

厚生労働科学研究費補助金（臨床研究等 ICT 基盤構築・人工知能実装研究事業）
『AI の眼』による医療安全確保に関する研究

分担研究報告書

「人工知能技術を用いた手術動画解析に関する研究」

研究分担者 川崎 良 大阪大学大学院医学系研究科・寄附講座特任教授
中島 悠太 大阪大学データビリティフロンティア機構・准教授
長原 一 大阪大学データビリティフロンティア機構・教授

【研究要旨】我が国の超高齢社会を迎えた我が国において、高齢者人口は増加し、手術を要する患者が増加傾向にある一方で手術を行う外科医の不足が問題となっている。安全な手術を受けたいという患者の希望と、手術の経験を積むことで術者が育成されるという手術教育のギャップを埋める一つの方策として人工知能（artificial intelligence, AI）を使うことによる手術技術の評価、その発展形として安全な外科手術とは何か、そして、安全な外科手術を提供する外科医をいかに教育するかという課題への解決の糸口があると考えている。本分担研究では、AI 解析に必要となる大量かつ多様性のある手術動画を収集し研究に生かすためウェブインターフェースで手術動画を収集するレポジトリをクラウドプラットフォームで設計し、構築し、運用が開始された。手術動画から教師ラベル付きの静止画を作成し、学習と検証に用いて手術動画解析に合わせて設計した AI モデルで手術時間推定、手術器具検出、そして、手術手技評価指標の探索を行った。今後さらに手術経験の長短、円滑さや合併症の有無などの臨床指標を組み合わせ技能評価やベンチマーキングの指標化を目指して研究を続ける予定である。

A. 研究目的

超高齢社会を迎えた我が国において、高齢者人口は増加し、手術を要する患者も増加傾向にある。その一方で、外科系医師の減少・大都市偏在・働き方改革等により術者や医療従事者の不足が見込まれ、医療安全確保に懸念がもたれている。白内障手術の潜在的な対象者は 2045 年をピークに 3500 万人を超えるとも推計されており外科手術の需要はさらに高まる。手術を受ける患者にとっては、熟練医による手術を希望することが多い一方、手術技能の習得を目指す専攻医や比較的経験の浅い術者が経験を積むためにも実際の患者に対して安全が確保さ

れたうえで手術経験を積む環境が必要がある。熟練医による手術と手術教育とをどう両立させるかは重要な課題である。本研究では、人工知能（artificial intelligence, AI）技術を手術動画に対する解析に使い、特に件数の多い白内障手術を題材に、医療安全に寄与するような手術解析用の AI モデルの開発と応用を目的とする。特に本分担研究では、「学会主導の手術動画の統一的な収集を可能にするウェブレポジトリサイトの構築」と「AI が『眼』となることで安全な手術教育、手術サポートに資するパイロット研究」を分担している。

B. 研究方法

学会が主導する手術動画の統一的な収集

手術動画収集プラットフォームとして、マイクロソフト社 Azure クラウドサービスを用いたクラウド型の動画収集システムの構築を開始した。実際の動画収集の流れは、まず事前に医師は患者に対して手術動画を研究に利用することについて説明を行ったうえで同意を頂き手術動画を供出する。利用者登録を行った医師は自らの手術動画をアップロード後、現状では手術動画に対し教師ラベルとなる工程名を入力する。この機能は十分なデータ蓄積が得られればこの機能は自動判別 AI モデルで置換する予定である。工程別の時間集計、工程による動画検索と並行再生機能が実装されている。

コンピュータやロボットの「眼」としてロボット手術の進展・手術リスク予知・手術サポート・手術教育などに資する、種々の手術動画解析 AI のパイロット研究

これまで手術動画は手術の記録として、また、術者や関係者が動画を見直し、手術手技の修練に用いるなどされてはきたが、定量的な評価や画像処理による解析の対象とはなっていなかった。本分担研究では手術動画を画像処理することで、①手術開始、終了、工程別時間の推定、②手術時間のリアルタイム推定、③手術器具の軌道解析について手術手技のベンチマーキング、技能評価の標準化、安全な手術教育法の開発などの手術医療安全 AI として開発を開始する。

(倫理面への配慮)

本研究はパイロット研究については大阪大学倫理審査を受けて行っている。多施設での検証については現在京都大学で倫理審査中である。

C. 研究結果

学会が主導する手術動画の統一的な収集

ウェブ眼科手術動画レポジトリサイト

(eyesurgeonsclub.net) を立ち上げ、アップロードされた動画はオフラインで AI 動画解析モデル群開発に利用を開始した (図 1)。



図 1: 動画をアップロード後、工程名を入力する (左) と工程別の時間が集計 (右) される。

この AI 動画解析モデルには、医療安全に係る技能習熟度や手術合併症リスク評価など目的別の複数の AI モデルからなる。計画に従って手術動画の収集と AI 解析結果の提示等プラットフォームとしての運用のノウハウの蓄積を行った。

コンピュータやロボットの「眼」としてロボット手術の進展・手術リスク予知・手術サポート・手術教育などに資する、種々の手術動画解析 AI のパイロット研究

白内障手術への応用：手術動画解析の応用として、手術開始後から手術終了までの時間をリアルタイムで推定するモデルを開発した。これは、手術時間が予定よりも長くなる、予想よりも手術難易度が高いなど、手術安全を脅かす可能性のある状況のアラートへの応用のほか、業務管理 (手術室利用の予定変更等) にも応用が可能である。4 名の術者による白内障手術 2,686 例を用い、まずは基本となる手術時間予測モデルを作成し、そのモデルを 20 症例程度のファインチューニングで術者ごとに最適化されたモデルの

作成も可能であった。推定時間と実時間の差を表す平均絶対誤差(mean absolute error, MAE)は 5.2 秒から 9.3 秒と誤差 10 秒以内での推定が可能であった(図 2) (under review)。

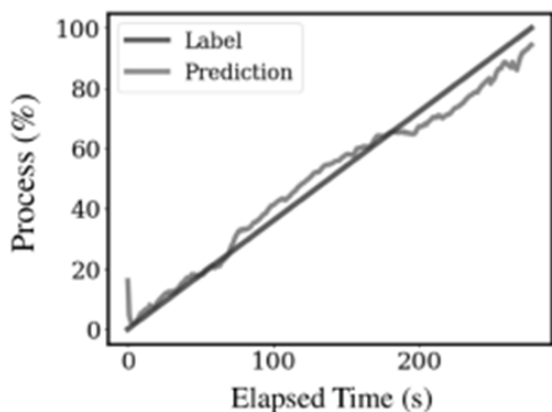


図 2：実手術時間に対する手術時間予想結果の例

手術手技熟練度の推定：小切開白内障手術の技術評価にはこれまで指導医が目視で評価する Modified OSATS (表 1) のような定性的な評価が主であった。その中から、「効率の良い動作をしているか? (economy of movement)」について、AI を用いた熟練度推定を試みた。具体的には白内障手術の中でも熟練を要する工程である前囊切開 (CCC) を行う動画を切り出し、器具の動きをセマンティックセグメンテーションで描画、器具先端を検出、その軌道を描画し、定量的な解析を行った (図 3)。解析の指標は探索的に、①工程開始から終了までの時間、②視野安定度指標、③器具挿入部安定指標、④器具先端の移動速度、⑤器具先端の移動速度変化ピーク数、⑥急峻な速度変化、の算出を試みた。試験的に二人の術者間で算出した結果を表 2 に示す。術者 1 は術者 2 に比べて CCC 工程を早く終了しているが、視野安定度、器具挿入部安定指標は術者 2 の方がより安定した結果となった。また、器具の動作速度では、術者 1 はより大きく少ない手数

で工程を行っているのに対し、術者 2 はより穏やかに、手数多く工程を行っているというこれまで官能検査としてしかとらえることができていなかった特徴を数値化することができた (表 2)。

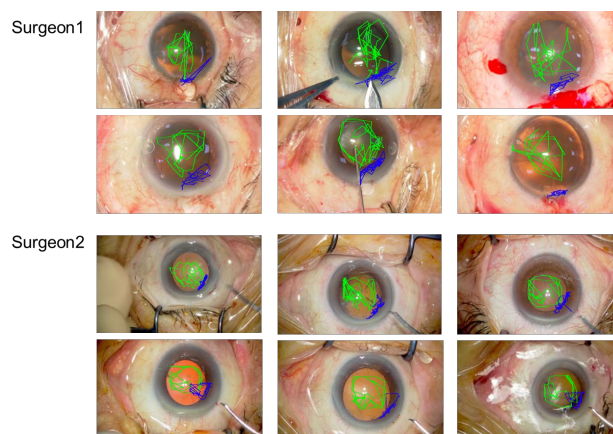


図 3. CCC 工程における器具軌道：緑は器具先端の軌道、青は器具挿入部の軌道を表す。

D. 考按

本分担研究は白内障手術を事例として手術動画解析関連の AI モデル開発またその利活用を目指すものである。学習及び検証用の動画収集はウェブインターフェースを介してクラウドに保管し、解析することとし、そのための要件を技術面、安全面、倫理面で考慮したうえで実装することができた。倫理審査が継続中だが、多施設で熟練者から比較的経験の浅い医師までを対象として手術動画収集と手術動画解析 AI の開発と検証というサイクルを回していく。特に、本研究成果の発表により、手術を行う医師から多くのニーズがありすぐにでも使いたいと協力を申し出る医師のフィードバックも複数得ており、本研究の社会実装に手ごたえを感じている。単に経験の浅い術者の教育のみならず、一人で手術を行っている術者がベンチマーキングとして用いることや、高齢になった術者が自らの手術を見直す手段と

しての利用など様々な活用の可能性が示唆された。

一方、高解像度で記録した動画の容量は白内障手術という比較的短い手術であっても通信帯域に負担をかけ、それが、通信費用として上乗せされるなど本格的な社会実装を目指した運用に向けての知見の蓄積も得た。また、情報の保管をクラウドで行うことに対する危惧を持つ医療施設は多く、分散協調学習(federated learning)などデータと一元的に集約しなくともローカルで学習しつつ、複数施設からの学習情報をもとにモデルのみをアップデートする手法の応用についても検討を継続して行っている。それぞれの術者においてこれまでは定性的に特徴を判断することしかできなかつたが、時間および円滑さ、また、動作の緩急を定量的に評価する **proof of concept** を得ることができた。2022 年度はこのような指標の自動抽出機能を作りこみ、手術経験の方に応じてより多くの術者の動画を解析し、熟練度の指標化を試みる予定である。

E. 結論

白内障手術という実証に適したケースで短期間に AI モデルの開発から実証までのサイクルを回すことができつつある。社会実装に向けて小規模ではあるがクラウドサービスを用いることで技術的な面だけでなく運用に向けての知見も得られている。これらの知見は、医療の全領域における医療安全 AI の開発・実証・実装の加速、ひいては厚生労働省の AI 活用施策に大きく貢献する。既に本研究成果の発表により、手術を行う医師から多くのニーズがあることなどフィードバックも複数得ており、本研究の社会実装に手ごたえを感じている。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) B. Wang, L. Li, M. Verma, Y. Nakashima, R. Kawasaki and H. Nagahara. MTUNet: Few-shot Image Classification with Visual Explanations. 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). 2021;2294-2298.
- 2) 三吉 範克, 川崎 良, 江口 英利, 土岐 祐一郎. AI は外科にどこまで役立つか. 大阪大学における AI ホスピタルと消化器外科領域における取組の現状と展望. 外科 2021;83:1153-1159.
- 3) 川崎良. 人工知能を用いた画像解析による白内障手術研究. 眼科手術 2022;35:16-23.

2. 学会発表

- 1) B. Wang, L. Li, M. Verma, Y. Nakashima, R. Kawasaki and H. Nagahara. MTUNet: Few-shot Image Classification with Visual Explanations. 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). June 19-25 (virtual conference).
- 2) 川崎良. 眼科の人工知能:現在と将来 白内障手術 AI. 第 125 回日本眼科学会総会 2021 年 4 月 8-11 日. 大阪.
- 3) 川崎良 眼科×疫学×AI=? 第 125 回日本眼科学会総会 2021 年 4 月 8-11 日. 大阪.

H. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得
申請検討・準備中
2. 実用新案特許
なし
3. その他
なし

表 1. 小切開白内障手術の評価ポイント Modified OSATS

(Paley GL et al. Journal of Surgical Education 2021;78:1077-1088.)

- **手術顕微鏡視野を中心に据えているか？ (microscope centration)**
 - 1：常に顕微鏡を中心に戻したり、また、フォーカスを合わせなおす動作を行っている
 - 3：手術を通じておおむね中心に据えられているが、術中に修正しなおしている
 - 5：常に目が顕微鏡の中心にあり、良好な術野を維持している
- **効率の良い動作をしているか？ (economy of movement)**
 - 1：多くの不必要な動作、不必要な眼内への器具の出し入れを行っている
 - 3：効率の良い時間、動き、エネルギーの使い方を行っているが、ところどころに不必要な動作がある
 - 5：明確な目的を持った動作を行い、眼内での動作やエネルギーの使い方が必要最低限で効率が良い
- **眼組織の扱いが丁寧か？ (Respect for tissue)**
 - 1：不必要な力をしばしば眼組織にかけている、あるいは、器具を不適切に用いることにより組織損傷が起きている
 - 3：眼内組織を慎重に扱っているが、ある状況においては眼組織の歪みや不注意による損傷が起きている
 - 5：つねに慎重に眼組織を扱っており、眼組織の歪みや損傷を引き起こしていない
- **手術工程の流れが円滑か？ (Flow of operation)**
 - 1：手術介入を行う上で、不正確で、未熟な技術である
 - 3：慎重に手術技術を用いているが、ある状況においては誤ることもある
 - 5：すべての手術工程において熟練し、確実に正しい技術を用い、それを良好かつ効果的に行っている。
- **手術器具の扱いが優れているか？ (Instrument Handling)**
 - 1：繰り返し手術器具を暫定的に、あるいは、不適切に動かす。二つ目の器具の使い方がぎこちなく、手術の進行を制限してしまっている
 - 3：手術器具の使用に優れているが、ところどころでぎこちなさや硬さが認められる、二つ目の器具が手術遂行を進めている
 - 5：流れるような手術器具の動作で、ぎこちなさはなく、眼内での動きは必要最低限である、両手の動きが境目なく共同作業がなされている

表 2. CCC 工程における定量指標の比較例

	術者 1	術者 2
CCC 工程時間 (秒)	28.02	39.97
視野安定度指標	0.34	0.13
器具挿入部安定指標	0.29	0.14
先端速度 (ピクセル/秒)		
最大速度	280	205
ピーク数	10	19
150 ピクセル/秒以上のピーク数	3	5
急峻な速度変化	0.66	0.74