

УДК 004.387

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ ИГРОКА И ВИРТУАЛЬНОГО АВАТАРА

П. Д. Гришков<sup>1</sup>, В. В. Кугуракова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Высшая школа информационных технологий и интеллектуальных систем  
Казанского (Приволжского) федерального университета

<sup>1</sup>grishkovpavel@gmail.com, <sup>2</sup>vlada.kugurakova@gmail.com

### **Аннотация**

Представлены математические подходы для реализации методов по синхронизации действий человека и виртуального аватара, с использованием инверсной кинематики. Для создания полноценной системы синхронизации поведения игрока и VR-аватара описана реализация необходимого для этого функционала: позиционирование рук, калибровка их размера, сгибание рук в анатомически приемлемые стороны, анатомическое сгибание позвоночника, приседание и перемещение в пространстве. Реализация наклона и приседания значительно расширяет функционал синхронизации поведения игрока и его аватара, что позволяет создать полный набор визуальных самоощущений пользователя, находящегося в виртуальной среде, чего лишено большинство приложений виртуальной реальности на данный момент.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, VR, VR-аватар, инверсная кинематика

### **ВВЕДЕНИЕ**

Очки виртуальной реальности ограничивают поле зрения пользователя. Одним из побочных эффектов этого факта является то, что пользователь не может видеть собственное тело. Люди на протяжении всей своей жизни видят собственное тело и не задумываются о важности этого факта. Оказавшись в виртуальной реальности, человек в большинстве случаев может наблюдать только кисти рук, в худшем случае – лишь изображение контроллеров. Из-за этого пропадает ощущение реальности происходящего, и пользователь сразу осознаёт, что находится в искусственно созданном пространстве, что может плохо отразиться

на целях, которые преследует определённое приложение. Например, если человек, проходя обучение на виртуальном симуляторе ремеслу, опасному для человеческой жизни, будет без должной оценки ситуации производить критические действия, впоследствии он может повторять подобное в рамках своей работы, что может привести к трагедии. Таким образом, для систем виртуальной реальности, например [1, 2], немаловажным фактором является представление собственного тела при взгляде от первого лица.

Иммерсивность в виртуальной реальности – коэффициент погружения человека в виртуальный мир – показывает, насколько реалистично человек воспринимает искусственный мир. Достижение высокой иммерсивности в виртуальной реальности достигаются с помощью использования передовых технологий изображения, звука, осязания и др., например, чувство осязания в VR достигается с помощью имитации тактильных ощущений через специальные перчатки [3]. Возможность механически воздействовать на виртуальные объекты дополняют картину нового мира пользователя.

Визуальное представление собственного тела было требованием систем виртуальной реальности почти с момента их создания. Еще в конце 1980-х годов VPL Research экспериментировала с нереалистичными аватарами [4]. Потенциальную важность визуализации аватаров для ощущения эффекта присутствия была отмечена в ранних моделях Слейтера и Уилбера [5]. Слейтер продемонстрировал, что виртуальное тело оказывает значительное влияние на самовосстановление эффекта присутствия при перемещениях [6]. Лин [7] показал, что аватар, который был правильно откалиброван от пола до высоты участника эксперимента, увеличил точность оценок высоты. Люди, правильно оценивающие пропорции мира, с меньшей вероятностью упадут с уступа. Таким образом, полезность аватаров достаточно широко изучена.

Технология виртуальной реальности в ближайшем будущем откроет новые границы в общении людей на расстоянии. Появляется всё большее количество приложений, позволяющих видеть и слышать друг друга не просто на видеозаписи, а уже в трехмерном пространстве. Применение виртуальных аватаров является неотъемлемой частью подобных систем, ведь в социальных ситуациях пользователи могут эффективно их использовать для обмена информацией. Мимика, жесты и положение тела используются как средства общения, в лю-

бых прямых взаимодействиях между людьми. Например, Доддс с соавторами [8] показал, что аватар – полезный ресурс в общении с другими людьми в многопользовательских системах виртуальной реальности.

Подготовка к работе в труднодоступных или опасных для жизни человека местах, к работе с узкоспециализированным оборудованием [1] или со сложными технологическими процессами, отработка моторных навыков для обучения проведению хирургическим операциям [2] возможна с помощью VR-тренажеров. В настоящее время всё большее количество крупных компаний занимается разработкой подобных систем для обучения и повышения квалификации персонала. Для решения подобных задач необходима повышенная способность пользователя выполнять определенные когнитивные задачи.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время присутствует ряд проблем, связанных с отражением пользователя и синхронизацией его действий в виртуальной среде:

- сложно сделать аватар похожим на настоящее тело пользователя;
- проблема uncanny valley – аватары распознаются по несвойственным человеку мимике и моторике, даже если 3D-модель полностью совпадает внешне с реальным человеком, прототипом аватара [9];
- отсутствует система полноценных анимаций для убедительного повторения движений человека;
- существуют риски в неправильной калибровке аватара; это приведёт к расхождению между действиями пользователя и его виртуального аватара; пользователю будет некомфортно взаимодействовать с миром, и в связи с этим теряется эффект присутствия.

Основной задачей данной работы является реализация методов по синхронизации действий человека и виртуального аватара.

### **АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ**

Все очки (шлемы) виртуальной реальности связывает факт наличия акселерометра, гироскопа и магнитометра. При помощи этих аппаратных решений разработчику можно определить угол поворота очков на голове человека, век-

тор перемещения очков в пространстве и перемещать игрового персонажа, исходя из этих данных.

Контроллеры для очков виртуальной реальности, так же, как и очки, оснащены акселерометром, гироскопом и магнитометром. В дополнение к этим трём датчикам трекинг контроллеров в пространстве происходит с помощью станций глубинного захвата и магнитных систем.

Существует несколько решений перчаток для виртуальности, таких, как *CaptoGlove*, *Manus VR*, *Gloveone*, *Control VR*, различные решения от *CyberGlove Systems* [10]. Средства захвата движения, основанные на перчатках, стали популярными в конце 1980-х как способ взаимодействия людей с виртуальными средами, позволяя воспроизводить жесты всей руки. *MIT-LED* была одной из первых пар перчаток, специально предназначенных для отслеживания движения рук для записи анимаций [11].

*Kinect* – это бесконтактный игровой контроллер, способный посредством двух сенсоров глубины и цветной видеокамеры распознавать полное трехмерное движение тела человека в пространстве. Слабо подходит для VR, так как не способен распознавать развороты человека на 180 градусов и имеет очень большие погрешности в трекинге конечностей [12].

*Leap Motion* – технология, предназначенная для захвата мелкой моторики человека. Критичными проблемами для использования *Leap Motion* в VR являются необходимость держать руки непосредственно перед датчиком в достаточно ограниченной области и неидеальные алгоритмы определения кистей рук – под некоторыми углами руки фактически перестают определяться.

*Motion Capture* – технология захвата движений. Маркерная система использует костюм с датчиками, надеваемый на человека, и множество камер, которые фиксируют данные с датчиков. Безмаркерная система не требует специального костюма с датчиками, распознаёт движения с помощью технологий компьютерного зрения и распознавания образов, однако предоставляет очень зашумлённую информацию, в связи с чем плохо применима в рамках виртуальной реальности.

Другие решения в синхронизации движений для аватара: *Proteus VR* [13] – работа Монреальской школы общественного здравоохранения – предлагает захват предметов в руку и перемещение по удочке, но пользователи видят только

кисти рук; и IKinema Runtime [14] – программное обеспечение, представляющее собой универсальный алгоритм инверсной кинематики для всего тела, который используется для создания реалистичного движения персонажей предлагает большой набор готовых инструментов для различных видов поведения персонажа – лазание, размещение ног, передвижение.

### **НАШ ПОДХОД**

Наш подход основан на использовании методов инверсной кинематики (ИК), как называют математический процесс восстановления движений объекта из других данных.

Анимированный персонаж моделируется скелетом из жестких сегментов, соединенных шарнирами, называемым кинематической цепью. Кинематические уравнения персонажа определяют связь между углами соединений скелета и его позой или конфигурацией. Задача прямой кинематической анимации использует уравнения кинематики для определения позы с учетом совместных углов. Обратная кинематическая задача вычисляет совместные углы для желаемой позы персонажа.

В игровом движке с открытым исходным кодом Unreal Engine [15], разрабатываемом компанией Epic Games с 1998 года, есть несколько способов использовать ИК, например, Two Bone IK и FABRIC.

Первым подходом к созданию VR-аватара можно назвать использование стандартного VR-шаблона, содержащего базовые классы для работы с VR-шлемами, в котором реализованы возможность перемещения с помощью ручки и захват предметов. Тело пользователя ограничено кистями рук. Второй и описанный в этой работе подход – парадигма полного тела аватара с использованием ИК. Для создания полноценной системы синхронизации поведения игрока и VR-аватара необходима реализация функционала позиционирования рук, калибровки их размера, их сгибания или поворотов, наклона туловища (сгибание позвоночника), приседания и перемещения в пространстве.

### **Позиционирование рук VR-аватара**

Посредством контроллеров в игровой движок передается информация о перемещениях рук человека [16]. Чтобы избежать диссонанс между настоящими

---

руками человека и руками аватара, необходимо правильно позиционировать 3D-модели контроллеров, имеющие схожие с реальными размеры, в кистях аватара.

### Размер VR-аватара

Пользователю перед началом работы с виртуальным телом необходимо произвести калибровку в T-pose (поза для универсальности подхода к заданию моделей: в положении, когда ноги соединены вместе, а руки разведены параллельно полу в разные стороны). Реалистичный размер виртуального аватара достигается определением роста и размаха рук игрока. В первую очередь задается размер 3D-модели, исходя из пропорций роста человека к росту модели. После этого изменяются размеры рук аватара. В зависимости от пропорции размаха рук человека к размаху рук 3D-модели увеличиваются или уменьшаются в равных размерах плечи и предплечья скелета модели.

### Сгибание рук VR-аватара

Простейшим методом инверсной кинематики является “Two Bone IK”, он позволяет аналитически, с помощью тригонометрических тождеств вычислить вращения для двух костей (см. Рис. 1). Для работы в 3D пространстве, как и в случае VR, существует бесконечное число возможных решений для установки вращения костей.

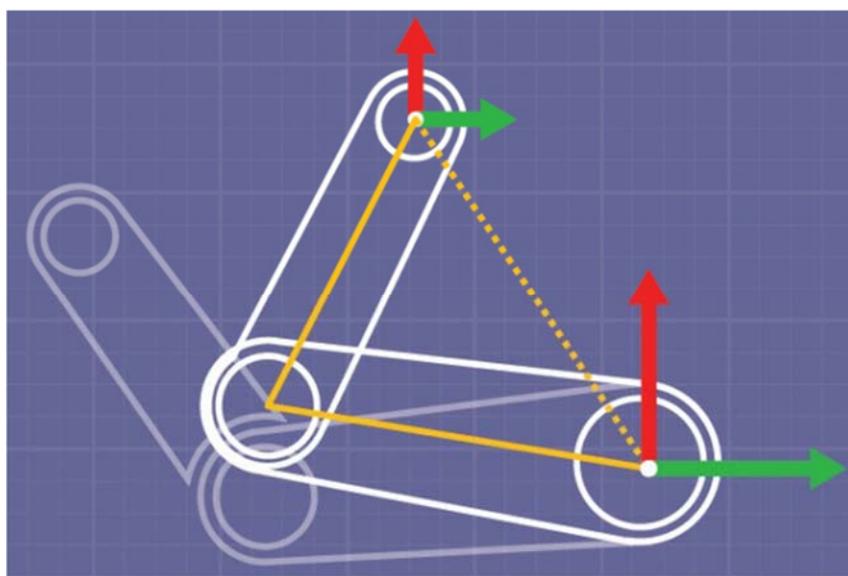


Рис. 1. Two Bone IK

Для упрощения этой задачи вводится дополнительная точка в пространстве, которая вместе с направлением от корня кости к целевой точке ИК создаёт плоскость – нормаль к плоскости является векторным произведением этих двух направлений. Эта плоскость затем используется для упрощения задачи ИК вплоть до двух измерений.

### Сгибание позвоночника VR-аватара

Другой способ использования инверсной кинематики – Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics (FABRIK). В отличие от реализации Two Bone IK, FABRIK не ограничивает количество костей, которые могут существовать в обратной кинематической цепи. Чтобы достичь этого, FABRIK использует несколько иной подход: вместо того, чтобы быть аналитическим, FABRIK итеративным путем прохождения вверх и вниз по цепочке костей рассчитывает повороты (Рис. 2) каждой кости.

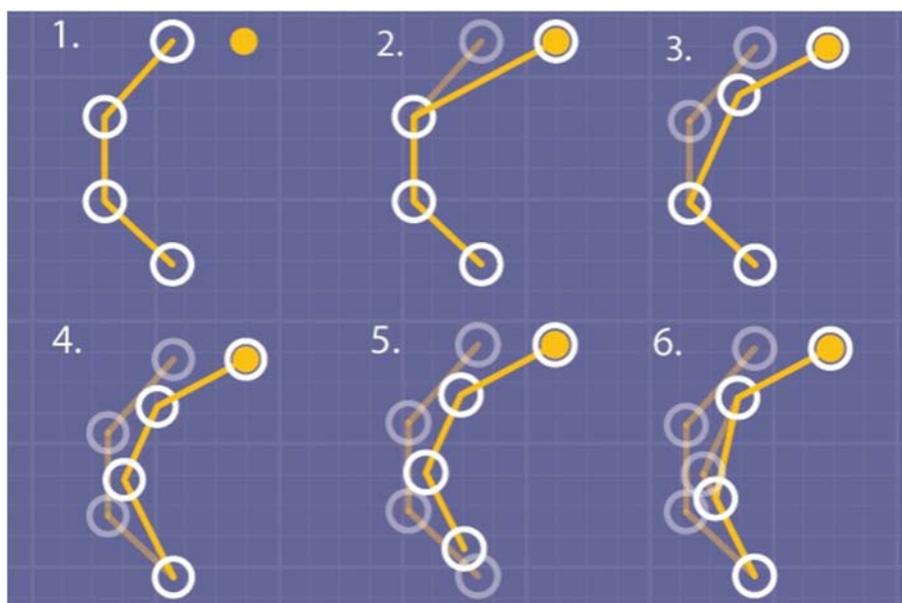


Рис. 2. Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics

Эта реализация позволяет добиться синхронизации действий игрока с анимацией его виртуального аватара (см. Рис. 3).

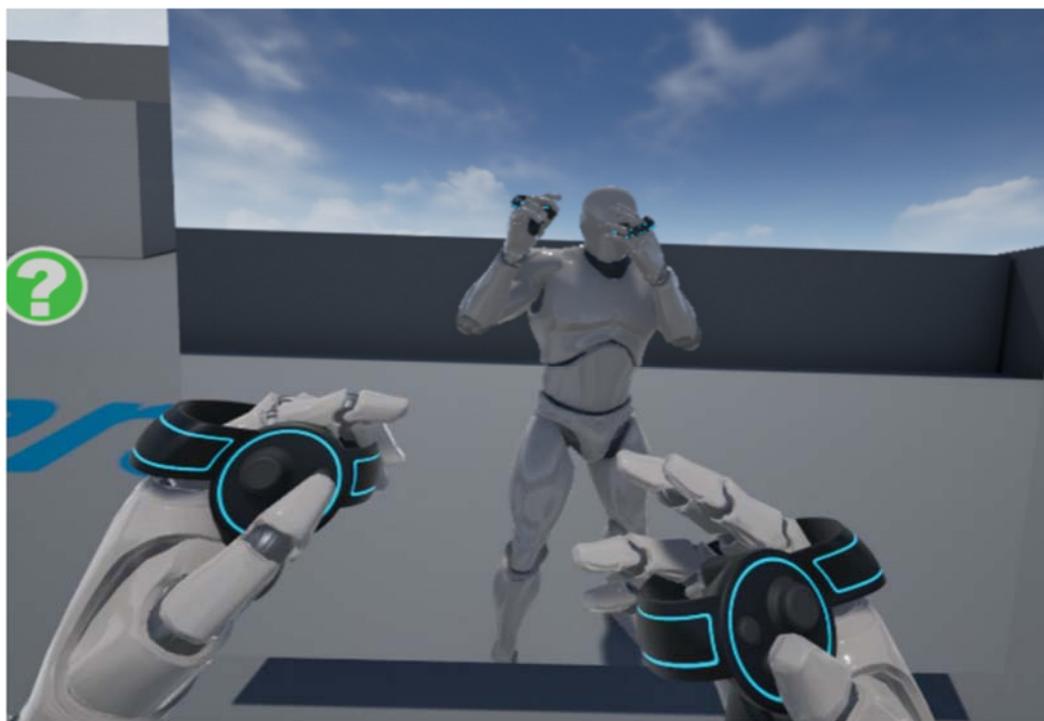


Рис. 3. ИК верхней части туловища

### Приседание VR-аватара

Помимо наклонов туловища, человек способен приседать (Crouching Recognition). Основываясь только на положении головы человека в пространстве, довольно сложно корректно определить, присел человек или наклонился, ведь мы не знаем, где находится его таз. Для решения этой проблемы был создан метод разграничения анимаций в зависимости от перемещений головы игрока, графически представленный на Рис. 4. На этом рисунке представлен боковой разрез, где ось X направлена по направлению таза человека, ось Z – от пола вверх. Красной точкой обозначена заранее откалиброванная высота игрока. Зелёной точкой обозначена высота таза игрока, которая равна половине высоты человека. Если в текущий момент времени голова человека находится в голубой области, будет проигрываться анимация приседания, если в красном круге – анимация наклона, если выходит за пределы круга – человек сделал шаг вперёд или назад. Область приседания ограничена формулой (параболы)  $z=-x^2+x+h$ , где  $h$  – высота человека.

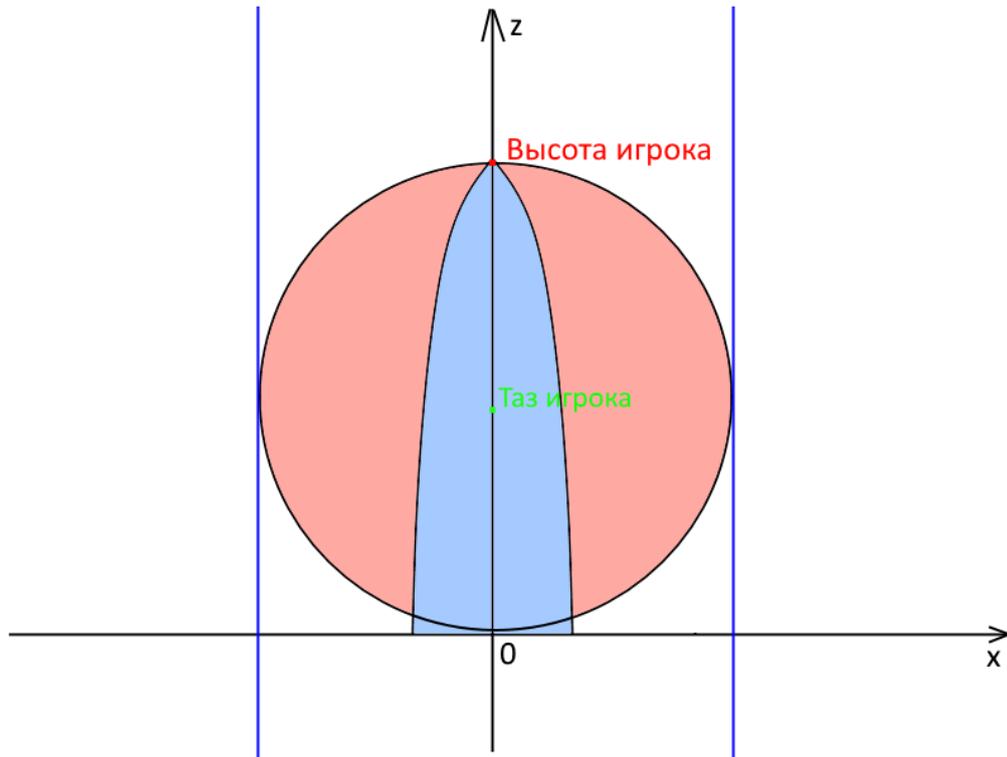


Рис. 4. ИК верхней части туловища

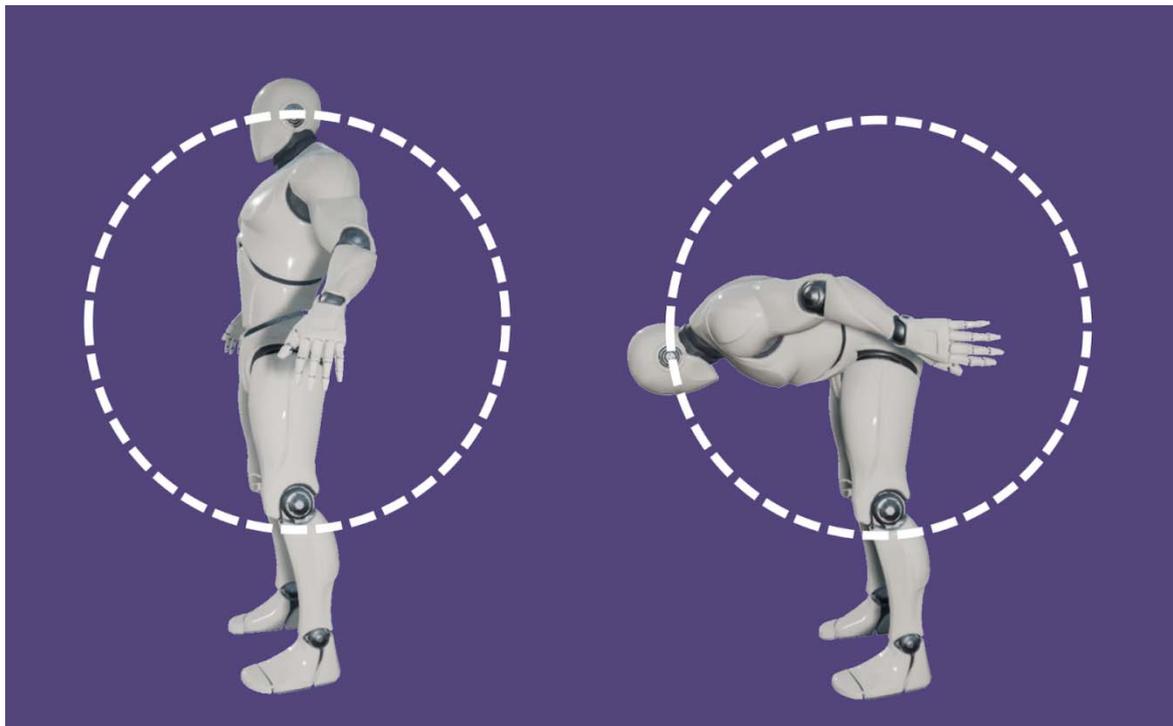


Рис. 5. Траектория максимального сгибания человека

Траектория максимального сгибания человека (Рис. 5) выводится по формуле (окружности)  $x^2+(z-h)^2=(h/2)^2$ , где  $h$  – высота человека.

## Перемещение в пространстве

Перемещение в пространстве реализовано двумя способами: телепортация или ходьба. Телепортация с помощью удочки – проверенное и популярное решение среди VR-приложений. При нажатии на джойстик на контроллере из виртуальной кисти пользователя появляется сплайн, графически отображающий кривую и точку, куда будет совершено перемещение. При вращении джойстика пользователь может выбрать направление, куда он будет смотреть после перемещения.

Ходьба используется, когда человек вышел за траекторию максимального сгибания (Рис. 5). Ноги аватара двигаются в рамках анимаций по StateMachine.

Направление таза аватара зависит от направления взгляда, положения рук относительно взгляда и тела (Рис. 6). В реалтайме рассчитывается предположительное направление таза: если оно больше, чем на 15 градусов отличается от текущего, то значения интерполируются и таз разворачивается на правильный угол. Предположительное направление равняется сумме векторов взгляда, вектора от головы до левой руки, умноженного на вес данной руки, и аналогичного вектора правой руки.

Вес руки рассчитывается в зависимости от положения руки: чем ближе она к тазу, тем он меньше. Если рука заходит за таз, её вес равен 0.

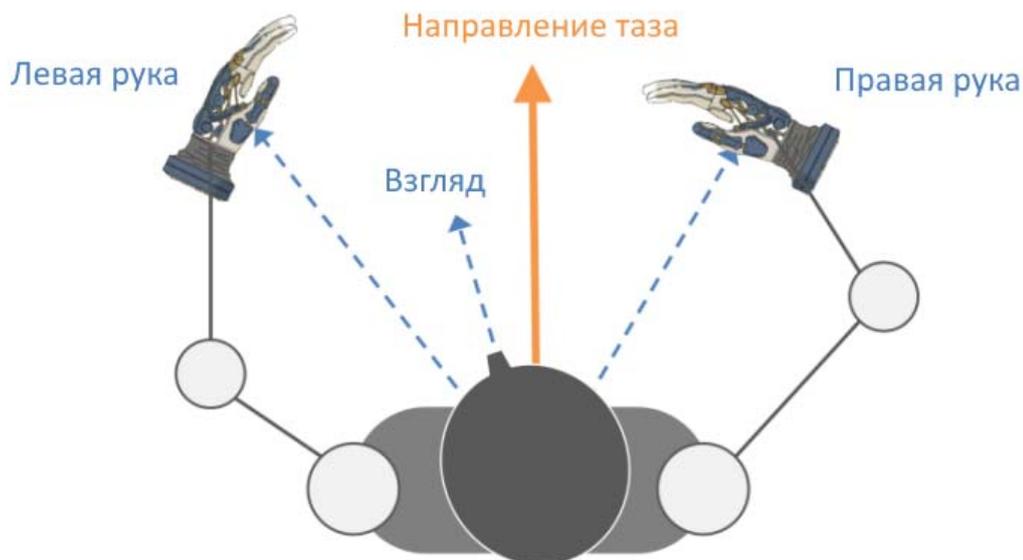


Рис. 6. Схема зависимостей при вращении аватара на месте

## **РЕЗУЛЬТАТЫ**

Описаны математические подходы для реализации собственных методов по синхронизации действий человека и виртуального аватара:

- распознавание приседания и наклона человека;
- синхронизация нижней части туловища;
- приведены подходы правильного позиционирования рук относительно контроллеров;
- выведены зависимости анимаций от роста и размаха рук человека.

Все разработанные методы реализованы в плагине для Unreal Engine 4 [15]. Реализация наклона и приседания значительно расширяет функционал для синхронизации поведения игрока и его аватара, предлагая, таким образом, полный набор визуальных самоощущений пользователя, находящегося в виртуальной среде, чего лишено большинство приложений виртуальной реальности на данный момент. Точное позиционирование рук разработано в IKinema [14], для игрового движка Unity доступен плагин реализации перемещения в пространстве, существуют другие неполные решения. Однако такого полного комплекса методов на данный момент нет ни в одном из решений, представленных в мире.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Актуальность реализованного плагина достигается тем, что всё большее количество крупных компаний занимается разработкой тренажеров виртуальной реальности для обучения и повышения квалификации персонала. Созданный виртуальный аватар способен снижать умственную нагрузку на определенные виды задач и повысить производительность при их решении [17].

Работа подчеркивает важность использования аватаров как в однопользовательских, так и в многопользовательских системах виртуальной реальности для повышения коэффициента погружения в виртуальную среду за счет визуального представления своего тела.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа поддержана Программой повышения конкурентоспособности КФУ и финансировалась за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному

университету на выполнение госзадания в области научной деятельности 0211/02.11.10122.001.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Abramov V.D., Kugurakova V.V., Rizvanov A.A., Abramskiy M.M., Manakhov N., Evstafiev M.E., Ivanov D.S.* Virtual biotechnological labs development // *Bi-oNanoScience*. 2017. Vol. 7. Iss. 2. P. 363–365.
2. *Kugurakova, V., Khafizov M., Akhmetsharipov R.* Virtual surgery system with realistic visual effects and haptic interaction // *Proc. of The International Conference On Artificial Life And Robotics*. 2017. P. P86–P89.
3. *Shigapov M., Kugurakov, V., Zykov E.* Design of digital gloves with feedback for VR // *Proc. of IEE EWDTs*. 2018.
4. *Won A.S., Bailenson J., Lee J., Lanier J.* Homuncular Flexibility in Virtual Reality // *Journal of Computer-Mediated Communication*. 2015. Vol. 20. No. 3. P. 241–259.
5. *Slater M., Wilbur S.* A framework for immersive virtual environments (five): Speculations on the role of presence in virtual environments // *Presence: Teleoperators and virtual environments*. 1997. Vol. 6. No. 6. P. 603–616.
6. *Martin Usoh M.S., Steed, A.* Taking Steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality // *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 1995. Vol. 2. No. 3. P. 201–219.
7. *Lin Q., Rieser J.J., Bodenheimer B.* Stepping off a ledge in an HMD-based immersive virtual environment // *Proc. of ACM Symposium on Applied Perception*. 2013. P. 107.
8. *Dodds T.J., Mohler B.J. & Bülthoff H.H.* Talk to the virtual hands: Self-animated avatars improve communication in head-mounted display virtual environments // *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6. No. 10.
9. *Kugurakova V., Talanov M., Manakhov N.* Anthropomorphic artificial social agent with simulated emotions and its implementation // *6th Annual Int. Conference on Biologically Inspired Cognitive Architecture*. 2015. Vol.71. P. 112–118.
10. *CyberGlove Systems*. URL: <http://www.cyberglovesystems.com/>
11. *Wheatland N., Wan Y., Song H., Neff M., Zordan V. & Jörg S.* State of the Art in Hand and Finger Modeling and Animation // *Computer Graphics Forum*. 2015. Vol. 34. No. 2. P. 735–760.

12. Microsoft Kinect. URL: <https://www.xbox.com/ru-RU/xbox-one/accessories/kinect>
  13. Proteus VR. URL: <https://www.proteus-vr.com>
  14. IKinema. URL: <https://www.ikinema.com>
  15. Unreal Engine. URL: <http://unrealengine.com>
  16. *Copenhaver J.* VR Animation and Locomotion Systems in Lone Echo. URL: <https://readyatdawn.sharefile.com/share/view/s80d4725de7045259>
  17. *Steed A., Pan Y., Zisch F. & Steptoe W.* The impact of a self-avatar on cognitive load in immersive virtual reality // Proc. of IEEE Virtual Reality. 2016. P. 67.
- 

## **SYNCHRONIZATION OF PLAYER AND VIRTUAL AVATAR MOVEMENTS**

**P. D. Grishkov<sup>1</sup>, V. V. Kugurakova<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>*Higher School of Information Technologies and Intelligent Systems.  
Kazan Federal University*

<sup>1</sup>[grishkovpavel@gmail.com](mailto:grishkovpavel@gmail.com), <sup>2</sup>[vlada.kugurakova@gmail.com](mailto:vlada.kugurakova@gmail.com)

### ***Abstract***

The paper presents mathematical approaches for implementing methods for synchronizing human actions and virtual avatar movements, using inverse kinematics. To create a complete system for synchronizing the player's behavior and VR-avatar, the implementation of the necessary functionality is described: hand positioning, calibration of their size, bending of hands into anatomically acceptable sides, anatomical flexion of the spine, squatting and moving in space. The implementation of tilt and squat significantly extends the functionality of synchronization of the player's behavior and avatar, which allows creating a complete set of visual sensations of the user in a virtual environment, which is deprived of most of the applications of virtual reality at the moment.

***Keywords:*** *Virtual reality, Unreal Engine, inverse kinematic, avatar, crouching recognition*

## REFERENCES

1. Abramov V.D., Kugurakova V.V., Rizvanov A.A., Abramskiy M.M., Manakhov N., Evstafiev M.E., Ivanov D.S. Virtual biotechnological labs development // *Bi-oNanoScience*. 2017. Vol. 7. Iss. 2. P. 363–365.
2. Kugurakova, V., Khafizov M., Akhmetsharipov R. Virtual surgery system with realistic visual effects and haptic interaction // *Proc. of The International Conference on Artificial Life And Robotics*. 2017. P. P86–P89.
3. Shigapov M., Kugurakov, V., Zykov E. Design of digital gloves with feedback for VR // *Proc. of IEE EWDTs*. 2018.
4. Won A.S., Bailenson J., Lee J., Lanier J. Homuncular Flexibility in Virtual Reality // *J. of Computer-Mediated Communication*. 2015. Vol. 20. No. 3. P. 241–259.
5. Slater M., Wilbur S. A framework for immersive virtual environments (five): Speculations on the role of presence in virtual environments // *Presence: Teleoperators and virtual environments*. 1997. Vol. 6. No. 6. P. 603–616.
6. Martin Usoh M.S., Steed, A. Taking Steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality // *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 1995. Vol. 2. No. 3. P. 201–219.
7. Lin Q., Rieser J.J., Bodenheimer B. Stepping off a ledge in an HMD-based immersive virtual environment // *Proc. of ACM Symposium on Applied Perception*. 2013. P. 107.
8. Dodds T.J., Mohler B.J. & Bühlhoff H.H. Talk to the virtual hands: Self-animated avatars improve communication in head-mounted display virtual environments // *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6. No. 10.
9. Kugurakova V., Talanov M., Manakhov N. Anthropomorphic artificial social agent with simulated emotions and its implementation // *6th Annual Int. Conference on Biologically Inspired Cognitive Architecture*. 2015. Vol.71. P. 112–118.
10. CyberGlove Systems. URL: <http://www.cyberglovesystems.com/>
11. Wheatland N., Wan Y., Song H., Neff M., Zordan V. & Jörg S. State of the Art in Hand and Finger Modeling and Animation // *Computer Graphics Forum*. 2015. Vol. 34. No. 2. P. 735–760.
12. Microsoft Kinect. URL: <https://www.xbox.com/ru-RU/xbox-one/accessories/kinect>
13. Proteus VR. URL: <https://www.proteus-vr.com>

14. IKinema. URL: <https://www.ikinema.com>
15. Unreal Engine. URL: <http://unrealengine.com>
16. *Copenhaver J.* VR Animation and Locomotion Systems in Lone Echo. URL: <https://readyatdawn.sharefile.com/share/view/s80d4725de7045259>
17. *Steed A., Pan Y., Zisch F. & Steptoe W.* The impact of a self-avatar on cognitive load in immersive virtual reality // Proc. of IEEE Virtual Reality. 2016. P. 67.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**ГРИШКОВ Павел Дмитриевич** – бакалавр Высшей школы информационных технологий и интеллектуальных систем (ВШ ИТИС) Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ). Сфера интересов: разработка приложений на Unreal Engine.

**GRISHKOV Pavel Dmitrievich** – Bachelor of Higher School ITIS. Sphere of interests: Unreal Engine development.  
email: [grishkovpavel@gmail.com](mailto:grishkovpavel@gmail.com)



**КУГУРАКОВА Влада Владимировна** – старший преподаватель ВШ ИТИС КФУ, руководитель лаборатории «SIM». Сфера интересов: разработка игр, иммерсивность виртуальных сред, интерпретация биосигналов человека, погруженного в виртуальную среду, методы трансформации нарративной идентичности.

**KUGURAKOVA Vlada Vladimirovna** – Senior Lecturer of Higher School of Information Technology and Intelligent Systems, Head of Laboratory «SIM». Sphere of interests: game development, immersivity of virtual environment, narrative identity.

email: [vlada.kugurakova@gmail.com](mailto:vlada.kugurakova@gmail.com)

*Материал поступил в редакцию 1 июля 2018 года.*