

iMAP VISION: 画像解析 AI が実現するカテーテルアブレーション手技支援の新たな可能性

iMAP VISION: A New Possibility for Catheter Ablation Procedure Support with Image Analysis AI

宗像 大輔¹ 杉田 翔哉¹ 宮崎 正浩¹ 調 慧一¹
 森山 翔太郎¹ 古谷 咲乃¹ 上山 剛² 内野 英治³
 Daisuke Munakata¹ Shoya Sugita¹ Masahiro Miyazaki¹ Keiichi Shirabe¹
 Shotaro Moriyama¹ Sakino Furuya¹ Takeshi Ueyama² Eiji Uchino^{3,4}

¹ 山口県立総合医療センター 臨床工学部 ² 山口県立総合医療センター 循環器内科 ³ 山口大学 創成科学研究科 ⁴ 一般財団法人ファジィシステム研究所

概要

心臓カテーテルアブレーション手技における 3D マッピングシステムのエラーは、手技遅延や中断の主要因であり、臨床的・経済的損失に繋がる。術者が膨大なエラーコードと対応策を即座に記憶・実行することは困難であり、特に難治性不整脈症例では対応の遅れが深刻な結果を招くリスクがある。本研究では、この課題に対し、マッピングシステムの画面情報を Optical Character Recognition (OCR) でリアルタイムに読み取り、Retrieval-Augmented Generation (RAG) 技術を用いて過去の類似事例や製品マニュアル、さらに非構造化データ (Word、PowerPoint 等) として存在する施設内ナレッジベースと照合するエラー検知・解決支援システム「iMAP VISION」を開発した。本稿では、iMAP VISION の設計と、画像 (画面キャプチャ) とテキスト情報 (エラーコード、マニュアル、施設内知見) を統合的に処理することでエラー対応時間を短縮し、術者の経験年数による対応差を軽減する臨床的有用性について報告する。

1 はじめに

図 1 に示す 3D マッピングシステムを用いた心臓カテーテルアブレーションは、複雑な不整脈治療に不可欠である。しかし手技中には、図 2 のようなシステムエラーが頻発しうる。これらエラー (例: センサーカテーテル認識不良、ロケーションパッド接続問題) は、術者にトラブルシューティングの負担を強い、患者への負担増大や手技効率低下を招く。特に難治性心房頻拍 (AT) 等の複雑症例では、術者が心内電位解釈に集中すべき状況で、予期せぬエラーが思考を中断させ手技進行を妨げる事態は少なくない。エラーコードは 100 種類を超え、その対応は取扱説明書 (時に 500 ページ超) を参照しても、金属干渉や医療機器の配置、電源環境といった施設固有要因により解決しない場合がある。そのため、対応方法は施設毎に最適化されたローカルルールに依存することも多い。

従来のエラー対応は、表示コードを基にマニュアルを参照するか、経験豊富なスタッフの助言に頼るのが主であったが、エラーの多様性と迅速な判断の困難さから、特に経験の浅い術者には大きな負担となっていた。エラーメッセージの重要度判断も経験に依存する部分が多い。このような背景から、手技中に発生するシステムエラーをリアルタイムで検知し、適切な解決策を迅速に提示することで術者負担を軽減し、手技の安全性と効率性を向上させる支援システムの開発が求められていた。

また、システム上に明確なエラー表示が出現しない「隠れたエラー」も存在する。例えば、高周波アブレーション装置使用時にカテーテル先端の温度が適切に上昇しない場合、システムは特定のエラーコードを表示しないが、これは回路の問題やカテーテル自体の不良を示している可能性がある。このような状況では、システム再起動の要否判断も含めて、術者の経験値に基づく対応が必要となる。一方で、エラーに対する回避方法についても施設固有の知見が蓄積されており、これらの情報を体系化し活用することが重要である。

近年、生成 AI、特に大規模言語モデル (LLM) の応用が期待されるが、誤情報や幻覚 (ハルシネーション) のリスクも指摘されている。本研究はこれらの課題に対応するため、画像とテキスト情報を統合的に解析するリアルタイムエラー検知・解決支援システム「iMAP VISION」を開発し、その臨床的有用性を評価することを目的とした。

2 方法

本研究で開発した「iMAP VISION」は、マッピングシステムのモニター映像出力を分配器で分岐しリアルタイムに解析する。システムはバックグラウンドで常時稼働し、OCR 技術で画面上のエラーメッセージを自動認識・抽出する。

図 3 に示すように、認識エラーメッセージに対し、システムは主に以下 3 機能を提供する。

- **エラー重要度分類:** 認識エラーを手技影響度 (例: 致命的、重要、警告、情報) に基づき事前定義基準で即座に分類・提示する。これにより術者は対応優先度を迅速に判断できる。
- **解決策の提示:** 分類エラーに対し、標準マニュアルに基づく解決手順やヒントをテキスト、写真、短い動画形式で提示する。
- **施設固有ナレッジベース (RAG) の活用:** 図 4 に示すように、各施設で過去に経験したエラー事例と解決策 (テキスト、画像、動画等) をナレッジベースとして蓄積・管理する。このナレッジは Word、Excel、PowerPoint 等の非構造化データから構築され、エンベディング処理後ベクタースタに格納する。新規エラー発生時、この施設固有データベースを RAG 技術 [1, 2, 3] で検索し、類似過去事例に基づく最適解や注意点を提示する。これにより標準マニュアルでは対応困難な施設特有問題にも対応可能となる。エラーメッセージと関連画像情報を照合し、類似状況特定による高精度な対応策提示を目指す。

有用性評価のため前向き比較試験を実施。本システム導入前（対照群 20 症例）と導入後（介入群 20 症例）で、エラー表示から解決までの時間を主要評価項目として比較した。

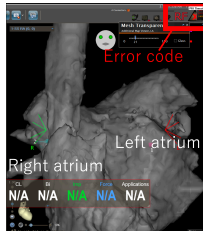


図 1 マッピングシステム操作画面

メッセージ	対応
エラー 1 No communication with PII detected.	PII との通信が検出されません。 解消するまで、次の操作を行いません。
エラー 2 PII が電源に正しく接続されていることを確認してください。	1. PII が電源に正しく接続されていること、電源が ON になっていることを確認します。 2. 1. 分間待って、PII が起動プロセスを完了したことを確認します。
エラー 3 ワークステーションと PII がケーブルで正しく接続されていることを確認してください。	3. ワークステーションと PII がケーブルで正しく接続されていることを確認します。
エラー 4 PII の電源スイッチを一息 OFF にしてから ON にし、PII とワークステーション間に通信が確立されるまで数分待ちます。	4. PII の電源スイッチを一息 OFF にしてから ON にし、PII とワークステーション間に通信が確立されるまで数分待ちます。

図 2 マッピングシステムのエラーコード及び対応策

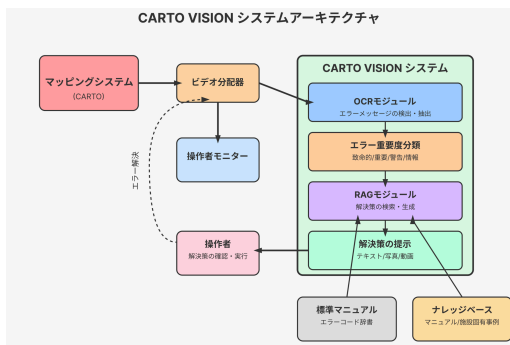


図 3 iMAP VISION システムの概略図

3 結果

経験の浅い術者（臨床経験 1 年未満）のエラー解決時間は、対照群 8.4 分から介入群 2.1 分へと有意に短縮され ($p < 0.001$)、熟練者（臨床経験 10 年以上）の 4.2 分を上回る成績であった。この時間短縮効果は、センサーカテーテルエラーやロケーションパッドエラー等の重要度の高いエラーで特に顕著であった。

介入群の術者からは「iMAP VISION がエラー監視を担うため、不整脈解析に集中できる」との評価を得た。エラー対応時間は対照群で経験差による影響が大きかったが、介入群では初学者も熟練者と同等の迅速な対応が可能となった。

本システムは、エラーメッセージの常時解析と解決策の自動提示により、初学者でも問題の重篤度を迅速に把握し適切な対応を可能にすることで、学習曲線の短縮に寄与することが示唆された。さらに、従来は経験に依存していた「隠れたエラー」への対応についても、システムが過去の類似事例を提示することで、より体系的なトラブルシューティングが可能になった。

4 考察

本研究で開発した画像 AI 解析に基づくリアルタイムエラー検知・解決支援システム「iMAP VISION」は、カテーテルアブレーション手技におけるマッピングシス

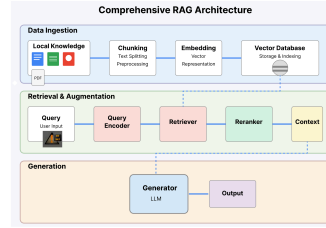


図 4 RAG 概略図

ムのエラー対応時間を有意に短縮し、手技の効率化と安定化に寄与することが示された。特に、対応遅延が手技中断に直結しうる重大エラーへの迅速な対応は臨床的意義が大きい。

本システムの強みは、リアルタイムでのエラー検知・重要度分類、標準的解決策提示に加え、RAG 技術による施設固有ナレッジベース（非構造化データ含む）の活用にある。各施設の経験に基づく実践的解決策（テキスト、写真、動画形式）を蓄積・共有することで、より状況に応じた最適な対応が可能となり、これは標準マニュアルのみでは得られない大きな利点である。また、経験の浅い術者が熟練者と同等のエラー対応を迅速に行えるようになることは、教育的側面からも有用であり、トレーニング期間短縮やヒューマンエラー低減に貢献しうると考えられる。

特に注目すべきは、システムが明確なエラー表示のない状況にも対応できる点である。高周波アブレーション時の温度上昇不良のような「隠れたエラー」に対しても、過去の類似事例との照合により適切な対応策を提示することで、術者の負担軽減と手技の安全性向上に寄与している。

本研究結果は、iMAP VISION がカテーテルアブレーションのワークフロー改善に有効なツールであることを示唆している。今後の展望として、本システムをエラー対応支援に留めず、術者の手技操作自体をリアルタイム解析し最適なカテーテル操作や設定変更を提案する、より高度な術中インテリジェントアシスタントシステムへと発展させることを目指したい。初学者から熟練者まで全術者にとって直感的で使いやすい（ユーザーフレンドリーな）インターフェースを備え、より安全で質の高いアブレーション治療実現に貢献するシステム構築が今後の重要課題である。

参考文献

- [1] Philip Adejumo, Phyllis Thangaraj, Sumukh Vasisht Shankar, Lovedeep Singh Dhingra, Arya Aminorroaya, and Rohan Khera. Retrieval-augmented generation for extracting cha2ds2-vasc risk factors from unstructured clinical notes in patients with atrial fibrillation. *medRxiv*, pages 2024-09, 2024.
- [2] Patrick Lewis, Ethan Perez, Aleksandra Piktus, Fabio Petroni, Vladimir Karpukhin, Naman Goyal, Heinrich Kuttler, Mike Lewis, Wen-tau Yih, Tim Rocktäschel, et al. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks. *arXiv preprint arXiv:2005.11401*, 2021.
- [3] Chin Siang Ong, Nicholas T Obey, Yanan Zheng, Arman Cohan, and Eric B Schneider. Surgeryllm: a retrieval-augmented generation large language model framework for surgical decision support and workflow enhancement. *npj Digital Medicine*, 7(1):364, 2024.