作解析と機械学習による腹腔鏡手術技量評価）

腹腔鏡下手術は低侵襲で患者負担が少ない一方、鉗子操作の自由度制限、触覚情報の欠如、モニタ越しの奥行知覚の困難さ等、術者に高度な空間認識力と精密な操作制御を要求する難易度の高い手術手技である。そのため、効率的かつ体系的な手術教育手法の確立が重要であるが、従来広く用いられてきた Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills (GOALS) や Objective Structured Assessment of Technical Skills (OSATS) に代表される主観的評価法は、評価者間のばらつきや再現性の低さが課題として残されている。これらを背景として、本研究は腹腔鏡下手術技能を、客観的、定量的に、かつ再現性良く評価するため、光学式モーションキャプチャ (MoCap) による手術器具動態解析と機械学習を統合したフィードバックシステムを構築することを目的とする。

腹腔鏡下手術は低侵襲で患者の負担が少ない一方、鉗子操作の自由度制限、触覚情報の欠如、モニタ越しの奥行知覚の困難さ等、術者に高度な空間認識力と精密な操作制御を要求する難易度の高い手術である。そのため、効率的かつ体系的な手術教育手法の確立が重要であるが、従来広く用いられてきた Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills (GOALS) や Objective Structured Assessment of Technical Skills (OSATS) に代表される、熟練医による主観的評価法は、評価者間のばらつきや再現性の低さが課題として残されている。これらを背景として、本研究は、腹腔鏡下手術での手術技量を客観的、定量的、かつ再現性良く評価するため、光学式モーションキャプチャ (MoCap) を用いて手術器具動態の特徴量を解析し、その特徴量をもとに機械学習を行うことで、自動で術者の技量を評価するシステムを構築することを目的とする。

本研究では、カダバー (篤志献体) を用いた腹腔鏡下腎摘除術を題材とし、複数の赤外線反射マーカーを取り付けた手術器具と光学式モーションキャプチャーシステムにより、模擬手術中の手術器具の動作を高精度に記録した。取得した手術器具の動作データから、操作時間、軌跡長、速度分布、姿勢変化量、加速度、両手間協調度など 111 項目の特徴量を抽出し、統計解析を用いて、熟練医と未熟練医の技量差を示す主要因子を明らかにした。その結果、手技の効率性 (無駄動作の少なさ)、手術器具操作速度、動作安定性 (姿勢変化の滑らかさ) などが技量レベルを反映する重要指標であることが示唆された。

次に、抽出した手術器具動態の特徴量を入力とし、術者の技量を評価し、初級者と上級者の 2 群に分類する機械学習モデル、初級者、中級者、上級者の 3 群に分類する機械学習モデル、および 2 名の熟練者による GOALS 評価を教師信号とし手術器具動態の特徴量から GOALS スコアを推定する機械学習モデルを構築した。分類問題では、サポートベクターマシン (SVM)、Random Forest など、GOALS 評価への回帰問題では、サポートベクター回帰 (SVR)、部分的最小二乗 (PLS) 回帰、リッジ回帰など複数の機械学習手法を用い、5 分割交差検証 (100 回反復) により汎化性能を評価した。その結果、分類問題では高い精度 (平均 F1 score 0.85 以上)、GOALS スコア推定では人間の評

価と機械学習モデルによる評価に強い相関 (相関係数 0.80 以上) が見られ、提案する機械学習に基づく技量評価の有効性が確認された。

単に技量の分類結果や GOALS スコアを示すだけでは、手術訓練者にとって有効な助言とはならず、どうしてそのような評価になったかの理由を示す必要がある。そのため説明可能 AI の一つである SHapley Additive exPlanations (SHAP) を用いて評価結果の判断根拠を可視化した。これにより、腹腔鏡下手術において熟練者と初心者が大きく異なる点が、「軌跡効率」「動作速度」「姿勢安定性」であることが明確に示され、AI 評価の透明性が向上した。また、特徴量の寄与度を個別に提示することで、模擬手術において訓練者が「どの動作を改善すべきか」を理解しやすくなり、教育的効果が高まった。

本システムはさらに、豚臓器による模擬手術トレーニング等へ応用され、医学生・若手医師の技量向上過程の可視化に有効であることが確認された。2025 年度以降は治験審査委員会 (IRB) の承認のもと、実臨床 (ドナー腎摘術) における手術器具動態データの収集を開始し、臨床場面における外的妥当性の検証を進めている。

以上より、本研究は腹腔鏡下手術において、手術器具動態解析、統計学、機械学習、説明可能 AI を統合した客観的技量評価フレームワークを構築し、手術教育の高度化に寄与するものである。本システムは、腹腔鏡下手術教育現場における手術教育の効率化のみならず、遠隔手術支援、医療事故検証のための手術記録などの基盤技術として発展が期待される。