

Многофункциональная CNN-трансформерная система с учётом тяжести для объяснимой сортировки диабетических язв стопы и мобильного развёртывания

Источник: Frontiers in AI — Medicine

Дата публикации: 2026-09-04

Оригинал: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frai.2026.1795751>

диабетическая стопа

диагностика

классификация изображений

мобильное развёртывание

объяснимый ИИ

Введение

Классификация изображений диабетической язвы стопы (ДЯС) может поддерживать своевременную клиническую сортировку; однако многие существующие системы обеспечивают ограниченную гранулярность оценки тяжести, полагаются на наборы изображений из одного источника и преимущественно используют методы объяснения на уровне пикселей. В данном исследовании разработана семиклассовая, чувствительная к тяжести, многозадачная система искусственного интеллекта для интерпретируемого анализа изображений ДЯС и развёртывания на устройствах класса смартфонов.

Методы

Система сочетает доменно-адаптивное предобучение SimCLR, улучшение изображений на основе U-Net, извлечение признаков с помощью EfficientNet-V0, легковесный блок слияния на основе оконного трансформера, а также параллельные головки для классификации и порядковой регрессии тяжести.

Четыре публичных источника данных — DFUC 2020/2021, AZH, Medetec и репозиторий с порядковой шкалой, согласованный с IWGDF, — были гармонизированы и дедуплицированы, что дало аналитический корпус из 24 925 оригинальных изображений. Оценка включала отложенный тестовый набор из 3 739 изображений, пятикратную стратифицированную перекрестную проверку, тестирование с исключением одного источника, независимую когорту из 366 изображений, прошедшую клиническую аудиторскую проверку, анализ калибровки и неопределенности, оценку интерпретируемости на основе концептов, а также профилирование на мобильных устройствах.

Результаты

На отложенном тестовом наборе система достигла точности 95,5% (95% ДИ, 94,7–96,1) и макро-показателя F1, равного 0,953, при этом средняя точность пятикратной перекрестной проверки составила $96,5\% \pm 0,3$ процентного пункта. Внешняя оценка порядковой тяжести дала корреляцию Спирмена $\rho = 0,91$. В когорте, прошедшей клиническую аудиторскую проверку, взвешенная каппа Коэна для согласия между моделью и клиницистами по тяжести составила 0,952. Ассистированная моделью проверка была связана с изменением зафиксированного плана ведения пациента в 27,6% случаев, а 92,6% сгенерированных объяснений были оценены как клинически полезные. Полный вывод на устройстве, включая генерацию карт активации классов с градиентным взвешиванием и объяснений на основе концептов, занимал 322 мс на изображение на устройстве с чипом Snapdragon 8 Gen 1.

Обсуждение

Предложенная система демонстрирует, каким образом обучение представлениям на основе множества источников, многозадачное моделирование тяжести, оценка неопределенности, интерпретируемость на основе концептов и эффективное развертывание на периферийных устройствах могут быть интегрированы в единый конвейер ИИ для анализа изображений ДЯС. Полученные результаты указывают на высокую эффективность классификации, сильное согласие по порядковой тяжести, клинически интерпретируемые выходные данные и технически осуществимый вывод на устройствах класса смартфонов. Требуется дальнейшая многоцентровая проспективная валидация в различных популяциях и условиях получения изображений до внедрения в рутинную клиническую практику поддержки принятия решений.

Перевод выполнен: 04.09.2026 | ai4med.ru

Машинный перевод. Рекомендуем сверять с оригиналом при клиническом использовании.