

УДК: 004.896

РОБОТ-АССИСТРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДОСТАВКИ МЕДИЦИНСКОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ

О.М. Гергет

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: gerget@ipu.ru

Д.С. Гергет

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: sgerget74@gmail.com

Ключевые слова: гибкая робототехника, машинное обучение, медицинские робот-ассистированные комплексы

Аннотация: Разрабатываемая робот-ассистированная система доставки медицинского инструмента и имплантируемого устройства при проведении клапанной терапии стентоподобными устройствами включает в себя систему визуального контроля и систему доставки медицинского инструмента к зоне интереса. В рамках создания системы визуального контроля требовалось разработать метод поиска ключевых точек, направленный на одновременное предсказание класса (метки) и координат ключевых точек. К ключевым точкам относятся точки анатомических структур и инструмента доставки. В связи с этим разработан метод, основанный на многозадачном обучении. При разработке системы доставки медицинский инструмент (катетер) рассмотрен с позиции непрерывного робота и смоделирован с точки зрения допущения о кусочно-постоянной кривизне, а с целью увеличения точности позиционирования дистального конца катетера предложен метод решения обратной задачи кинематики для секции изгиба непрерывного робота (катетера) с переменной кривизной и возможностью линейного смещения базы. В статье последовательно рассмотрены системы доставки инструмента и визуального контроля, приведены результаты исследования.

1. Введение

В настоящее время инновационные решения в области медицинской робототехники позволяют активно применять роботизированные комплексы при проведении эндоваскулярных процедур. Однако, существует ряд проблем, одна из которых связана с имеющимся противоречием между повышением автоматизации доставки медицинского инструмента в заданную область тела человека и неопределенностью его местоположения при одновременной минимизации времени нахождения инструмента в теле, что требует комплексирования большого количества сенсорной информации и повышения уровня интеллектуальности робот-ассистированных систем.

В статье рассмотрен вопрос разработки робот-ассистированных систем для решения проблемы, вызванной функционированием работы сердечных клапанов, которая в большинстве случаев решается на основе клапанной терапии стентоподобными устройствами (TAVR), посредством эндоваскулярной имплантации медицинского устройства (транскатетерного клапана) малоинвазивным способом через катетер, вводимый в сосудистую систему человека. Ключевыми факторами таких вмешательств являются визуальный контроль, и точность позиционирования устройства. Визуальный контроль небольшого по размеру медицинского инструмента внутри движущейся области является нетривиальной задачей. Следует отметить, что комплексирование данных разной модальности, трекинг, сегментация, детектирование осложняются тем, что данные процедуры должны осуществляться максимально быстро и эффективно при обработке изображений. Другим важным вызовом является разработка роботизированной платформы, методов навигации и управления инструментом внутри сосудистой системы. Сам процесс автоматизации из-за отсутствия одновременно точных и быстрых моделей, описывающих поведение катетера внутри сложных анатомических структур, несмотря на существующие разработки не является решенной задачей. В связи с этим актуальным направлением исследования является, во-первых, применение концепции управления гибким манипулятором (в частности, медицинским инструментом) в исследованиях малоинвазивной навигации; во-вторых, комплексированием данных разной модальности, полученных при проведении клапанной терапии стентоподобными устройствами (TAVR), с методами искусственного интеллекта.

2. Материалы и методы

В настоящий момент на рынке присутствуют два разных роботизированных решения для осуществления эндоваскулярных процедур при проведении хирургических вмешательств на сердечно-сосудистой системе: хирургическая система Da Vinci от Intuitive и роботизированные катетеры [1-3]. В рамках статьи под роботизацией катетера понимается создание роботизированной платформы, управляющей катетером и направляющим устройством. Роботизированная платформа должна обеспечивать перемещение и вращение катетера в пространстве, иметь возможность взаимодействовать со всеми механизмами управления самого катетера, быть эргономичной и иметь возможность размещаться в пространстве с С-дугой.

Для обеспечения управления роботизированной платформой принято решение рассмотреть катетер с позиции непрерывного робота с допущением о кусочно-постоянной кривизне. С этой целью проведено исследование существующих подходов и разработан новый метод для аппроксимации фактической рабочей области медицинского инструмента. На основе разработанного метода аппроксимации определены значения параметров катетера при введенном допущении: 1) катетер (непрерывный робот) состоит из последовательных секций изгиба. Конструкция секций такова, что изменение конфигурации одной секции не приводит к изменению конфигурации остальных секций; 2) каждая секция изгиба разбита на подсекции, которые изгибаются или меняют длину вместе со всей секцией. Каждой подсекции исходя из ее конструкции присвоены веса, которые отражают какая доля изменений по длине или по углу изгиба секции приходится на подсекцию. [4]. Полученные таким образом параметры катетера позволяют более точно моделировать изгиб катетера и тем самым решать прямую задачу кинематики и моделировать тело катетера с высокой точностью, обеспечив работу в режиме реального времени.

Решение задачи позиционирования осуществляется посредством реализации метода решения обратной задачи кинематики катетера, как непрерывного робота переменной кривизны, с возможностью линейного смещения базы.

Сущность метода заключается в решении обратной задачи кинематики на основе итеративного поиска отношения k между углом изгиба θ и углом хорды α и подборе линейного перемещения h (смещение базы) через угол хорды α и текущую длину переменной части секции изгиба S'_Δ . Данный метод позволяет найти ближайшую нулевой конфигурацию секции, которая удовлетворяет целевому положению рабочего органа робота [5].

Эффективность метода оценивалась по скорости и доли успешных решений. Было сгенерировано 10^5 целей (на основе прямой кинематики). Решение считается успешным, если обратная задача кинематики решена менее чем за 0.5 мс. с точностью $\varepsilon_A = 0.001$ рад (угловой допуск) и $\varepsilon_L = 1$ мкм (линейный допуск).

С целью решения обратной задачи кинематики для роботизированной платформы с катетером предлагается модифицировать алгоритм FABRIK (показывающий лучшие результаты с точки зрения точности и скорости работы по сравнению с аналогами) за счет описания катетера отрезками хорд и касательных, что позволило повысить точность решения обратной задачи кинематики для всей системы и обеспечить работу в режиме реального времени (в данном случае, задача должна быть решена до получения следующего кадра от медицинского оборудования (Ангиографы: Siemens Artis zeego)).

Поскольку управление перемещением катетера осуществляется на основе данных обратной связи визуального сопровождения, то следует отметить не менее важную задачу, решаемую в рамках разработки робот-ассистированного комплекса, которая заключается в создании системы визуального контроля.

Модуль визуального контроля предполагает решение таких задач, как: распознавание, трекинг, сегментация и синхронизация данных как анатомических структур, так и медицинского инструмента. В статье остановимся на решении задач распознавания и трекинга анатомических структур и медицинского инструмента на основании графических медицинских данных. С этой целью разработан подход, в основе которого лежит концепция многозадачного обучения (рис. 1).

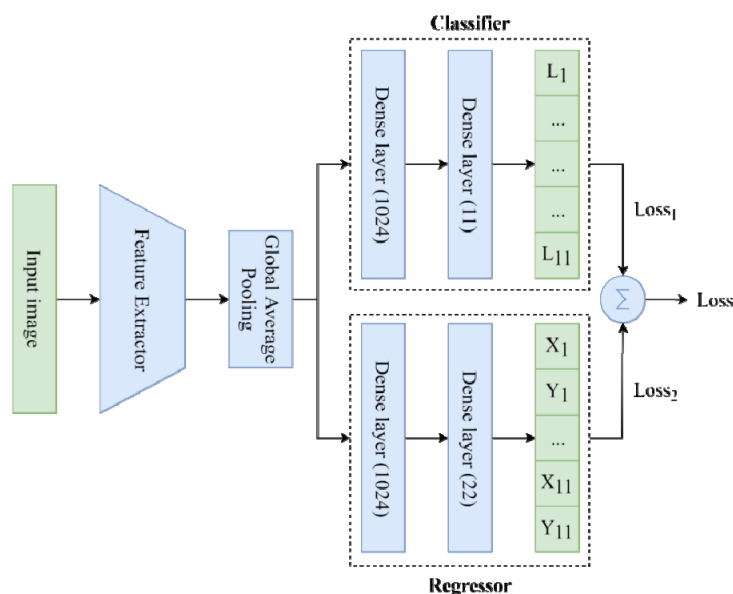


Рис. 1. Концепция многозадачного обучения для поиска и классификации ключевых точек.

Модель на основе многозадачного обучения включает несколько частей, основными среди которых являются: извлечение признаков (на выходе вектор оптимальных дискрипторов); классификатор (11 выходов, отражающих вероятности обнаружения интересующих ключевых точек на изображении); регрессор (на выходе предсказание координат ключевых точек (22 выхода)). С этой целью использованы детекторы Faster-RCNN, SSD, RFCN на основе таких моделей как MobileNet, ResNet, Inception ResNet и NASNet, которые варьируются по архитектуре, сложности и количеству весов. Поскольку модели, построенные по принципу многозадачного обучения, предполагают одновременное решение нескольких задач, то необходимо осуществлять одновременную оптимизацию нескольких функций потерь. В нашем исследовании в качестве общей функции потерь при решении задачи классификации использовалась взвешенная сумма бинарной кросс-энтропии и Log-Cosh – функция потерь при регрессии. В результате общая функция потерь рассчитывается следующим образом:

$$Loss = w_1 \cdot Loss_1 + w_2 \cdot Loss_2,$$

$$Loss_1 = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \log \hat{y}_i + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i),$$

$$Loss_2 = \sum_{i=1}^N \log(\cosh(\hat{y}_i - y_i)) = \sum_{i=1}^N \log\left(\frac{e^{(\hat{y}_i - y_i)} + e^{-(\hat{y}_i - y_i)}}{2}\right),$$

где y_i – истинное значение, \hat{y}_i – предсказание модели, N – количество классов/точек.

Поскольку вклад функции Log-Cosh в общую функцию потерь значительно меньше, то для сохранения баланса значение веса w_2 задается в 2 раза больше, чем значение веса w_1 .

После предварительной обработки входных данных сформированы обучающая и тестовая выборки, состоящие из наборов двумерных изображений 1000×1000 пикселей с 8-битной глубиной. Итоговая выборка состояла из 4817 изображений в оттенках серого, из которых 3485 изображений использованы в качестве обучающего набора, а 1332 – в качестве тестового набора. Проведение TAVR позволило получить серию анонимных изображений, иллюстрирующих 3 этапа: позиционирование катетера и системы доставки, начало ретракции капсулы и выход имплантируемого клапана, развертывание клапана. После прохождения 100000 итераций обучения, каждая модель была протестирована на тестовом наборе данных. В качестве оценки точности выбрана метрика mean Average Precision с использованием порогового значения Intersection over Union = 0.5 (mAP@0.5) [6]. Изменение точности результатов на основе исследуемых моделей отражена на рис. 2:

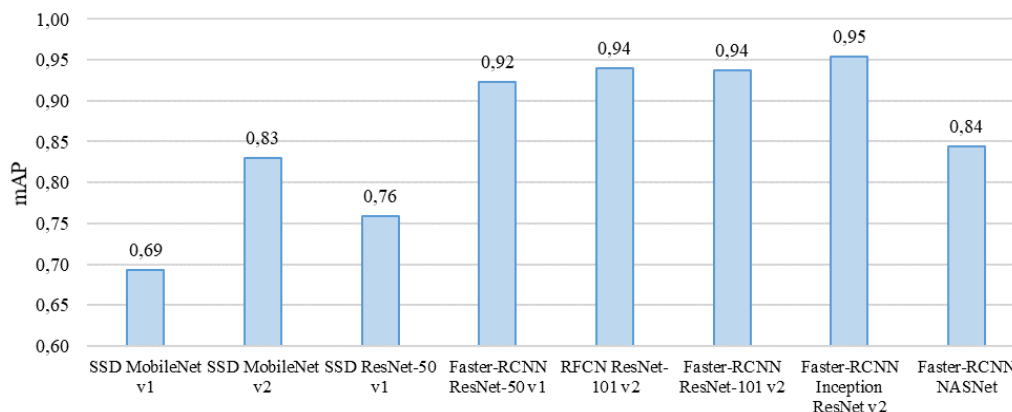


Рис. 2. Сравнение значений точности поиска и классификации ключевых точек для исследуемых моделей.

Наибольшей точностью обладают модели, использующие модели ResNet-50 и ResNet-101. Стоит также отметить, модель MobileNet v2 на основании детектора SSD. Такая комбинация позволила получить относительно высокое значение точности ($mAP@0.5 = 0.83$), имея при этом 6.06 млн. весов.

3. Заключение

Разрабатываемая робот-ассистированная система основана на сочетании методов визуального ассистирования и роботизированной платформы доставки медицинского инструмента при проведении малоинвазивных вмешательств на сердце. Для обеспечения управления роботизированной платформой катетер смоделирован с точки зрения допущения о кусочно-постоянной кривизне, а с целью увеличения точности позиционирования дистального конца катетера предложен метод решения обратной задачи кинематики для секции изгиба непрерывного робота (катетера) с переменной кривизной и возможностью линейного смещения базы, который отличается от существующих итеративным поиском отношения между углом, образованным хордой и касательной к ней, проведенной через начало секции изгиба, и углом изгиба, и итеративным подбором линейного смещения базы. Анализ результатов показывает, что предложенный метод решения обратной задачи кинематики для одиночной секции изгиба является более надежным (доля успешных решений у предложенного метода от 7% до 35% выше, чем у метода, основанного на вычислении матриц Якоби).

При решении задачи распознавания разработан подход на основе многозадачного обучения. Наибольшую точность показала реализация модели Faster-RCNN Inception ResNet. Средняя точность предсказания данной модели на тестовой выборке составила 95%, скорость предсказания 3 кадра в сек. Наиболее быстрая и легковесная модель SSD MobileNet имеет среднюю точность предсказания 83%, при этом средняя скорость предсказания – 26 кадров в сек.

Прикладная значимость результатов позволит повысить точность методов управления непрерывным роботом и достоверность прогнозирования динамики процессов на основе автоматизированного интеллектуального анализа.

Список литературы

1. Najafi G. et al. Current State of Robotics in Interventional Radiology // CardioVascular and Interventional Radiology. 2023. Vol. 46, No. 5. P. 549-561.

2. Iqbal S., Mohammed S., Amirat Y. A guaranteed approach for kinematic analysis of continuum robot based catheter // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2009. P. 1573-1578.
3. Durand E. et al. Evaluation of the R-one robotic system for percutaneous coronary intervention: the R-EVOLUTION study // EuroIntervention: journal of EuroPCR in collaboration with the Working Group on Interventional Cardiology of the European Society of Cardiology. 2023. Vol. 18, No. 16. P.1339-1347.
4. Kolpashchikov D. Y., Gerget O. M. Comparison of Inverse Kinematics Algorithms for Multi-Section Continuum Robots // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, №. 8. С. 420-424.
5. Kolpashchikov D.Y., Gerget O.M., Danilov V.V. FABRIKx: Tackling the Inverse Kinematics Problem of Continuum Robots with Variable Curvature // Robotics. 2022. Vol. 11. No 6. P. 1-16.
6. Danilov V.V., Klyshnikov K.Y., Gerget O.M., Skirnevsky I.P., Kutikhin A.G., Shilov A.A., Ganuykov V.I., Ovcharenko E.A. Aortography keypoint tracking for transcatheter aortic valve implantation based on multi-task learning // Frontiers in Cardiovascular Medicine. 2021. Vol. 8, Article number 697737. P. 1-15.