

Разработка системы телеуправления непрерывного робота, управляемого по схеме “ведущий–ведомый”

Д. Ю. Колпащиков, С. Б. Галина, М. В. Мамченко, Р. Р. Галин

Институт проблем управления им В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия.

Поступила в редколлегию 01.07.2025 г. Принята 24.07.2025 г.

Аннотация—Представлена человеко-машинная система телеуправления непрерывным роботом для эндоваскулярных вмешательств, реализующая схему “ведущий–ведомый”. Ведущий роботизированный катетер вручную деформируется оператором и оснащен распределёнными оптоволоконными датчиками формы. Ведомый катетер, введённый в сосудистое русло пациента, отслеживается методами компьютерного зрения и снабжён тензодатчиками усилий. Алгоритмы обратной кинематики обеспечивают воспроизведение формы ведущего катетера ведомым, а сенсорная обратная связь передаёт контактные нагрузки в виде регулируемого механического сопротивления. Показано, что система удовлетворяет ключевым критериям коллаборативной робототехники – интуитивность управления, двусторонняя обратная связь, адаптивное ограничение движений и безопасность пациента. Рассмотрены перспективы расширения функций за счёт интерактивного обучения и предиктивного контроля. Решение может стать основой для роботизированных платформ нового поколения, предназначенных для мало-инвазивных процедур в условиях ограниченной визуализации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: непрерывный робот, роботизированный катетер, телеуправление; схема “ведущий–ведомый”, тактильная обратная связь, оптоволоконные сенсоры, визуальная реконструкция формы, коллаборативная робототехника, эндоваскулярная хирургия.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_2_79

1. ВВЕДЕНИЕ

Робот – это запрограммированный приводной механизм с определённой степенью автономности, который перемещается в своей среде для выполнения заданных задач [1]. В современных условиях робототехнические системы становятся неотъемлемыми элементами автоматизированных комплексов, расширяющими функциональные возможности человека и позволяющими выполнять операции в средах, потенциально опасных или труднодоступных для непосредственного присутствия оператора. К числу таких сред относятся подводные пространства, зоны действия ионизирующего излучения, орбитальные и замкнутые технологические объёмы, включая, например, трубопроводы.

Наиболее распространённым типом промышленных роботов являются роботы-манипуляторы, функционирующие в хорошо структурированных и заранее известных средах. Такие условия обеспечивают предсказуемость взаимодействия с окружающими объектами и позволяют использовать упрощённые модели поведения. Однако при работе в слабоструктурированных или динамически изменяющихся условиях применение жёсткозвенных манипуляторов сопряжено с рядом ограничений. Основным из них являются потенциальные нежелательные столкновения с объектами среды, способные привести к повреждению как самого робота, так и окружающих элементов. Также сложность представляет управление роботами в неизвестных или слабо формализованных средах, где отсутствуют адекватные модели взаимодействия. Кроме



Рис. 1. Пример непрерывного робота [5].

того, даже в структурированных пространствах, насыщенных препятствиями, традиционные решения с ограниченным числом степеней свободы оказываются недостаточно гибкими.

Одним из направлений повышения адаптивности и маневренности робототехнических систем является использование конструкций с избыточным числом степеней свободы. Такая избыточность позволяет реализовывать альтернативные траектории движения при сохранении основной задачи, тем самым обеспечивая возможность обхода препятствий и минимизации рисков столкновений. Однако внедрение избыточных степеней свободы требует разработки более сложных алгоритмов управления, возросших вычислительных ресурсов, а также увеличивает конструктивную и экономическую сложность системы.

2. RELATED WORK

Непрерывные (континуум) роботы представляют собой класс гибких робототехнических систем, которые совершают движение за счет упругой деформации изгиба собственного тела [2]. Такие роботы обладают высокой маневренностью, что позволяет использовать их в пространствах со сложной неструктурированной геометрией для выполнения различных задач. Например, непрерывные роботы используются для неразрушающего контроля и ремонта внутри сложных устройств [3–5] (см. рис. 1), а также для проведения диагностики и малоинвазивных хирургических вмешательств [6, 7].

Кинематика непрерывных роботов активно изучается и на сегодняшний день известно множество решений как прямой [8–11], так и обратной задач кинематики [12–16]. Наиболее распространенные и эффективные подходы базируются на двух ключевых предположениях: об отсутствии кручения и о постоянстве кривизны. Допущение об отсутствии кручения говорит о том, что у непрерывного робота отсутствует деформация кручения. Допущение о постоянстве кривизны означает, что если секция изгиба непрерывного робота (деформируемое звено робота) построена оптимально, то она будет изгибаться так, что кривизна и кручение будут постоянны по всей длине нейтральной линии изгиба секции [8]. В этом случае нейтральная линия секции всегда будет представлять собой дугу круга. Также существует более продвинутое допущение постоянной кривизны – допущение о кусочно-постоянной кривизне [17]. Оно представляет секцию изгиба как последовательность подсекций, плавно переходящих друг в друга, изгиб которых описывается допущением о постоянной кривизне. Позицию и ориентацию конечного элемента подсекции можно описать с помощью виртуального жесткого робота.

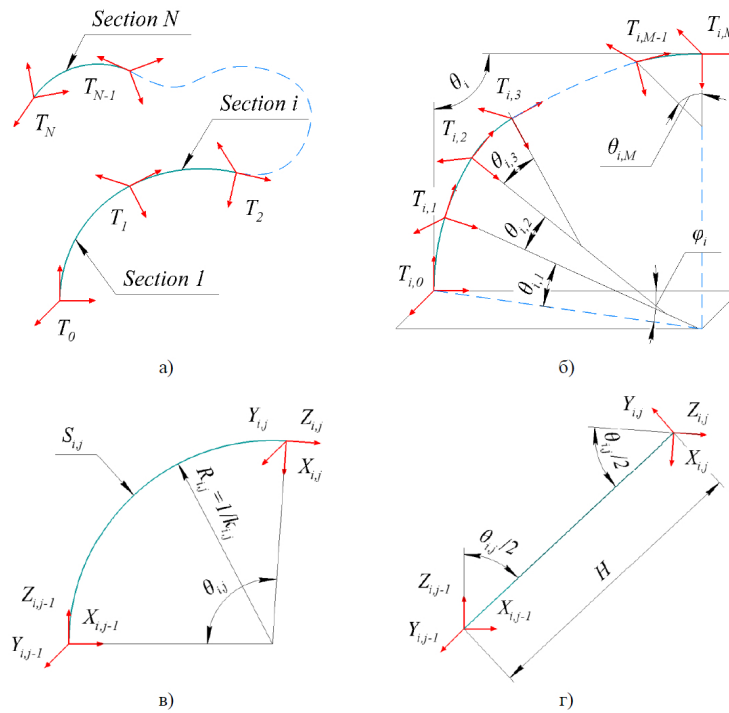


Рис. 2. Кинематическая структура многосекционного непрерывного робота: а) общая кинематика робота, б) кинематика i -ой секции, в) кинематика j -ой подсекции, г) виртуальный жесткий робот, описывающий подсекцию.

На рис. 2. представлена кинематическая структура N -секционного непрерывного робота, описанного допущением о кусочно-постоянной кривизне. Многосекционный непрерывный робот представляет собой последовательность независимых секций изгиба (см. рис. 2а). Касательные двух соседних секций лежат на одной прямой в точке сопряжения секций. Каждая секция изгиба делится M подсекций (см. рис. 2б). Во время изгиба секции все ее подсекции изгибаются одновременно. Угол между первой и последней касательными секции – угол изгиба секции. Касательные двух соседних подсекций лежат на одной прямой в точке сопряжения подсекций. Допущение о постоянстве кривизны используется для описания формы нейтральной линии подсекции (см. рис. 2в). Положение и ориентация конечного элемента робота определяется с использованием виртуального жесткого робота (см. рис. 2г).

Виртуальный жесткий робот, описывающий подсекцию. Одним из ключевых способов управления непрерывными роботами является телеуправление – это управление в реальном времени движением робота, осуществляемое оператором дистанционно [1]. Этот подход особенно актуален в медицинских приложениях, где применение непрерывных роботов позволяет операторам выполнять процедуры вне зоны воздействия ионизирующего излучения (например, рентгеновского или флюороскопического).

2.1. Телеуправление непрерывным роботом

Сложная и гибкая структура непрерывных роботов представляет собой серьёзный вызов при разработке эффективных человеко-машинных интерфейсов для систем телеуправления. В отличие от традиционных манипуляторов с жёсткими звеньями, кинематика которых интуитивно сопоставима с движениями человеческой руки, поведение непрерывных роботов существенно отличается и требует иных подходов к управлению. Более подходящие биомеханические аналоги непрерывных роботов можно найти среди представителей животного мира –

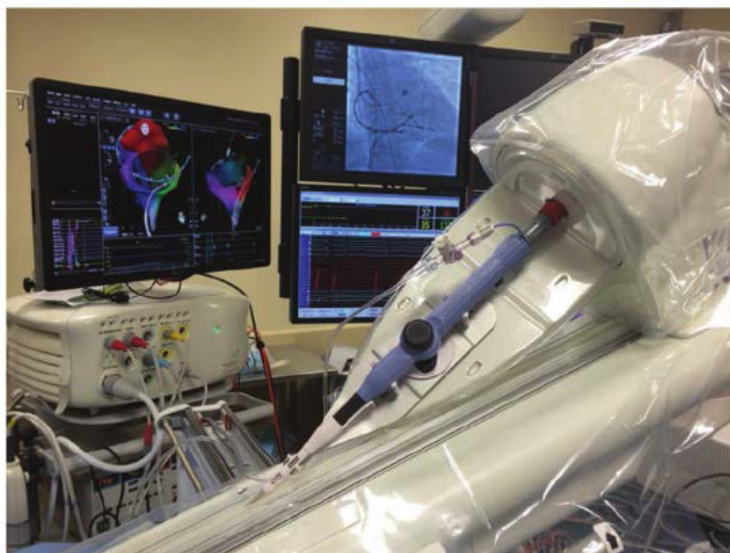


Рис. 3. Стандартный катетер в оснастке для дистанционного управления [18].

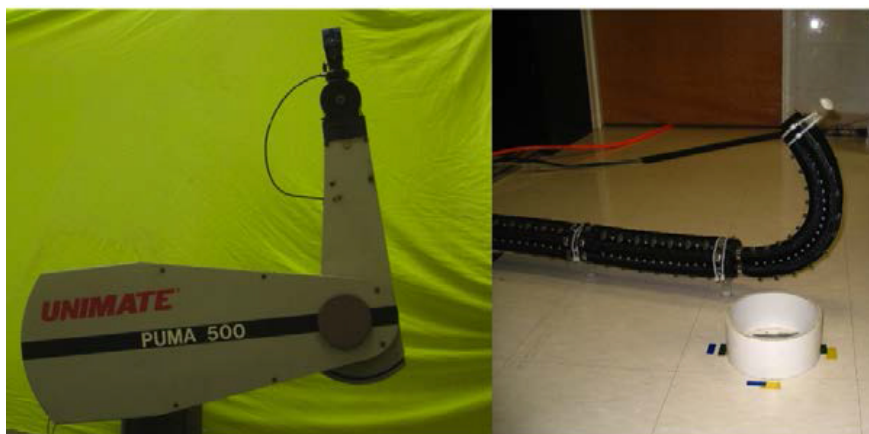


Рис. 4. Примеры жестких роботов в качестве ведущего [21, 22].

например, щупальце осьминога или хобот слона. У человека наибольшим структурным сходством обладает позвоночник, однако он не обеспечивает необходимой подвижности и точности для воспроизведения сложных деформаций, характерных для непрерывных систем.

В качестве ведомого устройства могут использоваться различные непрерывные роботы. В медицинской практике наиболее часто применяются роботизированные катетеры (см. рис. 3) – специализированные устройства, предназначенные для дистанционного управления стандартными гибкими катетерами.

В системах телеуправления в качестве ведущих устройств чаще всего используются джойстики или иные контроллеры, обеспечивающие управление положением и/или ориентацией ведомого робота [19, 20]. Несмотря на распространённость такого подхода, ограниченное число степеней свободы у данных устройств может вызывать затруднения при преобразовании движений джойстика в движения манипулятора.

Альтернативным решением является использование жёсткого робота в качестве ведущего устройства [21, 22] (см. рис. 4). В этом случае жёсткий манипулятор служит для задания целевой точки или желаемой формы, которую должен воспроизвести непрерывный робот. В

обоих случаях используется обратная кинематика для определения конфигурации, которая позволит непрерывному роботу достичь указанной точки. Хотя этот подход демонстрирует работоспособность, он часто оказывается неинтуитивным для пользователя.

Более интуитивным методом является применение другого непрерывного робота в роли ведущего устройства [23]. В этом случае ведущий робот делается кинематически похожим на ведомого робота. Такой подход обеспечивает высокую степень прозрачности управления, однако требует наличия системы сенсорного восприятия формы ведущего робота, что создаёт дополнительные технические сложности.

2.2. Восприятие формы непрерывного робота

Восприятие формы непрерывного робота представляет собой задачу определения текущей конфигурации робота на основе сенсорных данных. Восприятие формы является ключевым элементом для реализации обратной связи в управлении непрерывными и мягкими роботами.

Ввиду отсутствия жёстких звеньев и шарниров, а также компактным размерам, которые создают трудности при интеграции с существующими датчиками, определение конфигурации таких роботов требует применения специализированных сенсорных систем. Это привело к активным исследованиям различных типов сенсоров, которые зачастую разрабатываются специально для конкретных роботов с учётом их уникальной механической конструкции и кинематической структуры [24]. В настоящее время основными подходами к определению формы являются методы, основанные на измерении электрических, магнитных и оптических свойств, а также методы, основанные на анализе изображений.

Электрические сенсоры [25, 26]: работают на основе изменения сопротивления, емкости или индуктивности при изгибе робота. Чаще всего они изготавливаются из эластичных токопроводящих материалов, что позволяет интегрировать их в гибкие структуры. Распространённые варианты включают проводящие полимеры, жидкие металлы, нанокompозиты и импедансную томографию. Изгиб или растяжение изменяет электрофизические параметры, что позволяет восстановить форму по сенсорной информации.

Магнитные сенсоры [27, 28]: основаны на измерении параметров магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами или катушками, встроенными в структуру робота. Положение и ориентация магнитных элементов отслеживаются с помощью внешних или встроенных магнитометрических сенсоров. Изменения ориентации и положения магнита при деформации конструкции позволяют восстановить форму робота.

Оптические сенсоры [29, 30]: используют оптоволоконные сенсоры (например, FBG). Они используют изменения длины волны отражённого света в оптоволоконных структурах при изгибе, растяжении или кручении. Для пространственного восприятия формы вдоль тела робота, как правило, используются многожильные или многоточечные волокна с несколькими зонами регистрации. Распределённые сенсоры позволяют восстановить кривизну и кручение по всей длине нейтральной линии изгиба, а при наличии нескольких волокон – и трёхмерную конфигурацию.

Следует отметить, что большинство сенсорных систем разрабатываются в привязке к конкретной конструкции, что существенно ограничивает возможности стандартизации.

Дополнительно, перспективным направлением является применение визуальных методов восприятия формы. Визуальные методы основаны на извлечении геометрической информации о форме робота из изображений, полученных с помощью камер [31, 32] (см. рис. 5) или медицинских визуализирующих устройств [33]. Современные методы включают элементы компьютерного зрения и глубинного обучения, что позволяет работать с “сырыми” изображениями без явных геометрических моделей.

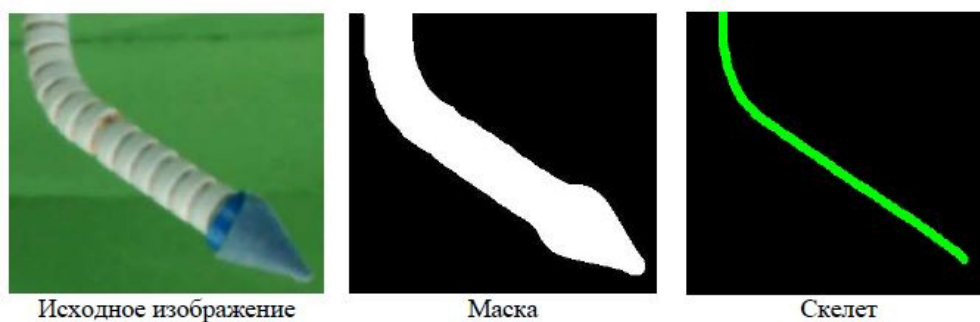


Рис. 5. Пример визуального восприятия формы непрерывного робота [31].

Сравнительный анализ ключевых характеристик каждого метода восприятия формы приведен в таблице 1.

Таблица 1. Ключевые характеристики методов восприятия роботов

Метод	Достоинства	Недостатки
Электрические сенсоры	– Низкая стоимость; – Простота реализации; – Быстрый отклик.	– Чувствительность к электромагнитным помехам; – Ограниченная точность; – Необходимость регулярной калибровки и температурной компенсации.
Магнитные сенсоры	– Работа без прямой видимости; – Поддержка миниатюрных и компактных решений; – Работа в реальном времени с высокой частотой обновления данных.	– Подверженность влиянию внешних ферромагнитных материалов и полей; – Необходимость индивидуальной калибровки сенсорной зоны; – Ограниченный рабочий объем.
Оптические сенсоры	– Высокая точность и разрешение; – Устойчивость к помехам; – Возможность измерения кривизны, кручения и удлинения.	– Высокая стоимость оборудования; – Ограничения по радиусу изгиба; – Сложность монтажа.
Визуальные методы	– Отсутствие необходимости сенсоров в теле робота; – Использование существующей визуализации; – Поддержка реконструкции формы через компьютерное зрение и обучение; – Высокая гибкость алгоритмической постобработки.	– Высокие вычислительные затраты; – Зависимость от условий визуализации; – Требуется прямая видимость объекта.

Проведённый анализ показывает, что выбор метода восприятия формы должен определяться условиями применения, конструктивными ограничениями робота и требованиями к точности и надёжности и стоимости.

Оптические методы на основе FBG-сенсоров обеспечивают наилучшее качество измерения формы, включая изгиб, кручение и удлинение, при высокой устойчивости к внешним помехам. Однако они требуют дорогостоящего оборудования и сложной интеграции, особенно в миниатюрные конструкции.

Электрические сенсоры являются привлекательными за счёт низкой стоимости и простоты реализации. Тем не менее, они подвержены шумам, нестабильности и требуют регулярной калибровки.

Магнитные методы удобны для задач, не допускающих прямой визуализации, но страдают от низкой устойчивости к внешним магнитным и металлическим объектам, что ограничивает их надёжность в клинических или производственных условиях.

Визуальные методы обеспечивают универсальный способ получения информации о форме. Однако они чувствительны к условиям освещения, имеют значительные задержки и требуют высоких вычислительных ресурсов.

Исходя из проведенного анализа наиболее перспективными средствами восприятия формы для телеуправляемого непрерывного робота, управляемого по схеме “ведущий-ведомый”, являются визуальные методы и оптические сенсоры. Оптические сенсоры могут использоваться для восприятия формы ведомого робота поскольку они обладают высокой точностью и помехоустойчивостью. Визуальные методы могут быть использованы для восприятия формы ведомого робота, так как для использования этих методов нет нужды в вмешательстве в конструкцию роботизированного катетера для установки сенсоров.

3. ПРОБЛЕМА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Эндоваскулярные технологии занимают одно из ведущих направлений в современной кардиохирургии, обеспечивая малоинвазивный доступ к структурам сердечно-сосудистой системы и способствуя снижению операционных рисков. Одним из ключевых факторов, определяющих успешность вмешательства, является точное и безопасное позиционирование гибкого инструмента (катетера) в соответствии с анатомическими ориентирами.

В существующей клинической практике управление катетером осуществляется вручную и основывается на ограниченной визуальной информации (например, данных ангиографии) и субъективных тактильных ощущениях хирурга, возникающих при взаимодействии инструмента с тканями. Несмотря на высокую распространённость и эффективность этого подхода, он обладает рядом существенных ограничений:

- Визуальный контроль затруднён из-за слабой контрастности катетера и анатомических структур на медицинских изображениях. Для повышения визуальной различимости используется контрастное вещество, однако его многократное применение ограничено по клиническим показаниям;
- Точность манипуляций во многом зависит от квалификации и опыта хирурга;
- Хирург в течение всего вмешательства подвержен воздействию ионизирующего излучения, что создаёт необходимость в снижении времени нахождения в рентгеноопасной зоне и автоматизации отдельных этапов процедуры.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка человеко-машинной системы управления непрерывным роботом на основе архитектуры “ведущий-ведомый”, обеспечивающей интуитивное управление, тактильную обратную связь и адаптивное ограничение манипуляций в условиях ограниченной визуализации.

4. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ

В настоящей работе предлагается человеко-машинная система управления, реализующая архитектуру “ведущий-ведомый” для роботизированного катетера. В основе системы лежат два непрерывных робота с идентичной кинематической структурой, функционирующие как

ведущий и ведомый. Это обеспечивает прямую и однозначную передачу действий оператора на исполнительное устройство.

Ведущий роботизированный катетер предназначен для ручного управления и снабжён системой оптоволоконных датчиков, позволяющей с высокой точностью измерять его форму в реальном времени. Конфигурация, реконструируемая на основе данных этих сенсоров, используется для формирования управляющих воздействий на ведомый робот, взаимодействующий с анатомическими структурами в теле пациента.

Ведомый робот, предназначенный для взаимодействия с анатомическими структурами, оснащён тензодатчиками, регистрирующими усилия, возникающие в рукояти во время контакта с внешней средой. Поскольку внесение изменений в конструкцию ведомого катетера недопустимо по клиническим причинам, его форма определяется исключительно методами компьютерного зрения.

На этапе инициализации системы в сосудистое русло пациента вводится контрастное вещество. Это необходимо для выделения анатомических структур с помощью алгоритмов сегментации на основе машинного обучения [34]. Полученная модель окружающей среды используется как оператором для оценки условий манипуляции и планирования движения, так и роботом – для ограничения траектории в пределах безопасной зоны. Дополнительно контрастирование позволяет зафиксировать исходную конфигурацию ведомого катетера и синхронизировать её с моделью ведущего устройства.

В процессе операции оператор вручную изгибает управляемую часть ведущего катетера. Полученная форма регистрируется оптическими сенсорами и преобразуется в конфигурацию, которая используется для расчёта аналогичной деформации ведомого катетера. Алгоритмы обратной кинематики обеспечивают соответствие формы ведомого и ведущего устройства. Перед выполнением движения моделируется траектория ведомого робота, визуализируемая на экране. После верификации оператором модель принимается к исполнению, и реальное движение начинается.

Ключевой особенностью предложенной системы является наличие замкнутого канала сенсорной обратной связи. Усилия, возникающие на ведомом устройстве при контакте с окружающей средой, передаются на ведущий робот в виде регулируемого механического сопротивления. Это обеспечивает тактильную обратную связь и способствует формированию эффекта физического присутствия. Оператор ощущает сопротивление движения в режиме реального времени, что повышает точность и безопасность манипуляций. Аналогичные принципы реализованы в медицинских человеко-машинных интерфейсах для промышленных манипуляторов [35].

Дополнительно в процессе работы система технического зрения непрерывно отслеживает форму ведомого катетера. Это исключает необходимость установки дополнительных сенсоров на устройство, вводимое в организм, и одновременно обеспечивает визуальный контроль положения рабочего органа. При выходе за пределы заранее определённой безопасной зоны система автоматически ограничивает движение ведущего устройства, предотвращая потенциально травмоопасные воздействия.

5. ПРИНЦИПЫ КОЛЛАБОРАЦИИ В СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМАХ

Развитие робототехнических систем в медицине всё чаще опирается на концепции коллаборативной робототехники, предполагающей тесное взаимодействие между оператором и роботом в одной рабочей зоне [36]. Хотя рассматриваемая архитектура “ведущий-ведомый” основывается на дистанционном управлении, ключевые принципы коботов уже реализуются в проектируемой системе:

- **Интуитивность управления:** использование аналогичного по структуре непрерывного робота в качестве ведущего устройства обеспечивает более естественное взаимодействие. Вручную изгибая ведомое устройство, оператор формирует управляющее воздействие без необходимости абстрактного представления о координатах, углах или траекториях. Такая схема взаимодействия является интуитивно понятной и снижает требования к предварительной подготовке пользователя, в том числе в условиях ограниченного времени принятия решений.
- **Совместная работа через сенсорные каналы:** несмотря на физическое разделение оператора и ведомого устройства, взаимодействие реализуется посредством сенсорных каналов обратной связи. Информация о форме и усилиях, действующих на ведомый катетер, передаётся на ведущий в виде визуальных и механических сигналов. Это обеспечивает синхронную координацию действий человека и робота в реальном времени, формируя эффект совместной работы в общем сенсорном пространстве.
- **Обратная связь о состоянии среды:** Система оснащена тензодатчиками, фиксирующими усилия, возникающие в процессе взаимодействия катетера с анатомическими структурами, и системой технического зрения, позволяющей определять форму и положение ведомого устройства. Таким образом, оператор получает полную информацию о состоянии среды в режиме реального времени, включая визуальное и тактильное подтверждение своих действий.
- **Безопасность:** Предусмотрено автоматическое ограничение движения при превышении пороговых значений усилий, а также при выходе катетера за пределы безопасной зоны, определяемой на основе предварительной сегментации анатомических структур. Такие механизмы позволяют минимизировать риск травматизации пациента и снизить зависимость безопасности от человеческого фактора [36].
- **Адаптивность поведения:** система адаптируется к действиям оператора и изменяющимся условиям среды. Перед выполнением манипуляции визуализируется предполагаемая траектория ведомого катетера, что позволяет оператору откорректировать движение до начала реального воздействия. Конфигурация ведомого устройства пересчитывается в режиме реального времени с учётом обратной связи, а поведение системы может быть изменено на основании текущих условий работы [37].

Таким образом, предлагаемая система обладает всеми основными признаками коллаборативного взаимодействия. Она обеспечивает интуитивное управление, двустороннюю сенсорную обратную связь, автоматическое ограничение движения и адаптивную реакцию на действия оператора, что позволяет рассматривать её как коллаборативную робототехническую платформу, соответствующую современным стандартам безопасности и взаимодействия. Однако при этом система обладает потенциалом для дальнейшего расширения коллаборативных свойств.

6. РАСШИРЕНИЕ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ СВОЙСТВ

Дополнительно, архитектура системы обладает потенциалом для дальнейшего расширения коллаборативных свойств, направленных на углубление взаимодействия между человеком и роботом, повышение автономности системы и адаптивности в сложных клинических сценариях. В частности, могут быть реализованы следующие направления:

1. **Интерактивное обучение.** Интеграция методов интерактивного обучения позволит системе воспроизводить действия оператора на основе вручную показанных траекторий. В таком режиме ведущий катетер используется не только как интерфейс управления, но и как демонстрационный инструмент: оператор физически формирует траекторию или це-

левую конфигурацию, а система запоминает и повторяет её в аналогичных клинических ситуациях.

2. **Адаптивное поведение:** использование методов машинного обучения для предиктивного контроля, прогнозирования усилий, адаптации к анатомическим условиям. Это обеспечит адаптацию движения ведомого катетера в реальном времени, с учётом индивидуальных особенностей пациента, текущего положения инструмента и предполагаемой реакции среды. Кроме того, использование формализованных подходов к распределению задач между элементами системы позволяет обеспечить согласованность действий и эффективную координацию в условиях изменяющейся среды [38].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена архитектура системы телеуправления непрерывным роботом, реализующей схему “ведущий–ведомый” с двусторонней сенсорной обратной связью. Основу системы составляют два катетера с идентичной кинематикой, где ведущий катетер управляется вручную и снабжён оптическими сенсорами, а ведомый – воспринимает усилия и форму через систему технического зрения и тензодатчики. Обратная связь реализована как через визуальные каналы, так и в виде механического сопротивления, формируемого на ведущем устройстве.

Показано, что разработанная система удовлетворяет критериям коллаборативной робототехники: она обеспечивает интуитивное управление, обратную связь о состоянии среды, безопасность взаимодействия и адаптивность поведения. Дополнительно обоснована возможность расширения коллаборативных свойств за счёт внедрения механизмов обучения по демонстрации, предиктивного контроля и интеграции в гибридные операционные. Полученные результаты могут быть использованы при построении роботизированных систем следующего поколения для медицины и других приложений, требующих высокой чувствительности и точности при работе в ограниченных пространствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ Р 60.0.0.4-2023. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения.* Москва, Российский институт стандартизации, 2023.
2. Robinson G., Davies J.B.C. Continuum robots – a state of the art, *Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. IEEE, 2003, vol. 4, May, pp. 2849–2854.
3. Pistone A., Ludovico D., Dal Verme L.D.M.C., Leggieri S., Canali C., Caldwell D.G. Modelling and control of manipulators for inspection and maintenance in challenging environments: A literature review, *Annual Reviews in Control*, 2024, vol. 57, pp. 100949.
4. Dong X., Wang M., Mohammad A., Ba W., Russo M., Norton A., Kell J., Axinte D. Continuum Robots Collaborate for Safe Manipulation of High-Temperature Flame to Enable Repairs in Challenging Environments, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 4217–4220.
5. Dong X., Axinte D., Palmer D., Cobos S., Raffles M., Rabani A., Kell J. Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, vol. 44, pp. 218–229.
6. Dupont P.E., Simaan N., Choset H., Rucker C. Continuum Robots for Medical Interventions, *Proc. of the IEEE*, 2022, vol. 110, no. 7, pp. 847–870.
7. Burgner-Kahrs J., Rucker D.C., Choset H. Continuum Robots for Medical Applications: A Survey. *IEEE Trans. on Robotics*, 2015, vol. 31, no. 6, pp. 1261–1280.
8. Hannan M.W., Walker I.D. Novel kinematics for continuum robots, in *Advances in Robot Kinematics*. Dordrecht, Springer Netherlands, 2000, pp. 227–238.

9. Chawla A., Frazelle C., Walker I. A comparison of constant curvature forward kinematics for multisection continuum manipulators. *2018 Second IEEE Int. Conf. on Robotic Computing (IRC)*. IEEE, 2018, pp. 217–223.
10. Chikhaoui M.T. et al. Comparison of modeling approaches for a tendon actuated continuum robot with three extensible segments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 989–996.
11. Runge G., Wiese M., Raatz A. FEM-based training of artificial neural networks for modular soft robots. *2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2017, pp. 385–392.
12. Adagolodjo Y., Renda F., Duriez C. Coupling numerical deformable models in global and reduced coordinates for the simulation of the direct and the inverse kinematics of soft robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 3910–3917.
13. Melingui A. et al. Neural networks based approach for inverse kinematic modeling of a compact bionic handling assistant trunk. *2014 IEEE 23rd Int. Symp. on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, 2014, pp. 1239–1244.
14. Djeffal S., Mahfoudi C., Amouri A. Comparison of three meta-heuristic algorithms for solving inverse kinematics problems of variable curvature continuum robots. *2021 Eur. Conf. on Mobile Robots (ECMR)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
15. Колпацников Д.Ю. *Метод и алгоритмы обратной кинематики и планирования движения для многосекционных непрерывных роботов*. Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2023. 126 с.
16. Колпацников Д.Ю., Гергет О.М. Решение обратной задачи кинематики для непрерывного робота через разбиение рабочей области. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2025, Т. 26, № 5, С. 253–259.
17. Mahl T., Hildebrandt A., Sawodny O. A variable curvature continuum kinematics for kinematic control of the bionic handling assistant. *IEEE Trans. on Robotics*, 2014, vol. 30, no. 4, pp. 935–949.
18. Shaikh Z.A., Eilenberg M.F., Cohen T.J. The Amigo™ remote catheter system: from concept to bedside. *The Journal of Innovations in Cardiac Rhythm Management*, 2017, vol. 8, no. 8, p. 2795.
19. Csencsits M. et al. User interfaces for continuum robot arms. *2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2005, pp. 3123–3130.
20. Huang Y. et al. A three-limb teleoperated robotic system with foot control for flexible endoscopic surgery. *Annals of Biomedical Engineering*, 2021, vol. 49, pp. 2282–2296.
21. Kapadia A.D., Walker I.D., Tatlicioglu E. Teleoperation control of a redundant continuum manipulator using a non-redundant rigid-link master. *2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2012, pp. 3105–3110.
22. Frazelle C.G. et al. Teleoperation mappings from rigid link robots to their extensible continuum counterparts. *2016 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2016, pp. 4093–4100.
23. Frazelle C.G., Kapadia A., Walker I. Developing a kinematically similar master device for extensible continuum robot manipulators. *J. of Mechanisms and Robotics*, 2018, vol. 10, no. 2, p. 025005.
24. Sincak P.J. et al. Sensing of continuum robots: A review. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 4, p. 1311.
25. Gerboni G. et al. Feedback control of soft robot actuators via commercial flex bend sensors. *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 2017, vol. 22, no. 4, pp. 1881–1888.
26. Hainsworth T. et al. A fabrication free, 3D printed, multi-material, self-sensing soft actuator. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 4118–4125.
27. Guo H. et al. Continuum robot shape estimation using permanent magnets and magnetic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 285, pp. 519–530.
28. Baaij T. et al. Learning 3D shape proprioception for continuum soft robots with multiple magnetic sensors. *Soft Matter*, 2023, vol. 19, no. 1, pp. 44–56.

29. Ryu S.C., Dupont P.E. FBG-based shape sensing tubes for continuum robots. *2014 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2014, pp. 3531–3537.
30. Xu R., Yurkewich A., Patel R.V. Curvature, torsion, and force sensing in continuum robots using helically wrapped FBG sensors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 1052–1059.
31. Manakov R.A. et al. Visual shape and position sensing algorithm for a continuum robot. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, vol. 1019, no. 1, p. 012066.
32. Vandini A. et al. Vision-based motion control of a flexible robot for surgical applications. *2014 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2014, pp. 6205–6211.
33. Shi C. et al. Shape sensing techniques for continuum robots in minimally invasive surgery: A survey. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 2016, vol. 64, no. 8, pp. 1665–1678.
34. Герпет О.М. и др. Нейросетевое моделирование и автоматическая сегментация корня аорты на снимках ангиографии. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*, 2024, № 69, С. 64–71.
35. Герпет О.М., Кравченко А.А., Мещеряков Р.В., Лысунец Т.Б., Галин Р.Р., Вольф Д.А., Мамченко М.В. Software Library for KUKA Iiwa Robot to Improve the Efficiency of Human-Robot Interaction in Robotic Medical Applications. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer, 2022, vol. 13719, pp. 284–295. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-23609-9_25.
36. Yang, G.Z., et al. *Medical Robotics—Regulatory, Ethical, and Legal Considerations for Increasing Autonomy*. Science Robotics, 2022.
37. Галин Р.Р., Мамченко М.В., Галина С.Б., Зорин В.А. Подход к распределению задач технологического процесса среди неоднородных участников КРТС с учетом их состояния. *Управление большими системами: сборник трудов*, 2024, вып. 112, С. 233–256.
38. Галин Р.Р., Мамченко М.В., Галина С.Б. Task Allocation Methodology in Collaborative Robotic Systems. *Proc. of 2023 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation: IEEE, 2023, pp. 1004–1009.

Development of a Teleoperation System for a Continuum Robot Operated in a Leader–Follower Configuration

D.Yu. Kolpashchikov, S.B. Galina, M.V. Mamchenko, R.R. Galin

This article presents a human-machine teleoperation system for a continuum robot tailored to endovascular interventions and based on a leader–follower architecture. The leader robotic catheter, manually shaped by the surgeon, is equipped with distributed fiber-optic shape sensors. The follower catheter, inserted into the patient’s vasculature, is tracked exclusively by computer-vision algorithms and instrumented with force sensors. Inverse-kinematics algorithms reproduce the leader’s configuration on the follower, while a closed-loop sensory channel conveys contact forces to the operator as adjustable mechanical resistance, creating a tangible sense of presence. The system fulfils the core principles of collaborative robotics—intuitive manipulation, bidirectional feedback, adaptive motion constraints, and patient safety. Potential extensions include learning from demonstration and predictive control. The proposed solution can serve as a foundation for next-generation robotic platforms enabling minimally invasive procedures under limited visual feedback.

KEYWORDS: continuum robot, robotic catheter, teleoperation, leader-follower scheme, haptic feedback, fiber-optic sensors, vision-based shape reconstruction, collaborative robotics. endovascular surgery