

Artigo: Tecnologia de Endoscopia por Cápsula: Uma Nova Era no Exame do Trato Digestivo

Autores *:Kang-ming Huang¹, Hua-bin Qiu² Yinghan Deng¹, Lian-hui Wu¹ Hong-bin Chen¹,

(1) Departamento de Gastroenterologia, Primeiro Hospital Sanming, Fujian Universidade Medicina, Sanming, China

(2) Departamento de Endoscopia Gastrointestinal, Primeiro Hospital Sanming, Universidade Medicina de Fujian, Sanming, China

Publicado: 30/12/2024 Digest Endosc 2024;15:243–249.

Endereço para correspondência: Hong-bin Chen, MD, Departamento de Gastroenterologia, Primeiro Hospital Sanming, Universidade Médica de Fujian, Nº 29, Dongxin 1st Road, Ledong Street, Sanming City 365000, China (e-mail: smchb2008@qq.com).

Resumo

A endoscopia por cápsula (EC) representa um importante avanço inovador nos exames gastrointestinais (GI), distinguindo-se por sua natureza não invasiva, indolor e conveniente, e rapidamente se estabeleceu como uma ferramenta crucial para o diagnóstico e tratamento de doenças digestivas. Com o desenvolvimento da inteligência artificial (IA) e do aprendizado de máquina (AM), à medida que a IA e o AM progredem, as capacidades da EC expandiram-se para além da mera obtenção de imagens do trato gastrointestinal; estão evoluindo progressivamente para abranger procedimentos como biópsias e administração direcionada de medicamentos.

Esta revisão pesquisou sistematicamente em cinco repositórios respeitáveis — Scopus, PubMed, IEEE Xplore, ACM Digital Library e ScienceDirect — todas as publicações originais sobre EC de 2001 a 2024.

A revisão fornece uma visão geral do status atual e das limitações identificadas da EC, destacando o papel significativo que a IA e o AM deverão desempenhar em seu desenvolvimento futuro.

Palavras-chave

- ▶ endoscopia por cápsula
- ▶ resistência
- ▶ transmissão de imagens
- ▶ avanços em inteligência artificial
- ▶ limitação

Esses autores contribuíram igualmente para este trabalho e compartilham a primeira autoria.

© 2024. O(s) Autor(es).

Este é um artigo de acesso aberto publicado pela Thieme sob os termos da Licença de Atribuição Creative Commons, permitindo uso, distribuição e reprodução irrestritos, desde que o trabalho original seja devidamente citado. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Thieme Medical and Scientific Publishers Pvt. Ltd., A-12, 2º andar, Setor 2, Noida-201301 UP, Índia Artigo de Revisão THIEME 243. Artigo publicado online: 30/12/2024

Introdução

No passado, o diagnóstico e o tratamento de doenças do intestino delgado eram inconvenientes devido à falta de ferramentas que pudessem examinar o intestino delgado (ID)¹ Desde o surgimento da endoscopia por cápsula (EC) do (ID) em 2001, essa situação mudou².

Este procedimento inovador e não invasivo oferece clareza incomparável na observação do revestimento mucoso do IB, tudo sem expor os pacientes à radiação.³ A EC se destaca por sua natureza não invasiva, pela possibilidade de uso repetido e por seu alto grau de tolerância pelo paciente. Olhando para o futuro, a fusão da EC com os avanços da inteligência artificial (IA) deverá elevar sua importância no diagnóstico e tratamento gastrointestinal (GI), anunciando a chegada de uma nova era na medicina de precisão.^{4,5}

Os esforços de pesquisa atuais estão focados na integração da IA para aprimorar a interpretação de imagens, simplificar a duração da análise e reduzir a probabilidade de erro humano. Além disso, devido à integração da IA, a EC obteve certos progressos em áreas como transmissão de imagens, duração da bateria, motilidade intestinal e sistemas de administração direcionada de medicamentos. Este artigo irá aprofundar as potenciais aplicações da IA na EC.

Aplicação de IA no Preparo do Trato Gastrointestinal antes da Cápsula Endoscópica

Atualmente, não foi estabelecido um padrão unificado para a medicação ideal para limpeza intestinal antes da EC.⁶ A qualidade do preparo intestinal é fundamental, pois influencia diretamente a qualidade do exame e a precisão dos resultados diagnósticos.

Estudos atuais comparam os efeitos da ingestão de 2 L de solução de polietilenoglicol (PEG) na noite anterior ao exame, 5 mL de simeticona 20 minutos antes do exame e 5 mg de metoclopramida. O grupo controle não consumiu alimentos sólidos após as 19h do dia anterior à EC e não consumiu alimentos líquidos 4 horas antes da EC. Contrariamente aos resultados da pesquisa mencionados anteriormente, não houve diferença significativa na visualização e na taxa de conclusão entre o grupo de observação e o grupo controle. Em vez disso, aumentou o desconforto dos pacientes⁷ e isso está na mesma linha de um resultado publicado recentemente por Estevinho et al., cujos achados mostraram que pacientes submetidos ao preparo intestinal na noite anterior ao exame apresentaram pior visualização, campo de visão diagnóstico e taxa de detecção de vasodilatação.⁸ Além disso, outros estudos relataram que o preparo intestinal purgativo pode não ser superior às dietas com líquidos claros.^{7,9}

A partir dos resultados do estudo atual, o preparo intestinal com laxantes antes da colonoscopia melhora a visualização e as taxas de detecção da colonoscopia. No entanto, ainda é necessário investigar mais a fundo se o preparo intestinal com 4 ou 2 L de PEG antes da EC pode melhorar a visualização e as taxas de detecção do exame.

Portanto, futuros estudos multicêntricos randomizados e controlados com tamanhos de amostra adequados, definições validadas de resultados diagnósticos e qualidade visual, protocolos padronizados para o preparo intestinal e populações homogêneas de pacientes são necessários, e atenção deve ser dada à tolerabilidade do paciente. Com a crescente aplicação da IA na área da EC, os padrões para avaliar a limpeza intestinal em imagens de EC tornaram-se mais unificados e eficientes. Isso é de grande importância para a melhoria contínua da qualidade da limpeza intestinal. A IA foi integrada para aprimorar a avaliação dos escores de limpeza intestinal, crucial para imagens de alta qualidade do trato gastrointestinal por EC.

Diversas escalas foram desenvolvidas para classificar o preparo intestinal para EC; no entanto, sua aplicação é limitada devido à baixa concordância inter-observador. Mascarenhas Saraiva et al.¹⁰ treinaram uma rede de aprendizado profundo em 35.269 quadros de mucosa colônica e desenvolveram um algoritmo de aprendizado profundo capaz de avaliar a qualidade do preparo intestinal com sensibilidade de 91%, especificidade de 97% e uma taxa de acurácia geral de 95%.

Esse algoritmo possui boa capacidade discriminativa, crucial para a aplicação futura da EC. Atualmente, devido a inconsistências no julgamento humano de imagens de EC, há certa variação nos resultados da leitura dessas imagens. Ju et al.¹¹ compararam os julgamentos de cinco gastroenterologistas com os de um sistema de IA. Ao avaliar a limpeza das imagens intestinais, os julgamentos dos cinco especialistas em gastroenterologia foram diversos, enquanto os julgamentos da IA foram consistentes.

Ribeiro et al.¹² projetaram uma Rede Neural Convolucional (CNN-CONVULSIONAL NEURAL NETWORK)) com base em 12.950 imagens de EC obtidas de dois centros clínicos no Porto, Portugal. A qualidade do preparo intestinal para cada imagem foi classificada como: excelente, com mucosa visível em > ou = 90% da superfície da imagem; satisfatória, com 50 a 90% da mucosa visível; e insatisfatória, com <50% da mucosa visível.

Os resultados preditivos da CNN foram comparados com a classificação estabelecida pelo consenso de três especialistas em EC, atualmente considerada o padrão ouro para avaliação da limpeza. Este algoritmo alcançou uma precisão geral de 92,1%, com sensibilidade de 88,4%, especificidade de 93,6%, valor preditivo positivo de 88,5% e valor preditivo negativo de 93,4%, comprovando sua capacidade de classificar com precisão o preparo intestinal para EC.

Duração da Cápsula Endoscópica

O tempo de uso da EC é um pré-requisito para seu desempenho. De acordo com um estudo de Ou et al.,¹³ aumentar a vida útil da bateria do dispositivo pode ser uma maneira eficaz de aumentar a taxa de conclusão do procedimento. Normalmente, os dispositivos de EC têm um tempo de operação que varia entre 8 e 15 horas.¹⁴ Ao avaliar diferentes tipos de endoscópios de cápsula, fatores como duração da bateria, contagem de pixels, frequência de imagem, tamanho da cápsula, tecnologia de recepção e campo de visão são cruciais para determinar a taxa de conclusão do diagnóstico e a avaliação do campo de visão (► Tabela 1). A vida útil da bateria é crucial, pois pode limitar a duração

dos procedimentos de EC, com 16,5% dos exames sendo interrompidos devido ao esgotamento da bateria.¹⁵ Uma abordagem inovadora poderia envolver o desenvolvimento de uma bateria autossustentável. Essa bateria exploraria a energia do sistema digestivo, potencialmente transformando fluidos gástricos em uma fonte contínua de eletrólitos, prolongando significativamente sua durabilidade.^{16,17}

Apesar disso, ela também enfrenta um grande obstáculo: a questão da baixa potência de saída. Um estudo recente de Ilic et al.¹⁸ apresentou uma bateria recarregável comestível composta de ingredientes e aditivos alimentares comuns. Um projeto de bateria emergente utiliza reações redox para energizar dispositivos, mas ainda tem dificuldades em fornecer densidade de energia suficiente.

Para acompanhar a evolução das necessidades da EC, pesquisas estão explorando a transferência de energia sem fio como uma solução potencial, aproveitando ondas eletromagnéticas para fornecer uma fonte de energia estável.¹⁹ Pesquisadores futuros poderão usar uma solução oral para aumentar a durabilidade das baterias de cápsula.

Localização e Movimento da Cápsula Endoscópica

De fato, o movimento de um CE através do trato gastrointestinal é tipicamente passivo, dependendo de ações peristálticas naturais para impulsionar o dispositivo. Esse método, no entanto, pode levar a áreas obscurecidas, aumentando potencialmente a probabilidade de diagnósticos não detectados. Para neutralizar isso, dispositivos de CE com movimento ativo controlado foram projetados, permitindo o movimento direcionado da cápsula.^{20,21}

Em seguida, pesquisas extensas foram conduzidas sobre a integração de módulos funcionais à CE ativa para expandir as capacidades dessa tecnologia, incluindo biópsia, administração de medicamentos e tatuagem (marcação de áreas específicas dentro do trato intestinal).^{22,23} A nova cápsula endoscópica para tatuagem (TCE) em estudo foi projetada para administração de tinta submucosa aos órgãos digestivos, servindo como um marcador suplementar para locais cirúrgicos.²⁴

Esta pesquisa alcançou o movimento ativo e multidirecional da CE utilizando a interação entre um campo magnético controlado externamente e um ímã permanente dentro do sistema. A equipe de pesquisa usou segmentos frescos de intestino de porco para testar o TCE proposto in vitro e descobriu que ele poderia guiar o TCE até o alvo e injetar o agente de tatuagem no tecido.

O controle do campo magnético apresenta um caminho altamente promissor. O sistema de atuação magnética consiste em uma cápsula feita de material magnético,²⁵ que pode ser formada pela mistura de pó magnético de neodímio-boro-ferro com resina de silicone,²⁶ ou pela modificação da cápsula com material magnético em uma das extremidades. O movimento dessa cápsula modificada é direcionado por uma fonte magnética externa, posicionada além da superfície do corpo.²⁷ Esse campo magnético é produzido por dispositivos como um ímã permanente portátil ou um braço robótico, bem como eletroímãs capazes de variar a intensidade do campo magnético.

Tabela 1 Parâmetros de diferentes cápsulas endoscópicas

Brand/manufacturer	Battery life	fps	Optical angle	Clarity/resolution	Size	Reception technology
Israel Given Imaging (under Medtronic)	7 ± 1 h (PillCam partial models of a series)	14	140 deg	256 × 256 pixels	11 × 26 mm (diameter × length)	Wireless power transfer
Korea InroMedic	Over 11 h	3	170 deg	320 × 320 Pixels	11 × 24 mm	Human body communication technology
Olympus	Over 10 h	Adjustable	160 deg wide angle	3,968 × 2,974 pixels	11 × 26 mm	Wireless power transfer
Ankon Technologies Co. Ltd	6-8 h	2	100 deg	480 × 480 Pixels	27 × 11,8 mm	Magnetic control Technology
Jinshan Technology Group Co., Ltd.	Exceeding 10 h (OMOM capsule endoscopy)	2-5	170 deg	512 × 512 Pixels	13 × 27,9 mm	Wireless power transfer
Shenzhen Jifu Medical Technology Co., Ltd	6-8 h	4	145 deg ultra-wide field of view	Patented trilens, high resolution	17 × 11,8 mm	Macro photography, wireless image transmission technology
CapsoVision	15-19 h	12-20	360 deg panoramic side view	-	11,5 × 26 mm	Human body communication technology data transmission system

O campo magnético gera forças rotacionais e translacionais, permitindo movimento, controle de velocidade, orientação, posicionamento e imagens precisas.²⁸ Tecnologias alternativas, incluindo ressonância magnética (RM), tomografia computadorizada, ultrassom, raio-X, imagem de raios gama, podem potencialmente auxiliar no posicionamento da cápsula. No entanto, sua integração com a CE é desafiadora devido à necessidade de imagens sustentadas durante todo o procedimento, que pode se estender por até 8 horas.

Ao avaliar essas tecnologias, vários fatores devem ser levados em consideração. A precisão do posicionamento é importante, mas não o único indicador. Por exemplo, embora métodos baseados em radiação, como ressonância magnética e raio-X, forneçam altos níveis de precisão, a execução desses métodos por períodos prolongados não é viável e o risco de exposição à radiação é indesejável. Deve-se observar que a endoscopia por cápsula controlada magneticamente (ECMC) também tem suas limitações. As evidências clínicas para a detecção de lesões gástricas, especialmente câncer gástrico, ainda são limitadas²⁹

Ela não apresenta as vantagens da endoscopia tradicional na detecção de fluidos gástricos, na realização de biópsias de lesões ou na realização de tratamentos endoscópicos.

A MCCE com capacidade para biópsia está atualmente em fase de pesquisa de aplicação pré-clínica. Em comparação com a endoscopia tradicional, a MCCE requer mais tempo para examinar o trato gastrointestinal, tem requisitos mais elevados para o preparo gastrointestinal e incorre em custos de exame mais elevados

Os avanços nos algoritmos de IA aprimoraram significativamente as capacidades da localização por vídeo no campo da imagem gastrointestinal. Essa tecnologia capitaliza as mudanças dinâmicas, como distorções, curvas e variações de forma, presentes nos dados visuais do trato gastrointestinal. Ao contrário de algumas outras técnicas, a localização por vídeo não precisa de dispositivos adicionais para um melhor posicionamento; ela funciona analisando os quadros brutos do vídeo.

Existem dois tipos principais de localização por vídeo: segmentação topográfica de vídeo e estimativa de movimento. 30 A segmentação topográfica de vídeo utiliza recursos de imagem como cor, textura e movimento para segmentar o vídeo em diferentes áreas específicas de cada órgão, o que auxilia na localização precisa.^{31,32}

A estimativa de movimento, baseada na odometria visual (VO),³³ determina a localização exata analisando como as características dos pontos mudam entre os quadros capturados pela câmera da cápsula. Este método para localização por endoscopia de cápsula sem fio (WCE) foi inicialmente proposto por Iakovidis et al., que utilizaram uma estrutura de análise de vídeo baseada em Java para acelerar o desenvolvimento de ferramentas inteligentes de análise de vídeo. Melhorias posteriores incluíram o uso de redes neurais artificiais para impulsionar o método de VO, aprimorar cálculos geométricos e aumentar a precisão do posicionamento.³⁴

A OV não apenas localiza a cápsula, mas também fornece informações direcionais calculando o movimento e a rotação de pontos específicos nos quadros de vídeo. No entanto, confiar apenas no posicionamento baseado em vídeo pode não atender às necessidades de precisão da localização WCE, e a baixa taxa de quadros da transmissão de vídeo, juntamente com a velocidade de reconhecimento de imagem, pode resultar em atrasos significativos.

Transmissão de Imagens

Através do peristaltismo do trato gastrointestinal, a cápsula atravessa o trato gastrointestinal, capturando e enviando imagens sem fio para um dispositivo de armazenamento usado pelo paciente. Ele opera por aproximadamente 8 horas, capturando imagens a uma taxa de 35 quadros por segundo.³⁵ Para reduzir o consumo de energia e resolver o gargalo da largura de banda da comunicação sem fio, em 2010, um estudo³⁶ apresentou um método de codificação de vídeo de baixa complexidade baseado na teoria de Wyner-Ziv, que foi aplicado à transmissão de imagens em endoscópios de cápsula.

Ao transferir processos complexos de codificação de vídeo (como estimativa de movimento) para o lado do receptor, o processo de codificação no transmissor foi simplificado. Este método de codificação alcançou resultados de compressão sem perdas usando apenas 30% dos dados da imagem de vídeo original quando a relação sinal-ruído do canal atingiu 3 dB. Além disso, as vantagens deste método de codificação foram confirmadas por meio de uma comparação com o padrão JPEG.

Vários estudos se concentraram nos sucessores da WCE que capturam imagens no formato Bayer, reduzindo assim o volume de dados para um terço.³⁷ No entanto, com o rápido desenvolvimento da tecnologia de sensores de imagem, as imagens capturadas no modo Bayer com altas taxas de quadros, boa qualidade e alta resolução ainda excedem a largura de banda do transmissor. Muitos métodos de compressão de imagem para o formato Bayer foram propostos para alcançar um desempenho de compressão mais alto.³⁸

No entanto, esses métodos permitem que algumas informações contidas na imagem original sejam perdidas, levando a erros. Existem também métodos de compressão sem perdas e de alta qualidade baseados em transformações estruturais.³⁹⁻⁴² No entanto, suas altas demandas computacionais os tornam inadequados para endoscopia sem fio. Além disso, esses métodos envolvem compressão multicanal, aumentando os requisitos de hardware e os custos.

A CE geralmente usa radiofrequência para transmissão de dados, que é categorizada com base na frequência em bandas baixa, alta, intermediária e de micro-ondas. Embora a baixa frequência seja fácil de projetar e apresente excelente desempenho em termos de penetração cortical, sua dependência de componentes eletrônicos maiores dificulta o processo de miniaturização da CE.

A maioria dos dispositivos comerciais de CE utiliza comunicação de dupla frequência, tipicamente em torno de 400 MHz. No entanto, a largura de banda do canal de 300 kHz permitida por essa faixa de frequência apresenta desafios significativos no fornecimento das taxas de dados necessárias para a transmissão de vídeo de alta qualidade em tempo real.

Essas limitações tornam as tecnologias de transmissão em banda estreita cada vez mais inadequadas para acompanhar os avanços na tecnologia da CE. A comunicação em banda ultralarga,^{43,44} capaz de transmitir dados a velocidades superiores a 100 Mb/s, melhora significativamente a qualidade do vídeo e reduz o consumo de energia, tornando-a uma escolha ideal para pesquisas emergentes sobre interfaces sem fio da CE.

Aplicação da Inteligência Artificial na Cápsula Endoscópica

Revisão da Cápsula Endoscópica Assistida por IA

Sabemos que em cada exame de CE, pode haver até 50.000 imagens, mas apenas uma ou duas delas são significativas. A produção de um laudo de imagem leva 30 minutos. Durante esse período, o laudo pode sofrer de desatenção, o que pode aumentar a taxa de diagnósticos perdidos. Para superar as limitações do laudo e economizar tempo, vários modos de visualização baseados em IA podem ser usados na plataforma CE atual.⁴⁵

O modo de ajuste, o modo de visualização automática e o omnimode são programas que analisam imagens sobrepostas e ajustam a velocidade de reprodução ou descartam quadros redundantes. Infelizmente, em comparação com o modo de visualização mais lento, a taxa de diagnósticos perdidos de algumas lesões chega a 12% ao usar o modo de visualização mais rápido.⁴⁶ Em conclusão, atualmente, o software de IA atual tem pouco efeito no custo e no tempo de visualização.

No entanto, alguns estudos demonstraram que a aplicação do sistema CNN de aprendizado profundo ao processo de leitura da CE pode reduzir o tempo de leitura sem reduzir a taxa de detecção de lesões erosivas e ulcerativas.⁴⁷⁻⁴⁹ No futuro, a IA precisará se basear mais em aprendizado profundo para melhorar a economia de tempo e reduzir diagnósticos perdidos.

De fato, a IA não apenas ajuda a melhorar a eficiência e a precisão da leitura de filmes,^{4,50} mas também pode auxiliar na identificação precoce de alterações tumorais. Por exemplo, no campo da esofagologia, a principal aplicação da IA tem sido na detecção de displasia e tumores esofágicos. O esôfago de Barrett é uma condição pré-cancerosa para adenocarcinoma esofágico.⁵¹

No entanto, endoscopistas podem não detectar 25% das lesões de displasia de alto grau e adenocarcinoma esofágico no esôfago de Barrett. De Groof et al.⁵² utilizaram um grande banco de dados com quase 500.000 imagens do esôfago de Barrett para desenvolver um sistema de detecção assistida por computador (CADE) que alcançou uma taxa de precisão de 89% na detecção de tumores precoces em pacientes com esôfago de Barrett, superando todos os 53 endoscopistas incluídos no estudo.

Da mesma forma, no estômago, Luo et al.⁵³ conduziram um grande estudo multicêntrico prospectivo de caso-controle usando IA para comparar e aprender com mais de 1 milhão de imagens de 84.424 pacientes. Eles desenvolveram um sistema de diagnóstico assistido por computador que não apenas obteve bons resultados na distinção de lesões benignas, mas também ajudou a determinar a profundidade da invasão.^{54,55}

Isso é de grande importância para o tratamento subsequente de tumores. Pesquisadores⁵⁶ também têm utilizado IA para a detecção de lesões de esôfago de Barrett, treinando sistemas de IA em um grande número de imagens para formar um sistema CADe para identificar e diagnosticar doenças do intestino delgado. Esses avanços demonstram o potencial da IA no aprimoramento do processo diagnóstico de doenças gastrointestinais, oferecendo uma análise mais precisa e eficiente dos extensos dados de imagem produzidos pela CE.

Além disso, a detecção de pólipos e tumores também é um objetivo importante dos exames de CE que utilizam sistemas CADe. Os pólipos exibem cor e textura semelhantes ao tecido de fundo, tornando-os mais difíceis de detectar em comparação com úlceras e lesões vasculares, que são visualmente mais distintas.

A taxa de falha para pólipos do intestino delgado é maior.⁵⁷ Até o momento, a precisão dos métodos de *machine Learning (ML)* e *deep learning* é relativamente menor quando comparado com outros tipos de lesões. Apesar desses desafios, vários grupos de pesquisa estão aplicando novos métodos de *deep learning* para melhorar a detecção de tumores do intestino delgado.³⁰

Endoscopia

Sangramento gastrointestinal inexplicável é a indicação mais comum para CE. Os primeiros sistemas usando CADe para sangramento dependiam das informações de (ML) *Machine Learning* com extração manual. Relata-se uma precisão de 81 a 98% para algoritmos baseados em ML, embora o desempenho no mundo real provavelmente seja diferente.³⁰

Diversas investigações utilizaram ML, CNN e algoritmos computacionais para discernir angioectasias intestinais, alcançando sensibilidade e especificidade notáveis.⁵⁸⁻⁶¹ Além disso, a IA facilita a avaliação do sangramento da mucosa intestinal durante a CE, estimando os níveis sanguíneos no trato digestivo, deduzindo assim a presença de sangramento ativo no revestimento do intestino delgado.⁶²⁻

64

Para úlceras do intestino delgado, a taxa de precisão inicial da tecnologia de ML na identificação de úlceras ficou entre 89,5 e 95,4%.³⁰ A CADe de úlceras evoluiu nos últimos 15 anos, embora a sutileza visual das úlceras represente um desafio em comparação com lesões francamente vermelhas ou que sangram.

Embora erosões e úlceras sejam processos patológicos relacionados, elas são visualmente distintas e, para algoritmos de IA, agrupá-las de forma confiável representa um desafio. Em 2011, Pan et al. desenvolveram uma CNN para detectar imagens com sangramento usando recursos de cor e textura. Este estudo utilizou um total de 150 vídeos completos de CE, 3.172 imagens com sangramento e 11.458 imagens sem sangramento para testar o algoritmo, alcançando sensibilidade e especificidade de 93,1 e 85,6%, respectivamente, no nível da imagem.

Em 2018, Fan et al. treinaram uma CNN com um conjunto de treinamento composto por 3.250 imagens de úlcera e 4.910 imagens de erosão para distinguir entre erosões e úlceras, respectivamente. Utilizando endoscopia especializada como padrão-ouro, eles alcançaram sensibilidades de 96,8 e 93,67% e especificidades de 94,79 e 95,98%⁶⁶.

Tabela 2 Resumo dos estudos na revisão de literatura sobre aplicação de IA em endoscopia por cápsula

Author and ref. no.	Field	Year of publication	Country	Research methods/ technology	Conclusion
Daniel and Rana ²⁵	Capsule Motility	2020	India	Magnetically assisted	Magnetic control capsule motility
Mascarenhas Saraiva et al ¹⁰	Bowel Preparation	2023	UK	Retrospective study	Improving intestinal preparation evaluation standards
Ju et al ¹¹	Bowel preparation	2023	Korea	Control study	AI evaluation bowel is superior to human evaluation
Ribeiro et al ¹²	Bowel preparation	2023	Portugal	Deep learning	The deep learning algorithm can be used to classify the quality of bowel preparation
Hosoe et al ⁴⁵	Image	2016	Japan	Randomized	The reading time has significantly decreased
Kyriakos et al ⁴⁶	Reading	2012	Greece	Controlled trial	The reading frequency that can be safely substituted for slower models in clinical practice was determined
Hwang et al ⁴⁷	Image reading	2021	Korea	Control study	Improving the detection rate of small lesion and ulcers using convolutional neural
Otani et al ⁴⁸	Lesion detection	2020	Japan	Control study	AI can diagnose small intestinal disease
Aoki et al ⁴⁹	Lesion detection	2020	Japan	Deep learning	Reduce the reading time
de Groof et al ⁵²	Image reading	2020	The Netherlands	Deep learning	Improve early detection of Barrett's esophagus
Cho et al ⁵⁴	Lesion detection	2019	Korea	Machine learning	Distinguish between benign and malignant lesions
Ueyama et al ⁵⁵	Lesion detection	2021	Japan	Deep learning	Improve the diagnostic identification lesion detection n rate of early gastric cancer
Cardoso et al ⁵⁶	Lesion detection	2022	Portugal	Control study	Enhancing lesion detection efficiency
Tsuboi et al ⁶¹	Lesion detection	2020	Japan.	Deep learning	Small bowel angioectasia
Fan et al ⁶⁶	Lesion detection	2018	China	Deep learning	Detect small intestinal ulcer and erosion

Adicionalmente, a IA tem suas limitações; por exemplo, ela não superou endoscopistas experientes na realização de diagnósticos finais para pacientes individuais. Portanto, a IA serve principalmente para auxiliar endoscopistas e melhorar sua eficiência no trabalho. Além disso, é improvável que a IA substitua o olho humano, já que os humanos são os responsáveis finais pelo relatório endoscópico final.⁵

No futuro, a IA, por meio de um aprendizado mais aprofundado, poderá refletir e resolver os seguintes problemas por meio da barra de cores do tecido da CE:

(1) se toda a detecção de SB está completa; (2) ajuda o examinador a informar com precisão o paciente sobre a junção do jejuno e do íleo; (3) indicação precisa da papila duodenal e da válvula ileocecal; (4) indicação precisa de lesões suspeitas; e (5) remoção de modelos de relatório da linguagem controversa da CE (por exemplo, incapacidade de informar ao paciente onde o jejuno e o íleo são demarcados) (► Tabela 2).

Conclusão

A evolução da tecnologia de CE tem sido notável, transitando de uma capacidade inicial de mera obtenção de imagens dentro do intestino delgado para as atuais cápsulas magnéticas que podem atravessar ativamente o trato gastrointestinal. O futuro promete uma expansão do papel da CE para incluir biópsias e intervenções terapêuticas. Espera-se que a aplicação da IA aumente a precisão diagnóstica e diminua a incidência de diagnósticos negligenciados. Embora a exploração do potencial da CE ainda esteja confinada principalmente a modelos suínos ou tratos GI ex vivo, suas perspectivas clínicas são encorajadoras. Para aproveitar totalmente o potencial da CE em ambientes clínicos, é imperativo refinar o desempenho das tecnologias inteligentes de CE e apreciar os benefícios da convergência tecnológica interdisciplinar.

Contribuições dos Autores

K.-m.H. e H.-b.C. iniciaram o desenho do estudo, K.-m.H.Y.D. e H.-b.Q. são responsáveis pela coleta de artigos originais e pela redação dos artigos, enquanto H.-b.C. e L.-h.W. são responsáveis pela revisão da qualidade dos artigos e pela calibração do inglês.

Fonte de Apoio Nenhuma.

Conflito de Interesses Nenhum declarado.

Referências

- 1 Fornaroli F, Gaiani F, Vincenzi F, et al. Applications of wireless capsule endoscopy in pediatric age: an update. *Acta Biomed* 2018; 89(9-S, 9-s):40–46
- 2 Lewis BS, Swain P. Capsule endoscopy in the evaluation of patients with suspected small intestinal bleeding: results of a pilot study. *Gastrointest Endosc* 2002;56(03):349–353
- 3 Pal P, Banerjee R, Gupta R, Reddy PM, Reddy DN, Tandan M. Capsule endoscopy in inflammatory bowel disease: a systematic review. *J Dig Endosc* 2023;14:149–174

- 4 Meher D, Gogoi M, Bharali P, Singh SP, Anirvan P. Artificialintelligence in small bowel endoscopy: current perspectives and future directions. *J Dig Endosc* 2020;11(06):
- 5 Haslach-Häfner M, Mönkemüller K. Reading capsule endoscopy:why not AI alone? *Endosc Int Open* 2023;11(12):E1175–E1176
- 6 Choi CW, Lee SJ, Hong SN, et al. Small bowel capsule endoscopy within 6 hours following bowel preparation with polyethylene glycol shows improved small bowel visibility. *Diagnostics (Basel)* 2023;13(03):469
- 7 Hansel SL, Murray JA, Alexander JA, et al. Evaluating a combined bowel preparation for small-bowel capsule endoscopy: a prospective randomized-controlled study. *Gastroenterol Rep (Oxf)* 2019; 8(01):31–35
- 8 Estevinho MM, Sarmento Costa M, Franco R, et al. Preparation Regimens to Improve Capsule Endoscopy visualization and diagnostic yield (Prep RICE); a multicentric randomized trial. *Gastrointest Endosc* 2024:S0016-5107(24)03358-3
- 9 Hookey L, Louw J, Wiepjes M, et al. Lack of benefit of active preparation compared with a clear fluid-only diet in small-bowel visualization for video capsule endoscopy: results of a randomized, blinded, controlled trial. *Gastrointest Endosc* 2017;85(01):187–193
- 10 Mascarenhas Saraiva MJ, Afonso J, Ribeiro T, et al. AI-driven colon cleansing evaluation in capsule endoscopy: a deep learning approach. *Diagnostics (Basel)* 2023;13(23):3494
- 11 Ju J, Oh HS, Lee YJ, et al. Clean mucosal area detection of gastroenterologists versus artificial intelligence in small bowel capsule endoscopy. *Medicine (Baltimore)* 2023;102(06):e32883
- 12 Ribeiro T, Mascarenhas Saraiva MJ, Afonso J, et al. Design of a convolutional neural network as a deep learning tool for the automatic classification of small-bowel cleansing in capsule endoscopy. *Medicina (Kaunas)* 2023;59(04):810
- 13 Ou G, Shahidi N, Galorport C, Takach O, Lee T, Enns R. Effect of longer battery life on small bowel capsule endoscopy. *World J Gastroenterol* 2015;21(09):2677–2682
- 14 Koulaouzidis A, Rondonotti E, Karargyris A. Small-bowel capsule endoscopy: a ten-point contemporary review. *World J Gastroenterol* 2013;19(24):3726–3746
- 15 Robertson KD, Singh R. Capsule Endoscopy. In: *Stat Pearls*. Treasure Island (FL): Stat Pearls Publishing LLC.; 2024
- 16 Mostafalu P, Sonkusale S. Flexible and transparent gastric battery: energy harvesting from gastric acid for endoscopy application. *Biosens Bioelectron* 2014;54:292–296
- 17 Nadeau P, El-Damak D, Glettig D, et al. Prolonged energy harvesting for ingestible devices. *Nat Biomed Eng* 2017;1:1
- 18 Ilic IK, Galli V, Lamanna L, et al. An edible rechargeable battery. *Adv Mater* 2023;35(20):e2211400
- 19 Xu M, Liu Y, Yang K, et al. Minimally invasive power sources for implantable electronics. *Exploration (Beijing)* 2023;4(01):20220106
- 20 Kim HM, Yang S, Kim J, et al. Active locomotion of a paddling based capsule endoscope in an in vitro and in vivo experiment (with videos). *Gastrointest Endosc* 2010;72(02):381–387
- 21 Carpi F, Pappone C. Magnetic maneuvering of endoscopic capsules by means of a robotic navigation system. *IEEE Trans Biomed Eng* 2009;56(05):1482–1490

- 22 Le VH, Hernando LR, Lee C, et al. Shape memory alloy-based biopsy device for active locomotive intestinal capsule endoscope. *Proc Inst Mech Eng H* 2015;229(03):255–263
- 23 Yim S, Gultepe E, Gracias DH, Sitti M. Biopsy using a magnetic capsule endoscope carrying, releasing, and retrieving untethered microgrippers. *IEEE Trans Biomed Eng* 2014;61(02): 513–521
- 24 Hoang MC, Park JO, Kim J. Battery-free tattooing mechanism based functional active capsule endoscopy. *Micromachines (Basel)* 2022;13(12):2111
- 25 Daniel P, Rana S. Magnetically assisted capsule endoscopy for endoscopic examination of esophagus and stomach—beginning of the end of flexible esophago gastroscopy!. *J Dig Endosc* 2020; 11:228–231
- 26 Carpi F, Galbiati S, Carpi A. Magnetic shells for gastrointestinal endoscopic capsules as a means to control their motion. *Biomed Pharmac other* 2006;60(08):370–374
- 27 Slawinski PR, Obstein KL, Valdastrì P. Capsule endoscopy of the future: what's on the horizon? *World J Gastroenterol* 2015;21 (37):10528–10541
- 28 Shamsudhin N, Zverev VI, Keller H, et al. Magnetically guided capsule endoscopy. *Med Phys* 2017;44(08):e91–e111
- 29 Wang X, Hu X, Xu Y, et al. A systematic review on diagnosis and treatment of gastrointestinal diseases by magnetically controlled capsule endoscopy and artificial intelligence. *Therap Adv Gastroenterol* 2023;16:17562848231206991
- 30 Iakovidis DK, Koulaouzidis A. Software for enhanced video capsule endoscopy: challenges for essential progress. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol* 2015;12(03):172–186
- 31 Mackiewicz M, Berens J, Fisher M. Wireless capsule endoscopy color video segmentation. *IEEE Trans Med Imaging* 2008;27(12): 1769–1781
- 32 Wang C, Luo Z, Liu X, Bai J, Liao G. Organic boundary location based on color-texture of visual perception in wireless capsule endoscopy video. *J Healthc Eng* 2018;2018:3090341
- 33 Cao Q, Deng R, Pan Y, et al. Robotic wireless capsule endoscopy: recent advances and upcoming technologies. *Nat Commun* 2024; 15(01):4597
- 34 Iakovidis DK, Dimas G, Karargyris A, Bianchi F, Ciuti G, Koulaouzidis A. Deep endoscopic visual measurements. *IEEE J Biomed Health Inform* 2019;23(06):2211–2219
- 35 Nogales Ó, García-Lledó J, Luján M, et al. Therapeutic impact of colon capsule endoscopy with PillCam™ COLON 2 after incomplete standard colonoscopy: a Spanish multicenter study. *Rev Esp Enferm Dig* 2017;109(05):322–327
- 36 Takizawa K, Hamaguchi K. Low-complexity video encoding method for wireless image transmission in capsule endoscope. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2010;2010:3479–3482
- 37 Ciuti G, Menciassi A, Dario P. Capsule endoscopy: from current achievements to open challenges. *IEEE Rev Biomed Eng* 2011;4:59–72
- 38 Liu G, Yan G, Zhao S, Kuang S. A complexity-efficient and one-pass image compression algorithm for wireless capsule endoscopy. *Technol Health Care* 2015;23(Suppl 2):S239–S247
- 39 Chen X, Zhang X, Zhang L, et al. A wireless capsule endoscope system with low-power controlling and processing ASIC. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst* 2009;3(01):11–22

- 40 Zhang N, Wu X. Lossless compression of colormosaic images. *IEEE Trans Image Process* 2006;15(06):1379–1388
- 41 Chung KL, Chen HY, Hsieh TL, Chen YB. Compression for Bayer CFA images: review and performance comparison. *Sensors (Basel)*2022;22(21):8362
- 42 Chung KH, Chan YH. A lossless compression scheme for Bayer color filter array images. *IEEE Trans Image Process* 2008;17(02):134–144
- 43 Hasan K, Ebrahim MP, Xu H, Yuce MR. Analysis of spectral estimation algorithms for accurate heart rate and respiration rate estimation using an ultra-wideband radar sensor. *IEEE Rev Biomed Eng* 2024;17:297–309
- 44 Hany U, Akter L. Accuracy of UWB path loss-based localization of wireless capsule endoscopy. *J Healthc Eng* 2023;2023:3156013
- 45 Hosoe N, Watanabe K, Miyazaki T, et al. Evaluation of performance of the Omnimode for detecting video capsule endoscopy images: a multicenter randomized controlled trial. *Endosc Int Open* 2016;4(08):E878–E882
- 46 Kyriakos N, Karagiannis S, Galanis P, et al. Evaluation of four timesaving methods of reading capsule endoscopy videos. *Eur J Gastroenterol Hepatol* 2012;24(11):1276–1280
- 47 Hwang Y, Lee HH, Park C, et al. Improved classification and localization approach to small bowel capsule endoscopy using convolutional neural network. *Dig Endosc* 2021;33(04):598–607
- 48 Otani K, Nakada A, Kurose Y, et al. Automatic detection of different types of small-bowel lesions on capsule endoscopy images using a newly developed deep convolutional neural network. *Endoscopy*2020;52(09):786–791
- 49 Aoki T, Yamada A, Aoyama K, et al. Clinical usefulness of a deep learning-based system as the first screening on small-bowel capsule endoscopy reading. *Dig Endosc* 2020;32(04):585–591
- 50 Yang YJ, Cho BJ, Jang HJ. Clinical usefulness of AI-assisted small bowel localization and lesion detection in capsule endoscopy. *Endoscopy* 2024;56(02):S121
- 51 Gatenby P, Bhattacharjee S, Wall C, Caygill C, Watson A. Risk stratification for malignant progression in Barrett's esophagus: gender, age, duration and year of surveillance. *World J Gastroenterol*2016;22(48):10592–10600
- 52 de Groof AJ, Struyvenberg MR, van der Putten J, et al. Deep learning system detects neoplasia in patients with Barrett's esophagus with higher accuracy than endoscopists in a multistep training and validation study with benchmarking. *Gastroenterology*2020;158(04):915–929.e4
- 53 Luo H, Xu G, Li C, et al. Real-time artificial intelligence for detection of upper gastrointestinal cancer by endoscopy: a multicentre, case-control, diagnostic study. *Lancet Oncol* 2019;20(12):1645–1654
- 54 Cho BJ, Bang CS, Park SW, et al. Automated classification of gastric neoplasms in endoscopic images using a convolutional neural network. *Endoscopy* 2019;51(12):1121–1129
- 55 Ueyama H, Kato Y, Akazawa Y, et al. Application of artificial intelligence using a convolutional neural network for diagnosis of early gastric cancer based on magnifying endoscopy with narrow-band imaging. *J Gastroenterol Hepatol* 2021;36(02):482–489
- 56 Cardoso P, Saraiva MM, Afonso J, et al. Artificial intelligence and device-assisted enteroscopy: automatic detection of enteric protruding lesions using a convolutional neural network. *Clin Transl Gastroenterol* 2022;13(08):e00514

- 57 Lewis BS, Eisen GM, Friedman S. A pooled analysis to evaluate results of capsule endoscopy trials. *Endoscopy* 2005;37(10):960–965
- 58 Aoki T, Yamada A, Kato Y, et al. Automatic detection of various abnormalities in capsule endoscopy videos by a deep learningbased system: a multicenter study. *Gastrointest Endosc* 2021;93 (01):165–173.e1
- 59 Leenhardt R, Li C, Le Mouel JP, et al. CAD-CAP: a 25,000-image database serving the development of artificial intelligence for capsule endoscopy. *Endosc Int Open* 2020;8(03):E415–E420
- 60 Vezakis IA, Toumpaniaris P, Polydorou AA, Koutsouris D. A novelreal-time automatic angioectasia detection method in wireless capsule endoscopy video feed. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2019;2019:4072–4075
- 61 Tsuboi A, Oka S, Aoyama K, et al. Artificial intelligence using a convolutional neural network for automatic detection of small bowel angioectasia in capsule endoscopy images. *Dig Endosc* 2020;32(03):382–390
- 62 Aoki T, Yamada A, Kato Y, et al. Automatic detection of blood content in capsule endoscopy images based on a deep convolutional neural network. *J Gastroenterol Hepatol* 2020;35(07): 1196–1200
- 63 Arieira C, Monteiro S, Dias de Castro F, et al. Capsule endoscopy: is the software TOP 100 a reliable tool in suspected small bowel bleeding? *Dig Liver Dis* 2019;51(12):1661–1664
- 64 Han S, Fahed J, Cave DR. Suspected blood indicator to identify active gastrointestinal bleeding: a prospective validation. *Gastroenterol Res* 2018;11(02):106–111
- 65 Pan G, Yan G, Qiu X, Cui J. Bleeding detection in wireless capsule endoscopy based on probabilistic neural network. *J Med Syst* 2011;35(06):1477–1484
- 66 Fan S, Xu L, Fan Y, Wei K, Li L. Computer-aided detection of small intestinal ulcer and erosion in wireless capsule endoscopy images. *Phys Med Biol* 2018;63(16):165001