

УДК 004.94+62:681

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-45-52

*Т. В. Радченко¹, А. В. Малолетов^{1,2}***РАЗРАБОТКА VR-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ**¹ Университет Иннополис² Волгоградский государственный технический университет

t.radchenko@innopolis.university, a.maloletov@innopolis.ru

Разработана система удаленного управления робототехническим мобильным комплексом на базе колесной мобильной платформы Scout 2.0 и коллаборативного робота-манипулятора Dobot CR5 с помощью VR-приложения с использованием платформ ROS и Unity для визуализации и управления. Для повышения точности и эффективности управления в сложных условиях и одновременно повышения скорости работы на простых участках движения был разработан адаптивный алгоритм. Исследования показали, что робот достаточно точно воспроизводит заданные движения и способен возвращаться к траектории после коррекции положения.

Ключевые слова: манипулятор, виртуальная реальность, управление движением.

*T. V. Radchenko¹, A. V. Maloletov^{1,2}***DEVELOPMENT OF A VR-APPLICATION FOR REMOTE CONTROL OF A ROBOT**¹ Innopolis University² Volgograd State Technical University

A remote control system for a robotic mobile complex based on the Scout 2.0 wheeled mobile platform and the Dobot CR5 collaborative robot arm has been developed using a VR application with the ROS and Unity platforms for visualization and control. An adaptive algorithm has been developed to improve the accuracy and efficiency of control in difficult conditions and at the same time increase the speed of operation in simple path parts. The study has shown that the robot reproduces the specified movements quite accurately and is able to return to the trajectory after correcting the position.

Keywords: manipulator, virtual reality, motion control.

Введение

Объектом исследования является робототехнический комплекс, реализованный на базе шестикоординатного коллаборативного манипулятора, установленного на мобильной платформе. Мобильная платформа позволяет перемещать манипулятор в пространстве, расширяя таким образом его рабочую область. Исследование сосредоточено на управлении этим типом манипуляторов в условиях интеграции с симуляционной средой и виртуальной реальностью (VR). Хотя манипуляторы разнообразны по своей конструкции и способам управления, здесь рассмотрен коллаборативный робот с высокой точностью и встроенными средствами безопасности, что особенно важно для удаленной работы в ограниченных пространствах. Виртуальная реальность при этом используется главным образом как техническая инфраструктура для работы с джойстиком: основное управление манипулятором реализовано через VR-контроллеры, а мобильной платформой через клавиатуру. Сам интерфейс VR и эффект погружения не являлись самоцелью проекта – их применение обусловлено только необходимостью обеспечить работу

джойстика, который требует активной VR-среды для регистрации движений и взаимодействия с цифровым двойником робота.

Современное развитие технологий виртуальной реальности и систем удаленного управления роботами характеризуется быстрым прогрессом и широким внедрением в таких сферах, как медицина [1], промышленность и образование [2]. Существенный вклад в развитие этой технологии внесли достижения в области сенсорных технологий, сетевых коммуникаций и компьютерной графики, что позволило создавать эффективные интерфейсы для взаимодействия с удаленными объектами в реальном времени. Например, концепции и подходы к построению роботизированных манипуляторов подробно рассматриваются в работах [3] и [4], где анализируются современные решения и принципы построения подобных систем.

Первые шаги в развитии виртуальной реальности связаны с созданием устройства Sensorama Мортонем Хейлигом в 1960-х годах (рис. 1). Sensorama считается одним из ранних примеров устройств, в которых было реализовано мультисенсорное взаимодействие с вирту-

альной средой, позволившее пользователю ощутить присутствие в смоделированной ситуации. Эта концепция стала важной отправной точкой в развитии технологий виртуальной реальности [5], [6].



Рис. 1. Первое VR-устройство «Sensorama»

Современные манипуляторы становятся все более сложными и точными благодаря развитию систем управления и сенсорики. В частности, ряд технических решений, направленных на повышение надежности и точности манипуляторов для удаленной работы, рассмотрен в [7]. Рост интереса к дистанционному управлению обусловлен также внедрением манипуляторов в медицину, особенно в хирургию, где они позволяют выполнять операции с высокой степенью точности и минимальной инвазией [8]. Кроме того, усовершенствование сетевых технологий и пользовательских интерфейсов [9] открывает новые возможности для их применения в промышленности и в системах обучения операторов с использованием виртуальных сред [10].

Для реализации управления манипулятором через VR-приложение использовались Dobot CR5 с двухпальцевым захватом и мобильная платформа Scout. Управление осуществлялось с помощью Samsung HMD Odyssey и приложе-

ния на Unity, обеспечивающего связь между VR-системой и роботом. Dobot CR5 – это современный шестикоординатный коллаборативный манипулятор, предназначенный для автоматизации точных производственных и исследовательских задач (рис. 2).



Рис. 2. Dobot CR5



Рис. 3. Scout 2.0

Scout 2.0 – это универсальная мобильная платформа, предназначенная для работы в сложных условиях как внутри помещений, так и на открытом воздухе (рис. 3). Она используется для транспортировки различного оборудования, включая манипуляторы, сенсоры и вычислительные модули, и обеспечивает высокую проходимость, автономность и гибкость интеграции.

Современные двухпальцевые захваты, такие как RG2 (рис. 4) от OnRobot, используются в промышленной и коллаборативной робототехнике благодаря гибкости, большому ходу (до 110 мм) и регулируемой силе захвата (3–40 Н), что позволяет эффективно работать с объектами различной формы и массы до 2 кг [8], [10].



Рис. 4. Модель захвата RG2



Рис. 5. Samsung HMD Odyssey

Виртуальные шлемы, например Samsung HMD Odyssey (рис. 5), обеспечивают высокое разрешение, широкий угол обзора и качественный объемный звук, что делает их востребованными для VR-приложений и обучения [1], [2].

Целью представленной работы является создание и исследование системы, с помощью которой можно управлять робототехническим комплексом дистанционно, используя VR-приложение. Такая система должна позволять человеку удобно и точно управлять роботом, видя его действия в виртуальной среде.

Реализация

Разработанная система позволяет удаленно управлять робототехническим комплексом через VR-приложение на Unity. Управление мобильной платформой осуществляется с клавиатуры, а манипулятором и захватом – с помощью VR-джойстика, что обеспечивает интуитивное и достаточно точное взаимодействие. Тестирование было проведено в симуляционной среде. Для этого была создана виртуальная модель робота, а логика управления реализована с помощью MoveIt – популярного программного пакета для планирования и исполнения движений промышленных манипуляторов в ROS. MoveIt позволяет формировать траектории, проверять их на допустимость (учитывая ограничения по кинематике и возможные столкновения), а также

автоматически оптимизировать движения конечного эффектора.

Два ключевых инструмента использовались для симуляции действий робота:

- Визуализатор RViz применялся для визуализации положений, траекторий и состояния робота – удобно для анализа и быстрой отладки работы алгоритмов управления.
- Симулятор Gazebo обеспечивал физическое моделирование среды и робота, позволяя оценить поведение системы с учетом динамики, столкновений и ограничений движения.

Такой подход позволил полностью замкнуть цикл: команды из VR-приложения попадали в симуляцию, результаты отображались в RViz (рис. 6) и Gazebo (рис. 7), что обеспечивало проверку как алгоритмов управления, так и физической адекватности системы.

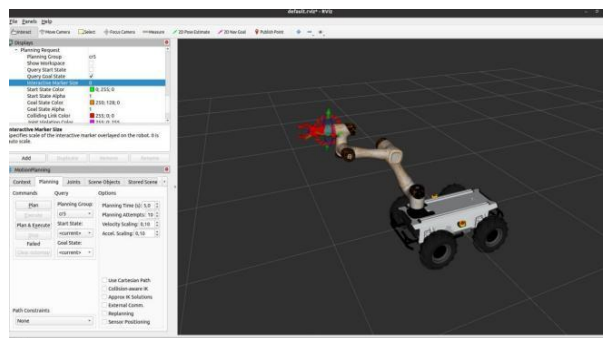


Рис. 6. Симуляция в Rviz



Рис. 7. Симуляция в Gazebo

Графики временной задержки и отклика

Одной из основных проблем при удаленном управлении робототехническими системами является задержка между отправкой команды и ее выполнением роботом. Задержки возникают на этапах передачи данных, обработки команд и работы исполнительных механизмов, что влияет на точность и безопасность управления, особенно при динамических задачах [11], [12].

В зависимости от типа соединения задержка может составлять от единиц до сотен миллисекунд, а для промышленных и медицинских применений ведутся разработки по ее минимизации [13]. В условиях симуляции на одном персональном компьютере задержка обычно составляет 30–50 мс из-за ограничений производительности и особенностей виртуальной среды, что достаточно близко соответствует

типичной задержке во многих распределенных системах. Поэтому в рамках исследования не делалось попыток уменьшить эти задержки, а напротив задержки рассматривались как фактор неопределенности в работе системы. На рис. 8 представлены временные события, связанные с управлением движением робота. Для каждого события показана задержка в миллисекундах.

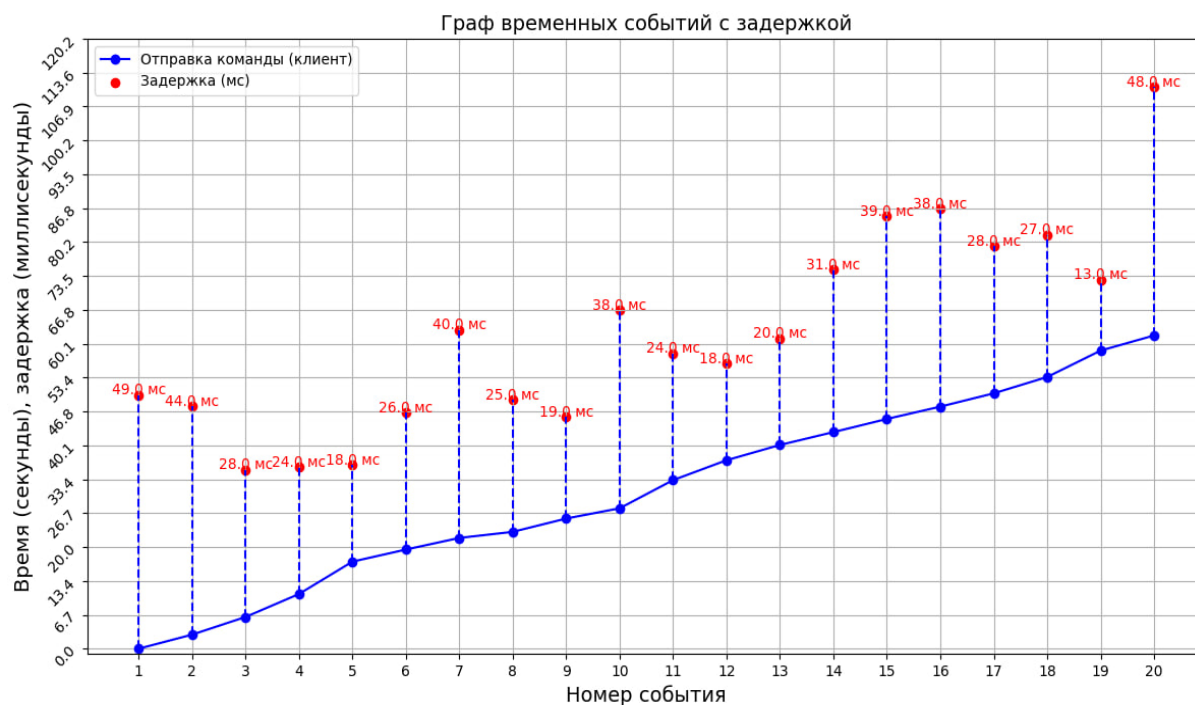


Рис. 8. Граф временных событий с задержкой

Движение в декартовом пространстве

В рамках работы были проведены экспериментальные исследования в симуляционной среде, направленные на проверку работы системы управления роботом. Один из экспериментов был посвящен отображению положения и ориентации конечного эффектора (в рассматриваемом случае – захвата) манипулятора и VR-джойстика в декартовом пространстве. Для этого был реализован метод, который считывает смещение джойстика и передает это смещение в систему управления роботом, который выполняет соответствующее движение. Для проверки работы метода были проведены ряд экспериментов, чтобы проанализировать,

насколько траектории конечного эффектора робота и джойстика управления похожи друг на друга. В качестве опорных объектов для траекторий джойстика управления были выбраны следующие объекты (рис. 9).

Ниже приведены изображения траекторий конечного эффектора робота и джойстика управления (рис. 10). Как видно, траектории движения робота и джойстика очень похожи, однако в каждой из них наблюдается определенная разница, связанная с частотой обновления данных. Эта разница обусловлена тем, что работа выполняется в симуляции, где существуют ограничения по точности вычислений и частоте обновлений, что непосредственно влияет на результат, отображаемый на графиках.

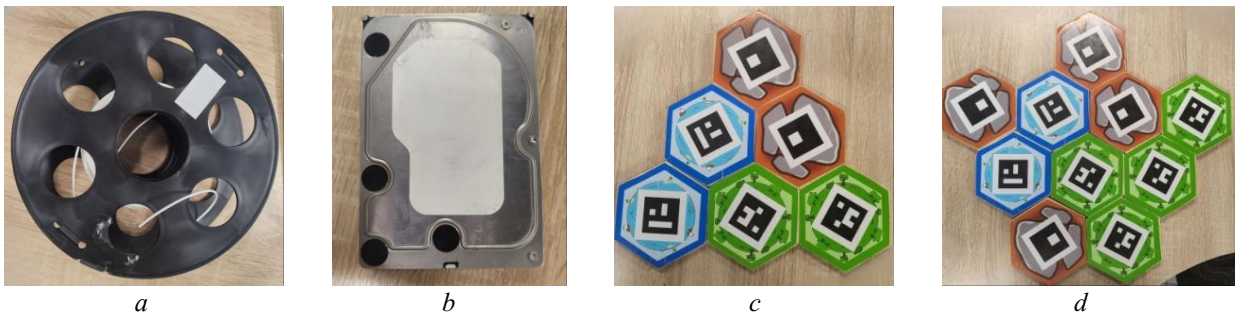


Рис. 9. Опорные объекты для траекторий джойстика управления^

a – объект круглой формы; *b* – объект прямоугольной формы; *c* – объект сложной треугольной формы; *d* – объект сложной формы

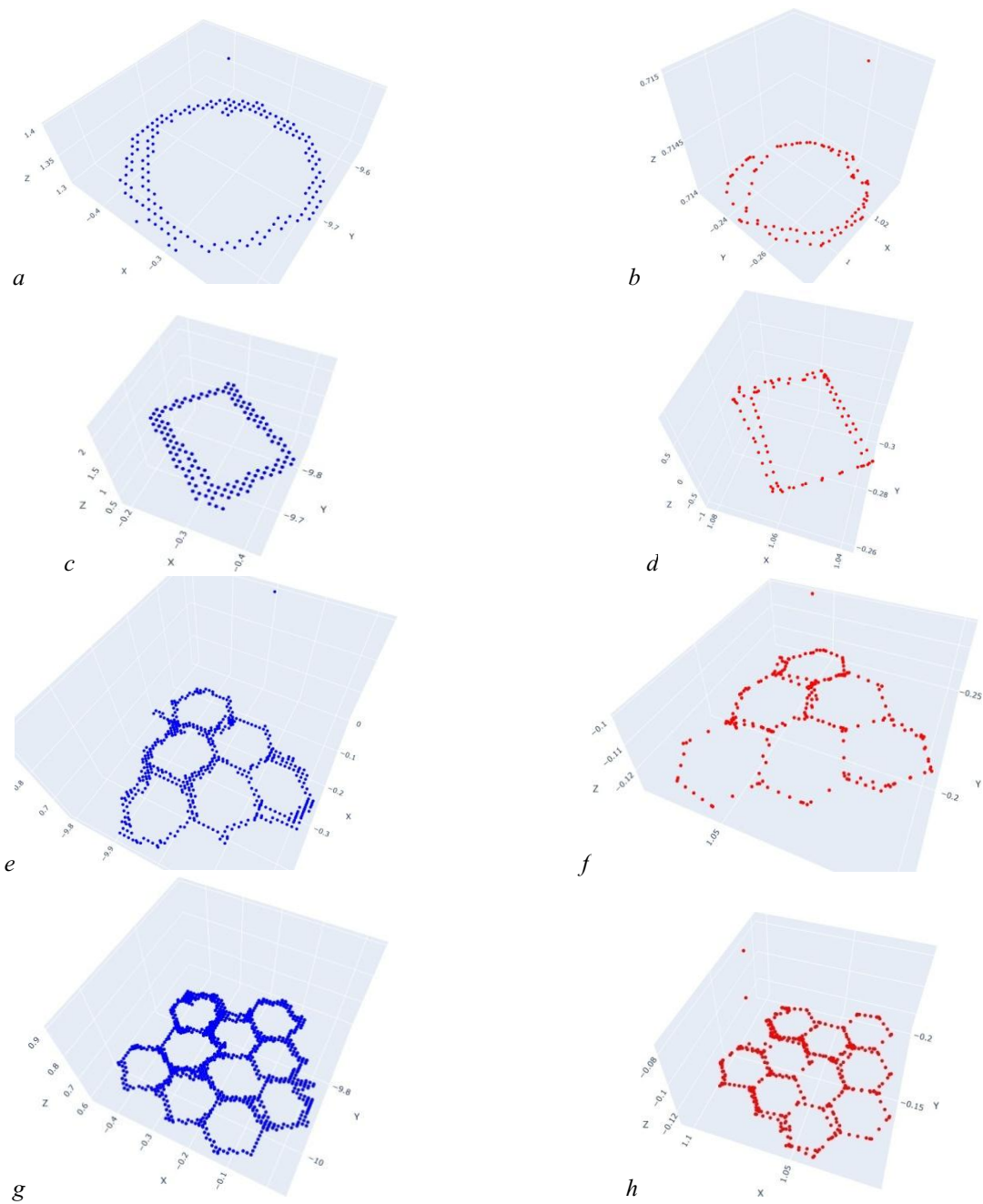


Рис. 10. Сравнение траекторий джойстика управления (*a, c, e, g*) и конечного эффектора робота (*b, d, f, h*):

a, b – при движении по окружности; *c, d* – при движении по прямоугольной траектории; *e, f* – при движении по траектории сложного треугольника; *g, h* – при движении по траектории сложной фигуры

Также во время данного эксперимента была зафиксирована интересная особенность в поведении робота: в процессе обводки заданной фигуры (рис. 11) робот в определенный момент был вынужден изменить свое положение для продолжения выполнения задачи. Это проявилось на другом графике (рис. 12), где видно отклонение траектории от основного контура фигуры. Несмотря на это, робот успешно вернулся в нужную точку и продолжил выполнение поставленной задачи, что свидетельствует о корректной работе системы управления и ее способности к адаптации в нестандартных ситуациях.

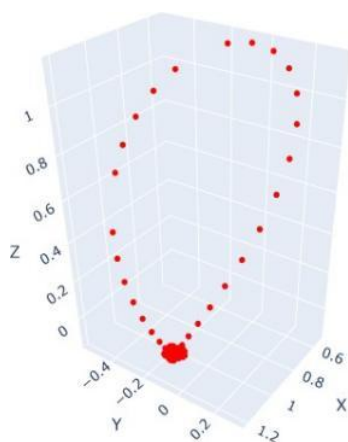


Рис. 11. Изменение положения конечного эффектора робота

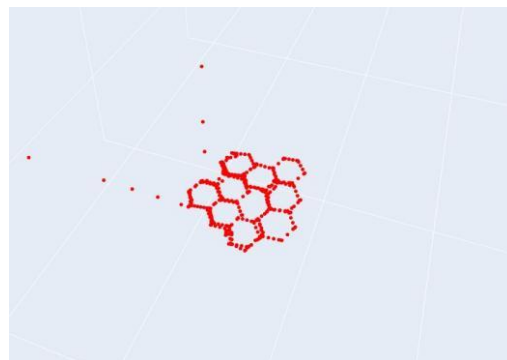


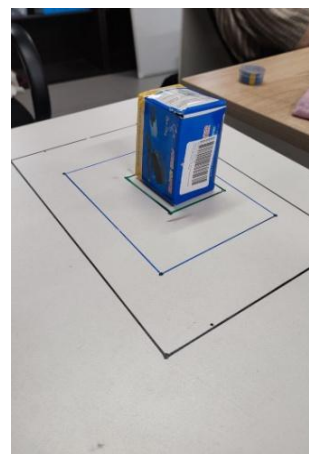
Рис. 12. Траектория конечного эффектора робота при движении по траектории сложной фигуры

Сравнение эффективности управления манипулятором

В ходе работы были проведены эксперименты в симуляции, направленные на оценку требуемого времени при перемещении объекта прямоугольной формы в целевую область, размер которой последовательно уменьшался. Вначале задачи выполнялись человеком – оператор вручную перемещал объект (рис. 13, а) в три области разного размера (рис. 13, б), каждая из которых становилась все меньше. Было установлено, что по мере уменьшения области требовалась большая точность позиционирования, и время выполнения задачи увеличивалось.



а



б

Рис. 13. Постановка эксперимента с участием человека

Далее аналогичный эксперимент был проведен с использованием робота в симуляции под управлением разработанной VR-системы (рис. 14). Управление манипулятором осуществлялось посредством джойстика, причем предварительно был использован фиксированный коэффициент усиления, при котором движение

манипулятора строго соответствовало смещению джойстика. Такой метод оказался малоэффективным в узких целевых областях: высокая чувствительность затрудняла точное позиционирование, что приводило к значительному увеличению времени выполнения задачи и ошибкам размещения объекта.

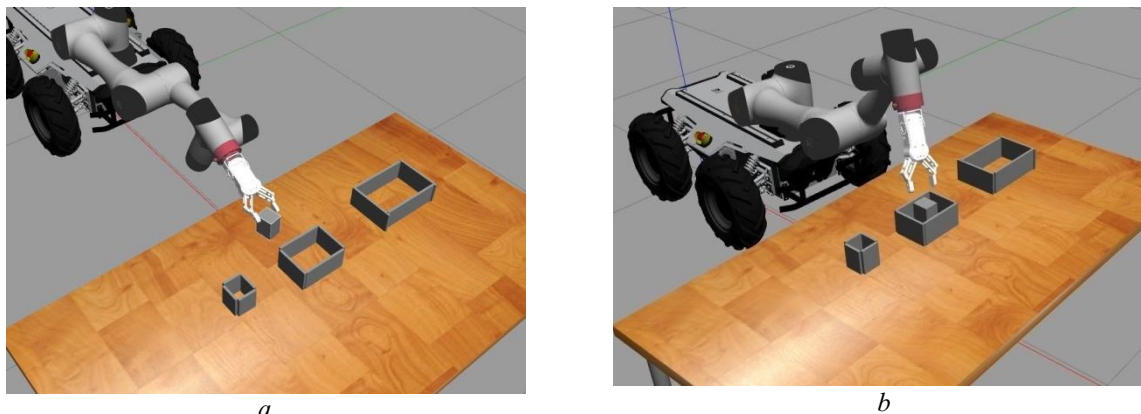


Рис. 14. Эксперимент в симуляции с управлением манипулятором робота:
a – захват предмета роботом; *b* – перемещение предмета

Для повышения точности была реализована функция динамического изменения коэффициента усиления. Оператор мог уменьшать коэффициент при работе в узких зонах, что позволило аккуратно и точно управлять манипулятором, а при перемещении по свободному пространству – увеличивать коэффициент для ускорения работы. Повторный эксперимент с адаптивным коэффициентом показал сокращение времени выполнения задачи и увеличение точности позиционирования.

Результаты эксперимента показывают, что робот в симуляции выполнял задачу медленнее человека, особенно в узких зонах – разница достигала 5–7 раз. Это частично объясняется тем, что симуляция и VR-приложение запускались на одном ПК, что увеличивало вычислительные задержки. Кроме того, даже оператор без специальной подготовки показал высокую эффективность за счет интуитивного управления.

Внедрение адаптивного коэффициента усиления позволило заметно сократить время выполнения задачи по сравнению с фиксированным управлением и приблизить результаты робота к действиям человека. Это подтверждает перспективность адаптивных методов в задачах точного позиционирования.

В таблице приведены усредненные значения времени, которое требуется на выполнение задачи человеком вручную или с помощью робота. Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что удаленное управление роботом даже в такой простой задаче, как перемещение требует значительно большего времени, чем перемещение объекта человеком вручную, а также подтверждает, что применение адаптивных алгоритмов приближает эф-

фективность управления роботом к возможностям человека, особенно в сложных условиях.

Среднее время выполнения задачи (сек)
 в разных зонах

Условие	Зона 1 (32х22см)	Зона 2 (14х19см)	Зона 3 (8х7 см)
Человек	3,35	3,74	4,93
Робот (K=1)	15,8	24,6	34,2
Робот (адапт. K)	12,1	18,2	26,5

Вывод

В результате работы была разработана и протестирована система удаленного управления робототехническим комплексом с применением VR-приложения и симуляционных средств. Реализованные решения обеспечили интуитивное взаимодействие оператора с манипулятором и мобильной платформой, а внедрение адаптивных методов управления повысило точность и эффективность выполнения задач.

В дальнейшем планируется развивать проект, уделяя особое внимание переходу к тестированию на реальном оборудовании, оптимизации обмена данными для сокращения задержек, расширению функциональности интерфейса и интеграции дополнительных видов обратной связи. Также проект будет совершенствоваться за счет устранения выявленных недостатков и регулярного обновления системы с учетом новых сценариев использования.

Таким образом, представленный подход оказывается перспективным инструментом для обучения операторов, тестирования новых алгоритмов и дальнейшей интеграции современных VR-технологий в робототехнику.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Abbas, J. R.* What is Virtual Reality? A healthcare-focused systematic review of definitions / J. R. Abbas and others // *Health Policy and Technology*. – 2023. – Vol. 12, No. 2. – P. 100742. – DOI:10.1016/j.hlpt.2023.100742.
2. *Hamad, A.* How Virtual Reality Technology Has Changed Our Lives / A. Hamad, B. Jia // *Frontiers in Virtual Reality*. – 2022. – Vol. 3. – P. 856333. – DOI:10.3389/frvir.2022.856333.
3. *Robotic Manipulator – an overview* / S. J. Qin // *ScienceDirectTopics*, 2013. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/robotic-manipulator>.
4. *Isermann, R.* Basic Concepts of Manipulator Robot Control. / R. Isermann. – Berlin: Springer, 2005.
5. *Sensorama, Morton Heilig's Early Virtual Reality Machine, 2024.* – Режим доступа: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=2785>.
6. *Smith, J.* A Review of Early Virtual Reality Devices: The Case of Sensorama / J. Smith, A. Doe // *PLOS One*. – 2024. – Vol. 19, No. 6. – Режим доступа: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371%2Fjournal.pone.0305379>.
7. *Development of Robotic Manipulators for Remote Control* / L. Andersson // *KTH Royal Institute of Technology*, тех. отч., 2020. – Режим доступа: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1467108/FULLTEXT01.pdf>.
8. *Lee, J.* Robotic Manipulators in Modern Surgery: A Review / J. Lee, S. Kim // *Journal of Robotic Surgery*. – 2018. – Vol. 12. – Pp. 123-134. – Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6232426/>.
9. *Damindarov, R. R.* Design of Teleoperation System for Control over Industrial Manipulators with Upper-Limb Exoskeleton / R. R. Damindarov, I. Gaponov, A. V. Maloletov // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. – 2024. – Vol. 20, No. 5. – Pp. 789-811.
10. *Wang, H.* Networked Control for Robotic Manipulators: Recent Advances and Challenges / H. Wang, X. Li // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2022. – Vol.76. – P. 102352. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827122001524>.
11. *Smith, J.* Network Latency in Remote Robot Control: Challenges and Solutions / J. Smith, K. Lee // *Future Internet*. – 2024. – Vol. 16, No. 1. – P. 12-25. – DOI: 10.3390/fi16010012.
12. *Latency Analysis in Teleoperated Robotic Systems* / P. Andersen, M. Jensen // *Technical University of Denmark*, тех. отч., 2021. – Режим доступа: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/123456789/latency_report.pdf.
13. *Wang, H.* Low-Latency Communication Technologies for Industrial Teleoperation / H. Wang, X. Li // *KioskSoft Robotics Review*. – 2023. – Vol. 11. – Pp. 55-63. – Режим доступа: <https://www.kiosksoft.com/roboticsreview/low-latency>.