

А.Д. ОБУХОВ, А.А. ВОЛКОВ, Н.А. ВЕХТЕВА, К.И. ПАТУТИН,
А.О. НАЗАРОВА, Д.Л. ДЕДОВ

**МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ ТЕНИ ПРОЦЕССА
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ
СИСТЕМ ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЙ**

Обухов А.Д., Волков А.А., Вехтева Н.А., Патутин К.И., Назарова А.О., Дедов Д.Л. **Метод формирования цифровой тени процесса перемещения человека на основе объединения систем захвата движений.**

Аннотация. В статье рассматривается задача формирования цифровой тени процесса перемещения человека. Проведен анализ предметной области, который показал необходимость формализации процесса создания цифровых теней для имитации движений человека в виртуальном пространстве, тестировании программно-аппаратных комплексов, функционирующих на основе действий человека, а также в различных системах опорно-двигательной реабилитации. Выявлено, что среди существующих подходов к захвату движений человека нельзя выделить универсальный и стабильно работающий при различных условиях внешней среды. Разработан метод формирования цифровой тени на основе комбинирования и синхронизации данных из трех систем захвата движений (трекеры виртуальной реальности, костюм motion capture и камеры с использованием технологий компьютерного зрения). Объединение перечисленных систем позволяет получить комплексную оценку положения и состояния человека независимо от условий внешней среды (электромагнитные помехи, освещенность). Для реализации предложенного метода проведена формализация цифровой тени процесса перемещения человека, включающая описание механизмов сбора и обработки данных от различных систем захвата движений, а также этапы объединения, фильтрации и синхронизации данных. Научная новизна метода заключается в формализации процесса сбора данных о перемещении человека, объединении и синхронизации аппаратного обеспечения используемых систем захвата движений для создания цифровых теней процесса перемещения человека. Полученные теоретические результаты будут использоваться в качестве основы для программной абстракции цифровой тени в информационных системах для решения задач тестирования, имитации человека и моделирования его реакции на внешние раздражители за счет обобщения собранных массивов данных о его перемещении.

Ключевые слова: цифровые тени, процесс перемещения человека, системы захвата движений, математическая модель, виртуальная реальность.

1. Введение. Технологии цифрового двойника и цифровой тени активно развиваются в разных сферах промышленности в качестве центрального элемента построения высокотехнологичного производства. В соответствии с ГОСТ Р 57700.37-2021 под цифровым двойником некоторого изделия понимается система, состоящая из цифровой модели (системы математических и компьютерных моделей, описывающей структуру и функциональность реального объекта) и двусторонних информационных связей с изделием. основоположник понятия «цифровой двойник» М. Гривс определяет его как

«конструкцию, которая полностью описывает потенциальный или реальный физически производимый продукт от микроатомного уровня до макрогеометрического уровня» [1, 2]. Наряду с термином «цифровой двойник» существуют такие понятия, как цифровая модель и тень. В соответствии с классификацией, представленной в работе [3], можно выделить три различные категории, обладающие следующими принципиальными различиями: цифровая модель (математическое или цифровое представление объекта без автоматизированного канала обмена данными между цифровыми и физическими объектами), цифровая тень (в дополнение к цифровой модели существует автоматизированный канал обмена информацией от физических объектов, оказывающих влияние на цифровой объект) и цифровой двойник (существует полностью автоматизированный и интегрированный канал данных в обоих направлениях, воздействия на цифровой объект могут вызывать изменения состояний физических объектов). Концепция цифровых теней была предложена в рамках Индустрии 4.0 [4] как некоторая платформа, которая объединяет информацию из различных источников, чтобы обеспечить возможность анализа объекта в режиме реального времени для принятия решений. В отличие от цифрового двойника для формирования цифровой тени необходима не всеобъемлющая база данных, а ограниченная потребностями определенной задачи. Кроме того, для ряда областей, включающих объекты с заранее неопределенным поведением, создание цифрового двойника является задачей высокой сложности и трудоемкости с необходимостью верификации, валидации, проверки полноты и адекватности полученной модели. Например, создание цифрового двойника человека или даже животного остается трудно реализуемой на текущем уровне технологий задачей [5]. В области создания цифровых теней и двойников оборудования и технических систем, наоборот, наблюдается прогресс за счет использования в качестве основы формализованных закономерностей их функционирования.

Процедура формирования цифровых теней сопряжена со сбором и обработкой больших объемов информации. Необходима формализация данного процесса, выработка единого подхода к созданию цифровых теней. Рассмотрим несколько примеров реализации цифровых теней и двойников. В исследовании [6] представлена концепция цифрового двойника для решения задачи повышения прозрачности процесса закупок между компаниями. Из результатов описания их практической деятельности можно сделать выводы о том, что структура данных является главной частью

системы, которая закладывает необходимый фундамент для реализации цифрового двойника, как инструмента анализа и прогноза работы реально функционирующей системы. Реализация цифровой тени робота-сборщика кабин является центральной темой исследования в статье [7]. Целью реализации данной технологии на производстве была необходимость предсказания и предотвращения возникновения аномалий в функционировании роботов, что потребовало осуществить всесторонний сбор данных о функционировании как роботов, так и среды вокруг них.

В области формирования цифровых теней человека можно говорить о прогрессе в моделировании только отдельных составляющих: фрагментов тела или отдельных действий. Так, например, в работе [8] реализована комплексная модель скелетно-мышечной системы, которая воспроизводит реалистичные движения человека в соответствии с динамикой мышечных сокращений. Авторами реализован алгоритм имитации обучения, который может работать с 346 мышцами тела для моделирования различных сценариев перемещения, включая деформацию костей, мышечную слабость, использование протеза. Несмотря на то, что полученная модель является искусственно сгенерированной и отличается от реальной скелетно-мышечной системы, подобные цифровые тени и двойники даже с учетом допущений могут найти применение при решении многих задач (прототипирование, тестирование, имитация деятельности человека в виртуальном пространстве) [9, 10]. В работе [11] рассматривается цифровой двойник человека, выполняющего операции на складе. Предложенная авторами архитектура используется для передачи данных о реальных действиях сотрудника, собранных с помощью набора датчиков, в информационную систему для формирования виртуального аватара. Действия аватара оцениваются с целью улучшения и оптимизации эргономики складских операций без прерывания реального производственного процесса.

Из анализа рассмотренных исследований сделан вывод о том, что вопрос формализации процесса формирования цифровой тени для некоторого произвольного объекта, в частности человека, проработан недостаточно. В вышеперечисленных исследованиях используются различные подходы, акцентирующие внимание на практическом использовании существующих технологий (компьютерное зрение или датчики), но не на формализации методологического подхода. Применение цифровых теней в системах, построенных на базе виртуальной реальности, открывает новые возможности по имитации

объектов и процессов реального мира, тестированию нового оборудования в виртуальных условиях, созданию более совершенных информационных систем, приближенных по своим характеристикам к реальным [12].

В качестве предметной области мы рассматриваем человеко-машинные системы, где создание цифровой тени отдельных процессов взаимодействия человека с техническими или программными комплексами является актуальной задачей. Для создания такой цифровой тени необходимо сформулировать алгоритм сбора и обработки больших объемов информации от систем захвата движений, которые осуществляют отслеживание перемещения человека. Необходимо принять во внимание, что данные с различных датчиков захвата движений не учитывают индивидуальное строение каждого человека, могут передаваться с ошибками и отклонениями [13]. Также при создании новых систем (например, беговых платформ, костюмов и т. д.) для виртуального пространства необходимо проведение множества новых тестов непосредственно с участием человека в качестве пользователя. Создание цифровой тени процесса перемещения человека может упростить решение этих проблем за счет анализа накопленных экспериментальных данных и их сравнения с получаемыми новыми данными. Эта задача также имеет актуальность при имитации движений человека в виртуальном пространстве, тестировании программно-аппаратных комплексов, функционирующих на основе действий человека, а также в различных системах опорно-двигательной реабилитации [14].

Задача исследования состоит в разработке метода формирования цифровой тени процесса перемещения, что является важным аспектом создания виртуальных тренажерных комплексов, систем адаптивного перемещения, опорно-двигательной реабилитации, где точность воспроизведения поведения человека имеет большое значение.

2. Метод формирования цифровой тени процесса перемещения. Построение цифровой тени связано со сбором большого объема данных для получения закономерностей функционирования процесса или объекта и последующей программной реализации в виде некоторой платформы. Для ее создания необходимо формализовать основные этапы формирования цифровой тени, начиная от автоматизированного сбора и анализа исходных данных из различных источников и заканчивая программной реализацией цифрового представления физического объекта или процесса.

Анализируя различные подходы к фиксации движений человека, можно схематично отразить процесс формирования цифровой тени в данной предметной области следующим образом (рисунок 1).

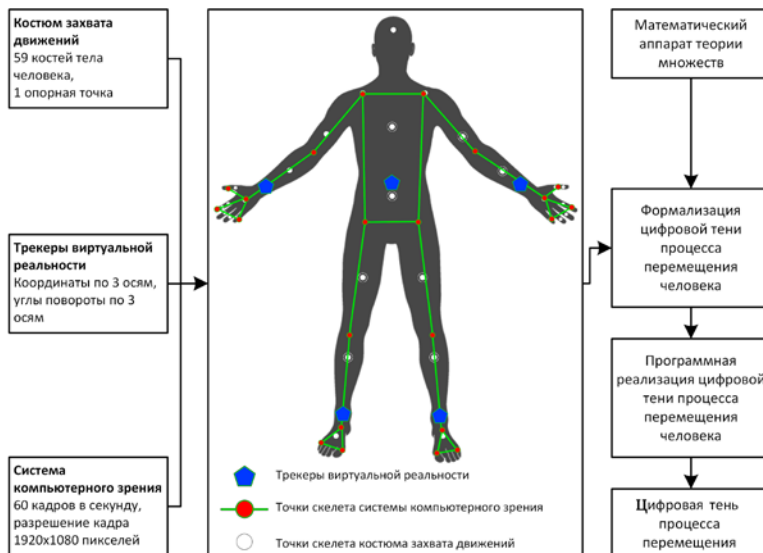


Рис. 1. Схема формирования цифровой тени процесса перемещения

Первый этап метода основан на объединении различных подходов к отслеживанию состояния человека в процессе перемещения. В рамках данного исследования мы выделяем следующие направления на этом этапе:

- отслеживание траекторий движений человека с использованием костюма захвата движения (Perseption Neuron, система захвата движения на основе инерциальных датчиков [15]), позволяющего зафиксировать изменение положения 59 сегментов тела человека относительно базовой (опорной) точки. Недостатком данного подхода является отсутствие информации об абсолютном значении положения человека в трехмерном пространстве и высокая вероятность возникновения искажений в данных при близком расположении к источнику электромагнитных помех;

- высокоточное отслеживание ключевых точек человека с использованием трекеров и контроллеров виртуальной реальности, обладающих низкой погрешностью измерения в зоне видимости

базовых станций (до 9x9 метров) [16, 17]. В случае выхода из зоны видимости базовых станций или их перекрытии возможна потеря сигнала от датчиков, что ведет к получению некорректных данных; размеры и масса трекеров ограничивают возможное количество закрепленных на человеке датчиков;

– применение технологий компьютерного зрения на основе одной камеры, стереокамер или системы из нескольких синхронизированных камер для получения скорректированных и более точных данных о положении человека в трехмерном пространстве при помощи распознавания ключевых точек тела человека, в том числе пальцев и лица [18 – 20]. При использовании данного инструмента возникают проблемы с распознаванием ключевых фрагментов силуэта человека при быстром движении объекта или слабой освещенности в кадре.

Сравнение трех подходов захвата движений по объективным метрикам представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение подходов к захвату движений

	Набор камер	Трекеры VR	Костюм motion capture
Зона отслеживания	Ограничена видимостью камеры и освещенностью	От 1.5x2 м до 9x9 м	Радиус до 150 м
Максимальное количество точек отслеживания	От 17 до 33 (зависит от алгоритма распознавания). Возможно отслеживание точек рук (до 21), ног (до 8) и лица (до 468)	От 1 до N (зависит от количества N трекеров, максимум 68)	От 12 до 32
Точность позиционирования	От ± 5мм до ± 40мм. Ухудшается при удалении от камеры	±0.7 мм	± 1мм
Скорость получения данных	От 15 до 120 раз в секунду	От 60 до 120 раз в секунду	До 250 раз в секунду
Структура данных	Массив 2D или 3D точек	Три значения координаты (по осям X, Y, Z), три значения угла поворота (по осям X, Y, Z)	Три значения углов поворота сегмента (по осям X, Y, Z), координаты сегмента (по осям X, Y, Z)

В результате представленного сравнительного анализа необходимо отметить невозможность использования единственного

метода отслеживания движений человека. Наличие рассмотренных недостатков перечисленных инструментов приводит к необходимости при формировании цифровой тени процесса перемещения применения комплексного подхода к сбору и обработке исходной информации. Таким образом, на втором этапе создания цифровой тени формируется программно-аппаратный комплекс для сбора данных о состоянии человека в процессе перемещения из трех различных источников, что позволит компенсировать слабые стороны каждого из инструментов за счет остальных.

При объединении данных, полученных с разных источников и имеющих различные форматы и объем, частоту получения и область анализа, необходимо обеспечить их синхронизацию и согласованность. Для этого на третьем этапе метода необходимо осуществить математическое описание цифровой тени процесса перемещения, используя верифицированный математический аппарат. Это позволит формализовать процессы сбора, обработки и анализа данных, а также процедуру их объединения в единый объект для получения исчерпывающей информации об исследуемом процессе.

На финальном этапе выявленные закономерности и сформулированные соотношения преобразуются в программную реализацию цифровой тени, которая и является ожидаемым результатом работы метода. Поведение цифровой тени в виртуальном пространстве за счет обработки и обобщения больших объемов собранных данных о реальном процессе перемещения соответствует реальному объекту, что позволяет использовать ее для имитации поведения человека, тестирования новых объектов и моделирования процессов без необходимости проведения натуральных экспериментов.

В дальнейших исследованиях возможна интеграция дополнительного аппаратного обеспечения для сбора данных о физическом состоянии человека в процессе перемещения или иной двигательной активности. Это оборудование может использоваться для анализа относительной величины напряжения, полученной от закрепленных на ключевых мышцах датчиков ЭМГ, измерения частоты пульса и дыхания, а также исследования электрической активности кожи, отражающей стрессовую реакцию пользователя в процессе контроля тревоги [21]. Полученный массив данных может привести к формированию расширенной цифровой тени человека, применимой уже в более широких классах задач. Однако объединение систем захвата движений и медицинского оборудования для сбора данных о состоянии человека в процессе двигательной активности является темой отдельного исследования.

Таким образом, первый и второй этапы метода не вызывают затруднений и неоднократно рассмотрены в различных исследованиях и на практике [22, 23]. На третьем этапе необходимо проведение дополнительных исследований для разработки формализованного (например, теоретико-множественного) представления цифровой тени процесса перемещения человека. Это позволит успешно осуществить завершающий этап метода, приводящий к программной реализации цифровой тени.

3. Формализация цифровой тени процесса перемещения человека. В общем случае, математическое описание цифровой тени – это многомерный вектор характеристик объекта/процесса в каждый момент времени. В этот вектор входят как значения входных переменных (внутренних и внешних параметров среды), так и выходные параметры (внутренние и внешние). Тогда для получения такого представления последовательно формализуем в математической форме составляющие процесса перемещения в соответствии со следующими тремя направлениями:

- костюм для захвата движений человека;
- трекеры виртуальной реальности;
- система компьютерного зрения.

Эти компоненты позволяют осуществить сбор данных о процессе движения человека, дублировать и верифицировать данные друг друга. Рассмотрим формализацию процессов сбора и обработки информации от каждого из них.

В результате использования костюма motion capture формируется набор из одной опорной точки и множества расположенных относительно нее сегментов (костей), положение которых указывается при помощи углов наклона по трем осям. При необходимости система позволяет записывать помимо изменения угла поворота датчика также его перемещение относительно предыдущего замера [24].

Пусть задано множество сегментов (костей) $B = \{b_i \mid i = 1..N_b\}$, общим количеством N_b . Для каждого сегмента b_i задано в зависимости от режима 6 или 3 значений:

$$b_i = \langle bx_i, by_i, bz_i, bax_i, bay_i, baz_i \rangle \text{ ИЛИ } b_i = \langle bax_i, bay_i, baz_i \rangle, \quad (1)$$

где bx_i, by_i, bz_i – значения позиции i -го датчика по трем осям, относительно предыдущего замера; bax_i, bay_i, baz_i – значения

поворота i - го датчика по трем осям, относительно предыдущего замера.

Тогда обозначим опорную точку на спине пользователя, как $b_0 = \langle bx_0, by_0, bz_0, bax_0, bay_0, baz_0 \rangle$. Множество сегментов B задается для каждого замера, таким образом, существует соответствие между множеством дискретных отметок времени $T = \{t_j\}$ и множеством значений датчиков B . Так как между сегментами заданы связи, определим порядок их следования и соединения как $OB: B \times B$, являющееся частично упорядоченным множеством. Тогда систему захвата движений на основе motion capture MC представим следующим образом:

$$MC = B \times T. \quad (2)$$

Далее рассмотрим формализацию системы захвата движений на основе трекеров виртуальной реальности VR . Пусть задано N_{tr} трекеров $TR = \{tr_i | i = 1..N_{tr}\}$, каждый из которых характеризуется кортежем:

$$tr_i = \langle tx_i, ty_i, tz_i, tax_i, tay_i, taz_i \rangle, \quad (3)$$

где $tx_i, ty_i, tz_i, tax_i, tay_i, taz_i$ – абсолютные значения координат i - го трекера по осям X, Y, Z, а также углы их поворота по этим осям соответственно.

Примем, что по умолчанию tr_0 размещается на спине пользователя, tr_1 и tr_2 – на ногах, tr_3 и tr_4 – на руках (либо являются контроллерами, которые пользователь держит в руках).

Аналогично (2) система захвата движений VR примет вид:

$$VR = TR \times T. \quad (4)$$

Формализация системы захвата движений на основе компьютерного зрения CV включает ряд дополнительных этапов, так как изначально данными для этого подхода является кадр (или набор кадров), на которых необходимо осуществить распознавание человека и его ключевых точек [25]. Поэтому на первом этапе необходимо осуществить следующее преобразование для каждого кадра f с целью получения набора точек $P = \{p_i\}$:

$$f \rightarrow P, \quad (5)$$

$$p_i = \langle px_i, py_i, pz_i \rangle. \quad (6)$$

где px_i, py_i, pz_i – координаты точки p_i в кадре f по трем осям.

Реализация (5) возможна с применением различных инструментов, основанных, например, на нейронных сетях. Такие библиотеки как MediaPipe, BlazePose, PoseNet, MoveNet [26, 27] и другие позволяют определить на кадре силуэт человека и выделить от 17 до 33 точек с возможностью расширения этого количества за счет выделения ключевых точек лица, пальцев и т.д. Схема расположения точек вдоль тела человека зависит от выбранного метода, но всегда включает опорные точки рук, ног, туловища и головы. Большинство моделей нейронных сетей осуществляет позиционирование точек по двум координатам (X и Y) из-за сложности оценки глубины при использовании камеры. Ряд алгоритмов (например, MediaPipe) имитирует определение координаты pz_i относительно некоторой опорной точки, но это значение является неточным и не позволяет позиционировать объект в пространстве. Поэтому для устранения данной проблемы необходимо обеспечить вычисление положения человека в пространстве по всем трем осям с использованием нескольких (минимум двух) камер следующим образом:

$$\begin{aligned} px_i &= cx_i^1/kx, \\ py_i &= (cy_{\max} - 0.5(cy_i^1 + cy_i^2))/ky, \\ pz_i &= (cx_{\max} - cx_i^2)/kx, \end{aligned} \quad (7)$$

где cx_i^1 и cx_i^2 – положение точки p_i на первой и второй камере соответственно по оси X; cy_i^1 и cy_i^2 – положение точки p_i на первой и второй камере соответственно по оси Y; cx_{\max} и cy_{\max} – максимальные значения пикселей по осям X и Y; kx и ky – коэффициенты для перевода пикселей в метры.

Помимо непосредственно ключевых точек скелета человека, распознанных алгоритмами компьютерного зрения, значение имеют углы между ребрами, соединяющими эти точки. Введем следующие

обозначения $PA = \{pa_i\}$ – множество ребер распознанного силуэта человека, где каждому ребру соответствует пара связанных точек:

$$pa_i = \langle p_i, p_k \rangle, i \neq k. \quad (8)$$

Между элементами множества PA и множеством костей B можно сформировать следующее однозначное соответствие:

$$(\forall pa_i) \exists (pa_i \rightarrow b_k), \quad (9)$$

причем отношение, заданное между PA и B , является инъективным (различным pa_i соответствуют различные b_k), но не сюръективным (так как не для любого b_k существует pa_i). Обозначим как $BP \subseteq B$ подмножество элементов, принадлежащих отношению (9).

Таким образом, получим следующую систему захвата движений:

$$CV = P \times PA \times T. \quad (10)$$

После формализации всех компонентов цифровой тени процесса перемещения необходимо осуществить процесс компоновки данных в единую структуру. Данный метод включает следующие этапы.

Этап калибровки. Получение данных от всех систем захвата движений (MC , VR , CV) в начальный момент времени ($t_0 \in T$). В момент калибровки отслеживаемый человек должен находиться в особой позиции (чаще всего выбирается Т-поза) в течение момента калибровки. После успешного завершения калибровки осуществляется формирование начальной (нулевой) точки h_0 по следующим правилам:

$$h_0 = \langle b_0, tr_0, p_b \rangle, \quad (11)$$

$$p_b = \left\langle \frac{px_{23} + px_{24}}{2}, \frac{py_{23} + py_{24}}{2}, \frac{pz_{23} + pz_{24}}{2} \right\rangle, \quad (12)$$

где p_b – усредненная точка между элементами p_{23} и p_{24} , наиболее близкая к tr_0 .

Таким образом, точка h_0 – это объединение элементов: опорной точки b_0 , закрепленного на спине трекера tr_0 и некоторой точки p_0 , наиболее близкой по расположению к tr_0 . Для остальных трекеров tr_i ($i > 0$) устанавливается соответствие между i -им трекером и ближайшей k -ой точкой множества P :

$$\forall tr_i \left(tr_i \rightarrow p_k \mid p_k = \arg \min_P \left(\begin{matrix} (px_k - tx_i)^2 + \\ (py_k - ty_i)^2 + \\ (pz_k - tz_i)^2 \end{matrix} \right)^{0.5} \right). \quad (13)$$

Этап отслеживания. Рабочий такт всех систем отслеживания, приводящий к получению их значений в следующий момент времени $t_j \in T$. Полученные данные из-за их различной размерности могут быть нормированы к единому интервалу. Также это позволяет получить для всех элементов разницу между текущим (в момент t_j) и предыдущим (в момент t_{j-1}) состоянием:

$$\Delta B = \left\{ \Delta b_i = \left\langle \begin{matrix} bx_i - bx_{ij-1}, \\ by_i - by_{ij-1}, \\ bz_i - bz_{ij-1}, \\ bax_{ij} - bax_{ij-1}, \\ bay_i - bay_{ij-1}, \\ baz_i - baz_{ij-1} \end{matrix} \right\rangle \right\}, \quad (14)$$

$$\Delta TR = \left\{ \Delta tr_i = \left\langle \begin{matrix} tx_{ij} - tx_{ij-1}, \\ ty_i - ty_{ij-1}, \\ tz_i - tz_{ij-1}, \\ tax_i - tax_{ij-1}, \\ tay_i - tay_{ij-1}, \\ taz_i - taz_{ij-1} \end{matrix} \right\rangle \right\}, \quad (15)$$

$$\Delta P = \left\{ \Delta p_i = \left\langle \begin{array}{l} px_{ij} - px_{ij-1}, \\ py_i - py_{ij-1}, \\ pz_i - pz_{ij-1} \end{array} \right\rangle \right\}, \quad (16)$$

$$\Delta PA = \left\{ \Delta pa_i = \left\langle \begin{array}{l} pax_{ij} - pax_{ij-1}, \\ pay_i - pay_{ij-1}, \\ paz_i - paz_{ij-1} \end{array} \right\rangle \right\}, \quad (17)$$

где индекс j определяет текущее значение координат или угла для элементов множеств B , TR , P и PA , а индекс $j-1$ – предыдущее значение этих элементов соответственно.

Этап фильтрации. Ввиду несовершенства используемых технических средств возникает возможность появления помех и искажений в собранных данных, вызванных потерей сигнала, электромагнитными помехами, быстрым перемещением человека (в случае компьютерного зрения). Для выявления элемента, значения которого искажены помехами, используются следующие правила:

- для метода MC :

$$\forall (b_i \in BP)(|\Delta b_i| > \beta) \text{ И } (|\Delta pa_k| < \rho), \quad (18)$$

- для метода VR :

$$\forall (tr_i)(|\Delta tr_i| > \tau) \text{ И } (|\Delta p_k| < \varphi), \quad (19)$$

- для метода CV :

$$\forall (p_i, pa_i)(|\Delta pa_k| > \rho \text{ ИЛИ } |\Delta p_k| > \varphi) \text{ И } (|\Delta b_i| < \beta \text{ И } |\Delta tr_i| < \tau), \quad (20)$$

где β – допустимый порог отклонения угла кости в методе захвата MC за время $\Delta t = t_j - t_{j-1}$; ρ – допустимый порог отклонения угла ребра силуэта в методе захвата CV за время Δt ; τ – допустимый порог отклонения перемещения трекера в методе захвата VR за время Δt ; φ – допустимый порог отклонения перемещения точки в методе захвата CV за время Δt .

Нарушение правил (18 – 20) для соответствующего элемента приводит к исключению его из рассмотрения и использованию значений дублирующего его элемента.

Этап синхронизации. Необходимо отметить, что каждый из методов MC, VR, CV осуществляет отправку данных с различными временными интервалами. Время на получение и обработку пакета информации также может значительно отличаться. Это приводит к рассинхронизации информации из различных источников. В рамках данного исследования мы не фокусируемся на этой проблеме, принимая, что на этапе синхронизации пакеты информации от каждого из методов привязаны к текущему времени $t_j \in T$ (при необходимости с выполнением усреднения значений или аппроксимации). Тогда после каждого рабочего такта и фильтрации осуществляется объединение значений в единый массив $ds_j \in DS$, относящийся к времени $t_j \in T$:

$$ds_j = \langle B, TR, P, PA \rangle. \quad (21)$$

Тогда $DS = \{ds_j\}$ – это формализованное представление цифровой тени процесса перемещения.

Так как представленное математическое описание цифровой тени основано на данных, полученных от трех независимых систем захвата движений, оно может обеспечить достаточную полноту решения задачи позиционирования человека в пространстве. Указанные в таблице 1 значения точности позиционирования по выбранным технологиям захвата движений обеспечивают необходимую точность и валидацию получаемых значений для построения цифровой тени.

Таким образом, с использованием теории множеств формализована цифровая тень процесса перемещения человека, включающая процедуры сбора и обработки данных от различных систем захвата движений. Новизна исследования заключается в комплексном подходе к анализу процесса перемещения, синхронизации и фильтрации этих данных для создания цифровой тени.

4. Реализация цифровой тени процесса перемещения человека. После формализации цифровой тени процесса перемещения осуществляется ее реализация в виде программной абстракции. Данный этап включает разработку следующих программных модулей:

1. Модуль сбора данных с костюма захвата движений.
2. Модуль сбора данных с трекеров виртуальной реальности.

3. Модуль компьютерного зрения для распознавания позиции человека в трехмерных координатах.
4. Модуль синхронизации данных.
5. База данных для хранения собранной информации.

Особенности сбора данных отображены на рисунке 2: действия пользователя фиксируются с использованием системы захвата движений, компьютерного зрения и трекеров виртуальной реальности. Для сбора информации используются апробированные программные библиотеки (OpenCV и MediaPipe для компьютерного зрения, OpenVR для получения информации с трекеров и Axis Neuron для костюма захвата движения Perception Neuron), что обеспечивает верификацию разработанного программного обеспечения в области сбора информации.

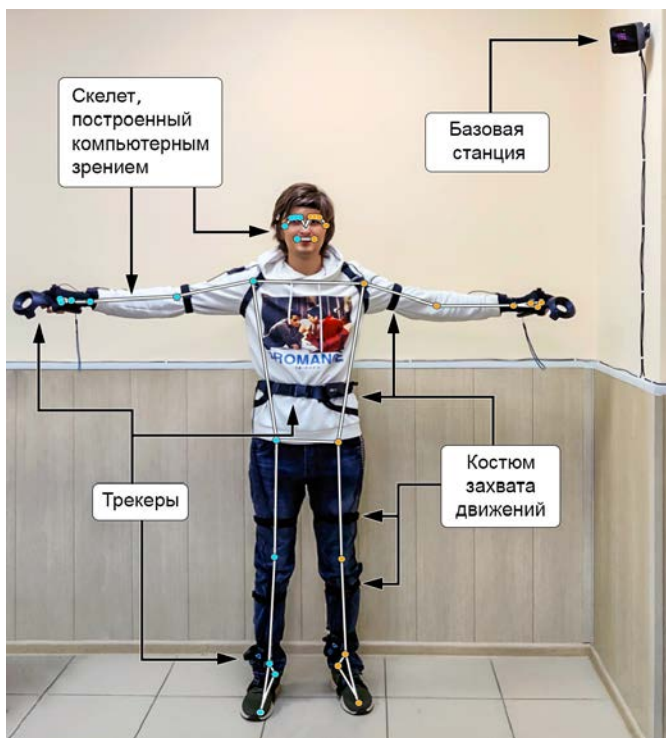


Рис. 2. Схема сбора данных для формирования цифровой тени

Собранные данные далее обобщаются в цифровую абстракцию с использованием статистических и интеллектуальных методов.

Полученный «черный ящик», повторяющий при известных условиях поведение реального объекта, используется в составе других информационных систем. Цифровая тень тогда может использоваться на этапе тестирования информационной системы, выступая в качестве имитации реального объекта (человека). Кроме того, сохраненная цифровая тень с корректно записанными данными является эталоном, с которым можно сравнивать текущие данные в процессе функционирования системы, взаимодействующей с человеком. Тогда значительное отклонение текущей информации от показателей цифровой тени является индикатором ее некорректности либо сбоя в работе системы.

5. Заключение. Цифровые тени являются перспективным направлением современной промышленности, так как направлены на создание информационных копий объектов и процессов, обобщение больших объемов данных об их функционировании и состоянии при различных условиях. Использование цифровых теней позволяет значительно сократить затраты на проведение научно-исследовательских и конструкторских работ за счет замены реального объекта на его цифровую тень с подобными свойствами. Однако алгоритмическое и математическое обеспечение процесса создания цифровых теней недостаточно регламентировано, отсутствует единый подход к их реализации для различных предметных областей.

В работе представлен метод формирования цифровой тени процесса перемещения человека на основе объединения систем захвата движений, что позволяет получить комплексное представление о перемещении человека при различных условиях внешней среды.

Для реализации метода формализована цифровая тень процесса перемещения, учитывающая сбор и обработку информации от трех различных технологий захвата движения, этапы фильтрации и синхронизации данных, что позволяет сформировать массив данных о перемещении человека в различных условиях. Полученные теоретические результаты используются для реализации программной абстракции цифровой тени процесса перемещения и соответствующих программных модулей сбора, анализа и обработки информации о действиях человека.

Областью применения результатов исследования являются человеко-машинные системы, основанные на анализе процесса перемещения человека. К ним относятся продвинутое тренажерные комплексы с подключаемыми беговыми платформами, системы захвата движений и опорно-двигательной реабилитации.

Литература

1. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/307509727_ (дата обращения: 03.11.2022).
2. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. №. 7. С. 517-531.
3. Kritzinger W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. 2018. vol. 51. no. 11. pp. 1016-1022.
4. Krüger J. et al. Innovative control of assembly systems and lines // CIRP annals. 2017. vol. 66. no. 2. pp. 707-730.
5. Botín-Sanabria D.M. et al. Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review // Remote Sensing. 2022. vol. 14. no. 6. p. 1335.
6. Pause D., Blum M. Conceptual Design of a Digital Shadow for the Procurement of Stocked Products // IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS). IEEE, 2018. pp. 288-295.
7. Srinivasan V. et al. Digital Shadow Model for automated Cabin assembly process. 2021.
8. Lee S. et al. Scalable muscle-actuated human simulation and control // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2019. vol. 38. no. 4. pp. 1-13.
9. Park S. et al. Learning predict-and-simulate policies from unorganized human motion data // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2019. vol. 38. no. 6. pp. 1-11.
10. Mourot L. et al. A Survey on Deep Learning for Skeleton-Based Human Animation // Computer Graphics Forum. 2022. vol. 41 (1). pp. 122-157.
11. Nikolakis N. et al. The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2019. vol. 32. no. 1. pp. 1-12.
12. Gagneré G., Ternova A. A CAstelet in Virtual reality for shadOw AVatar (CAVOV) // ConVRgence (VRIC) Virtual Reality International Conference Proceedings. Simon Richir (dir.). International Journal of Virtual Reality. 2020. vol. 3316.
13. Liu S., Zhang J., Zhang Y., Zhu R. A wearable motion capture device able to detect dynamic motion of human limbs // Nature communications. 2020. vol. 11. no. 1. pp. 1-12.
14. Богомолов А.В. Информационные технологии цифровой адаптационной медицины // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. №. 5. С. 1154-1182.
15. Wu Y. et al. A Comprehensive Analysis of the Validity and Reliability of the Perception Neuron Studio for Upper-Body Motion Capture // Sensors. 2022. vol. 22. no. 18. pp. 6954.
16. Niehorster D.C., Li L., Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research // i-Perception. 2017. vol. 8. no. 3. pp. 2041669517708205.
17. Ikbal M.S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC Vive virtual reality system // IEEE Access, 2020. vol. 9. pp. 3798-3815.
18. Cherkasov K.V. et al. The use of open and machine vision technologies for development of gesture recognition intelligent systems // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. 2018. vol. 1015. no. 3. pp. 032166.
19. Moeslund T.B., Hilton A., Krüger V. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis // Computer vision and image understanding. 2006. vol. 104. no. 2-3. pp. 90-126.
20. Hellsten T. et al. The Potential of Computer Vision-Based Marker-Less Human Motion Analysis for Rehabilitation // Rehabilitation Process and Outcome. 2021. vol. 10. pp. 11795727211022330.

21. Mekruksavanich S., Hnoohom N., Jitpattanakul A. A Deep Residual-based Model on Multi-Branch Aggregation for Stress and Emotion Recognition through Biosignals // 2022 19th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, 2022. pp. 1-4.
22. Zielinski E. Live Perception and Real Time Motion Prediction with Deep Neural Networks and Machine Learning // Diss. Harvard University. 2021.
23. Ohri A., Agrawal S., Chaudhary G.S. On-device Realtime Pose Estimation & Correction // International Journal of Advances in Engineering and Management (IAEM). 2021.
24. Choo C.Z.Y., Chow J.Y., Komar J. Validation of the Perception Neuron system for full-body motion capture // PloS one. 2022. vol. 17. no. 1. pp. e0262730.
25. Obukhov A. et al. Organization of Three-Dimensional Gesture Control Based on Machine Vision and Learning Technologies // Computer Science On-line Conference. Springer, Cham, 2022. pp. 70-81.
26. Bazarevsky V. et al. BlazePose: On-device real-time body pose tracking // arXiv preprint arXiv: 2006.10204. 2020.
27. Chen Y. et al. Adversarial poseNet: A structure-aware convolutional network for human pose estimation // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017. pp. 1212-1221.

Обухов Артем Дмитриевич — д-р техн. наук, руководитель лаборатории, управление фундаментальных и прикладных исследований, Тамбовский государственный технический университет. Область научных интересов: адаптивные информационные системы, структурно-параметрический синтез, нейронные сети, машинное обучение. Число научных публикаций — 214. obuhov.art@gmail.com; улица Советская, 106, 392000, Тамбов, Россия; р.т.: +7(915)867-6915.

Волков Андрей Андреевич — младший научный сотрудник, управление фундаментальных и прикладных исследований, Тамбовский государственный технический университет. Область научных интересов: информационные технологии, архитектуры информационных систем, распределенные системы управления. Число научных публикаций — 25. didim@eclabs.ru; улица Советская, 106, 392000, Тамбов, Россия; р.т.: +7(953)703-0619.

Вехтева Надежда Андреевна — младший научный сотрудник, управление фундаментальных и прикладных исследований, Тамбовский государственный технический университет. Область научных интересов: информационные технологии, 3D моделирование, адаптивные информационные системы. Число научных публикаций — 16. magicanloner@gmail.com; улица Советская, 106, 392000, Тамбов, Россия; р.т.: +7(908)298-1042.

Патутин Кирилл Игоревич — младший научный сотрудник, управление фундаментальных и прикладных исследований, Тамбовский государственный технический университет. Область научных интересов: компьютерное зрение, машинное обучение, нейронные сети. Число научных публикаций — 14. kirill-patutin@mail.ru; улица Советская, 106, 392000, Тамбов, Россия; р.т.: +7(915)862-7022.

Назарова Александра Олеговна — техник-программист, управление фундаментальных и прикладных исследований, Тамбовский государственный технический университет. Область научных интересов: информационные технологии, разработка программного обеспечения, виртуальная реальность, анализ данных. Число

научных публикаций — 12. nazarova.al.ol@yandex.ru; улица Советская, 106, 392000, Тамбов, Россия; р.т.: +7(920)496-3910.

Дедов Денис Леонидович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, управление фундаментальных и прикладных исследований, Тамбовский государственный технический университет. Область научных интересов: виртуальные тренажерные комплексы, обучение персонала, информационные технологии, адаптивные информационные системы. Число научных публикаций — 117. hammer68@mail.ru; улица Советская, 106, 392000, Тамбов, Россия; р.т.: +7(915)672-9838.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10057, <https://rscf.ru/project/22-71-10057/>.

A. OBUKHOV, A. VOLKOV, N. VEKHTOVA, K. PATUTIN, A. NAZAROVA,
D. DEDOV

THE METHOD OF FORMING A DIGITAL SHADOW OF THE HUMAN MOVEMENT PROCESS BASED ON THE COMBINATION OF MOTION CAPTURE SYSTEMS

Obukhov A., Volkov A., Vekhtova N., Patutin K., Nazarova A., Dedov D. The Method of Forming a Digital Shadow of the Human Movement Process Based on the Combination of Motion Capture Systems.

Abstract. The article deals with the problem of forming a digital shadow of the process of moving a person. An analysis of the subject area was carried out, which showed the need to formalize the process of creating digital shadows to simulate human movements in virtual space, testing software and hardware systems that operate on the basis of human actions, as well as in various systems of musculoskeletal rehabilitation. It was revealed that among the existing approaches to the capture of human movements, it is impossible to single out a universal and stable method under various environmental conditions. A method for forming a digital shadow has been developed based on combining and synchronizing data from three motion capture systems (virtual reality trackers, a motion capture suit, and cameras using computer vision technologies). Combining the above systems makes it possible to obtain a comprehensive assessment of the position and condition of a person regardless of environmental conditions (electromagnetic interference, illumination). To implement the proposed method, a formalization of the digital shadow of the human movement process was carried out, including a description of the mechanisms for collecting and processing data from various motion capture systems, as well as the stages of combining, filtering, and synchronizing data. The scientific novelty of the method lies in the formalization of the process of collecting data on the movement of a person, combining and synchronizing the hardware of the motion capture systems to create digital shadows of the process of moving a person. The obtained theoretical results will be used as a basis for software abstraction of a digital shadow in information systems to solve the problems of testing, simulating a person, and modeling his reaction to external stimuli by generalizing the collected data arrays about his movement.

Keywords: digital shadows, human movement process, motion capture systems, mathematical model, virtual reality.

References

1. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept. 2016. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/307509727> (accessed 03.11.2022).
2. Carev M.V., Andreev Yu.S. [Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases] Cifrovye dvojniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, scenariy ispolzovaniya – [Journal of Instrument Engineering] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2021. vol. 64. no. 7. pp. 517-531. (In Russ.).
3. Kritzinger W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. vol. 51. no. 11. pp. 1016-1022.
4. Krüger J. et al. Innovative control of assembly systems and lines. CIRP annals. 2017. vol. 66. no. 2. pp. 707-730.
5. Botín-Sanabria D.M. et al. Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. Remote Sensing. 2022. vol. 14. no. 6. p. 1335.

6. Pause D., Blum M. Conceptual Design of a Digital Shadow for the Procurement of Stocked Products. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS). IEEE, 2018. pp. 288-295.
7. Srinivasan V. et al. Digital Shadow Model for automated Cabin assembly process. 2021.
8. Lee S. et al. Scalable muscle-actuated human simulation and control. ACM Transactions on Graphics (TOG). 2019. vol. 38. no. 4. pp. 1-13.
9. Park S. et al. Learning predict-and-simulate policies from unorganized human motion data. ACM Transactions on Graphics (TOG). 2019. vol. 38. no. 6. pp. 1-11.
10. Mourot L. et al. A Survey on Deep Learning for Skeleton-Based Human Animation. Computer Graphics Forum. 2022. vol. 41. vol. 1. pp. 122-157.
11. Nikolakis N. et al. The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2019. vol. 32. no. 1. pp. 1-12.
12. Gagneré G., Ternova A. A Castelet in Virtual reality for shadOw AVatar (CAVOV). ConVRgence (VRIC) Virtual Reality International Conference Proceedings. Simon Richir (dir.). International Journal of Virtual Reality. 2020. vol. 3316.
13. Liu S., Zhang J., Zhang Y., Zhu R. A wearable motion capture device able to detect dynamic motion of human limbs. Nature communications. 2020. vol. 11 no. 1. pp. 1-12.
14. Bogomolov A.V. [Information technologies of digital adaptive medicine] Информационные технологии цифровой адаптивной медицины – [Informatics and automation] Информатика и автоматизация. 2021. vol. 20. no. 5. pp. 1154-1182. (In Russ.).
15. Wu Y. et al. A Comprehensive Analysis of the Validity and Reliability of the Perception Neuron Studio for Upper-Body Motion Capture. Sensors. 2022. vol. 22. no. 18. pp. 6954.
16. Niehorster D.C., Li L., Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research. i-Perception. 2017. vol. 8. no. 3. pp. 2041669517708205.
17. Ikbal M.S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC Vive virtual reality system. IEEE Access, 2020. vol. 9. pp. 3798-3815.
18. Cherkasov K.V. et al. The use of open and machine vision technologies for development of gesture recognition intelligent systems. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. 2018. vol. 1015. no. 3. pp. 032166.
19. Moeslund T.B., Hilton A., Krüger V. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. Computer vision and image understanding. 2006. vol. 104. no. 2-3. pp. 90-126.
20. Hellsten T. et al. The Potential of Computer Vision-Based Marker-Less Human Motion Analysis for Rehabilitation. Rehabilitation Process and Outcome. 2021. vol. 10. pp. 11795727211022330.
21. Mekruksavanich S., Hnoohom N., Jitpattanakul A. A Deep Residual-based Model on Multi-Branch Aggregation for Stress and Emotion Recognition through Biosignals. 2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, 2022. pp. 1-4.
22. Zielinski E. Live Perception and Real Time Motion Prediction with Deep Neural Networks and Machine Learning. Diss. Harvard University. 2021.
23. Ohri A., Agrawal S., Chaudhary G.S. On-device Realtime Pose Estimation & Correction. International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM). 2021.

24. Choo C.Z.Y., Chow J.Y., Komar J. Validation of the Perception Neuron system for full-body motion capture. *PloS one*. 2022. vol. 17. no. 1. pp. e0262730.
25. Obukhov A. et al. Organization of Three-Dimensional Gesture Control Based on Machine Vision and Learning Technologies. *Computer Science On-line Conference*. Springer, Cham, 2022. pp. 70-81.
26. Bazarevsky V. et al. BlazePose: On-device real-time body pose tracking. *arXiv preprint arXiv:2006.10204*. 2020.
27. Chen Y. et al. Adversarial poseNet: A structure-aware convolutional network for human pose estimation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2017. pp. 1212-1221.

Obukhov Artem — Ph.D., Dr.Sci., Head of the laboratory, Department of fundamental and applied research, Tambov State Technical University. Research interests: adaptive information systems, structural-parametric synthesis, neural networks, machine learning. The number of publications — 214. obuhov.art@gmail.com; 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russia; office phone: +7(915)867-6915.

Volkov Andrey — Junior researcher, Department of fundamental and applied research, Tambov State Technical University. Research interests: information technologies, information system architectures, distributed control systems. The number of publications — 25. didim@eclabs.ru; 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russia; office phone: +7(953)703-0619.

Vekhteva Nadezhda — Junior researcher, Department of fundamental and applied research, Tambov State Technical University. Research interests: information technologies, 3D modeling, adaptive information systems. The number of publications — 16. magicanolner@gmail.com; 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russia; office phone: +7(908)298-1042.

Patutin Kirill — Junior researcher, Department of fundamental and applied research, Tambov State Technical University. Research interests: computer vision, machine learning, neural networks. The number of publications — 14. kirill-patutin@mail.ru; 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russia; office phone: +7(915)862-7022.

Nazarova Alexandra — Programmer technician, Department of fundamental and applied research, Tambov State Technical University. Research interests: information technology, software development, virtual reality, data analysis. The number of publications — 12. nazarova.al.ol@yandex.ru; 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russia; office phone: +7(920)496-3910.

Dedov Denis — Ph.D., Senior researcher, Department of fundamental and applied research, Tambov State Technical University. Research interests: virtual training complexes, personnel training, information technologies, adaptive information systems. The number of publications — 117. hammer68@mail.ru; 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russia; office phone: +7(915)672-9838.

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-71-10057, <https://rscf.ru/en/project/22-71-10057/>.