

Medical Image Segmentation: A Comprehensive Review of Deep Learning-Based Methods

Abstract :

Medical image segmentation is a critical application of computer vision in the analysis of medical images. Its primary objective is to isolate regions of interest in medical images from the background, thereby assisting clinicians in accurately identifying lesions, their sizes, locations, and their relationships with surrounding tissues. However, compared to natural images, medical images present unique challenges, such as low resolution, poor contrast, inconsistency, and scattered target regions. Furthermore, the accuracy and stability of segmentation results are subject to more stringent requirements. In recent years, with the widespread application of Convolutional Neural Networks (CNNs) in computer vision, deep learning-based methods for medical image segmentation have become a focal point of research. This paper categorizes, reviews, and summarizes the current representative methods and research status in the field of medical image segmentation. A comparative analysis of relevant experiments is presented, along with an introduction to commonly used public datasets, performance evaluation metrics, and loss functions in medical image segmentation. Finally, potential future research directions and development trends in this field are predicted and analyzed.

چکیده:

بخش‌بندی تصاویر پزشکی یکی از کاربردهای حیاتی بینایی ماشین در تحلیل تصاویر پزشکی است. هدف اصلی آن جداسازی نواحی مورد نظر در تصاویر پزشکی از پس‌زمینه است که به پزشکان در شناسایی دقیق ضایعات، اندازه‌ها، موقعیت‌ها و ارتباط آنها با بافت‌های اطراف کمک می‌کند. اما در مقایسه با تصاویر طبیعی، تصاویر پزشکی چالش‌های خاصی دارند مانند وضوح پایین، کنتراست ضعیف، ناسازگاری و پراکندگی نواحی هدف. علاوه بر این، دقت و پایداری نتایج بخش‌بندی نیازمند الزامات سختگیرانه‌تری است. در سال‌های اخیر، روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق برای بخش‌بندی تصاویر پزشکی به یکی از محورهای اصلی (CNNها) تبدیل شده‌اند. این مقاله روش‌های نماینده کنونی و وضعیت پژوهشی این حوزه را دسته‌بندی، مرور و خلاصه می‌کند. همچنین تحلیل مقایسه‌ای از آزمایش‌های مرتبط به همراه معرفی مجموعه داده‌های عمومی رایج، معیارهای ارزیابی عملکرد و توابع هزینه مورد استفاده در بخش‌بندی تصاویر پزشکی ارائه شده است. در نهایت، مسیرهای تحقیقاتی آینده بالقوه و روندهای توسعه در این حوزه پیش‌بینی و تحلیل شده‌اند.

Background

Medical image segmentation plays a vital role in medical image analysis by enabling the isolation of specific regions of interest such as organs, tissues, and lesions from complex medical images. This process is essential for accurate diagnosis, treatment planning, and monitoring of diseases. With the rapid advancement of computer vision and artificial intelligence, especially deep learning, segmentation techniques have evolved significantly, enhancing the precision and efficiency of medical image interpretation..

زمینه

بخش‌بندی تصاویر پزشکی نقش حیاتی در تحلیل تصاویر پزشکی ایفا می‌کند؛ چرا که امکان جداسازی نواحی خاصی مانند اندام‌ها، بافت‌ها و ضایعات را از تصاویر پیچیده پزشکی فراهم می‌کند. این فرایند برای تشخیص دقیق، برنامه‌ریزی درمان و پایش بیماری‌ها ضروری است. با پیشرفت سریع بینایی ماشین و هوش مصنوعی، به‌ویژه یادگیری عمیق، تکنیک‌های بخش‌بندی به‌طور چشمگیری توسعه یافته‌اند و دقت و کارایی تفسیر تصاویر پزشکی را بهبود بخشیده‌اند.

Problem

Despite the progress, medical image segmentation faces unique and significant challenges that distinguish it from natural image analysis. Medical images often suffer from low resolution, poor contrast, noisy backgrounds, and inconsistent intensity distributions, which complicate the precise delineation of anatomical structures and pathological regions. Furthermore, the variability in imaging modalities and scarcity of annotated datasets impose strict requirements on the accuracy, robustness, and generalizability of segmentation models, making it difficult to develop universally effective solutions.

مسئله

با وجود پیشرفت‌ها، بخش‌بندی تصاویر پزشکی با چالش‌های خاص و مهمی مواجه است که آن را از تحلیل تصاویر طبیعی متمایز می‌کند. تصاویر پزشکی اغلب دچار وضوح پایین، کنتراست ضعیف، نویز پس‌زمینه و توزیع نامنسجم شدت سیگنال هستند که مرزبندی دقیق ساختارهای آناتومیک و مناطق پاتولوژیک را دشوار می‌سازد. علاوه بر این، تنوع در مدالیته‌های تصویربرداری و کمبود داده‌های دارای برچسب، الزامات سخت‌گیرانه‌ای را برای دقت، پایداری و تعمیم‌پذیری مدل‌های بخش‌بندی ایجاد می‌کند که توسعه راهکارهای عمومی و موثر را دشوار می‌کند.

Methodology

This paper provides a comprehensive review of deep learning-based segmentation methods, focusing on the use of Convolutional Neural Networks (CNNs), U-Net architectures, Transformer models, Generative Adversarial Networks (GANs), and hybrid approaches. It systematically categorizes the existing methods into supervised, semi-supervised, and unsupervised learning frameworks. Moreover, the paper examines key datasets, evaluation metrics, and loss functions used to benchmark the performance of these methods, presenting comparative analyses of experimental results to highlight their strengths and limitations.

روش‌شناسی

این مقاله مرور جامعی بر روش‌های بخش‌بندی مبتنی بر یادگیری عمیق ارائه می‌دهد و بر کاربرد شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) ها، معماری‌های U-Net، مدل‌های ترنسفورمر، شبکه‌های مولد رقابتی (GAN) ها (و روش‌های ترکیبی تمرکز دارد. روش‌های موجود به صورت سیستماتیک به سه دسته یادگیری نظارت‌شده، نیمه‌نظارت‌شده و بدون نظارت تقسیم‌بندی شده‌اند. علاوه بر این، مقاله مجموعه داده‌های کلیدی، معیارهای ارزیابی و توابع هزینه مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد این روش‌ها را بررسی کرده و تحلیل‌های مقایسه‌ای آزمایش‌ها را برای برجسته کردن نقاط قوت و محدودیت‌های آنها ارائه می‌کند.

Results

The review reveals that deep learning methods, particularly CNNs and their variants like U-Net, have substantially improved segmentation accuracy across various medical imaging tasks. Transformer-based models demonstrate promising results in capturing global contextual information, especially in complex and high-resolution images. However, challenges remain, such as handling limited annotated data and improving robustness to diverse imaging conditions. The paper concludes by outlining potential future research directions, emphasizing the integration of multi-modal data, development of more generalizable models, and advancement in interpretability and clinical applicability of segmentation methods.

نتایج

، به طور قابل توجهی دقت بخش‌بندی را در وظایف مختلف U-Net و گونه‌های آنها مانند CNN مرور انجام شده نشان می‌دهد که روش‌های یادگیری عمیق، به ویژه شبکه‌های تصویربرداری پزشکی بهبود بخشیده‌اند. مدل‌های مبتنی بر ترنسفورمر در درک اطلاعات زمینه‌ای گسترده، به‌ویژه در تصاویر پیچیده و با وضوح بالا، نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه می‌دهند. با این حال، چالش‌هایی همچنان باقی است، از جمله مدیریت داده‌های محدود برچسب‌خورده و بهبود پایداری در شرایط تصویربرداری متنوع. مقاله با تشریح مسیرهای بالقوه تحقیقاتی آینده، بر اهمیت ادغام داده‌های چندمدالیته، توسعه مدل‌های تعمیم‌پذیرتر و پیشرفت در تفسیرپذیری و کاربرد بالینی روش‌های بخش‌بندی تأکید می‌کند.