

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЕКТ DETECTION В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК АОРТОГРАФИИ

В.В. Лаптев, Н.А. Кочергин

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», бульвар им. академика Л.С. Барбараша, 6, Кемерово, Российская Федерация, 650002

Основные положения

• Практическая значимость работы заключается в следующем: представленная система визуализации данных аортографии является эффективным инструментом визуального ассистирования хирургу при проведении вмешательства, поддерживающая режим работы в реальном времени. Предложенный алгоритм предварительной обработки данных, повышающий качество изображения с минимальными затратами производительности, дополняет систему визуализации, позволяя достигнуть наилучшего результата.

Цель	Разработка системы визуального ассистирования хирургу при проведении транскатетерной имплантации аортального клапана.
Материалы и методы	Для решения поставленной задачи использован собственный набор данных, состоящий из 35 видеозаписей проведения процедуры вмешательства. В основе системы визуализации лежит подход обнаружения ключевых точек аортографии, базирующийся на технологии Object detection, с применением искусственных нейронных сетей семейства YOLO. Для достижения наилучшего результата в работе предложен метод улучшения качества входных данных посредством использования сверточных нейронных сетей, а именно технологии Autoencoder.
Результаты	Установлено, что модель сверточного автоэнкодера способна восстановить информативность зашумленного входного изображения с 40 до 75%, что в свою очередь позволяет повысить точность обнаружения объектов на изображении. Представленная система отслеживания в режиме реального времени для облегчения процедур транскатетерной имплантации аортального клапана имеет конечную точность по метрике качества MAP – 51,9%. Система визуального ассистирования может распознавать и отслеживать ключевые точки, указывающие на расположение корня аорты, системы доставки и протеза клапана сердца во время операции. Представленная система визуализации данных аортографии является эффективным инструментом визуального ассистирования хирургу при проведении вмешательства, поддерживающая режим работы в реальном времени.
Заключение	Предложенный алгоритм предварительной обработки данных, повышающий качество изображения с минимальными затратами производительности, дополняет систему визуализации, позволяя достигнуть наилучшего результата.
Ключевые слова	Машинное обучение • Обнаружение объектов • Детектирование • Ключевые точки • Аортальный клапан

Поступила в редакцию: 28.10.2023; поступила после доработки: 05.11.2023; принята к печати: 18.12.2023

APPLICATION OF OBJECT DETECTION TECHNOLOGY IN AORTOGRAPHY KEYPOINT TRACKING

V.V. Laptev, N.A. Kochergin

Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases”, 6, Academician Barbarash blvd., Kemerovo, Russian Federation, 650002

Highlights

• The practical significance of the work lies in the fact that the presented aortography data visualization

Для корреспонденции: Владислав Витальевич Лаптев, lptwlad1@gmail.com; адрес: бульвар им. академика Л.С. Барбараша, 6, Кемерово, Российская Федерация 650002

Corresponding author: Vladislav V. Laptev, lptwlad1@gmail.com; address: 6, Academician Barbarash blvd., Kemerovo, Russian Federation, 650002

system is an effective tool for visually assisting surgeons during transcatheter aortic valve implantation interventions, supporting real-time operation mode. The proposed data preprocessing algorithm, which improves image quality with minimal performance costs, complements the system, allowing specialists to achieve the best result.

Aim	The aim of this study is to develop a visual assistance system for transcatheter aortic valve implantation procedures.
Methods	To address the stated objective, our own dataset consisting of 35 videos of the intervention was used. The visualization system is based on the approach of detecting key points in aortography, utilizing “Object detection” technology with the application of YOLO family artificial neural networks. To achieve the best result, we proposed a method to enhance the quality of input data using convolutional neural networks, specifically the «Autoencoder» technology.
Results	The results of the study revealed that the convolutional autoencoder model is capable of restoring the informativeness of noisy input images from 40 to 75%, thereby increasing the accuracy of object detection in images. The presented real-time tracking system for facilitating TAVI procedures achieves a final accuracy of 51.9% according to the Mean Average Precision (MAP) quality metric. The visual assistance system can recognize and track key points indicating the location of the aortic root, delivery system, and heart valve prosthesis during surgery. The practical significance of the work lies in the fact that the presented aortography data visualization system is an effective tool for visually assisting surgeons during interventions, supporting real-time operation mode.
Conclusion	The proposed data preprocessing algorithm, which improves image quality with minimal performance costs, complements the visualization system, allowing specialists to achieve the best results.
Keywords	Machine learning • Object detection • Tracking • Keypoint • Aortic valve

Received: 28.10.2023; received in revised form: 05.11.2023; accepted: 18.12.2023

Список сокращений

TAVI – транскатетерная имплантация аортального клапана (transcatheter aortic valve implantation)

Введение

На сегодняшний день в медицинской практике, в частности в области кардиологии, увеличивается применение методик автоматической обработки графических данных. В перечень наиболее часто используемых входят алгоритмы обработки анатомических структур на основе данных магнитно-резонансной и компьютерной томографии. К сожалению, в ряде случаев применение представленных модальностей невозможно. К основным ограничениям компьютерной томографии относится отсутствие режима реального времени. В свою очередь такой метод контрастного исследования кровеносных сосудов, как флюороскопия, может применяться для неинвазивной диагностики непосредственно во время вмешательств, обладая при этом возможностью снижения лучевой нагрузки до 90%, а для визуального ассистирования хирургу при выполнении операции необходима разработка и внедрение интеллектуального алгоритма трекинга и визуализации данных.

Транскатетерная имплантация аортального клапана (transcatheter aortic valve implantation, TAVI) представляет собой относительно новый и высокоэффективный метод лечения пациентов со средним и высоким риском аортального стеноза. Краткосрочная и долгосрочная выживаемость больных после TAVI аналогична таковой после хирургической замены аортального клапана [1, 2]. Количество процедур TAVI неуклонно растет с момента первой процедуры, выполненной в 2002 г., и показания для TAVI продолжают расширяться [3]. Минимально инвазивные процедуры связаны с меньшим количеством послеоперационных осложнений, таких как атриовентрикулярная блокада, которая требует немедленной кардиостимуляции и может вызвать парепротезную регургитацию, влияющую на выживаемость, а также более низкой смертностью [4, 5]. Недавние исследования показали, что специфические осложнения TAVI зачастую ассоциированы с несоответствием протеза пациенту [6–8] и непра-

вильным расположением устройства. Большинство постпроцедурных осложнений зависят от оператора, но физиологические движения пациентов во время доставки и развертывания устройства могут временно прерывать сердечный цикл, ограничивать кровоток и вызывать проблемы с дыханием [9, 10]. Эти связанные с большим осложнения во многом зависят от качества интраоперационной визуализации, необходимой для точного позиционирования устройства [6]. Однако рутинные методы визуализации ограничены необходимостью снижения радиологической экспозиции и исключения повторных инъекций контрастного вещества, поэтому разработка систем визуальной помощи для интраоперационного руководства имеет первостепенное значение.

Некоторые системы интервенционной ангиографии интегрируют коммерчески доступное программное обеспечение, чтобы облегчить навигацию во время TAVI и снизить риск осложнений. На сегодняшний день такие продукты разработаны Philips (HeartNavigator), Siemens Healthcare (syngo Aortic Valve Guide), GE Healthcare (Innova HeartVision) [11] и Paieon Inc. (C-THV) [12] и успешно внедрены в клиническую практику. Существующие системы наведения выравнивают трехмерную анатомическую модель корня аорты на основе компьютерной томографии, созданную до операции, и накладывают ее на живые рентгеноскопические изображения во время позиционирования клапана, обеспечивая оптимальную ориентацию ангиографической системы и сосудистый доступ.

Однако эти системы не позволяют в режиме реального времени отслеживать ключевые точки и детализировать геометрию корня аорты во время операции, поскольку они предполагают предоперационную реконструкцию модели [13]. Следовательно, оператор по-прежнему несет ответственность за управление положением устройства и его развертывание с помощью данных аортографии и отслеживания положения кончика катетера. Логическим шагом вперед является разработка систем визуальной помощи, обеспечивающих возможность отслеживания ключевых точек катетера и контура корня аорты в режиме реального времени с использованием автоматизированной обработки изображений аортографии, независимо от оборудования для получения изображений.

В области обработки медицинских изображений имеется большое количество наработок среди отечественных исследователей [14, 15]. Также ранее нашими коллегами из отделения экспериментальной медицины НИИ КПССЗ предложен метод обнаружения ключевых точек аортографии при TAVI на основе многозадачного обучения [16]. Данный метод показал высокую эффективность на тестовом множестве, что, однако, не подтвердилось в реальных условиях.

Цель данного исследования – разработка систе-

мы визуального ассистирования хирургу при проведении транскатетерной имплантации аортального клапана на основе технологии Object detection [17], а также алгоритма предварительной обработки данных на основе автоэнкодера как инструмента поддержания качества входного изображения.

Материалы и методы

Данные. Для решения поставленной задачи нами собран и размечен собственный набор данных, состоящий из 35 видеозаписей размером $1\,000 \times 1\,000$ пикселей. Окончательная выборка состояла из 3 730 изображений в градациях серого. Каждое изображение проходило процедуру тщательного аннотирования экспертами. Итоговая выборка была разделена на две части: 2 932 (80%) изображения использовались в качестве обучающего набора, оставшиеся 798 (20%) изображений – в качестве тестового. Разделение осуществлялось по пациентам для более точной оценки предложенного метода. Процедура TAVI позволила получить серию анонимных изображений, иллюстрирующих три основных этапа:

- позиционирование катетера и системы доставки (рис. 1, A);
- начало ретракции капсулы и обнажение протеза, развертывание транскатетерного аортального клапана и вращение привода (рис. 1, B);
- развертывание протеза, 1/3 раскрытия клапана (рис. 1, C).

На каждом изображении отмечено различное количество точек, в зависимости от наличия на нем объекта определенного класса:

- маркировка ключевых точек на катетере (рис. 1, D);
- маркировка ключевых точек, указывающих на корень аорты (рис. 1, E);
- маркировка ключевых точек на клапанном стенде на стадии его развертывания на 1/3 (рис. 1, F);
- визуализация ключевых точек дистальной части системы доставки по сегментированным аортограммам (рис. 1, G);
- трехмерная модель целевой структуры аортального клапана (рис. 1, H).

Максимум 11 ключевых точек интереса (от 1 до 11 на каждом изображении) были помечены и аннотированы (рис. 2, D–H).

Анатомические ориентиры:

- кольцо аорты, целевой ориентир для TAVI: корень аорты 1 (AA1) и корень аорты 2 (AA2);
- аортальное синотубулярное соединение, дополнительный ориентир для правильного определения плоскости аортального кольца, – синотубулярное соединение 1 (STJ1) и синотубулярное соединение 2 (STJ2).

Ориентиры системы доставки:

- якоря системы доставки, ориентир, определяющий степень извлечения протеза, – проксимальный катетер (CP);

- точка изгиба катетера, ориентир синотубулярной части стента, – середина катетера (CM);
- рентгеноконтрастная полоса маркера капсулы на верхней части стержня до дистального кольца, ориентир степени изгиба внешнего стержня, используемый для определения степени извлечения протеза, – катетер дистальный (CD);
- наконечник катетера, ориентир, определяющий положение катетера и плоскость кольца аорты, – наконечник катетера (CT).

Дополнительные ориентиры:

- дистальная часть, ориентир для имплантации клапана, указывающий на плоскость кольца аорты, – ангиографический катетер (пигтейл) (PT);
- дистальная часть саморасширяющегося протеза определяет положение стента во время имплантации и его отклонение от плоскости корня аорты – дистальная часть стента: края опорного каркаса 1 (FE1) и 2 (FE2).

Автоэнкодер. Для решения проблемы зашумленности данных в представленной работе применена технология, основанная на сверточных нейронных сетях, – автоэнкодер. Сети автоэнкодеры – искусственные нейронные сети, которые используются для обучения без учителя. Их применяют для кодирования и декодирования данных, таких как изображения, звуковые сигналы и текст. Автоэнкодеры состоят из двух частей: кодировщика и декодировщика, а также слоя скрытого латентного пространства code или embedding (рис. 2). Кодировщик преобразует входные данные в скрытое представление, а декодировщик восстанавливает исходные данные из этого скрытого представления. Эти сети могут использоваться для сжатия данных, изучения скрытых признаков и генерации новых данных.

Автоэнкодеры состоят из двух частей: энкодера g и декодера f . Энкодер переводит входной сигнал в его представление (код, латентное представление):

$$h = g(x) \quad (1),$$

а декодер восстанавливает сигнал по его коду:

$$x = f(h) \quad (2),$$

Тем самым автоэнкодер, изменяя f и g , стремится выучить тождественную функцию:

$$x = f(g(x)) \quad (3),$$

минимизируя определенный функционал ошибки:

$$L(x, f(g(x))) \quad (4)$$

При этом семейства функций энкодера и декодера ограничены таким образом, чтобы автоэнкодер был вынужден отбирать наиболее важные свойства сигнала.

Для того чтобы решить поставленную задачу, нами подобрана собственная архитектура автоэнкодера, основанная на трансферном обучении. В качестве энкодера мы использовали предварительно обученную модель MobileNetV2, что позволило сохранить высокую обобщающую способность модели и способность формирования качественного век-

тора признаков входного изображения; в качестве декодера – собственную архитектуру, аналогичную обратной модели VGG19 (рис. 3). Для получения наилучшего результата входные данные проходили процедуру наложения шумов.

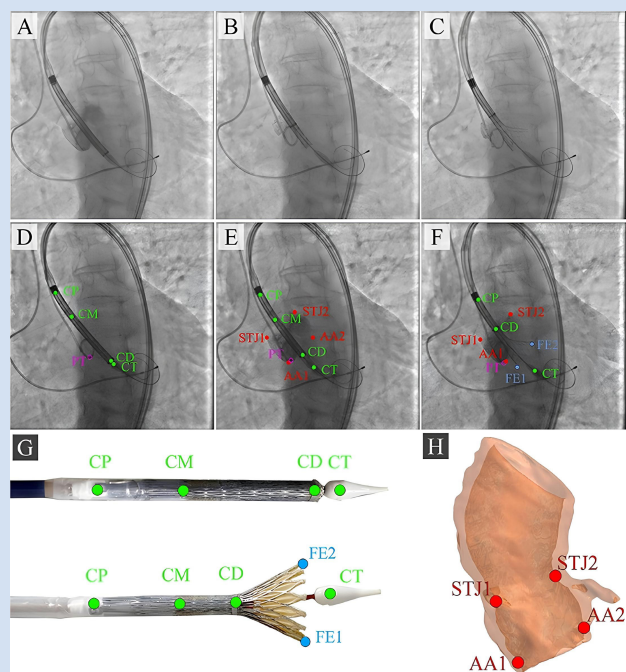


Рисунок 1. Алгоритм маркировки интраоперационных изображений аортографии и определения ключевых точек для системы отслеживания TAVI

Figure 1. Algorithm for labelling intraoperative aortography images and identifying key points for the TAVI tracking system

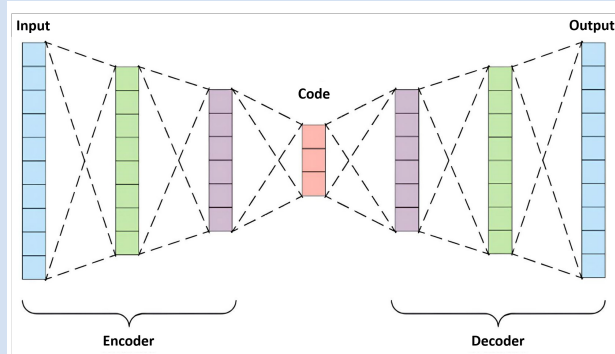


Рисунок 2. Концептуальная схема автоэнкодера

Figure 2. Conceptual diagram of autoencoder

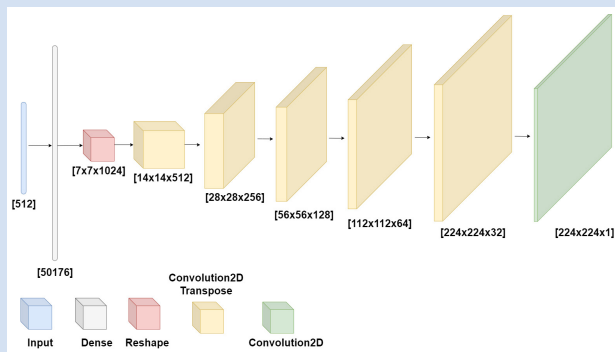


Рисунок 3. Архитектура «декодера»

Figure 3. Decoder architecture

При обучении автоэнкодера функционал ошибки L базировался на двух метриках: коэффициенте детерминации (R^2 , сокр. от R-Squared) и перекрестной энтропии (BCE , сокр. от Binary Cross Entropy). В результате функционал ошибки L имел следующий вид:

$$L = R^2 + BCE \quad (1),$$
$$BCE = -\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N y_i * \log(\hat{y}_i) + (1 - \hat{y}_i) \quad (2),$$
$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3)$$

где y_i – значение наблюдения, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение наблюдения, $\bar{y}_i$ – среднее значение всех наблюдений в выборке, N – количество наблюдений в выборке.

Результаты минимизации функции потерь в процессе обучения представлены на рис. 4. По данным графика видно, что модель сходится после 25 эпох, а переобучение (разница между значениями метрики на обучающей и валидационной выборках) нивелируется.

Object detection. Для достижения цели по обна-

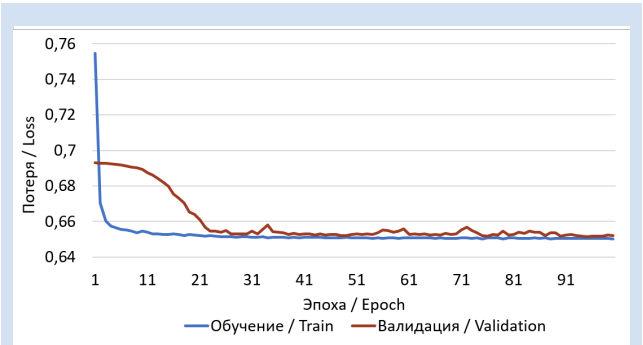


Рисунок 4. Динамика функции потерь на этапах обучения и валидации модели
Figure 4. Dynamics of the loss function during the training and validation of the model

ружению ключевых точек на кадре было принято решение использовать технологию Object detection, так как она хорошо зарекомендовала себя в ряде других задач [18–21].

Трекинг, или обнаружение объектов на изображении, является одной из основных задач компьютерного зрения. Именно поэтому в данной области имеется большое количество исследований и инструментов разработки. Одно из популярных решений включает обнаружение объектов в реальном времени моделями YOLO.

Сети семейства YOLO уже давно показывают результаты высокого качества, а также возможность работы в режиме реального времени, что и является основной целью данного исследования. Также стоит отметить удобство использования предоставляемого фреймворка. В качестве эксперимента нами обучены несколько моделей разного размера с указанием различных параметров, результаты экспериментов приведены в таблице. Для подготовки данных к обучению мы предварительно изменили экспертную разметку, заключив ключевую точку внутри ограничивающей рамки размером 36 на 36 пикселей, что является минимальной единицей обнаружения для моделей представленного типа. Таким образом модель учится проводить обнаружение привычной ограничивающей рамки, а мы концентрируем свое внимание на ее центре.

Так как результирующее качество локализации клапана по метрике MAP (mean average precision, метрика измерения точности детектирования объектов) для моделей v8m и v8l практически не имеет различий, нами выбрана модель с меньшим временем анализа. Выбранная метрика качества отражала точность предсказания в диапазоне от 0 до 1, основываясь на перекрытии между двумя областями.

Результаты экспериментов обучения моделей обнаружения YOLOV8 Results of the YOLOV8 detection model training experiments				
Модель / Model	Функция оптимизации / Optimization function	Применение слоя нормализации пакета входных данных / Batch normalization	Скорость анализа, мс / Speed, ms	MAP
YOLOv8n	Adam	True	4,1	0,442
	Adam	False	4,8	0,438
	SGD	True	4,1	0,46
YOLOv8s	Adam	True	7,2	0,459
	Adam	False	7,95	0,463
	SGD	True	7,2	0,468
YOLOv8m	Adam	True	9	0,482
	Adam	False	9,46	0,476
	SGD	True	9	0,519
YOLOv8l	Adam	True	18,21	0,489
	Adam	False	18,47	0,491
	SGD	True	18,2	0,521

Процесс обучения модели детектирования представлен на рис. 5.

Результаты

Результаты работы полученной модели автоэнкодера представлены на рис. 6. На рисунке отображены результаты трех экспериментов, отмеченных буквами А–С. Цифрами 1–3 обозначены этапы эксперимента, где 1 – исходное изображение, 2 – изображение с наложением шумов, 3 – результат работы модели автоэнкодера. Представленные результаты экспериментов подтверждают, что модель сверточного автоэнкодера способна восстановить информативность зашумленного входного изображения с 40 до 75%, что в свою очередь позволяет повысить точность обнаружения объектов на изображении.

Конечным результатом настоящего исследования является система визуализации ключевых точек аортографии (рис. 7). Результаты анализа изображения моделью интерпретированы двумя форматами: стандартный вывод экземпляров обнаружения заключенных в ограничивающую рамку и визуализация обнаружения при помощи точек. Второй вариант визуализации результатов более удобный при работе с данными изображениями. В представленных результатах отражены два эксперимента. Изображения в одном ряду отмечены буквами со следующими характеристиками: А – входное изображение; В – визуализация экспертной разметки; С – визуализация результата работы модели.

Обсуждение

Предполагается, что данную систему можно использовать как вспомогательный инструмент для оптимизации позиционирования клапана и как компонент роботизированной системы для выполнения TAVI.

Закключение

Предложена система предварительной обработки данных, направленная на улучшение качества

входного изображения и способная повысить информативность входных данных на 35%. Представлена система отслеживания в режиме реального времени для облегчения процедур TAVI с конечной точностью по метрике качества MAP 51,9%. Заявленная система может распознавать и отслеживать ключевые точки, указывающие на расположение корня аорты, системы доставки и протеза клапана сердца во время операции.

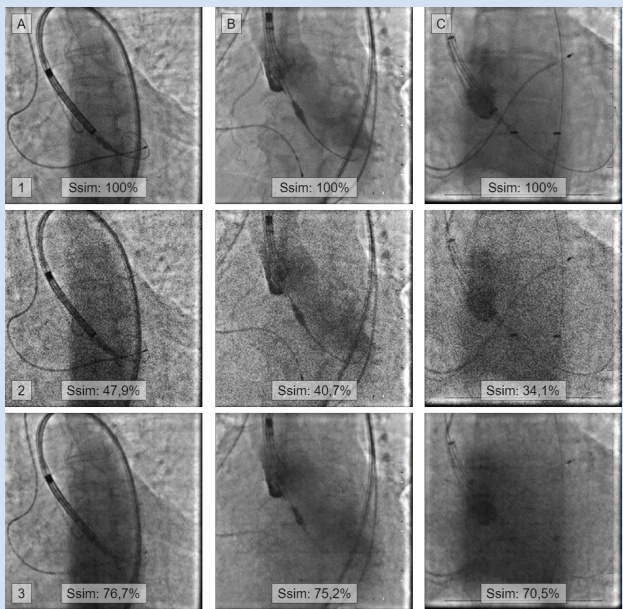


Рисунок 6. Результат работы модели с зашумленными изображениями
Figure 6. Results of the model's work with noisy images

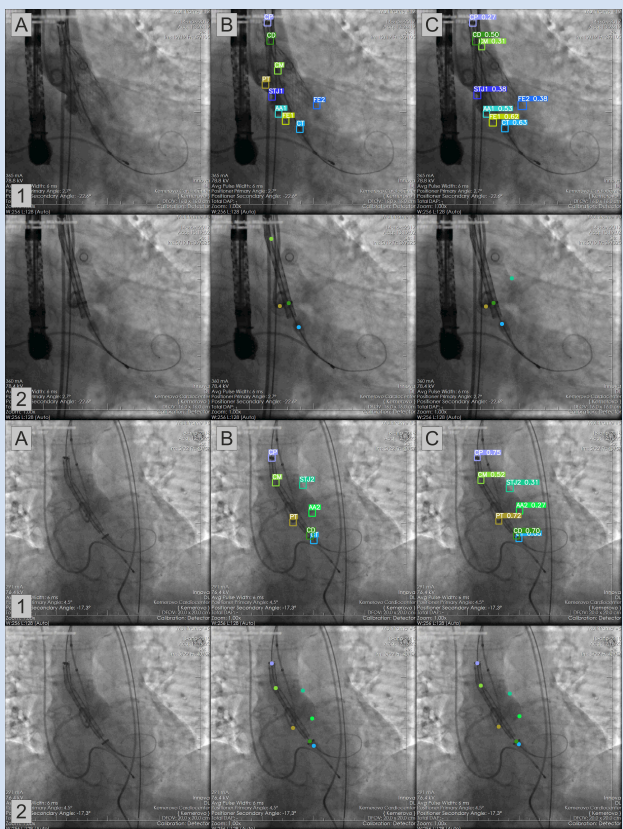


Рисунок 7. Результат работы модели
Figure 7. Results of the model's work

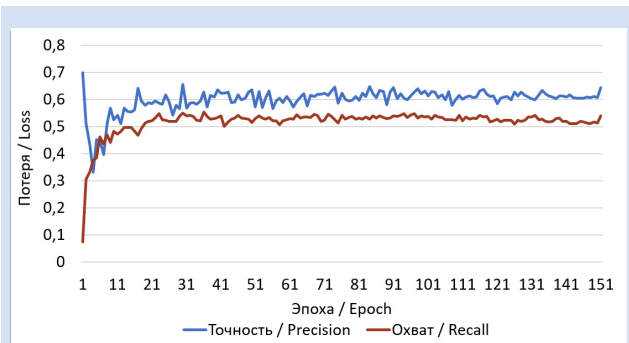


Рисунок 5. Динамика метрик «точность» / «охват» на этапах обучения модели (тестовое множество)
Figure 5. Dynamics of Precision/Recall metrics at the stages of model training (test set)

Конфликт интересов

В.В. Лаптев заявляет об отсутствии конфликта интересов. Н.А. Кочергин заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Лаптев Владислав Витальевич, младший научный сотрудник лаборатории тканевой инженерии и внутрисосудистой визуализации федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-8639-8889

Кочергин Никита Александрович, кандидат медицинских наук заведующий лабораторией тканевой инженерии и внутрисосудистой визуализации федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-1534-264X

Вклад авторов в статью

ЛВВ – вклад в концепцию исследования, получение и анализ данных исследования, написание и корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

КНА – получение данных исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-75-10009, <https://rscf.ru/project/23-75-10009/>.

Author Information Form

Laptev Vladislav V., Junior Researcher at the Laboratory of Tissue Engineering and Intravascular Imaging, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-8639-8889

Kochergin Nikita A., PhD, Head of the Laboratory of Tissue Engineering and Intravascular Imaging, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-1534-264X

Author Contribution Statement

LVV – contribution to the concept and design of the study, data collection and analysis, manuscript writing, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

KNA – data collection, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdelgawad A.M.E., Hussein M.A., Naeim H., Abuelatta R., Alghamdy S. A comparative study of TAVR versus SAVR in moderate and high-risk surgical patients: hospital outcome and midterm results. *Heart Surg Forum. Heart Surg Forum.* 2019;22(5):E331-E339. doi: 10.1532/hcf.2243.
2. Baumgartner H., Falk V., Bax J.J., De Bonis M., Hamm C., Holm P.J., Iung B., Lancellotti P., Lansac E., Rodriguez Muñoz D., Rosenhek R., Sjögren J., Tornos Mas P., Vahanian A., Walther T., Wendler O., Windecker S., Zamorano J.L.; ESC Scientific Document Group. 2017 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J.* 2017;38(36):2739-2791. doi: 10.1093/eurheartj/ehx391.
3. Winkel M.G., Stortecky S., Wenaweser P. Transcatheter aortic valve implantation current indications and future directions. *Front Cardiovasc Med.* 2019;6:179. doi: 10.3389/fcvm.2019.00179.
4. Veulemans V., Mollus S., Saalbach A., Pietsch M., Hellhammer K., Zeus T., Westenfeld R., Weese J., Kelm M., Balzer J. Optimal C-arm angulation during transcatheter aortic valve replacement: accuracy of a rotational C-arm computed tomography based three dimensional heart model. *World J Cardiol.* 2016;8(10):606-614. doi: 10.4330/wjc.v8.i10.606.
5. Dasi L.P., Hatoum H., Kheradvar A., Zareian R., Alavi S.H., Sun W., Martin C., Pham T., Wang Q., Midha P.A., Raghav V., Yoganathan A.P. On the mechanics of transcatheter aortic valve replacement. *Ann Biomed Eng.* 2017;45(2):310-331. doi: 10.1007/s10439-016-1759-3.
6. Chourdakis E., Koniari I., Kounis N.G., Velissaris D., Koutsogiannis N., Tsigkas G., Hauptmann K.E., Sontag B., Hahalis G. The role of echocardiography and CT angiography in transcatheter aortic valve implantation patients. *J Geriatr Cardiol.* 2018;15(1):86-94. doi: 10.11909/j.issn.1671-5411.2018.01.006.
7. Chakravarty T., Jilaihawi H., Doctor N., Fontana G., Forrester J.S., Cheng W., Makkar R. Complications after Transfemoral Transcatheter Aortic Valve Replacement with a Balloon-Expandable Prosthesis: The Importance of Preventative Measures and Contingency Planning. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2018;91(5):E29-E42. doi: 10.1002/ccd.24888.
8. Scarsini R., De Maria G.L., Joseph J., Fan L., Cahill T.J., Kotronias R.A., Burzotta F., Newton J.D., Kharbada R., Prendergast B., Ribichini F., Banning A.P. Impact of complications during transfemoral transcatheter aortic valve replacement:

how can they be avoided and managed? *J Am Heart Assoc.* 2019;8(18):e013801. doi: 10.1161/JAHA.119.013801.

9. Kappetein A.P., Head S.J., Genereux P., Piazza N., van Mieghem N.M., Blackstone E.H., Brott T.G., Cohen D.J., Cutlip D.E., van Es G.A., Hahn R.T., Kirtane A.J., Krucoff M.W., Kodali S., Mack M.J., Mehran R., Rodés-Cabau J., Vranckx P., Webb J.G., Windecker S., Serruys P.W., Leon M.B. Updated standardized endpoint definitions for transcatheter aortic valve implantation: the Valve Academic Research Consortium-2 consensus document (VARC-2). *Eur J Cardio-Thoracic Surg.* 2012;33(19):2403-18. doi: 10.1093/eurheartj/ehs255.

10. Chan J.L., Mazilu D., Miller J.G., Hunt T., Horvath K.A., Li M. Robotic-assisted real-time MRI-guided TAVR: from system deployment to in vivo experiment in swine model. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2016;11(10):1905-18. doi: 10.1007/s11548-016-1421-4.

11. Kilic T., Yilmaz I. Transcatheter aortic valve implantation: a revolution in the therapy of elderly and high-risk patients with severe aortic stenosis. *J Geriatr Cardiol.* 2017;14:204-17. doi: 10.11909/j.issn.1671-5411.2017.03.002

12. Codner P., Lavi I., Malki G., Vaknin-Assa H., Assali A., Kornowski R. C-THV measures of self-expandable valve positioning and correlation with implant outcomes. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2014;84(6):877-84. doi: 10.1002/ccd.25594.

13. Horehledova B., Muhl C., Schwemmer C., Hendriks B.M.F., Eijssvoegel N.G., Kietselaer B.L.J.H., Wildberger J.E., Das M. Aortic root evaluation prior to transcatheter aortic valve implantation: Correlation of manual and semi-automatic measurements. *PLoS One.* 2018;13(6):e0199732. doi: 10.1371/journal.pone.0199732.

14. Овчаренко Е.А., Клышников К.Ю., Саврасов Г.В., Батрагин А.В., Ганюков В.И., Коков А.Н., Нуштаев Д.В., Долгов В.Ю., Кудрявцева Ю.А., Барбараш Л.С. Прогнозирование результатов имплантации транскатетерного протеза клапана аорты на основе метода конечных элементов и данных микрокомпьютерной томографии. Современные технологии в медицине. 2016;8(1): 82-92. doi: 10.17691/stm2016.8.1.11

15. Онищенко П.С., Клышников К.Ю., Овчаренко Е.А. Искусственные нейронные сети в кардиологии: анализ графических данных. Бюллетень сибирской медицины. 2021; 20(4):193-204. doi: 10.20538/1682-0363-2021-4-193-204

16. Danilov V.V., Klyshnikov K.Y., Gerget O.M., Skirnevsky I.P., Kutikhin A.G., Shilov A.A., Ganyukov V.I., Ovcharenko E.A. (2021) Aortography Keypoint Tracking for Transcatheter Aortic Valve Implantation Based on Multi-Task Learning. *Front Cardiovasc Med.* 2021;8:697737. doi: 10.3389/fcvm.2021.697737.

17. Amit, Y., Felzenszwalb, P., Girshick, R. Object Detection. In: *Computer Vision: A Reference Guide..* Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_660-1

18. Лаптев Н.В., Лаптев В.В., Гергет О.М. Обнаружение пожароопасных объектов в лесном массиве на основе динамических признаков. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика.* 2023;63: 72-83. doi: 10.17223/19988605/63/9

19. Manakov R.A., Kolpashchikov D.Y., Laptev N.V., Danilov V.V., Skirnevskiy I.P., Gerget O.M. Visual shape and position sensing algorithm for a continuum robot. 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2019). Tomsk, Russia: TPU Publishing House, 2019. P. 399–402

20. Данилов В.В., Гергет О.М., Клышников К.Ю., Франжи А.Ф., Овчаренко Е.А. Анализ глубоких нейронных сетей для детекции стенозов коронарных артерий. *Программирование.* 2021; 3:3-11. doi: 10.31857/S0132347421030031

21. Tan M., Pang R., Le Q. V. Efficientdet: Scalable and efficient object detection. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). USA: Seattle, 2020. pp. 10778-10787 doi: 10.1109/CVPR42600.2020.01079

REFERENCES

1. Abdelgawad A.M.E., Hussein M.A., Naeim H., Abuelatta R., Alghamdy S. A comparative study of TAVR versus SAVR in moderate and high-risk surgical patients: hospital outcome and midterm results. *Heart Surg Forum. Heart Surg Forum.* 2019;22(5):E331-E339. doi: 10.1532/hsf.2243.

2. Baumgartner H., Falk V., Bax J.J., De Bonis M., Hamm C., Holm P.J., Iung B., Lancellotti P., Lansac E., Rodriguez Muñoz D., Rosenhek R., Sjögren J., Tornos Mas P., Vahanian A., Walther T., Wendler O., Windecker S., Zamorano J.L.; ESC Scientific Document Group. 2017 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J.* 2017;38(36):2739-2791. doi: 10.1093/eurheartj/ehx391.

3. Winkel M.G., Stortecky S., Wenaweser P. Transcatheter aortic valve implantation current indications and future directions. *Front Cardiovasc Med.* 2019;6:179. doi: 10.3389/fcvm.2019.00179.

4. Veulemans V., Mollus S., Saalbach A., Pietsch M., Hellhammer K., Zeus T., Westenfeld R., Weese J., Kelm M., Balzer J. Optimal C-arm angulation during transcatheter aortic valve replacement: accuracy of a rotational C-arm computed tomography based three dimensional heart model. *World J Cardiol.* 2016;8(10):606-614. doi: 10.4330/wjc.v8.i10.606.

5. Dasi L.P., Hatoum H., Kheradvar A., Zareian R., Alavi S.H., Sun W., Martin C., Pham T., Wang Q., Midha P.A., Raghav V., Yoganathan A.P. On the mechanics of transcatheter aortic valve replacement. *Ann Biomed Eng.* 2017;45(2):310-331. doi: 10.1007/s10439-016-1759-3.

6. Chourdakis E., Koniari I., Kounis N.G., Velissaris D., Koutsogiannis N., Tsigkas G., Hauptmann K.E., Sontag B., Hahalis G. The role of echocardiography and CT angiography in transcatheter aortic valve implantation patients. *J Geriatr Cardiol.* 2018;15(1):86-94. doi: 10.11909/j.issn.1671-5411.2018.01.006.

7. Chakravarty T., Jilalhaw H., Doctor N., Fontana G., Forrester J.S., Cheng W., Makkar R. Complications after Transfemoral Transcatheter Aortic Valve Replacement with a Balloon-Expandable Prosthesis: The Importance of Preventative Measures and Contingency Planning. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2018;91(5):E29-E42. doi: 10.1002/ccd.24888.

8. Scarsini R., De Maria G.L., Joseph J., Fan L., Cahill T.J., Kotronias R.A., Burzotta F., Newton J.D., Kharbanda R., Prendergast B., Ribichini F., Banning A.P. Impact of complications during transfemoral transcatheter aortic valve replacement: how can they be avoided and managed? *J Am Heart Assoc.* 2019;8(18):e013801. doi: 10.1161/JAHA.119.013801.

9. Kappetein A.P., Head S.J., Genereux P., Piazza N., van Mieghem N.M., Blackstone E.H., Brott T.G., Cohen D.J., Cutlip D.E., van Es G.A., Hahn R.T., Kirtane A.J., Krucoff M.W., Kodali S., Mack M.J., Mehran R., Rodés-Cabau J., Vranckx P., Webb J.G., Windecker S., Serruys P.W., Leon M.B. Updated standardized endpoint definitions for transcatheter aortic valve implantation: the Valve Academic Research Consortium-2 consensus document (VARC-2). *Eur J Cardio-Thorac Surg.* 2012;33(19):2403-18. doi: 10.1093/eurheartj/ehs255.

10. Chan J.L., Mazilu D., Miller J.G., Hunt T., Horvath K.A., Li M. Robotic-assisted real-time MRI-guided TAVR: from system

deployment to in vivo experiment in swine model. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2016;11(10):1905-18. doi: 10.1007/s11548-016-1421-4.

11. Kilic T., Yilmaz I. Transcatheter aortic valve implantation: a revolution in the therapy of elderly and high-risk patients with severe aortic stenosis. *J Geriatr Cardiol.* 2017;14:204-17. doi: 10.11909/j.issn.1671-5411.2017.03.002

12. Codner P., Lavi I., Malki G., Vaknin-Assa H., Assali A., Kornowski R. C-THV measures of self-expandable valve positioning and correlation with implant outcomes. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2014;84(6):877-84. doi: 10.1002/ccd.25594.

13. Horehledova B., Muhl C., Schwemmer C., Hendriks B.M.F., Eijssvoegel N.G., Kietselaer B.L.J.H., Wildberger J.E., Das M. Aortic root evaluation prior to transcatheter aortic valve implantation: Correlation of manual and semi-automatic measurements. *PLoS One.* 2018;13(6):e0199732. doi: 10.1371/journal.pone.0199732.

14. Ovcharenko E.A., Klyshnikov K.U., Savrasov G.V., Batranin A.V., Ganykov V.I., Kokov A.N., Nushtaev D.V., Dolgov V.Y., Kudryavtseva Y.A., Barbarash L.S. Predicting the Outcomes of Transcatheter Aortic Valve Prosthesis Implantation Based on the Finite Element Analysis and Microcomputer Tomography Data. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2016; 8(1): 82-92. doi: 10.17691/stm2016.8.1.11 (In Russian)

15. Onishchenko P.S., Klyshnikov K.Y., Ovcharenko E.A. Artificial neural networks in cardiology: analysis of graphical. *Bulletin of Siberian Medicine.* 2021; 20(4):193-204. doi: 10.20538/1682-0363-2021-4-193-204 (In Russian)

16. Danilov V.V., Klyshnikov K.Y., Gerget O.M., Skirnevsky I.P., Kutikhin A.G., Shilov A.A., Ganyukov V.I., Ovcharenko E.A. (2021) Aortography Keypoint Tracking for Transcatheter Aortic Valve Implantation Based on Multi-Task Learning. *Front Cardiovasc Med.* 2021;8:697737. doi: 10.3389/fcvm.2021.697737.

17. Amit, Y., Felzenszwalb, P., Girshick, R. Object Detection. In: *Computer Vision: A Reference Guide..* Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_660-1

18. Laptev N.V., Gerget O.M., Laptev V.V., Kravchenko A.A. Forest fire detection system based on neural network ensemble. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science* 2023;63: 72-83. doi: 10.17223/19988605/63/9 (In Russian)

19. Manakov R.A., Kolpashchikov D.Y., Laptev N.V., Danilov V.V., Skirnevskiy I.P., Gerget O.M. Visual shape and position sensing algorithm for a continuum robot. 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2019). Tomsk, Russia: TPU Publishing House, 2019. P. 399–402

20. Danilov V.V., Gerget O.M., Klyshnikov K. Y., Frangi A.F., Ovcharenko E.A. Analysis of deep neural networks for detection of coronary artery stenosis. *Programming.* 2021;3:3-11. doi:10.31857/S0132347421030031. (In Russian)

21. Tan M., Pang R., Le Q. V. Efficientdet: Scalable and efficient object detection. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). USA: Seattle, 2020. pp. 10778-10787 doi: 10.1109/CVPR42600.2020.01079

Для цитирования: Лаптев В.В., Кочергин Н.А. Применение технологии Object detection в задаче обнаружения ключевых точек аортографии. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2024;13(1): 144-151. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-1-144-151

To cite: Laptev V.V., Kochergin N.A. Application of Object detection technology in aortography keypoint tracking. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2024;13(1): 144-151. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-1-144-151