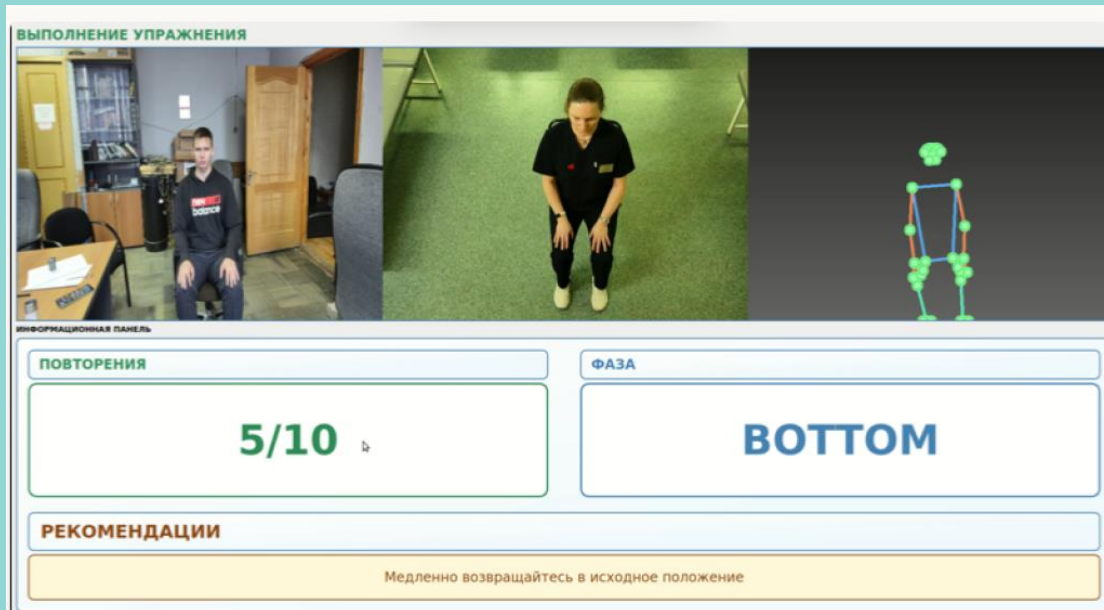


Реализация безмаркерной технологии захвата движения человека



Зезюлинский Н.В. (АО «МОККО»)
Павлович Р.В. (AtFrame DOO Novi Sad)
Севастьянов М.В. (МФТИ)
Хельвас А.В. (АО «МОККО», МФТИ.)

Решаемая прикладная задача: телереабилитация

Прикладная

При реабилитации критически важно регулярное правильное выполнение физических упражнений.



Проблема в том как этого добиться в условиях нехватки специалистов по реабилитации и при нахождении пациентов дома.

Техническая

Для контроля правильности выполнения физических упражнений в задачах реабилитации требуется высокая точность захвата движений для анализа «мелкой моторики»



Необходимо оборудования достаточное для необходимой в медицине точности

Предлагаемое решение

Разработка программно-аппаратного комплекса безмаркерного захвата движений, позволяющего продемонстрировать пациенту как надо выполнять упражнения и автоматически проконтролировать правильность выполнения по заранее установленным метрикам.

- Возможность съемки выполнения упражнений инструктором
- Разметка упражнения по требуемым метрикам (*амплитуда, углы, симметрия, плавность, скорость*)
- Визуализация выполнения упражнений
- Анализ соответствия метрикам выполнения упражнений пациентом

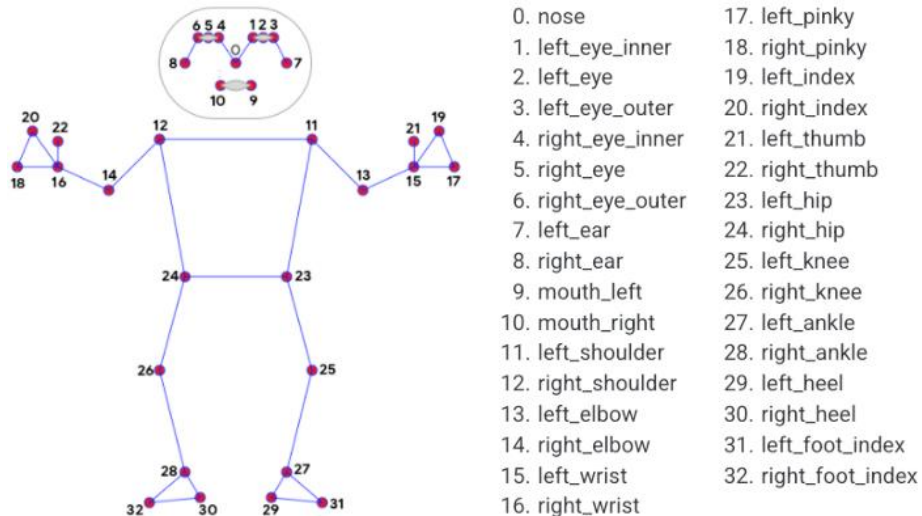
2 типа оборудования безмаркерных систем

Смартфон

Преимущества – предлагаем пациенту использовать то, что у него есть

Недостатки – непредсказуемое качество захвата движения, 2D - картинка

Примеры: Assist-I, FORA Vision

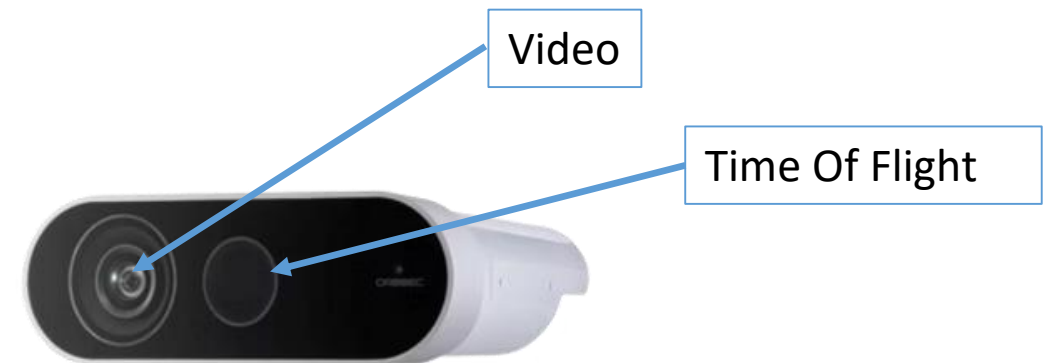


Специализированный Датчик video + TOF

Преимущества – уверенность в качестве работы системы, 3D картинка, высокая точность захвата движения

Недостатки – необходимость в покупке или аренде оборудования пациентом

Примеры: Habilect, Revi-Motion

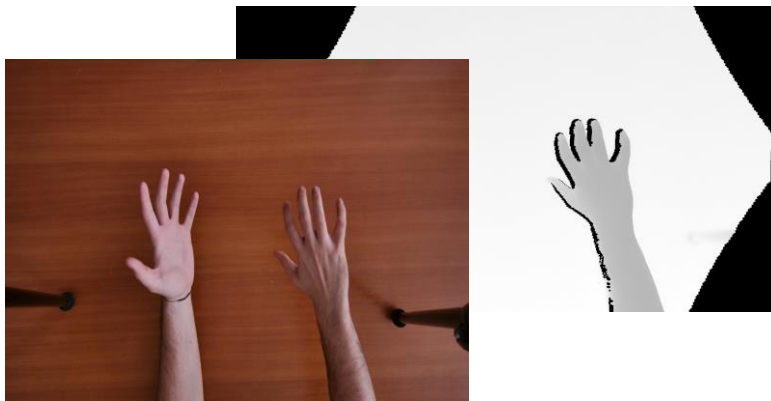


Этапы обработки выполнения упражнения

Этап 1

Первичная обработка видеопотоков RGB+D

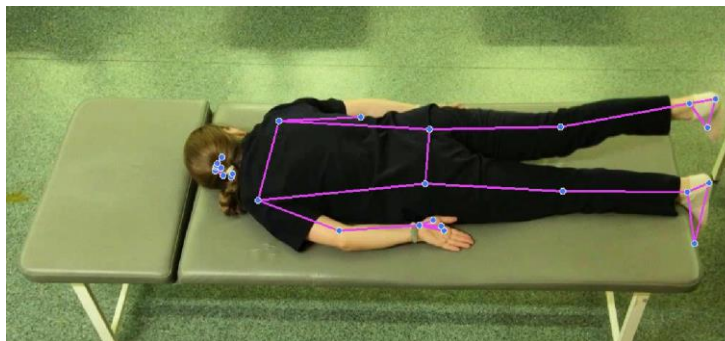
- Используя данные калибровки камеры, каждый пиксель на карте глубины проецируется на плоскость цветного изображения.
- Один раз вначале происходит обнаружение пола (МНК/линейная регрессия/RANSAC)



Этап 2

Локализация суставов

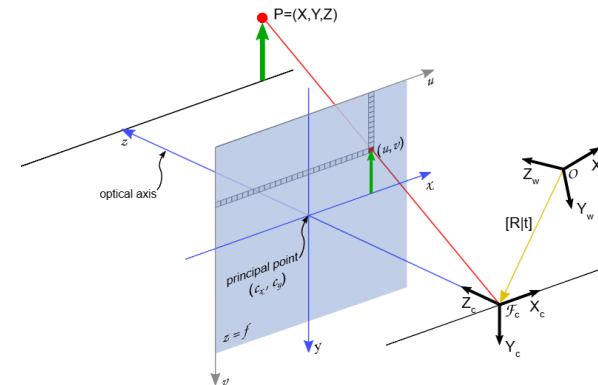
- RGB-изображение обрабатывается нейросетью BlazePose(mediapipe). Она локализует 33 ключевые точки на плоскости цветного кадра.
- Фильтрация Калмана (линейная модель движения).



Этап 3

Получение суставов в 3D

- Стабильные 2D-координаты (u, v) и соответствующее им значение глубины Z используются для вычисления реальных 3D-координат (X, Y, Z) по формулам проекционной геометрии.
- Фильтрация выбросов, фильтрация высоких частот.

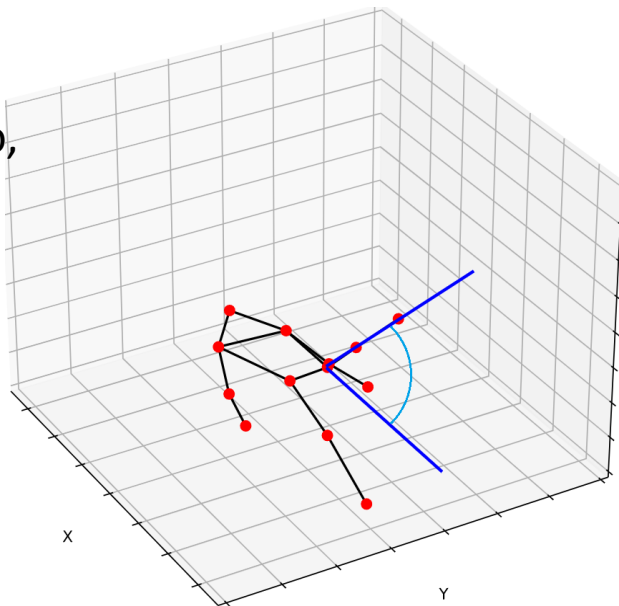
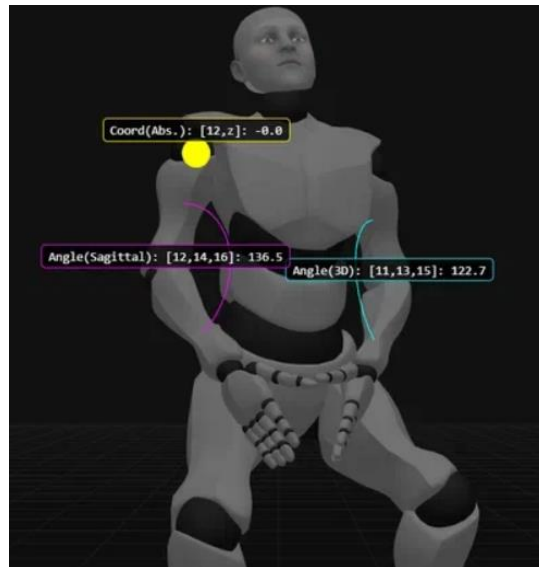


Этапы обработки выполнения упражнения

Этап 4

Расчет биологических метрик

- На основе 3D-траекторий в реальном времени рассчитывается массив метрик, включая:
 - 1) Углы в суставах .
 - 2) Скорости .
 - 3) Координаты: как абсолютные, так и относительные (например, кисть относительно плеча).
 - 4) Проекции векторов и углов на анатомические плоскости (сагиттальную, фронтальную, горизонтальную).
- Фильтрация полученных метрик.



Этап 5

Детектирование повторений. Генерация рекомендаций

- Детектирование циклов движения выполняется двумя методами:
 - 1) пересечение заданных пороговых значений (State Machine)
 - 2) анализ накопленных отклонений метрики от среднего (Dynamic CUSUM).
- Генерация корректирующей обратной связи на основании получаемых временных рядов и референсных значений.
- Для каждого валидированного повторения производится расчет его характеристик: экстремальных (min/max) и средних значений ключевых метрик.

Пример съемки и визуализации

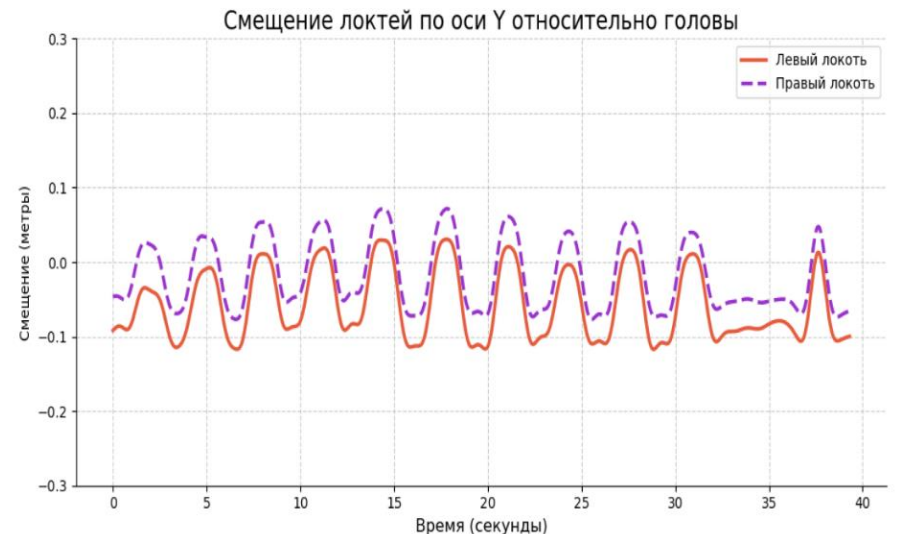
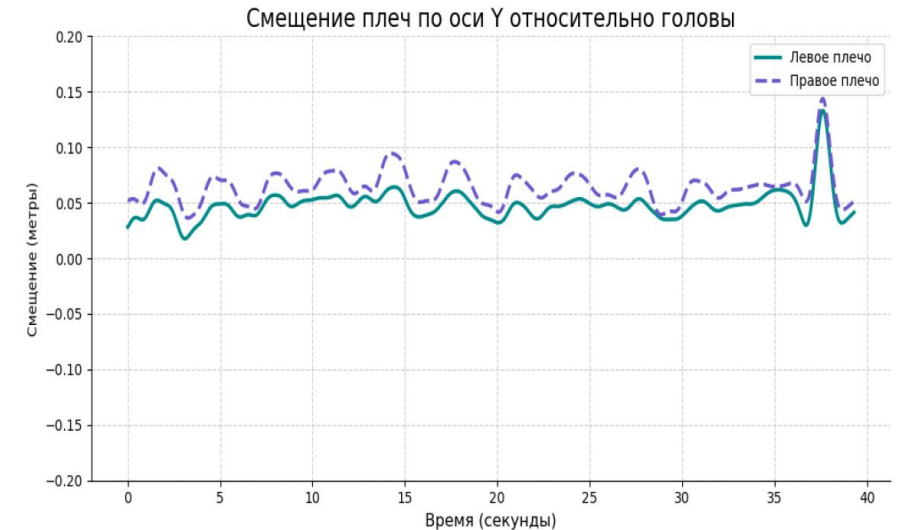
Упражнение: Разворот плечами

Метрики: Для оценки этого упражнения ключевым является контроль неподвижности корпуса. Поэтому основные метрики рассчитываются относительно головы пациента-шеи, которая принимается за статичный центр координат. Анализируются траектория и амплитуда движения плечевых суставов, а также угловая скорость для оценки плавности выполнения поворотов.

Иллюстративные материалы:

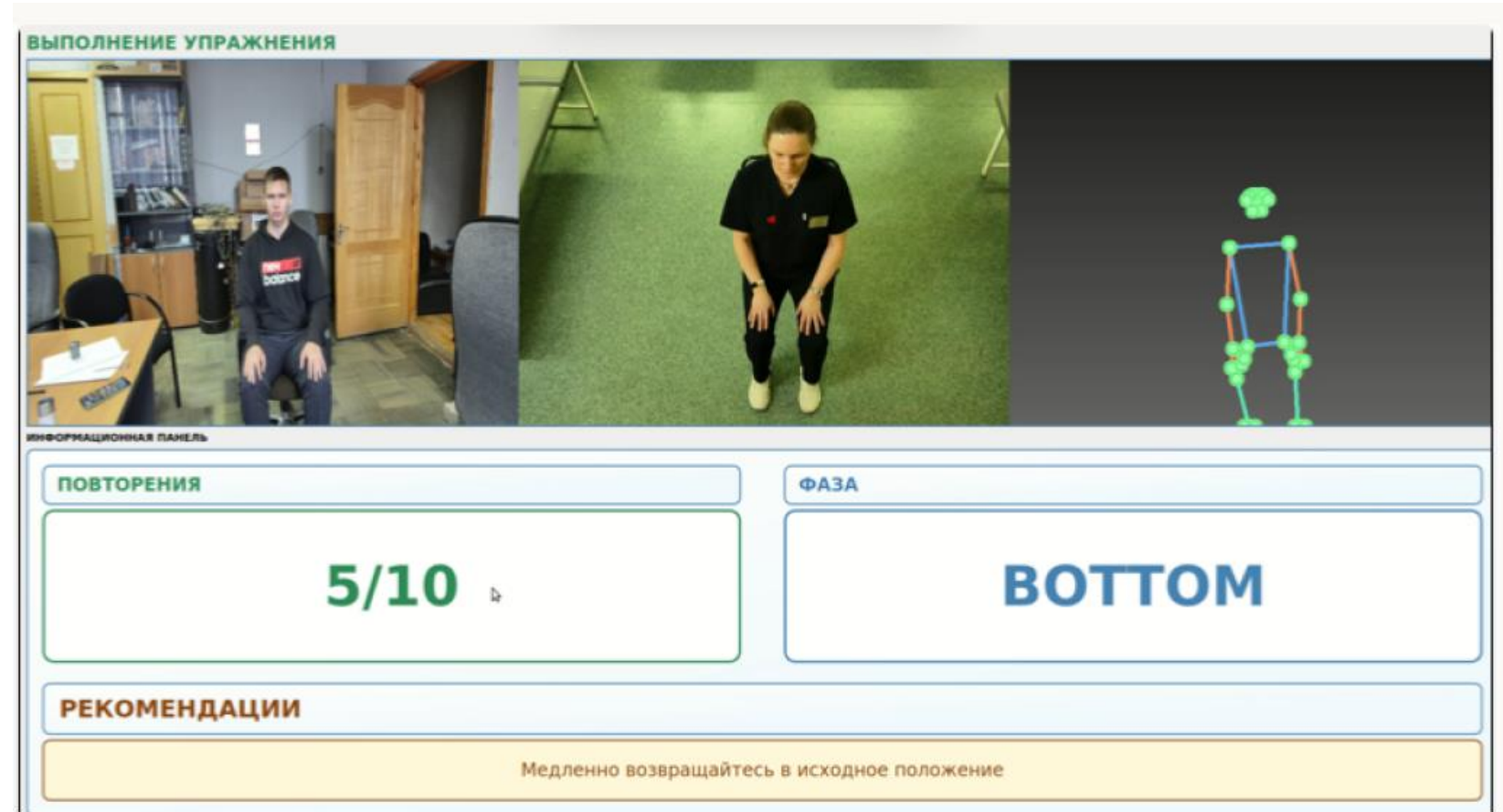
- Видео выполнения упражнения и трехмерная модель движения контрольных точек - "video1"

Визуализация данных:



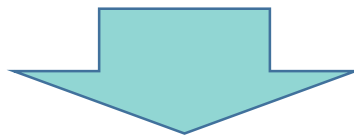
Прототип МОССО RENAВ в действии

- При выполнении упражнений требуется оборудование: камера типа Orbbec Femto Bolt - 418 \$, вычислитель типа Jetson Xavier AGX - 1500 \$, монитор или телевизионный экран, смартфон
- Пациент управляет процессом через телеграм-бот, видит себя, эталон и 3D-модель скелета. Текстовые рекомендации (например, "держите спину ровнее") генерируются на основе объективных биомеханических метрик (амплитуда, скорость) в процессе выполнения упражнения.
- В прототипе рекомендации текстовые – в перспективе аудио и видео



Сегодняшний день

- **Обработка видео при захвате и одновременном получении трехмерной модели** – около 30 кадров в секунду. Получаем видеозапись и трехмерную скелетную модель в координатном представлении.
- **Обработка обратной кинематики** - 10-20 кадров в секунду.
- **Расчет метрик** - занимает значительно меньше времени, чем первичная обработка. Можно считать мгновенным.
- **Точность** – линейная около 2 мм на масштабах тела, углы между сочленениями в среднем имеют ошибку в 2.1 градуса.
- **Обратная связь** – при достигнутых параметрах скорости обработки видео возможно реализовать практически синхронную обратную связь различными способами (текст, ситуативное аудио, и возможно видео наложение)



- Достигнута высокая точность, позволяющая контролировать любые из запрошенных к анализу упражнений
- Система использует только свободное ПО и не зависит от коммерческого ПО Microsoft либо другого
- Система может решать как контрольные так и диагностические задачи
- Прототип работы с пациентом – телеграм бот для управления процессом и визуализация на телеэкране.

Возможные области применения технологии

- **Медицина:**
 - **Телереабилитация.** Задачи правильного выполнения физических упражнений без участия инструктора
 - **Неврология.** Раннее выявление болезни Паркинсона, рассеянного склероза или инсультных нарушений по микродвижениям, походке, тремору.
 - **Ревматология.** Оценка двигательных нарушений и функционального статуса, мониторинг прогрессирования заболеваний и эффективности терапии
 - **Педиатрия.**
- **Немедицинские применения:**
 - **Эргономика на производстве** контроль правильности движений рабочих (подъём тяжестей, позы) для предотвращения травм. мониторинг усталости, микродвижений головы/тела → предсказание ошибок.
 - **Танцы.** Виртуальный педагог с биомеханической обратной связью
 - **Военное дело и полиция.** тренировка техники (стрельба, тактика, рукопашный бой).

Дальнейшие планируемые разработки

- **Развитие обратной связи с пациентом:** ситуационные аудио комментарии при выполнении упражнений, наложение скелетной модели на видео
- **Рабочее место врача:**
 - **получение врачом отчетов о выполнении упражнений:** отправка для просмотра врачом аватара выполнения упражнений для целей анализа ошибок пациента, но при этом анонимизации видео, отправка
 - **добавление новых упражнений** и их разметка по метрикам
 - **составление индивидуальных планов реабилитации** для пациентов из имеющихся библиотек упражнений
- **Интеграция с существующими телереабилитационными системами:** разработка интеграции цифрового реабилитолога с МИС и телемедицинскими системами
- **Создание библиотек физических упражнений под восстановление различных функций пациентов:** проведение съемок совместно с медицинскими партнерами заинтересованными в дальнейшем развитии продукта

Приглашаем к сотрудничеству!

