

<https://doi.org/10.47529/2223-2524.2023.1.9>

УДК: 677.026.444

Тип статьи: Обзор литературы / Review



Системы захвата движений: медико-техническая оценка современного этапа развития технологии. Обзор литературы

М.Д. Иванова^{1,*}, С.В. Муравьев², Г.З. Клоян¹, В.Н. Никитин¹, И.Д. Шитоев¹

¹ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

² ООО «Йорд Тех», Пермь, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель исследования: провести сравнительный медико-технический анализ существующих систем захвата движений.

Материалы и методы: в качестве научной базы для достижения поставленной цели использовались открытые источники данных (ресурсы eLibrary, Scopus, PubMed и др.). Глубина поиска не ограничена.

Результаты: последовательно представлены сведения о безмаркерных и маркерных системах захвата движения, в том числе инерционных, мобильных, механических, оптоэлектронных, магнитных, и системах, использующих технологию виртуальной реальности. Выполнен сравнительный анализ медико-технических характеристик представленных систем.

Заключение: показано, что системы захвата движения — перспективное направление развития целой группы инструментов для диагностики локомоторной функции, которая может быть успешно интегрирована в клинику спортивной медицины. Системы захвата движения разнятся по своим техническим параметрам, что требует глубокого аналитического подхода в их использовании для решения разных клинических задач.

Ключевые слова: система захвата движения, локомоторная функция, моторная функция, движение, диагностика

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Иванова М.Д., Муравьев С.В., Клоян Г.З., Никитин В.Н., Шитоев И.Д. Системы захвата движений: медико-техническая оценка современного этапа развития технологии. Обзор литературы. *Спортивная медицина: наука и практика*. 2023;13(1):28–40. <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2023.1.9>

Поступила в редакцию: 15.11.2022

Принята к публикации: 19.04.2023

Online first: 15.05.2023

Опубликована: 16.06.2023

* Автор, ответственный за переписку

Motion capture systems: medical and technical assessment of the current stage of technology development. Literature review

Maria D. Ivanova^{1,*}, Sergey V. Muravev², Gayane Z. Kloyan¹, Vladislav N. Nikitin¹, Ivan D. Shitoev¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² YordTech LLC, Perm, Russia

ABSTRACT

Objective: to conduct a comparative medical and technical analysis of existing motion capture systems.

Materials and methods: open data sources (e-library, Scopus, PubMed, etc.) were used as a scientific base to achieve this aim. The search depth is not limited.

Results: information about marker-free and marker motion capture systems, including inertial, mobile, mechanical, optoelectronic, magnetic and systems using virtual reality technology, is consistently presented. A comparative analysis of the medical and technical characteristics of the presented systems was carried out.

Conclusion: it is shown that motion capture systems are a promising direction for the development of a whole group of tools for the diagnosis of locomotor function, which can be successfully integrated into a sports medicine clinic. Motion capture systems vary in their technical parameters, which requires a deep analytical approach in their use to solve different clinical problems.

Keywords: motion capture system, locomotor function, motor function, movement, diagnostics

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Ivanova M.D., Muravev S.V., Kloyan G.Z., Nikitin V.N., Shitoev I.D. Motion capture systems: medical and technical assessment of the current stage of technology development. Literature review. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika (Sports medicine: research and practice)*. 2023;13(1):28–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2023.1.9>

Received: 15 November 2022

Accepted: 19 April 2023

Online first: 15 May 2023

Published: 16 June 2023

*Corresponding author

1. Введение

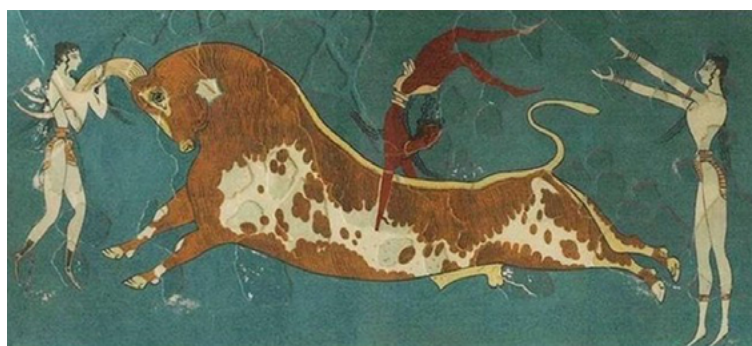
Движение — одно из фундаментальных проявлений живого, поэтому оценка движения — предмет одного из старейших наблюдений человечества, которые издревле носят практический мотив. Так, изображения методически правильных физических упражнений сопровождали пионерский труд «Книга тренинга» митанийца Киккули [1] — самое древнее методическое пособие по конным видам спорта. В то же время в местах распространения более «молодых» цивилизаций широко распространены статические изображения правильного выполнения тех или иных физических упражнений. Ярким образчиком такого свидетельства является фреска «Таврокатапсия» (ταυροκαταψιων, или «Игры с быком»), содержание которой объясняют как изображение ритуального быка и трех жрецов, тогда как в других источниках [2] эта фреска трактуется как «схема» выполнения акробатического прыжка (рис. 1).

По истечении тысячелетий визуальная объективная оценка стала прерогативой спортивной медицины, медицинской реабилитации и лечебной физкультуры в модифицированном виде — в контексте интенсивного развития техники и электроники. На протяжении XX века в качестве предмета оценки при изучении двигательных актов выступали разные модальности физических явлений, происходящих при движении человека: гониометрия (измерение углов конечностей [3]), динамометрия

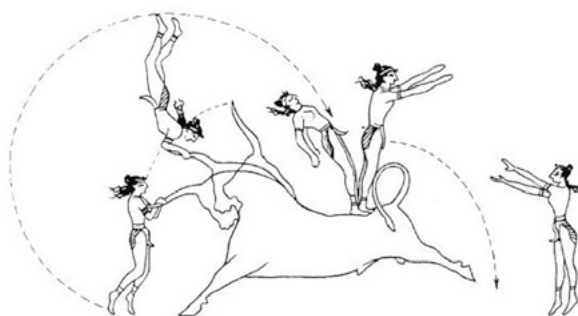
(исследование силы конечностей [4]), электромиография (оценка электрофизиологических процессов мышц [5, 6]), стабилметрия (тензометрический анализ центра давления на плоскость [7]). Все эти методы определяли лишь косвенные данные двигательного акта, а попытки компиляции результатов их применения имели определенную степень попущений [8].

Развитие цифровых технологий — методов оценки видеоряда [9, 10], фотограмметрии [11, 12, 13] и других современных тенденций развития науки и техники — позволило проводить интегративную оценку двигательных актов, а совершенствующаяся нормативно-правовая база обеспечения медицинской деятельности организаций, занятых оказанием помощи населению по профилю «медицинская реабилитация», изобилует цифровыми инструментами для оценки и коррекции двигательных актов, необходимыми для оснащения медицинских организаций соответствующего профиля [14]. Эти факты требуют логичного внимания со стороны медицинской общественности и скрупулезного технического анализа разработок в области оценки двигательных актов с позиции оптимального выбора устройств, методов их применения и принципов их функционирования. Наиболее прогрессивным и современным предметом анализа с этой точки зрения являются системы захвата движения.

Цель: провести сравнительный медико-технический анализ существующих систем захвата движений.



А



Б

Рис. 1. Фреска «Таврокатапсия» (1450–1550 гг. до н.э., Археологический музей Ираклиона, Кносский дворец, Греция; www.heraklionmuseum.gr; свободный доступ). А — оригинал фрески; Б — интерпретация фрески по мнению В. В. Григоревича)
Fig. 1. Fresco “Taurocatapsia” (1450–1550 BC, Heraklion Archaeological Museum, Knossos Palace, Greece; www.heraklionmuseum.gr, free access). А — the original fresco; Б — interpretation of the fresco according to V. V. Grigorevich)

2. Материалы и методы

В качестве научной базы для достижения поставленной цели использовались открытые источники данных (ресурсы elibrary, Scopus, PubMed и др.). Глубина поиска не ограничена.

3. Результаты

Система захвата движения (СЗД) — система, реализующая измерение положения и ориентации объекта в физическом пространстве с последующей записью этой информации в форме, пригодной для использования компьютером [15, 16, 17].

На сегодня СЗД реализуют разные физические явления, лежащие в их принципиальном устройстве и функционировании, что затрудняет их классификацию по этим признакам. Поэтому как таковую классификацию СЗД представить довольно трудно, ввиду этого ниже будут последовательно описаны современные СЗД, которые в той или иной мере допустимо объединить в следующие группы: оптические (маркерные и безмаркерные), инерционные, оптоэлектронные, мобильные СЗД и СЗД в VR (virtual reality — виртуальная реальность).

Маркерные системы оптического захвата движения (mOMC — Marker-Based Motion Capture System) является «золотым стандартом» для анализа движения с таргетной оценкой кинематики суставов человека [18, 19]. Такие системы состоят из высокоскоростных камер, которые отправляют инфракрасные световые сигналы для захвата отражения от маркеров, расположенных на теле человека. Эти маркеры могут представлять собой пассивные светоотражающие элементы или компактные устройства, оборудованные инфракрасными диодными лампочками [20, 21]. Сама камера регистрирует свет, использует данные о его пространственном расположении для анализа положения маркера в трехмерном пространстве [22]. Полученные ранее сведения в целом демонстрируют хорошую воспроизводимость оценки пространственного расположения другими СЗД, однако обладают рядом значимых отклонений при проведении исследований [23]. Эти отклонения можно условно разделить на две группы. Первая определяется пространственными взаимоотношениями камеры и маркеров, в том числе углов отражения при использовании пассивных маркеров и расстоянием от камеры до маркера [22]. Вторая группа ограничений связана в большей степени с техническими характеристиками камер, в том числе их качеством, количеством, диапазоном, относительным расположением камер [22]. Логично, что при повышении значимости этих ограничений качество функционирования СЗД будет драматично падать. В дополнение к перечисленным следует отметить ограничения функционирования ОМС, связанные с внешними условиями. Такие системы требуют постоянного присутствия объекта захвата на линии прямой видимости, в противном случае mOMC «теряет» объект и не может его

идентифицировать как тот же самый при его очередном появлении перед объективом [22]. Кроме этого, значимой трудностью при функционировании mOMC являются условия инсоляции, превышающие по яркости свет маркера [22]. Как бы то ни было, при преодолении всех ограничений mOMC демонстрируют высокую точность [20, 24] и гибкость в измерениях разнообразных локомоторных актов [20], однако их зависимость от лабораторного оборудования ограничивает возможность применения ОМС в повседневной жизни или в широкой клинической практике [21, 24].

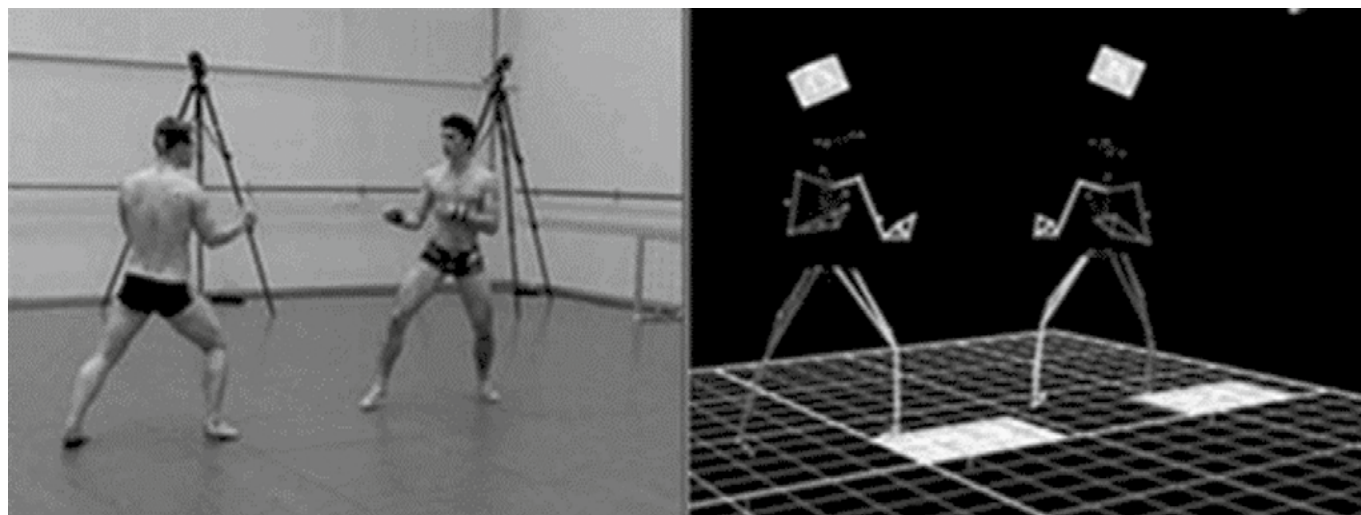
Заслуживающим внимания с точки зрения опыта применения mOMC являются продукты компании Vicon (Vicon Motion Systems Ltd UK® (Соединенное королевство, графство Оксфордшир, г. Оксфорд, д. Ярнтон). Примечательной особенностью этой ОМС является точность отслеживания маркеров [25, 26] до 1 мм [25, 27] (рис. 2). Этой же компании принадлежит mOMC-рекордсмен по диапазону съемки — система Vicon MX13, способная осуществлять захват движения на 1/10 максимальной площади футбольного поля (824 м² [28]). Благодаря высоким техническим характеристикам ОМС производства Vikon признаны «золотым стандартом» СЗД [22, 29].

Система Vicon широко используется для прогнозирования и анализа движения в спорте [26, 30, 31] и медицинской реабилитации пациентов с двигательными нарушениями. Так, были получены данные об особенностях двигательных стереотипов верхних [18, 31] и нижних конечностей [15, 29], поясничного отдела позвоночника при выполнении простых функциональных движений [25], изучены двигательные паттерны, возникающие при стенозе спинномозгового канала поясничного отдела позвоночника [32].

Безмаркерные системы оптического захвата движения. Типичным представителем СЗД этой группы является программно-аппаратный комплекс Kinect (Xbox, Microsoft Corporation®, США, штат Вашингтон, г. Редмонд). Kinect — безмаркерная система захвата движения, которая может интерпретировать и отслеживать трехмерные движения тела в режиме, близком к реальному времени (рис. 3) [16].

Основное преимущество Kinect — низкая цена, именно поэтому эта СЗД изначально использовалась в индустрии развлечений — в качестве устройства ввода в компьютерных играх [27]. По причине простоты эксплуатации СЗД Kinect нашла свое применение в обеспечении реабилитационных мероприятий [33, 34], в том числе с использованием телемедицинских технологий [35].

Принцип работы СЗД Kinect основан на функционировании специализированного источника света. Kinect — устройство с поддержкой технологии СЗД, позволяет записывать сложные движения человеческого тела. Камера захватывает объекты с нормальной скоростью в 30 кадров/сек. В устройстве Kinect одна из линз



А

Б

Рис. 2. А — нативное фото моделей, на заднем плане — камеры регистрации. Б — пример трехмерных динамических изображений моделей, порождаемых Vicon Nexus, 1.3 [30]

Fig. 2. А — native photo of models, in the background — registration cameras. Б — an example of three-dimensional dynamic images of models generated by Vicon Nexus, 1.3 [30]



А

Б

Рис. 3. А — нативное фото моделей, Б — пример трехмерных динамических изображений моделей, порождаемых Kinect Xbox 360 (<http://x-tech.am/kinect/> — свободный доступ на 01.11.2022 г.)

Fig. 3. А — native photo of models, Б — an example of three-dimensional dynamic images of models generated by Kinect Xbox 360 (<http://x-tech.am/kinect/> — free access as of 11/01/2022)

имеет инфракрасный излучатель, который наполняет исследуемое пространство этим светом. Полученная информация обрабатывается и выводится на экран ПК.

Технологически ценным свойством Kinect является отсутствие необходимости калибровки камеры, когда объект захвата появляется в поле зрения камеры — трехмерная фигура объекта автоматически вычисляется соответствующим программным обеспечением [15].

Важным преимуществом Kinect является точность измерения временных и общих пространственных

характеристик клинически значимых движений крупных объектов, например конечностей. В то же время существенным недостатком служит то, что Kinect оказывается недостаточно эффективным для оценки низкоамплитудных движений, например при исследовании тремора, движений кистей рук, пальцев конечностей [36, 37, 38, 39].

Резюмируя данные об СЗД — маркерных и безмаркерных семейств — целесообразно провести сравнительную характеристику таковых, дополнив ее фактами,

Таблица 1

Сравнительная характеристика маркерных и безмаркерных СЗД

Table 1

Comparative characteristics of marker and marker-free MSC

№ п/п	Признак	mOMC		Безмаркерные системы		Источник
		Характеристика	Баллы	Характеристика	Баллы	
1	Достоверность	Высокая	1	Низкая?	0	40
2	Продолжительность настройки и обработки	Высокая	-1	Низкая	1	
3	Пропускная способность	Низкая	-1	Высокая	1	
4	Возможность эксплуатации на нескольких объектах съемки	Да	1	Нет	-1	30
5	Портативность и мобильность	Нет	-1	Да	1	41
6	Вероятность ошибок при размещении маркеров	Есть	-1	Не применимо	0	23, 42, 43
7	Стоимость эксплуатации	Высокая	-1	Низкая	1	42, 44
8	Скорость обработки	Нет данных	0	Низкое	-1	23, 41, 43
		ИТОГО:	-3	ИТОГО:	2	

которые не были указаны выше ввиду их менее приоритетной значимости. Все описанные характеристики были ранжированы в балльной системе, где -1 балл указывал на негативную сравнительную характеристику, 1 балл — на позитивную, а 0 баллов свидетельствовал об отсутствии данных или неприменимости того или иного сравнительного признака.

Безусловно, такое сравнение не может быть полностью объективным по причине разного веса того или иного признака в описании СЗД. Такая сравнительная характеристика лишь указывает на то, что каждая СЗД должна применяться только после внимательной оценки нужды его использования относительно области использования или предмета оценки.

Инерционные системы захвата движения (IMC — inertial motion capture). Принципиально IMC состоит из одного или нескольких инерционных измерительных блоков для сбора данных от интегрированных акселерометров, гироскопов и магнитометров (см. рис. 4) [21, 45].

Системы IMC по результатам функционирования воссоздают трехмерную анимацию в реальном времени, которая обеспечивает всестороннюю объективную оценку пространственных характеристик тела с учетом его гравитационных характеристик. IMC обеспечивает получение сравнительно высоких результатов измерений с позиции достоверности, что позволяет использовать IMC в качестве подходящей альтернативы для оценки 3D-сегмента кинематики тела [46, 47].

Важным преимуществом IMC по сравнению с другими СЗД является то, что IMC не имеет базовой станции и поэтому является наиболее мобильной из всех измерительных систем [22]. К тому же система способна обнаруживать очень быстрое движение, что делает ее привлекательной для использования в объективной оценке спортивной деятельности и в спортивной медицине в целом [22]. Еще один плюс IMC связан с тем, что она может применяться практически в любой среде и совершенно не зависит от внешней инфраструктуры [24]. Среди недостатков IMC следует отметить единственный важный с позиции технологии: датчики IMC



Рис. 4. Принцип работы и вариант интерфейса IMC. IMC прикреплен к предплечью при помощи самоклеящейся ленты на 10 см дистальнее латерального надмыщелка. Регистрировались четыре активных движения: отведение; сгибание; а также внутренняя ротация и наружная ротация при отведении плеча [45]

Fig. 4. Principle of operation and IMC interface option. The IMC is attached to the forearm with self-adhesive tape 10 cm distal to the lateral epicondyle. Four active movements were recorded: abduction; bending; as well as internal rotation and external rotation during shoulder abduction [45]

чувствительны к линейному ускорению, что несколько ограничивает их в исследовании двигательных актов, связанных с перемещением объекта в пространстве по прямой линии [24].

Оптоэлектронные СЗД — компилятивное семейство СЗД, которое эксплуатирует другие описанные выше технологии захвата движения. Наиболее яркий представитель этой группы — MoCap (МОСАР, г. Лидингтон, штат Миссури, США).

Принципиально система совмещает в себе технологии маркерных оптических и инерциальных СЗД, обеспечивая сочтанный анализ данных по двум модальным сигналам соответственно (см. рис. 5) [48].

СЗД оптоэлектронного типа сыскали свою широкую популярность во многих сферах деятельности: 3D-анимации, спорте и спортивной медицине, в области велнес-технологий [41], медицинской реабилитации [49]. Специалисты, занятые в области клинической медицины, чаще всего симпатизируют в пользу оптоэлектронных СЗД по причине их доступности: такие системы требуют меньшего времени монтажа и количества оборудования [50]. Именно поэтому благодаря этим преимуществам были осуществлены масштабные исследования в области оценки ходьбы, оценке движений позвоночника [48, 50]. В области спортивной медицины заслуживает внимания исследование движений 560 приемов спарринг-партнеров карате, позволившее подробно исследовать степень их мастерства и ошибки выполнения приемов [51].

В то же время следует отметить целый ряд недостатков оптоэлектронных СЗД, которые в большей степени относятся к роду технологических дефектов.

- Ошибка со стороны регистрирующего датчика (например, дрейф гироскопа или возмущения магнитного поля) [41].

- Подвижное соединение датчика с телом испытуемого, в том числе миграция датчика по причине растяжения кожи или движений мышц в проекции размещения датчика [41].

Безусловно, эти проблемы интенсивно решаются и будут нивелированы в ближайшее время за счет улучшения обработки сигналов и модернизации оборудования [52].

Мобильные CPL — реализуются на базе мобильных, а именно персональных телекоммуникационных устройствах (смартфонах) без использования стороннего оборудования. Наиболее ярким представителем этой группы СЗД является MO₂CA [53]. Эта система реализует принципы функционирования Kinect и Dartfish (Kinect — Microsoft, Redmond, WA); Dartfish — USA, Inc, Alpharetta, GA, USA) [43]. Технология Dartfish позволяет организациям захватывать видео, обогащать видеоконтент графикой, текстом, закадровым голосом, выбором кадра, данными и отображать контент для онлайн-аудитории. Продукты включают: интерактивную платформу

видео по запросу WEB 2.0; программное обеспечение для спортивных тренировок; приложения на базе IOS и Android. Производители технологии Dartfish являются победителями конкурса Министерства культуры и спорта Кореи в 2006 г. за выявление инновационных бизнес-услуг в сфере спорта с индивидуальным онлайн-рецептом физиотерапии [54].

Система MO₂CA функционирует на базе смартфона iPhone (не ниже седьмого поколения, Apple Inc., г. Купертино, Калифорния, США). В качестве примера описания функционирования MO₂CA кажется необходимым описать типичный процесс регистрации при помощи этой системы, который наиболее подробно описан для оценки процесса ходьбы. При помощи смартфона, размещенного на штативе на расстоянии 2 метра от беговой дорожки так, чтобы в объектив камеры попадала нижняя конечность испытуемого, осуществляется регистрация биомеханических изменений походки, длина шага и время шага с частотой 60 Гц. Данная система используется для прогнозирования, диагностики и лечения многих заболеваний опорно-двигательного аппарата и неврологических расстройств [53] (см. рис. 6).

По результатам применения MO₂CA продемонстрировала значимый потенциал в оценке двигательных функций, который, однако, имел ряд ограничений по точности регистрации:

- при высокой скорости движений, в том числе при пароксизмальных нестереотипных движениях;
- при использовании испытуемым «неподходящей» одежды (так как для более точной регистрации



Рис. 5. Принцип функционирования MoCap [41]
Fig. 5. Functioning principle of MoCap [41]



Рис. 6. Принцип функционирования MO₂CA [53]
Fig. 6. Functioning principle of MO₂CA [53]



Рис. 7. Механические СЗД [https://inlnk.ru/voDK9n, свободный доступ на 01.11.2022 г.]
Fig. 7. Mechanical MCS [https://inlnk.ru/voDK9n, free access as of 11/01/2022]

испытуемому необходимо надеть монохромную одежду для акцентирования цвета скотча и белые носки).

Все эти ограничения требуют проведения более предметных испытаний для интеграции MO₂CA в клиническую практику [53].

СЗД в VR. Технологии виртуальной реальности в последние годы заслуженно обрели свое место в области клинической медицины в широком диапазоне прикладного применения — от телемедицины [55, 56] и обучения кадров до медицинской реабилитации [14].

В прикладном аспекте СЗД VR — лишь среда и интерфейс для функционирования СЗД, поэтому VR выступает универсальным инструментом для повышения заинтересованности и вовлеченности испытуемых в процесс захвата движения. Именно поэтому исследования виртуальных игр вкупе с СЗД для пациентов в процессе медицинской реабилитации показывают результаты как минимум не хуже, чем традиционные методы реабилитации для улучшения функций верхних конечностей и восстановления способности вести повседневную активность [57, 58]. А в ряде случаев — при восстановлении функции равновесия, реабилитации пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями и черепно-мозговыми травмами — СЗД в VR оказывались более эффективными [58].

Механические СЗД. Функционирование механической системы захвата осуществляется при помощи датчиков экзоскелета, которые регистрируют движения конечностей в суставах (см. рис. 7). При этом при инициации движения на компьютер средствами беспроводной связи передаются данные о углах (объеме) движения всех суставов. Механический захват является точным в том случае, если модель скелета испытуемого совпадает с цифровой его моделью. Однако при этом набор возможных движений весьма ограничен ввиду жесткости конструкции, что влечет за собой скованность движений пользователя. Поэтому основной областью применения механической CPL являются медицинские исследования [59], поскольку достоинствами механических СЗД являются практически неограниченная зона действия, отсутствие маркеров и точность измерительных устройств [60].

Магнитные системы захвата движения. Такие СЗД работают на основе регистрации данных датчиков и генерируемого ими магнитного поля. Измерения производятся датчиками по трем координатным осям в направлении магнитного поля, создаваемого генератором магнитного поля. При этом магнитометрические датчики крепятся на теле человека, а данные измерений передаются на компьютер с помощью передатчика. Оценка вектора направлений магнитного поля используется для измерения трехмерного положения и ориентации частей тела пользователя. Полученные результирующие данные направляются на аппаратную часть и используются для анимации модели скелета человека. Неоспоримым достоинством магнитных CPL являются поддержка шести степеней свободы (ориентация и перемещение) и высокая точность в условии откалиброванной рабочей зоны. Данные системы имеют ряд недостатков, связанных с вероятностью интерференции магнитного поля, которая может быть вызвана

посторонними приборами и крупными металлоконструкциями, приводящими к помехам. Еще одним недостатком магнитных СЗД является их высокая сравнительная стоимость — для полного захвата движения всего требуется несколько передающих блоков с подключенными к ним измерительными устройствами [60].

В завершение обзора современных СЗД, которые уже используются или обладают потенциалом использования в изучении локомоторной функции человека в норме и патологии, целесообразным видится провести сравнительную оценку описанных систем. В табл. 2 представлена сравнительная характеристика современных СЗД.

Таким образом, современную динамическую классификацию СЗД можно представить в интегральной логической схеме (рис. 8).

4. Выводы

Современные системы захвата движения — одно из наиболее динамически развивающихся и интегративных направлений диагностики локомоторной функции. Разработанные системы захвата движений реализуют разные по модальности физические явления, лежащие в основе идентификации подвижных частей тела или всего тела человека. Концептуальным принципом сегрегации систем захвата на отдельные группы является использование физических маркеров — меток, способствующих непосредственной регистрации тела в пространстве. В то же время системы захвата движений отличаются точностью в силу разных технологических и эксплуатационных характеристик, что не позволяет выделить явного лидера в перспективе использования того или иного типа системы захвата движений в клинической

Таблица 2

Сравнительная характеристика современных СЗД

Table 2

Comparative characteristics of modern MSC

Система	2D/3D	Камеры	Реальное время	В помещении	Размер	Маркер	Датчик	Частота дискретизации — частота регистрации данных
Маркерные: Vicon MX 13	3D	> 24	нет	да	3–25 мм	х	-	2000 Гц
Безмаркерные: Kinect	3D	1	да	да	-	-	х	30 Гц
Безмаркерные: Xsens MVN Link	3D	-	да	да	-	-	х	-
Маркерные: ViconMX40	3D	4	да	да	14 мм	х	-	120 Гц
Безмаркерные: MO ₂ CA	2D/3D	8	да	да (+ в полевых условиях)	138,3 × 67,1 × 7,1 мм	-	х	60 Гц
Безмаркерные: Xbox kinect	3D	-	да	да	24,9 × 6,6 × 6,7cm	-	х	30 Гц
Магнитные	2D/3D	-	-	да	-	-	х	до 120 Гц
Механические	2D/3D	-	да	да	-	-	х	-

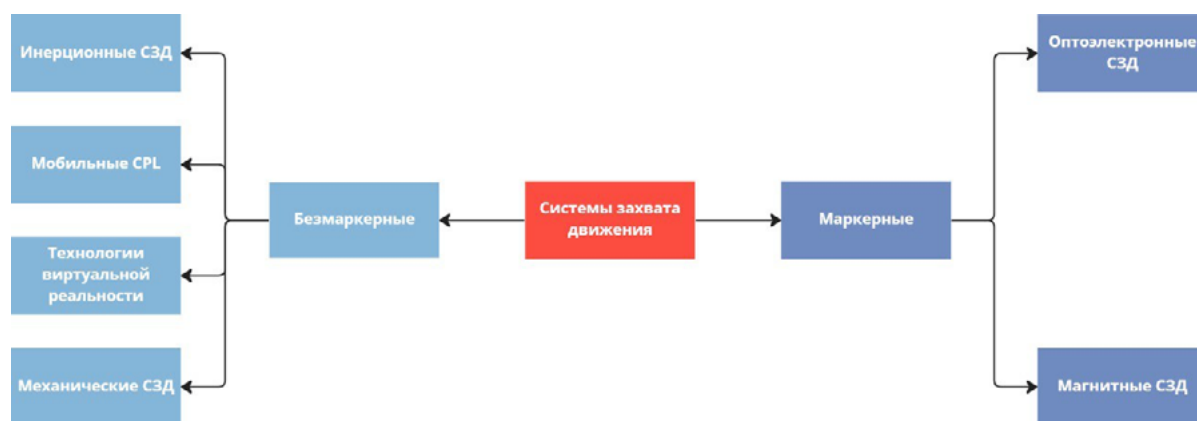


Рис. 8. Системы захвата движения
Fig. 8. Motion capture system

практике. Такая неопределенность прежде всего связана с разнородностью клинических задач, которые ставятся перед системами захвата движений. На сегодня можно смело говорить о том, что интеграция системы захвата движения в клинику спортивной медицины неотвратима, особенно в целях совершенствования тренировочного

Вклад авторов:

Иванова Мария Дмитриевна — сбор и обработка информации, написание текста статьи.

Муравьев Сергей Владимирович — редактирование, утверждение финальной версии статьи.

Клоян Гаянэ Зурабиевна — сбор и обработка информации, написание текста статьи.

Никитин Владислав Николаевич — редактирование, утверждение финальной версии статьи.

Шитоев Иван Дмитриевич — сбор и обработка информации, написание текста статьи.

Список литературы

1. **Григоревич В.В.** Всеобщая история физической культуры и спорта. Москва: Советский спорт; 2008.
2. **Григоревич В.В.** Всеобщая история физической культуры и спорта. Гродно: ГрГУ; 2005.
3. **Потехина Ю.П., Даутов Д.Р., Горячева Д.А., Павлов Д.В., Курникова А.А.** Гониометрическая оценка состояния опорно-двигательного аппарата студентов. Журнал анатомии и гистопатологии. 2018;7(3):46–50. <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2018-7-3-46-50>
4. **Тряпичников А.С., Щурова Е.Н., Чегуров О.К., Долганова Т.И.** Оценка дисфункции мышц нижних конечностей на предоперационном этапе у больных коксартрозом с деформацией бедренной кости. Фундаментальные исследования. 2015;(1):1042–1045.
5. **Finni T., Hu M., Kettunen P., Vilavuo T., Cheng S.** Measurement of EMG activity with textile electrodes embedded into clothing. Physiol. Meas. 2007;28(11):1405–1419. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/11/007>
6. **Marcolin G., Panizzolo F. A., Petrone N., Moro T., Grigoletto D., Piccolo D., Paoli A.** Differences in electromyographic activity of biceps brachii and brachioradialis while performing three variants of curl. PeerJ. 2018;6:e5165. <https://doi.org/10.7717/peerj.5165>
7. **Hlavacka F., Kunderát J., Krizková M., Bacová E.** Physiologic range of stabilometry values obtained in the upright posture using a computer. Cesk. Neurol. Neurochir. 1990;53(2):107–113.
8. **Самман А., Шахнов В.А.** Мобильная платформа виртуальной реальности для восстановления функций верхних конечностей с использованием данных электромиографии. Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2021;3(136):84–99. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-84-99>
9. **Махровская Н.А., Безрукавая В.Г., Погромская А.С.** Анализ алгоритмов распознавания образов для оптимизации решения задачи поиска объекта в видеоряде. Молодий вчений. 2016;5(32):238–241.
10. **Лянгузов А.А., Коробейников А.В.** Метод оценки качества работы алгоритмов сжатия видео при передаче по

процесса в спорте. Однако такой подход ограничен техническим несовершенством систем захвата движения, которые должны быть модернизированы в пользу повышения их точности, нивелирования потребности в носимых физических устройствах и повышения скорости обработки входящих данных.

Authors' contributions:

Maria D. Ivanova — collection and processing of material, article text writing.

Sergey V. Muravev — editing, article final version approval.

Gayane Z. Kloyan — collection and processing of material, article text writing.

Vladislav N. Nikitin — editing, article final version approval.

Ivan D. Shitoev — collection and processing of material, article text writing.

References

1. **Grigorevich V.V.** General history of physical culture and sports. Moscow: Sovetskii sport Publ.; 2008 (In Russ.).
2. **Grigorevich V.V.** General history of physical culture and sports. Grodno: State University of Grodno; 2005 (In Russ.).
3. **Potekhina Yu.P., Dautov D.R., Goryacheva D.A., Pavlov D.V., Kournikova A.A.** Goniometric evaluation of students' musculoskeletal system condition. Journal of Anatomy and Histopathology. 2018;7(3):46–50 (In Russ.). <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2018-7-3-46-50>
4. **Tryapichnikov A.S., Shchurova E.N., Chegurov O.K., Dolganova T.I.** The assessment of muscle dysfunction in patients with hip osteoarthritis combined with femoral deformity prior total hip arthropl. Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research. 2015;(1):1042–1045 (In Russ.).
5. **Finni T., Hu M., Kettunen P., Vilavuo T., Cheng S.** Measurement of EMG activity with textile electrodes embedded into clothing. Physiological measurement. 2007;28(11):1405–1419. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/11/007>
6. **Marcolin G., Panizzolo F. A., Petrone N., Moro T., Grigoletto D., Piccolo D., Paoli A.** Differences in electromyographic activity of biceps brachii and brachioradialis while performing three variants of curl. PeerJ. 2018;6:e5165. <https://doi.org/10.7717/peerj.5165>
7. **Hlavacka F., Kunderát J., Krizková M., Bacová E.** Physiologic range of stabilometry values obtained in the upright posture using a computer. Cesk. Neurol. Neurochir. 1990;53(2):107–113.
8. **Samman A., Shakhnov V.A.** Virtual Reality Mobile Platform for Restoring Upper Limbs Functions using Electromyography Data. Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Priborostroyeniye» = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2021;3(136):84–99 (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-84-99>
9. **Makhrovskaya N. A., Bezrukavaya V. G., Pogromskaya A. S.** Analysis of pattern recognition algorithms for optimizing the problem of finding an object in a video sequence. Molodii vchenii. 2016;5(32):238–241 (In Russ.).
10. **Lyanguzov A. A., Korobeinikov A. V.** Video Compression Performance Evaluation Method in Transmission via a Low-Speed

низкоскоростному радиоканалу в условиях воздействия помех. Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022;25(3):74–81.

11. **Struck R., Cordonì S., Aliotta S., Pérez-Pachón L., Gröning F.** Application of Photogrammetry in Biomedical Science. *Adv. Exp. Med. Biol.* 2019;1120:121–130. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06070-1_10

12. **Ey-Chmielewska H., Chruściel-Nogalska M., Frączak B.** Photogrammetry and its potential application in medical science on the basis of selected literature. *Adv. Clin. Exp. Med.* 2015;24(4):737–741. <https://doi.org/10.17219/acem/58951>

13. **Шитоев И.Д., Муравьев С.В., Каракулова Ю.В., Печерский В.И., Никитин В.Н., Клоян Г.З.** Эволюция оптической диагностики деформаций позвоночника. методы и перспективы развития (обзор литературы). *Гений ортопедии.* 2022;28(5):734–744. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2022-28-5-734-744>

14. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 31 июля 2020 г. N 788н «Об утверждении Порядка организации медицинской реабилитации взрослых» [интернет]. Режим доступа: <https://rg.ru/documents/2020/09/28/minzdrav-prikaz788-site-dok.html> (дата доступа 01.11.2022).

15. **Tanaka R., Ishii Y., Yamasaki T., Kawanishi H.** Measurement of the total body center of gravity during sit-to-stand motion using a markerless motion capture system. *Med. Eng. Phys.* 2019;66:91–95. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.12.020>

16. **Tanaka R., Kubota T., Yamasaki T., Higashi A.** Validity of the total body centre of gravity during gait using a markerless motion capture system. *J. Med. Eng. Technol.* 2018;42(3):175–181. <https://doi.org/10.1080/03091902.2018.1449909>

17. **Zhang H., Wang L., Chu S., Chen S., Meng H., Liu G.** Application of Optical Motion Capture Technology in Power Safety Entitative Simulation Training System. *Optics and Photonics Journal.* 2016;6(8B):155–163. <https://doi.org/10.4236/opj.2016.68B026>

18. **Wirth M.A., Fischer G., Verdú J.** Comparison of a New Inertial Sensor Based System with an Optoelectronic Motion Capture System for Motion Analysis of Healthy Human Wrist Joints. *Sensors.* 2019;19(23):5297. <https://doi.org/10.3390/s19235297>

19. **Aurand A.M., Dufour J.S., Marra W.S.** Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume. *J. Biomech.* 2017;58:237–240. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.05.006>

20. **Murphy M.A., Murphy S., Persson H.C.** Kinematic Analysis Using 3D Motion Capture of Drinking Task in People with and without Upper-extremity Impairments. *J. Vis. Exp.* 2018;(133):57228. <https://doi.org/10.3791/57228>

21. **Fleron M.K., Ubbesen N.C., Battistella F., Dejtjar D.J., Oliveira A.S.** Accuracy between optical and inertial motion capture systems for assessing trunk speed during preferred gait and transition periods. *Sports. Biomech.* 2018;18(4):366–377. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1409259>

22. **Tanaka R., Kubota T., Yamasaki T.** Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *Eur. J. Sport Science.* 2018;18(6):806–819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>

23. **Harsted S., Holsgaard-Larsen A., Hestbæk L., Boyle E., Lauridsen H.H.** Concurrent validity of lower extremity kinematics and jump characteristics captured in pre-school children by a markerless 3D motion capture system. *Chiropr. Man. Therap.* 2019;27:39. <https://doi.org/10.1186/s12998-019-0261-z>

24. **Karatsidis A., Jung M., Marsh J. A., Schepers H. M., et al.** Musculoskeletal model-based inverse dynamic analysis under ambulatory conditions using inertial motion capture. *Med. Eng. Phys.* 2019;65:68–77. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.12.021>

Channel. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova.* 2022;25(3):74–81 (In Russ.).

11. **Struck R., Cordonì S., Aliotta S., Pérez-Pachón L., Gröning F.** Application of Photogrammetry in Biomedical Science. *Adv. Exp. Med. Biol.* 2019;1120:121–130. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06070-1_10

12. **Ey-Chmielewska H., Chruściel-Nogalska M., Frączak B.** Photogrammetry and its potential application in medical science on the basis of selected literature. *Adv. Clin. Exp. Med.* 2015;24(4):737–741. <https://doi.org/10.17219/acem/58951>

13. **Shitoev I.D., Muravev S.V., Karakulova Yu.V., Pecherskiy V.I., Nikitin V.N., Kloyan G.Z.** Evolution of optical diagnosis of spinal deformity. Methods and future development (literature review). *Genij Ortopedii.* 2022;28(5):734–744 (In Russ.). <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2022-28-5-734-744>

14. Order of the Ministry of Health of the Russian Federation of July 31, 2020 N 788n “On Approval of the Procedure for Organization of Medical Rehabilitation of Adults” [internet]. Access mode: <https://rg.ru/documents/2020/09/28/minzdrav-prikaz788-site-dok.html> (accessed 11 January 2022) (In Russ.).

15. **Tanaka R., Ishii Y., Yamasaki T., Kawanishi H.** Measurement of the total body center of gravity during sit-to-stand motion using a markerless motion capture system. *Med. Eng. Phys.* 2019;66:91–95. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.12.020>

16. **Tanaka R., Kubota T., Yamasaki T., Higashi A.** Validity of the total body centre of gravity during gait using a markerless motion capture system. *J. Med. Eng. Technol.* 2018;42(3):175–181. <https://doi.org/10.1080/03091902.2018.1449909>

17. **Zhang H., Wang L., Chu S., Chen S., Meng H., Liu G.** Application of Optical Motion Capture Technology in Power Safety Entitative Simulation Training System. *Optics and Photonics Journal.* 2016;6(8B):155–163. <https://doi.org/10.4236/opj.2016.68B026>

18. **Wirth M.A., Fischer G., Verdú J.** Comparison of a New Inertial Sensor Based System with an Optoelectronic Motion Capture System for Motion Analysis of Healthy Human Wrist Joints. *Sensors.* 2019;19(23):5297. <https://doi.org/10.3390/s19235297>

19. **Aurand A.M., Dufour J.S., Marra W.S.** Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume. *J. Biomech.* 2017;58:237–240. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.05.006>

20. **Murphy M.A., Murphy S., Persson H.C.** Kinematic Analysis Using 3D Motion Capture of Drinking Task in People with and without Upper-extremity Impairments. *J. Vis. Exp.* 2018;(133):57228. <https://doi.org/10.3791/57228>

21. **Fleron M.K., Ubbesen N.C., Battistella F., Dejtjar D.J., Oliveira A.S.** Accuracy between optical and inertial motion capture systems for assessing trunk speed during preferred gait and transition periods. *Sports. Biomech.* 2018;18(4):366–377. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1409259>

22. **Tanaka R., Kubota T., Yamasaki T.** Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *Eur. J. Sport Science.* 2018;18(6):806–819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>

23. **Harsted S., Holsgaard-Larsen A., Hestbæk L., Boyle E., Lauridsen H.H.** Concurrent validity of lower extremity kinematics and jump characteristics captured in pre-school children by a markerless 3D motion capture system. *Chiropr. Man. Therap.* 2019;27:39. <https://doi.org/10.1186/s12998-019-0261-z>

24. **Karatsidis A., Jung M., Marsh J. A., Schepers H. M., et al.** Musculoskeletal model-based inverse dynamic analysis under ambulatory conditions using inertial motion capture. *Med. Eng. Phys.* 2019;65:68–77. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.12.021>

25. Mjosund H.L., Boyle E., Kjaer P., Mieritz R. M., Skallgård T., Kent P. Clinically acceptable agreement between the Vi-Move wireless motion sensor system and the Vicon motion capture system when measuring lumbar region inclination motion in the sagittal and coronal planes. *BMC Musculoskelet. Disord.* 2017;18(1):124. <https://doi.org/10.1186/s12891-017-1489-1>
26. Johnson W.R., Mian A., Donnelly C.J., Lloyd D., Alderson J. Predicting athlete ground reaction forces and moments from motion capture. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2018;56(10):1781–1792. <https://doi.org/10.1007/s11517-018-1802-7>
27. Muller B., Ilg W., Giese M.A., Ludolph N. Validation of enhanced kinect sensor-based motion capturing for gait assessment. *PloS One.* 2017;12(4):e0175813. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175813>
28. Spörri J., Schiefermüller C., Müller E. Collecting kinematic data on a Ski track with optoelectronic stereophotogrammetry: A methodological study assessing the feasibility of bringing the biomechanics Lab to the field. *PloS One.* 2016;11(8):e0161757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161757>
29. Hu S., Dai M., Dong T., Liu T. A Textile Sensor for Long Durations of Human Motion Capture. *Sensors.* 2019;9(10):2369. <https://doi.org/10.3390/s19102369>
30. Petri K., Lichtenstein M., Bandow N., Campe S., Wechselberger M., Sprenger D., et al. Analysis of anticipation by 3D motion capturing — a new method presented in karate kumite. *J. Sports Sci.* 2016;35(2):130–135. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1158851>
31. Ozkaya G., Jung H. R., Jeong I.S., Choi M.R., Shin M.Y., Lin X., et al. Three-dimensional motion capture data during repetitive overarm throwing practice. *Sci. Data.* 2018;5:180272. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.272>
32. Igawa T., Katsuhira J., Hosaka A., Uchikoshi K., Ishihara S., Matsudaira K. Kinetic and kinematic variables affecting trunk flexion during level walking in patients with lumbar spinal stenosis. *PloS One.* 2018;13(5):e0197228. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197228>
33. Bonnechère B., Jansen B., Haack I., Omelina L., Feipel V., Van Sint Jan S., Pandolfo M. Automated functional upper limb evaluation of patients with Friedreich ataxia using serious games rehabilitation exercises. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2018;15(1):87. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0430-7>
34. Chuang C.-H., Chen Y.-N., Tsai L.-W., Lee C.-C., Tsai H.-C. Improving Learning Performance with Happiness by Interactive Scenarios. *The ScientificWorldJournal.* 2014;2014:807347. <https://doi.org/10.1155/2014/807347>
35. Çubukçu B., Yüzgeç U., Zileli R., Zileli A. Reliability and validity analyze of Kinect V2 based measurement system for shoulder motions. *Med. Eng. Phys.* 2019;76:20–36. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.10.017>
36. Galna B., Barry G., Jackson D., Mhiripiri D., Oliver P., Rochester L. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. *Gait Posture.* 2014;39(4):1062–1068. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.01.008>
37. Dewey D.C., Miocinovic S., Bernstein I., Khemani P., Dewey R.B. 3rd, Querry R., et al. Automated gait and balance parameters diagnose and correlate with severity in Parkinson Disease. *J. Neurol. Sci.* 2014;345(1-2):131–138. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2014.07.026>
38. Takayasu K., Yoshida K., Mishima T., Watanabe M., Matsuda T., Kinoshita H. Analysis of the posture pattern during robotic simulator tasks using an optical motion capture system. *Surg.* 2017;18(1):124. <https://doi.org/10.1186/s12891-017-1489-1>
25. Mjosund H.L., Boyle E., Kjaer P., Mieritz R. M., Skallgård T., Kent P. Clinically acceptable agreement between the Vi-Move wireless motion sensor system and the Vicon motion capture system when measuring lumbar region inclination motion in the sagittal and coronal planes. *BMC Musculoskelet. Disord.* 2017;18(1):124. <https://doi.org/10.1186/s12891-017-1489-1>
26. Johnson W.R., Mian A., Donnelly C.J., Lloyd D., Alderson J. Predicting athlete ground reaction forces and moments from motion capture. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2018;56(10):1781–1792. <https://doi.org/10.1007/s11517-018-1802-7>
27. Muller B., Ilg W., Giese M.A., Ludolph N. Validation of enhanced kinect sensor-based motion capturing for gait assessment. *PloS One.* 2017;12(4):e0175813. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175813>
28. Spörri J., Schiefermüller C., Müller E. Collecting kinematic data on a Ski track with optoelectronic stereophotogrammetry: A methodological study assessing the feasibility of bringing the biomechanics Lab to the field. *PloS One.* 2016;11(8):e0161757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161757>
29. Hu S., Dai M., Dong T., Liu T. A Textile Sensor for Long Durations of Human Motion Capture. *Sensors.* 2019;9(10):2369. <https://doi.org/10.3390/s19102369>
30. Petri K., Lichtenstein M., Bandow N., Campe S., Wechselberger M., Sprenger D., et al. Analysis of anticipation by 3D motion capturing — a new method presented in karate kumite. *J. Sports Sci.* 2016;35(2):130–135. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1158851>
31. Ozkaya G., Jung H. R., Jeong I.S., Choi M.R., Shin M.Y., Lin X., et al. Three-dimensional motion capture data during repetitive overarm throwing practice. *Sci. Data.* 2018;5:180272. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.272>
32. Igawa T., Katsuhira J., Hosaka A., Uchikoshi K., Ishihara S., Matsudaira K. Kinetic and kinematic variables affecting trunk flexion during level walking in patients with lumbar spinal stenosis. *PloS One.* 2018;13(5):e0197228. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197228>
33. Bonnechère B., Jansen B., Haack I., Omelina L., Feipel V., Van Sint Jan S., Pandolfo M. Automated functional upper limb evaluation of patients with Friedreich ataxia using serious games rehabilitation exercises. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2018;15(1):87. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0430-7>
34. Chuang C.-H., Chen Y.-N., Tsai L.-W., Lee C.-C., Tsai H.-C. Improving Learning Performance with Happiness by Interactive Scenarios. *The ScientificWorldJournal.* 2014;2014:807347. <https://doi.org/10.1155/2014/807347>
35. Çubukçu B., Yüzgeç U., Zileli R., Zileli A. Reliability and validity analyze of Kinect V2 based measurement system for shoulder motions. *Med. Eng. Phys.* 2019;76:20–36. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.10.017>
36. Galna B., Barry G., Jackson D., Mhiripiri D., Oliver P., Rochester L. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. *Gait Posture.* 2014;39(4):1062–1068. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.01.008>
37. Dewey D.C., Miocinovic S., Bernstein I., Khemani P., Dewey R.B. 3rd, Querry R., et al. Automated gait and balance parameters diagnose and correlate with severity in Parkinson Disease. *J. Neurol. Sci.* 2014;345(1-2):131–138. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2014.07.026>
38. Takayasu K., Yoshida K., Mishima T., Watanabe M., Matsuda T., Kinoshita H. Analysis of the posture pattern during robotic simulator tasks using an optical motion capture system. *Surg.*

Endosc. 2017;32(1):183–190. <https://doi.org/10.1007/s00464-017-5655-1>

39. **Budman I., Meiri G., Ilan M., Faroy M., Langer A., Reboh D., et al.** Quantifying the social symptoms of autism using motion capture. *Sci. Rep.* 2019;9(1):7712. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44180-9>

40. **Perrott M.A., Pizzari T., Cook J., McClelland J.A.** Comparison of lower limb and trunk kinematics between markerless and marker-based motion capture systems. *Gait Posture.* 2017;52:57–61. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.10.020>

41. **Marin J., Blanco T., Marin J. J.** Octopus: A Design Methodology for Motion Capture Wearables. *Sensors.* 2017;17(8):1875. <https://doi.org/10.3390/s17081875>

42. **Martinez H.R., Garcia-Sarreon A., Camara-Lemarroy C., Salazar F., Guerrero-González M.L.** Accuracy of Markerless 3D Motion Capture Evaluation to Differentiate between on/off Status in Parkinson's Disease after Deep Brain Stimulation. *Parkinson's Dis.* 2018;2018:5830364. <https://doi.org/10.1155/2018/5830364>

43. **Nantsupawat N., Lane P., Siangprapunt O., Gadwala S., Nugent K.** Gait characteristics in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *J. Prim. Care Community Health.* 2015;6(4):1472–1478. <https://doi.org/10.1177/2150131915577207>

44. **Banach M., Wasilewska A., Dlugosz R., Pauk J.** Novel techniques for a wireless motion capture system for the monitoring and rehabilitation of disabled persons for application in smart buildings. *Technol. Health Care.* 2018;26(S2):671–677. <https://doi.org/10.3233/THC-182514>

45. **Rigoni M., Gill S., Babazadeh S., Elsewaisy O., Gillies H., Nguyen N., et al.** Assessment of Shoulder Range of Motion Using a Wireless Inertial Motion Capture Device—A Validation Study. *Sensors.* 2019;19(8):1781. <https://doi.org/10.3390/s19081781>

46. **Delrobaei M., Memar S., Pieterman M., Stratton T. W., McIsaac K., Jog M.** Towards remote monitoring of Parkinson's disease tremor using wearable motion capture systems. *J. Neurol. Sci.* 2017;384:38–45. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2017.11.004>

47. **Zhang J.-T., Novak A.C., Brouwer B., Li Q.** Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics. *Physiol. Meas.* 2013;34(8):63–69. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/8/N63>

48. **Moreno A.J., Utrilla G., Marin J., Sanchez-Valverde M.B., Royo A.C.** Cervical Spine Assessment Using Passive and Active Mobilization Recorded Through an Optical Motion Capture. *J. Chiropr. Med.* 2018;17(3):167–181. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2017.12.004>

49. **Ahmad N., Ghazilla R.A.R. Khairi N.M., Kasi V.** Reviews on various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *Signal Proc. Syst.* 2013;1(2):256–262. <https://doi.org/10.12720/ijsp.1.2.256-262>

50. **Muyor J.M., Arrabal-Campos F.M., Martínez-Aparicio C., Sánchez-Crespo A., Villa-Pérez M.** Test-retest reliability and validity of a motion capture (MOCAP) system for measuring thoracic and lumbar spinal curvatures and sacral inclination in the sagittal plane. *J. Back Musculoskelet. Rehabil.* 2017;1:1–7. <https://doi.org/10.3233/BMR-170606>

51. **Hachaj T., Piekarczyk M., Ogiela M.R.** Human Actions Analysis: Templates Generation, Matching and Visualization Applied to Motion Capture of Highly-Skilled Karate Athletes. *Sensors.* 2017;17(11):2590. <https://doi.org/10.3390/s17112590>

52. **Bellusci G., Roetenberg D., Dijkstra F., Luinge H., Slycke P.** Xsens MVN Motiongrid: Drift-Free Human Motion Tracking using Tightly Coupled Ultra-Wideband and Miniature Inertial Sensors. *Xsens Technologies White Paper.* 2011;6:1–10.

Endosc. 2017;32(1):183–190. <https://doi.org/10.1007/s00464-017-5655-1>

39. **Budman I., Meiri G., Ilan M., Faroy M., Langer A., Reboh D., et al.** Quantifying the social symptoms of autism using motion capture. *Sci. Rep.* 2019;9(1):7712. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44180-9>

40. **Perrott M.A., Pizzari T., Cook J., McClelland J.A.** Comparison of lower limb and trunk kinematics between markerless and marker-based motion capture systems. *Gait Posture.* 2017;52:57–61. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.10.020>

41. **Marin J., Blanco T., Marin J. J.** Octopus: A Design Methodology for Motion Capture Wearables. *Sensors.* 2017;17(8):1875. <https://doi.org/10.3390/s17081875>

42. **Martinez H.R., Garcia-Sarreon A., Camara-Lemarroy C., Salazar F., Guerrero-González M.L.** Accuracy of Markerless 3D Motion Capture Evaluation to Differentiate between on/off Status in Parkinson's Disease after Deep Brain Stimulation. *Parkinson's Dis.* 2018;2018:5830364. <https://doi.org/10.1155/2018/5830364>

43. **Nantsupawat N., Lane P., Siangprapunt O., Gadwala S., Nugent K.** Gait characteristics in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *J. Prim. Care Community Health.* 2015;6(4):1472–1478. <https://doi.org/10.1177/2150131915577207>

44. **Banach M., Wasilewska A., Dlugosz R., Pauk J.** Novel techniques for a wireless motion capture system for the monitoring and rehabilitation of disabled persons for application in smart buildings. *Technol. Health Care.* 2018;26(S2):671–677. <https://doi.org/10.3233/THC-182514>

45. **Rigoni M., Gill S., Babazadeh S., Elsewaisy O., Gillies H., Nguyen N., et al.** Assessment of Shoulder Range of Motion Using a Wireless Inertial Motion Capture Device—A Validation Study. *Sensors.* 2019;19(8):1781. <https://doi.org/10.3390/s19081781>

46. **Delrobaei M., Memar S., Pieterman M., Stratton T. W., McIsaac K., Jog M.** Towards remote monitoring of Parkinson's disease tremor using wearable motion capture systems. *J. Neurol. Sci.* 2017;384:38–45. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2017.11.004>

47. **Zhang J.-T., Novak A.C., Brouwer B., Li Q.** Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics. *Physiol. Meas.* 2013;34(8):63–69. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/8/N63>

48. **Moreno A.J., Utrilla G., Marin J., Sanchez-Valverde M.B., Royo A.C.** Cervical Spine Assessment Using Passive and Active Mobilization Recorded Through an Optical Motion Capture. *J. Chiropr. Med.* 2018;17(3):167–181. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2017.12.004>

49. **Ahmad N., Ghazilla R.A.R. Khairi N.M., Kasi V.** Reviews on various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *Signal Proc. Syst.* 2013;1(2):256–262. <https://doi.org/10.12720/ijsp.1.2.256-262>

50. **Muyor J.M., Arrabal-Campos F.M., Martínez-Aparicio C., Sánchez-Crespo A., Villa-Pérez M.** Test-retest reliability and validity of a motion capture (MOCAP) system for measuring thoracic and lumbar spinal curvatures and sacral inclination in the sagittal plane. *J. Back Musculoskelet. Rehabil.* 2017;1:1–7. <https://doi.org/10.3233/BMR-170606>

51. **Hachaj T., Piekarczyk M., Ogiela M.R.** Human Actions Analysis: Templates Generation, Matching and Visualization Applied to Motion Capture of Highly-Skilled Karate Athletes. *Sensors.* 2017;17(11):2590. <https://doi.org/10.3390/s17112590>

52. **Bellusci G., Roetenberg D., Dijkstra F., Luinge H., Slycke P.** Xsens MVN Motiongrid: Drift-Free Human Motion Tracking using Tightly Coupled Ultra-Wideband and Miniature Inertial Sensors. *Xsens Technologies White Paper.* 2011;6:1–10.

53. **Parks M., Chien J. H., Siu K.** Development of a Mobile Motion Capture (MO2CA) System for Future Military Application. *J. Mil. Med.* 2019;184(Suppl 1):65–71. <https://doi.org/10.1093/milmed/usy312>

54. **Won H.-J., Hong E.** The development of sport policy and management in South Korea. *International Journal of Sport Policy and Politics.* 2014;7(1):1–12. <https://doi.org/10.1080/19406940.2014.900104>

55. **Oyama S., Saeki M., Kaneta S., Shimoda S., Yoneda H., Hirata H.** Telerehabilitation Based on Markerless Motion Capture and IMT-2020 (5G) Networks. *Stud. Health Technol. Inform.* 2022;290:1108–1109. <https://doi.org/10.3233/SHTI220291>

56. **Rabatin A.E., Lynch M.E., Severson M.C., Brandenburg J.E., Driscoll S.W.** Pediatric telerehabilitation medicine: Making your virtual visits efficient, effective and fun. *J. Pediatr. Rehabil. Med.* 2020;13(3):355–370. <https://doi.org/10.3233/PRM-200748>

57. **Darekar A., McFadyen B.J., Lamontagne A., Fung J.** Efficacy of virtual reality-based intervention on balance and mobility disorders post-stroke: A scoping review. *J. Neuroeng. Rehab.* 2015;12(1):46. <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0035-3>

58. **Chanpimol S., Seamon B., Hernandez H., Harris-Love M., Blackman M.R.** Using Xbox kinect motion capture technology to improve clinical rehabilitation outcomes for balance and cardiovascular health in an individual with chronic TBI. *Arch. Physiother.* 2017;7:6. <https://doi.org/10.1186/s40945-017-0033-9>

59. **Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Котов С.В., Аведиков Г.Е., Митрофанов И.Е., Толстов К.М., Ефаров В.А.** Клинико-биомеханическое обоснование применения экзоскелета «ЭкзоАтлет» при ходьбе больных с последствиями ишемического инсульта. *Российский журнал биомеханики.* 2019;23(2):204–230. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2019.2.04>

60. **Лутохин А.С., Тычков А.Ю., Сотников А.М., Алимуратов А.К.** Анализ систем захвата движения в среде виртуальной реальности. *Вестник Пензенского государственного университета.* 2021;(2):102–106.

53. **Parks M., Chien J. H., Siu K.** Development of a Mobile Motion Capture (MO2CA) System for Future Military Application. *J. Mil. Med.* 2019;184(Suppl 1):65–71. <https://doi.org/10.1093/milmed/usy312>

54. **Won H.-J., Hong E.** The development of sport policy and management in South Korea. *International Journal of Sport Policy and Politics.* 2014;7(1):1–12. <https://doi.org/10.1080/19406940.2014.900104>

55. **Oyama S., Saeki M., Kaneta S., Shimoda S., Yoneda H., Hirata H.** Telerehabilitation Based on Markerless Motion Capture and IMT-2020 (5G) Networks. *Stud. Health Technol. Inform.* 2022;290:1108–1109. <https://doi.org/10.3233/SHTI220291>

56. **Rabatin A.E., Lynch M.E., Severson M.C., Brandenburg J.E., Driscoll S.W.** Pediatric telerehabilitation medicine: Making your virtual visits efficient, effective and fun. *J. Pediatr. Rehabil. Med.* 2020;13(3):355–370. <https://doi.org/10.3233/PRM-200748>

57. **Darekar A., McFadyen B.J., Lamontagne A., Fung J.** Efficacy of virtual reality-based intervention on balance and mobility disorders post-stroke: A scoping review. *J. Neuroeng. Rehab.* 2015;12(1):46. <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0035-3>

58. **Chanpimol S., Seamon B., Hernandez H., Harris-Love M., Blackman M.R.** Using Xbox kinect motion capture technology to improve clinical rehabilitation outcomes for balance and cardiovascular health in an individual with chronic TBI. *Arch. Physiother.* 2017;7:6. <https://doi.org/10.1186/s40945-017-0033-9>

59. **Pismennaya E.V., Petrushanskaya K.A., Kotov S.V., Avedikov G.E., Mitrofanov I.E., Tolstov K.M., Efarov V.A.** Clinical and biomechanical foundation of application of the exoskeleton Exoatlet at walking of patients with poststroke disturbances. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics.* 2019;23(2):204–230 (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2019.2.04>

60. **Lutokhin A.S., Tychkov A.Yu., Sotnikov A.M., Alimuradov A.K.** Analysis of motion capture systems in a virtual reality environment. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Penza state university.* 2021;2:102–106 (In Russ.).

Информация об авторах:

Иванова Мария Дмитриевна*, аспирант кафедры ВММБ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29 (ivanova-mashaa@mail.ru)

Муравьев Сергей Владимирович, к.м.н., научный директор ООО «Йорд Тех», 614000, Россия, Пермь, ул. Пушкина, 25, 124 (sergey89.m@mail.ru)

Клоян Гаянэ Зурабиевна, аспирант кафедры ВММБ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29 (kloyang@mail.ru)

Никитин Владислав Николаевич, к.т.н., доцент кафедры ВММБ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29 (nikitinvladislav86@gmail.com)

Шитоев Иван Дмитриевич, ассистент кафедры ВММБ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29 (shitoevid@yord.tech)

Information about the authors:

Maria D. Ivanova*, post-graduate student of Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russia (ivanova-mashaa@mail.ru)

Sergey V. Muravev, Ph.D. (Medicine), LLC “Yord Tech”, 25, Pushkina str., apt. 124, Perm, 614000, Russia (sergey89.m@mail.ru)

Gayane Z. Kloyan, post-graduate Student of Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russia (kloyang@mail.ru)

Vladislav N. Nikitin, Ph.D. (Technical), Associate Professor of Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russia (nikitinvladislav86@gmail.com)

Ivan D. Shitoev, assistant of Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russia (shitoevid@yord.tech)

* **Автор, ответственный за переписку / Corresponding author**