СЕГМЕНТАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАНТОГРАММ СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В. В. Михайлишин

Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации имени Г.А.Альбрехта Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия mikhailishin_v@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Компьютерная плантография является одним из методов диагностики состояния стоп. В ходе расчета клинико-функциональных показателей при проведении данного исследования одним из этапов является выделение точек, лежащих на границе зоны контакта стопы с опорной поверхностью. Ввиду стремления снизить нагрузку на специалистов при проведении этой процедуры и развития технологий искусственного интеллекта актуальной задачей является разработка модели сегментации зон контакта на плантограммах как одного из этапов автоматизации проведения данного исследования. Цель исследования – разработать и апробировать модель сегментации опорной зоны стопы на снимках компьютерной плантографии средствами искусственного интеллекта. Материалы и методы. В исследовании использован датасет, содержащий 500 снимков компьютерной плантографии разных пациентов. Результаты. По результатам обучения модели yolo11x-seg (модель сегментация снимков) были получены высокие показатели в задачах детекции и сегментации зон контакта совместно в переднем и среднем отделах стопы и отдельно в заднем отделе стопы. Метрики качества работы модели составили: mAP50 – 0.9727, mAP50-95 – 0.8293, точность – 0.9849, полнота – 0.9684 в задаче детекции сегментируемой области; mAP50 – 0,9727, mAP50-95 – 0,8482, точность – 0,9849, полнота – 0,9688 в задаче семантической сегментации. Полученные показатели подтверждают способность модели эффективно выделять и сегментировать общую зону контакта в переднем и среднем отделах стопы, а также зону контакта в заднем отделе стопы. Выводы. Интеграция данной модели в системы поддержки принятия врачебных решений обеспечит ускорение процесса анализа снимков и снижение трудозатрат специалистов, что позволит оптимизировать проведение научных исследований и повысить качество медицинских услуг.

Ключевые слова: стопа, компьютерная плантография, искусственный интеллект, семантическая сегментация, зоны контакта, зоны ишемии

Для цитирования: Михайлишин В. В. Сегментация электронных плантограмм средствами искусственного интеллекта // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 75–83. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-6

SEGMENTATION OF ELECTRONIC PLANOGRAMS BY MEANS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

V.V. Mikhailishin

Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht of the Ministry of Labour and Social Protection of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia mikhailishin_v@mail.ru

© Михайлишин В. В., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. Background. Computer plantography is one of the methods of diagnosing the condition of the feet. During the calculation of clinical and functional parameters during the study, one of the stages is to identify points lying on the border of the foot's contact zone with the support surface. In the form of active development of artificial intelligence technologies, an urgent task is to develop a model for segmentation of contact zones as one of the stages of automation of this research. The purpose of the work is to develop and evaluate a segmentation model of the foot support zone in computer plantography images using artificial intelligence. Materials and methods. The study used a dataset containing 500 images of computer plantography of different patients. *Results*. Based on the results of training the yolo11x-seg model (image segmentation model), high performance was achieved in detecting and segmenting contact zones in the anterior and middle parts of the foot and separately in the posterior part of the foot. The quality metrics of the model were: mAP50 0,9727, mAP50-95 0,8293, accuracy 0,9849, completeness 0,9684 in the segmented area detection task, and mAP50 0,9727, mAP50-95 0,8482, accuracy 0,9849, completeness 0,9688 in the semantic segmentation task. The obtained indicators reflect the ability of the model to effectively identify and segment the common contact area in the forefoot and middle part of the foot, as well as the contact area in the posterior part of the foot. Conclusions. The integration of this model into medical decision support systems will speed up the process of image analysis and reduce the labor costs of specialists, which will optimize research and improve the quality of medical services.

Keywords: foot, computer plantography, artificial intelligence, semantic segmentation, contact zones, ischemia zones

For citation: Mikhailishin V.V. Segmentation of electronic planograms by means of artificial intelligence. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):75–83. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-6

Введение

Компьютерная плантография – это диагностический метод, который заключается в получении цифрового снимка подошвенной поверхности стопы в опоре. Он используется для диагностики, в том числе скрининговой, ортопедических заболеваний стопы, а также позволяет индивидуально подбирать ортопедические изделия, включая ортезы и ортопедическую обувь [1, 2].

При проведении данного исследования особое значение имеет точное определение области стопы, соприкасающейся с опорой, для использования этих данных при проведении оценки функционального состояния стопы. В частности, они необходимы для расчета индекса стопы по методикам В. А. Штритера и И. М. Чижина [3, 4]. Эти данные используются для определения линейного показателя высоты продольного свода, угла Кларка, индекса Шиппо-Смирка и Штели [5, 6].

В настоящее время наблюдается процесс интеграции технологий искусственного интеллекта в анализ медицинских изображений, что позволяет оптимизировать работу клинических специалистов [7, 8]. В числе прочего они позволяют эффективно автоматизировать задачи сегментации медицинских снимков, облегчая выделение ключевых областей для последующего анализа [9]. Ввиду этого актуальной задачей является автоматизация сегментации снимков компьютерной плантографии с применением данных технологий.

Цель исследования – разработать и апробировать модель сегментации опорной зоны стопы на снимках компьютерной плантографии средствами ис-кусственного интеллекта.

Материалы и методы

В исследовании использовался набор данных, включающий плантограммы 500 человек в возрасте старше 18 лет, собранные в период с 2014 по 2024 г. с использованием комплексов Diapod и Ortmann Pro Diagnostics. Для повышения релевантности выборки в анализ были включены как мужчины (26 %), так и женщины (74 %), среди которых 78 % имели деформации стоп (74 % – плоскостопие, 16 % – вальгусная деформация первого пальца), а 22 % составляли пациенты без выявленных патологий. Предобработка снимков проводилась по разработанному алгоритму, согласно которому каждая стопа была выравнена по вертикальной оси и помещена на отдельные снимки одинакового разрешения с контрастным черным фоном. На заключительном этапе производилось отражение снимков правой стопы по горизонтали [10].

Аннотирование исходного датасета включало разметку зоны контакта (ишемии, опоры) совместно в переднем и среднем отделе стопы, а также отдельно в заднем отделе стопы.

Для семантической сегментации снимков компьютерной плантографии была обучена модель YOLOv11-Seg, основанная на архитектуре YOLO и оптимизированная для задач сегментации изображений. Модели данной архитектуры демонстрируют высокую эффективность в семантической сегментации медицинских изображений [11]. Для их разработки, обучения и оценки использован язык программирования Python совместно с библиотекой Ultralytics.

Для оценки качества работы моделей использовались метрики, адаптированные под задачи сегментации масок и детекции объектов:

– mAP50(B) – усредненная средняя точность (mean Average Precision) для ограничивающих рамок (Bounding Box) и сегментационных масок (Mask) при пороге IoU 0,5;

– mAP50-95 – более строгая метрика, усредненная по диапазону порогов IoU от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05.

Для расчета mAP50 и mAP50-95 использовалась метрика Intersection over Union (IoU), определяющая степень пересечения предсказанных и истинных рамок или масок. Объект считался правильно предсказанным, если IoU превышал заданный порог. Усреднение по порогам в mAP50-95 позволяет получить более полную оценку качества модели, учитывающую разные пороги точности.

Метрики точности (Precision) и чувствительности (Recall) использовались для оценки соотношения истинно положительных, ложноположительных и ложнонегативных предсказаний. Истинно положительными считались рамки или маски, где IoU с истинным объектом превышал установленный порог. Ложноположительные включали предсказания, которые не соответствовали ни одному истинному объекту либо имели IoU ниже порога. Ложнонегативными считались объекты, которые не были обнаружены моделью.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования была проведена предобработка и разметка исходных снимков компьютерной плантографии, по результатам которой в исходный набор вошла 1000 унифицированных изображений стоп. Датасет был разделен на тренировочную и валидационную выборки для проведения кросс-валидации. На рис. 1 представлен пример размеченного изображения.



Рис. 1. Пример предобработанного снимка компьютерной плантографии с нанесенной разметкой: *l* – область зоны контакта в переднем и среднем отделах стопы; *2* – в заднем отделе стопы

В качестве основы для обучения была выбрана модель yolo11x-seg, обладающая высокой эффективностью и универсальностью при выполнении задач семантической сегментации изображений. Обучение проводилось на протяжении 100 эпох с использованием пакетов (batch), включающих по 30 изображений и входных данных с разрешением 640×640 пикселей. Такой выбор параметров обеспечил сбалансированное соотношение между вычислительными затратами и качеством предсказаний модели.

Для улучшения обобщающей способности модели в процессе обучения применялся генератор данных, который модифицировал изображения в каждом пакете. В рамках этой обработки в случайном порядке, но в заданных пределах изменялись яркость, контрастность и масштаб изображения. Дополнительно с определенной вероятностью выполнялись операции поворота, смещения, масштабирования и объединения нескольких изображений в соответствии с заданными параметрами. Пример результатов такой обработки представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлены графики изменения функции потерь (loss) модели в задачах детекции объектов и семантической сегментации, полученные на тренировочной и валидационной выборках в процессе обучения.



Рис. 2. Пример обработанных снимков генератором в пакете: *l* – область зоны контакта в переднем и среднем отделах стопы; *2* – в заднем отделе стопы



Рис. 3. Динамика изменения значения функции потерь в процессе обучения: *1* и 2 – на тренировочной выборке (1 – для задачи детекции объектов; 2 – для семантической сегментации); 3 и 4 – на валидационной выборке (3 – для задачи детекции объектов; 4 – для семантической сегментации)

Для задач детекции и семантической сегментации на графиках наблюдалось снижение функции потерь как на тренировочной, так и на валидационной выборках, что свидетельствует о сходимости модели и ее способности к обобщению данных. На начальных этапах обучения значения функции потерь уменьшались наиболее интенсивно, после чего происходили их стабилизация и выход на плато, что указывает на достижение моделью состояния оптимальной обученности без признаков переобучения. Это подтверждает корректность настройки гиперпараметров и эффективное обучение модели на предоставленных данных.

На рис. 4 представлена динамика изменения метрик mAP50 и mAP50-95 в процессе обучения модели на валидационной выборке для задач детекции и семантической сегментации.



Рис. 4. Динамика изменения метрик в процессе обучения: *а* и *б* – для задачи семантической сегментации; *в* и *г* – для задачи детекции объектов

По результатам анализа динамики метрик на графиках выявлено, что во всех случаях наблюдался рост метрик в первые 25 эпох, после чего их рост замедлялся, достигая плато. Значения метрик mAP50 (*a* и *в*) для обеих задач после достижения плато находились в диапазоне 0,9–0,98, тогда как для метрики mAP50-95 (*б* и *г*) показатели стабилизировались в диапазоне 0,7–0,8, что связано с большей строгостью данной метрики.

Итоговые метрики разработанных моделей ИИ на валидационном наборе данных указаны в табл. 1.

Таблица 1

Метрики качества работы модели искусственного интеллекта
в задачах семантической сегментации и детекции
объектов на снимках компьютерной плантографии

Задача	mAP50	mAP50-95	Точность	Полнота
Детекция объектов	0,9727	0,8293	0,9849	0,9684
Семантическая сегментация	0,9727	0,8482	0,9849	0,9688

Согласно полученным метрикам разработанная модель искусственного интеллекта продемонстрировала высокое качество работы в задачах детекции объектов и семантической сегментации зоны контакта на снимках компьютерной плантографии. Для обеих задач показатели mAP50 составляют 0,9727, а метрика mAP50-95 показывает несколько более низкие значения (0,8293 для детекции и 0,8482 для сегментации), что указывает на небольшое снижение качества при учете всех порогов IoU. При этом показатели точности и полноты для обеих задач остаются практически одинаковыми и превышают 0,96, подтверждая надежность модели. Пример сегментации снимка проиллюстрирован на рис. 5.



Рис. 5. Пример сегментации зон контакта на плантограмме моделью искусственного интеллекта: *1* – зона контакта в переднем и среднем отделах стопы; *2* – в заднем отделе стопы

Заключение

Разработанная модель семантической сегментации зон контакта на плантограммах, основанная на технологиях искусственного интеллекта, продемонстрировала высокие показатели качества работы (mAP50 – 0,9727, mAP50-95 – 0,8482, точность – 0,9849, полнота – 0,9688), что подтверждает ее применимость для определения зон контакта с целью расчета диагностических показателей.

Созданная модель искусственного интеллекта обладает высоким потенциалом для научных исследований и клинической практики благодаря достигнутому сокращению длительности разметки снимков высококвалифицированным специалистом.

Список литературы

 Маненков М. П., Радченко О. Р. Участие специалиста по оказанию медицинской помощи несовершеннолетним обучающимся в формировании здоровьесберегающей среды общеобразовательной организации (на примере скрининга и профилактики плоскостопия) // Медико-фармацевтический журнал Пульс. 2024. Т. 26, № 2. С. 25–33. doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2024-26-2-25-33 EDN: CMLZPH

- 2. Веденина А. С., Ткачук И. В., Смирнова Л. М. [и др.]. Скрининг функциональных нарушений стоп с помощью компьютерной плантографии и подометрии // Медицинская техника. 2014. № 2. С. 21–24. EDN: SBZLTP
- 3. Патент России № 2253363. Способ диагностики состояния отделов стопы / Гавриков К. В., Плешаков И. А., Калужский С. И. [и др.]. 2005. Бюл. № 16.
- ГОСТ Р 52623.1–2008. Технологии выполнения простых медицинских услуг функционального обследования : [утвержден и введен приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 декабря 2008 г. № 359-ст]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200068115 (дата обращения: 01.02.2025).
- 5. Веденина А. С., Смирнова Л. М. Оценка функционального состояния стопы с использованием плантографии // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. № 5 (82). С. 136–139. EDN: KAPBFX
- 6. Pita-Fernández S. [et al.]. Validity of footprint analysis to determine flatfoot using clinical diagnosis as the gold standard in a random sample aged 40 years and older // Journal of epidemiology. 2015. T. 25, № 2. C. 148–154.
- 7. Rajpurkar P., Lungren M. P. The current and future state of AI interpretation of medical images // New England Journal of Medicine. 2023. Vol. 388, № 21. P. 1981–1990.
- Ali O. [et al.]. A systematic literature review of artificial intelligence in the healthcare sector: Benefits, challenges, methodologies, and functionalities // Journal of Innovation & Knowledge. 2023. Vol. 8, № 1. P. 100333.
- Yang R., Yu Y. Artificial convolutional neural network in object detection and semantic segmentation for medical imaging analysis // Frontiers in oncology. 2021. Vol. 11. P. 638182.
- Михайлишин В. В., Смирнова Л. М., Черкашин С. О. Цифровая обработка электронных планограмм с применением технологий искусственного интеллекта как этап автоматизации плантографических исследований // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 19–24. EDN: IDROCH
- 11. Su Y. [et al.]. YOLO-LOGO: A transformer-based YOLO segmentation model for breast mass detection and segmentation in digital mammograms // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2022. Vol. 221. P. 106903.

References

- Manenkov M.P., Radchenko O.R. The participation of a specialist in providing medical care to underage students in the formation of a health-saving environment of a general education organization (using the example of screening and prevention of flat feet). *Mediko-farmatsevticheskiy zhurnal Pul's = Medical and Pharmaceutical journal Pulse*. 2024;26(2):25–33. (In Russ.). doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2024-26-2-25-33 EDN: CMLZPH
- 2. Vedenina A.S., Tkachuk I.V., Smirnova L.M. et al. Screening of functional disorders of the feet using computer plantography and podometry. *Meditsinskaya tekhnika* = *Medical equipment*. 2014;(2):21–24. (In Russ.). EDN: SBZLTP
- 3. Patent Russian Federation № 2253363. Sposob diagnostiki sostoyaniya otdelov stopy = A method for diagnosing the condition of the foot departments. Gavrikov K.V., Pleshakov I.A., Kaluzhskiy S.I. et al. 2005. Bull. № 16. (In Russ.)
- 4. GOST R 52623.1–2008. Technologies for performing simple medical services of functional examination : [approved and introduced by Order No. 359-st of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 4, 2008]. (In Russ.). Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200068115 (accessed 01.02.2025).
- 5. Vedenina A.S., Smirnova L.M. Assessment of the functional state of the foot using plantography. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* =

Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Technical sciences. 2008;(5):136–139. (In Russ.). EDN: KAPBFX

- Pita-Fernández S. et al. Validity of footprint analysis to determine flatfoot using clinical diagnosis as the gold standard in a random sample aged 40 years and older. *Journal* of epidemiology. 2015;25(2):148–154.
- Rajpurkar P., Lungren M.P. The current and future state of AI interpretation of medical images. *New England Journal of Medicine*. 2023;388(21):1981–1990.
- Ali O. et al. A systematic literature review of artificial intelligence in the healthcare sector: Benefits, challenges, methodologies, and functionalities. *Journal of Innovation* & *Knowledge*. 2023;8(1):100333.
- 9. Yang R., Yu Y. Artificial convolutional neural network in object detection and semantic segmentation for medical imaging analysis. *Frontiers in oncology*. 2021;11:638182.
- Mikhaylishin V.V., Smirnova L.M., Cherkashin S.O. Digital processing of electronic planograms using artificial intelligence technologies as a stage of automation of plantographic research. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2024;(3):19–24. (In Russ.). EDN: IDROCH
- Su Y. et al. YOLO-LOGO: A transformer-based YOLO segmentation model for breast mass detection and segmentation in digital mammograms. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2022;221:106903.

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Валерьевич Михайлишин младший научный сотрудник лаборатории инновационных и экспертно-реабилитационных технологий, Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации имени Г. А. Альбрехта Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Бестужевская, 50) E-mail: mikhailishin v@mail.ru

Viktor V. Mikhailishin

Junior researcher at the laboratory of innovative and expert rehabilitation technologies, Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht of the Ministry of Labour and Social Protection of the Russian Federation (50 Bestuzhevskaya street, St. Petersburg, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 27.01.2025 Поступила после рецензирования/Revised 20.02.2025 Принята к публикации/Accepted 15.03.2025