

УДК 159.938.25 + 004.05

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОТОРНОГО КОНТРОЛЯ В “ГИБРИДНЫХ” ПОЗАХ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

© 2021 г. Н. Д. Бабанов^{1,*}, Е. А. Бирюкова²

¹ ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина”
125315 Москва, ул. Балтийская, д. 8, Россия

² ФГАОУ ВО “КФУ им. В.И. Вернадского”
295007 Симферополь, Проспект Академика Вернадского, 4, Россия

*E-mail: n.babanov@nphys.ru

Поступила в редакцию 01.12.2020 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 19.01.2021 г.

Статья посвящена анализу современного состояния исследований в области аспектов нейрофизиологического контроля параметров нетипичных поз у человека, связанных с использованием внешних устройств по типу экзоскелет. Основными результатами исследований последних 5 лет является формирование научных представлений о нейрофизиологических перестройках системы моторного контроля при применении роботизированных устройств. Полученные сведения могут быть использованы в физиологии спорта, двигательной реабилитации пациентов, при разработке экзоскелетов верхних и нижних конечностей, организации работы операторов, обучении специфическим движениям.

Ключевые слова: функциональное состояние, синергия мышц, мышцы, экзоскелет, роботехнические системы, моторное обучение, функциональное состояние

DOI: 10.31857/S0235009221020025

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в научной литературе отмечается значительный рост числа исследований, посвященных изучению особенностей контроля и управления двигательными функциями человека в разных ситуациях, в частности при физической работе, операторской, спортивной деятельности, восстановительном лечении и реабилитации пациентов с моторными нарушениями.

Научный интерес к этой проблематике обусловлен, в том числе, значительным развитием технологии как медицинского (Письменная и др., 2019), так и промышленного (Schmalz et al., 2019) применения роботизированных комплексов с целью повышения качества жизни и социального благополучия населения. Отметим рост исследовательского интереса к изучению особенностей реализации нетипичных (гибридных) поз у человека, связанных с использованием внешних устройств, например, экзоскелетов конечностей. Таким положением может быть “сидячее стояние” (Noguchi et al., 2019), когда формируется поза, близкая к вертикальной стойке, но с перераспределенной нагрузкой в скелетно-мышечном аппарате. Авторами работы (Rowley et al., 2020) показано, что формирование нетипичных поз у человека связа-

но со значительными адаптационными перестройками механизмов пострального контроля, что обеспечивает защиту организма от перегрузки, или травм, вследствие использования роботизированных устройств.

Из данной литературы (Totaro et al., 2019) известно, что наличие дополнительных технических устройств может приводить к изменению функциональных состояний человека, за счет вовлечения в процесс адаптации не только нервно-мышечной, но и гуморальной системы организма. На сегодняшний день по-прежнему нерешенной остается проблема поиска оптимальной комбинации и надежных критериев оценки функционального состояния организма человека при взаимодействии с роботизированными устройствами, в частности, параметров электромиограммы (Wang et al., 2018), энцефалограммы (Saleh et al., 2017), характеристик сердечного ритма (Casas et al., 2020), стабилметрических показателей (Koyama et al., 2019) и других. Так, наличие возможных взаимосвязей между оцениваемыми количественными параметрами нейрофизиологического обеспечения моторного контроля в “гибридных” позах может предоставить базу для системной оценки функционального состояния человека, а также

“физиологического качества” разрабатываемых роботизированных устройств.

Настоящий обзор является частью научно-исследовательской работы лаборатории функциональных состояний ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина” при сотрудничестве с кафедрой физиологии человека и животных и биофизики Таврической академии ФГАОУ ВО “КФУ им. В.И. Вернадского”. Ранее нами проведен анализ современного состояния исследований в области двигательной реабилитации пациентов с нарушениями моторики верхних конечностей (Чуян и др., 2019), дана оценка наиболее часто используемых методов функциональной диагностики, связанных с применением пассивных индустриальных экзоскелетов нижних конечностей и спины (Бабанов и др., 2020).

Цель настоящего исследования — анализ и обобщение литературных данных относительно биологических аспектов нейрофизиологического контроля параметров нетипичных поз у человека, связанных с использованием внешних устройств.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В настоящей работе применялся контент-анализ релевантных публикаций за последние 5 лет. Отбор научных работ проводился с использованием баз PubMed, Российской Государственной Библиотеки, “Киберленинка”, Научной электронной библиотеки (elibrary.ru) и сервиса “Гугл Академия” (Google Scholar), в которых анализировался массив тематических публикаций глубиной не более чем до 2015 г. Исключались патенты. Использовались настройки поиска “точное словосочетание” и “все слова” для повышения точности отбора. Первоначальные критерии включения основывались на содержании заголовка и аннотации. В найденных публикациях находились те, в которых есть упоминание о проведении исследований при помощи физиологических методик оценки функционального состояния операторов при использовании внешних устройств. Основные направления для поиска: экзоскелеты, моторная координация, мышечная синергия, координация мышц, поструральный контроль, паттерны активации мышечной активности, центральная нервная система. Выбор был обусловлен имплицитным знанием и последующим визуальным выявлением ключевых слов в публикациях базы PubMed с использованием опции “похожие публикации” (similar articles) для биомедицинских статей. Для поиска зарубежных источников — exoskeletons, motor coordination, muscle synergy, muscle coordination, postural control, patterns of muscle activity activation, central nervous system. Таким образом, было установлено 37 релевантных публикаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно современным литературным данным, в мировой практике применения экзоскелетов можно условно выделить следующие цели: промышленное использование и медицинское назначение. При этом наиболее часто в литературе упоминаются роботизированные устройства для коррекции моторных функций верхних (Pirondini et al., 2016), нижних конечностей (Nuckols et al., 2020a), а также устройства, предназначенные для облегчения нагрузки на поясницу операторов (Madinei et al., 2020).

Заметим, что помимо активных устройств, призванных облегчать движения в конечностях, отдельным прикладным аспектом использования роботизированных экзоскелетов является организация рабочих станций, направленных на формирование вертикальной позы “сидячего стояния” с перераспределением нагрузки на скелетно-мышечный аппарат субъекта (Inoue et al., 2017). Использование подобных устройств позволяет практически полностью нивелировать отрицательное влияние длительного пребывания в сидячем положении на организм их пользователей, что достигается за счет снижения нагрузки на нижние конечности и позвоночник (Gao et al., 2016), повышения контроля за положением тела и осанкой (Luger et al., 2019) во время выполнения рабочих задач.

Несмотря на очевидную пользу применения роботизированной техники для различных сфер жизнедеятельности человека, ряд авторов отмечают наличие существенных рисков для операторов и пациентов, использующих подобные устройства (Howard et al., 2019).

Обращает на себя внимание тот факт, что значительная часть клинических исследований в этом направлении проведена с участием либо небольшого числа волонтеров (Кондур и др., 2017; Shindo et al., 2011; Prasard et al., 2010), либо содержит описание лишь отдельных клинических случаев (Buch et al., 2008; Daly et al., 2014). Отметим также, что значительная часть научных работ, посвященных вопросам нейрофизиологического обеспечения двигательных функций при использовании экзоскелета, имеет ярко выраженный прикладной характер с преимущественным использованием протоколов коротких по времени наблюдений, узкого диапазона методов функциональной диагностики. Кроме того, существенная дисперсия данных о целях, способах, времени применения роботизированных устройств значительно затрудняет как обобщение сведений о физиологических механизмах изменения моторного контроля при их применении, так и прогнозирование возможных отдаленных последствий для организма их операторов.

В то же время из данных актуальной литературы известно, что смена рабочей задачи может приводить к организации новых нетипичных поз и движений у оператора. В частности, в исследованиях работы (Theurel et al., 2018) на примере экзоскелетов верхних конечностей показано, что изменение позы во время использования такого устройства приводит к изменениям не только в двигательном паттерне рук, но и увеличению пострурального напряжения, выраженного в изменении опорной реакции в сторону повышения колебаний центра давления в сагиттальной плоскости. Вероятным объяснением этого факта является то, что современные роботизированные экзоскелеты, благодаря своей трехмерной структуре и большому количеству степеней свободы, способны прикладывать силы к каждому суставу тренируемой конечности в отдельности, при этом формируя необходимый паттерн ее движения в трехмерной плоскости (Proietti et al., 2017). При этом наличие дополнительных тактильных контактов в местах крепления устройств с большим количеством степеней свободы неизменно приводит к существенной модификации координационной функции движения конечностей, перестройкам в центральной нервной системе, адаптационным реакциям со стороны вегетативной нервной и сердечно-сосудистой систем операторов экзоскелета (Kaogu et al., 2017).

Кроме того, некоторые исследователи (Proietti et al., 2017) отмечают наличие устойчивых пост-эффектов изменения мышечных и суставных синергий у операторов экзоскелетов, что может оказать значительное влияние на их функциональное состояние после окончания сеансов взаимодействия с экзоскелетом (Ganesh et al., 2010). Согласно мнению ряда авторов (Rong et al., 2017), интересным аспектом работы с экзоскелетами является возможность исследовать нейрофизиологическое обеспечение моторного контроля при выполнении точных движений, таких как наведение на мишень. Ряд работ посвящены описанию мышечных синергий, координирующих движения конечности при взаимодействии с роботизированными устройствами (Proietti et al., 2017). Так, в исследованиях по изучению межмышечной координации при помощи электромиографии передней большеберцовой, камбаловидной, латеральной икроножной, косой широкой, двуглавой, прямой мышцы бедра и полусухожильной мышц обеих ног у пациентов (Li et al., 2019) показано, что при ношении экзоскелета нижних конечностей естественная синергия этих мышц заменяется искусственной с существенной модификацией паттерна движения. Отметим, что, согласно данным работы (Li et al., 2019), вклад различных мышц в адаптационные реакции к ношению экзоскелета значительно различался. Результаты приведенного исследования также ука-

зывают на то, что крутящий момент человеческого сустава может значительно изменяться под действием вовлечения суставного крутящего момента экзоскелета.

В некоторых исследованиях показано, что использование экзоскелетов нижних конечностей может изменить исходные паттерны мышечных сокращений у субъектов во время их обычной ходьбы, что может оказать неблагоприятное влияние на моторные функции субъектов, которые часто используют экзоскелеты, за счет нарушения естественной синергии их мышц (Hassan et al., 2018). Так, эффективность использования экзоскелетов и других внешних устройств подобного типа напрямую обусловлена точным взаимодействием между мышечной системой оператора и двигателями робота. При этом задача точного измерения крутящих моментов суставов оператора и шарниров экзоскелета является весьма проблематичной (Stetter et al., 2019).

Отдельной проблемой для исследователей является анализ распределения крутящих моментов экзоскелета и суставов оператора в процессе выполнения требуемого движения (Martinez et al., 2017). Дальнейшее развитие исследований в направлении измерения и моделирования крутящего момента в голеностопных, коленных и тазобедренных суставах нижних конечностей при ходьбе, а также плечевого, локтевого, лучезапястного сустава при использовании экзоскелета верхней конечности, анализ ЭМГ сигналов от связанных с ними мышц будет способствовать физиологической интерпретации адаптационных эффектов организма операторов к ношению экзоскелета (Li et al., 2019). В ряде работ показано (Farkhatdinov et al., 2019), что использование экзоскелетов для поддержки пользователей с ограниченными возможностями требует разработки индивидуального биомеханического моделирования, которое может быть интегрировано в систему помощи при ходьбе.

Важным аспектом изучения эффектов ношения экзоскелета является вопрос обеспечения стабильной статичной позы субъекта (Luger et al., 2019), поскольку для этого необходимо, чтобы центр тяжести при ношении экзоскелета находился в пределах границы опоры. В исследованиях (Morasso et al., 2002) показано, что для сохранения стабильности позы недостаточно одного собственного стабилизирующего момента, создаваемого вязкоупругими силами тканей суставов (Кобелев и др., 2012). Так, необходимым условием для поддержания равновесия во время ношения экзоскелета является активный контроль за развиваемой силой мышц для формирования управляющего вращающего момента, противодействующего опрокидывающему моменту. При статичном поддержании равновесия важную

роль играет сенсорная информация от интрафузальных мышечных волокон (реагируют на растяжение) и телец Гольджи (реагируют на развиваемое усилие) (Агаджанян и др., 2017).

В настоящее время мы не смогли найти исследования, подробно описывающие все вовлеченные мышечные группы для поддержания гибридных поз по типу “сидячего стояния”, однако, в этом контексте особый интерес представляют исследования, связывающие синергетические аспекты организации сложных движений, в том числе обеспечения сохранения вертикальной стойки. Некоторые авторы (Robertson et al., 2017) указывают на то, что поскольку большая часть вертикального стояния и ходьбы происходит автоматически под контролем центрального генератора паттернов и мозжечка, пользователи часто не способны оценить необходимую степень активации той или иной мышцы. Так, из-за различных стратегий в обеспечении контроля за движением может случиться так, что экзоскелет и оператор не выполняют согласованных и конструктивных действий, создавая общие системные возмущения, которые могут представлять угрозу для пользователя (Veneman et al., 2013). Для того чтобы свести дестабилизирующие движения к минимуму до начала компенсирующих движений, у операторов экзоскелетов происходит упреждающая корректировка позы (Takakusaki, 2016).

Несмотря на различные стратегии управления роботизированными комплексами, важным является определение общих паттернов нервно-мышечной адаптации при реализации нетипичных (гибридных) поз. Полагаем, что для этих целей могут быть полезными исследования, связанные с оценкой мышечной коактивации (одновременной активации мышц агониста и антагониста) (Latash et al., 2018) у операторов экзоскелета. По мнению авторов работы (Hulliger et al., 1989), одной из возможных основных ролей коактивации является облегчение роли проприоцепции, в частности, вклада сенсорных волокон группы “Ia” для достижения более успешного выполнения задач на точность. Кроме того, как показывают исследователи (Peterka et al., 2018), в паттерн коактивации при поддержании заданной позы вовлечено большое количество групп мышц, обеспечивающих процесс мышечной синергии. Отметим, что для осуществления, как минимум, одной степени свободы необходимы две группы мышц с противоположным действием (Gottlieb et al., 1989). Так, миографические исследования во время спокойного стояния выявили у испытуемых две основные мышечные синергии с противоположным действием: с дорсальной стороны тела: трицепс голени (*Musculus triceps surae*), мышцы задней поверхности бедра, мышца, выпрямляющая позвоночник (*Musculus erector spinae*); с вентральной стороны: передняя большеберцовая

мышца (*Musculus tibialis anterior*), четырехглавая мышца бедра (*Musculus quadriceps femoris*), прямая мышца живота (*Musculus rectus abdominis*) (Latash et al., 2018). Кроме того, известно, что компенсирующая регулировка позы может быть достигнута путем изменения положения как голеностопного, так и, в меньшей степени, тазобедренного суставов (Afschrift et al., 2016, Фролов и др., 2019). В работах (Бабанов и др., 2018; Fasola et al., 2019) показано, что изменение кинематических соотношений, вызванных ограничением подвижности в голеностопных суставах, характерное для некоторых типов пассивных экзоскелетов, неизменно приводит к возникновению адаптационных движений в коленных суставах оператора экзоскелета. Кроме того, экспериментальные данные (Collins et al., 2015) указывают на то, что использование устройств с высокой жесткостью, призванных ослабить нагрузку на икроножные мышцы, может приводить к повышенной активности мышц-антагонистов, например, подошвенного сгибателя и передней большеберцовой мышцы. Уменьшение растяжения сухожилий приводит к уменьшению упругой отдачи при толчке ногой для совершения шага. При этом изменения механики мышц и сухожилий, действующих в суставах нижних конечностей при ношении экзоскелета, приводят к изменениям координации всего тела его оператора (Jackson et al., 2017). В работе (Nuckols et al., 2020b) по изучению влияния экзоскелета на динамику подошвенного сгибателя и мышц-антагонистов использовался метод ультразвуковой визуализации, который позволил обнаружить положительную корреляцию между изменением средней скорости активации камбаловидной мышцы и уровнем общего метаболизма у человека. В работах по оценке мышечного тонуса при изометрических сокращениях мышц (Lanza et al., 2017) показано, что нервно-мышечная активация агонистов и антагонистов различается в зависимости от угла в коленном суставе во время разгибания. В работах (Robertson et al., 2017) показано, что ношение экзоскелета может сопровождаться уменьшением развиваемой мышечной силы одновременно с увеличением ее длины. При этом вероятным механизмом, объясняющим отсутствие значимого снижения активации мышцы пропорционально уровню разгрузки, создаваемой экзоскелетом, является рассогласование реакции на афферентные сигналы механорецепторов при уменьшении мышечного растяжения. По нашему мнению, дальнейшие исследования в данном направлении позволят расширить представления о механизмах моторного контроля мышечной активации у операторов экзоскелета.

Нерешенной остается проблема оценки непосредственного влияния роботизированных устройств на центральную нервную систему испытуемых, в частности, супраспинальный уровень регуляции

движений (Tucker et al., 2015). В настоящее время в литературе очень мало работ, посвященных особенностям нейрофизиологических механизмов центрального контроля заданной позы при использовании роботизированных устройств. При этом известно (Takakusaki et al., 2017), что контроль позы и вертикального равновесия требует сложной мультисенсорной интеграции и сенсомоторной координации.

Современные нейробиологические данные свидетельствуют о том, что нормальный автоматический локомоторный ритм регулируется нейронным ансамблем центрального генератора паттернов (ЦГП) спинного мозга, модифицируются периферическими сенсорными сигналами и опосредуются надспинальным контролем. В частности, активность ЦГП модулируется импульсами от супраспинальных локомоторных центров, в том числе субталамической локомоторной области в латеральной гипоталамической области; мезэнцефальной локомоторной области, соответствующая клиновидному и педункулопонтинному ядрам в дорсальной части среднего мозга; локомоторной области мозжечка, расположенной близко к фастигиальным ядрам по средней линии мозжечка; и мостовой локомоторной области в понтомедулярной ретикулярной формации (Armstrong et al., 1988; Mori et al., 2001; Shik, Orlovsky, 1976).

Принято считать, что функциональная организация, связанная с контролем постурального мышечного тонуса, находится в понтомедулярной ретикулярной формации. В исследованиях (Takakusaki et al., 2016) показано, что нарушение интеграции сенсорной информации, в частности проприоцепции, в височно-теменном узле и первичной вестибулярной коре, может привести к дефициту внутренней постуральной модели.

В ряде работ отмечается, что при использовании экзоскелетов возникают каскады локальных и глобальных нейромеханических компенсаций (Nuckols et al., 2020c). При этом большое количество эффектов со стороны центральной нервной системы при использовании роботизированных устройств с нейроинтерфейсами обусловлено активизацией процессов нейропластичности, что является ключевым моментом для успешной реабилитации пациентов с патологией движения (Calabrò et al., 2018; Boudreau et al., 2010).

В работе (Li et al., 2018) показаны значительные изменения паттернов ЭЭГ активности в сенсомоторных областях контралатеральной конечности при ношении одностороннего экзоскелета. Авторы отмечают, что, чем меньше индекс межполушарной асимметрии при ношении одностороннего экзоскелета, тем меньше влияния оказывает экзоскелет на центральную нервную систему его оператора. При этом критерием адаптации

организма к одностороннему экзоскелету является полное исчезновение межполушарной асимметрии паттернов ЭЭГ при ходьбе. Так, индекс межполушарной асимметрии, наряду с изменением электрокимографических характеристик, является дополнительным качественным показателем адаптации организма к ношению экзоскелетов и других подобных устройств. Подтверждением этих данных можно считать работу (Nakaniishi et al., 2014), где проводилось сравнение ходьбы в роботизированном ортезе Lokomat с пассивным стоянием. Было обнаружено, что в течение цикла ходьбы в устройстве происходила десинхронизация в сенсомоторной области мю- и бета-ритмов, что отображало повышенную активность нейронов в этой области. Также показано, что происходит подавление мю- и бета-ритмов в правой первичной соматосенсорной коре во время ходьбы условно здоровых добровольцев на беговой дорожке при сравнении с ходьбой в робототехническом вспомогательном комплексе (Knaepen et al., 2015). Эти данные могут быть полезны для оптимизации конструкции и управления.

Несмотря на значительный интерес исследователей к проблеме обеспечения центрального контроля моторных функций во время взаимодействия с внешними устройствами, следует отметить ограниченность методов функциональной диагностики для решения вышеназванных задач. Результаты нашего исследования свидетельствуют о том, что большинство работ по оценке физиологических изменений в организме операторов экзоскелетов посвящено изучению таких показателей, как кинематика движений, параметры мышечного напряжения и других. При этом большинство работ в изучаемой нами области проведено с использованием методов классической ЭЭГ, поверхностной и стимуляционной электромиографии, компьютерной стабилотрии, которые зачастую не дают достаточного понимания нейрофизиологических механизмов организации сложных движений, в том числе обеспечения кинематики и контроля формирования новых паттернов движения при применении роботизированных устройств.

На этом фоне обращает на себя внимание появление достаточно новых, перспективных методов функциональной томографии (Zonnino et al., 2019; Surgent et al., 2019) и нейровизуализации (Thibault et al., 2016), инфракрасной спектроскопии (Kim et al., 2020), позволяющих исследовать перестройки в ЦНС испытуемых во время взаимодействия с роботизированными устройствами. В частности, в исследованиях с применением метода StretchfMRI, во время движений, контролируемых экзоскелетом верхней конечности, были исследованы прямые нейронные корреляты М-ответа ЭМГ от мышц сгибателей и разгибателей верхней конечности. Полученные в данном ис-

следования результаты свидетельствуют о надежности метода StretchfMRI для идентификации длиннолатентного рефлекса (Хайбуллин, 2017) во время протокола fMRI (Zonnino et al., 2019).

В настоящее время одним из первых рандомизированных клинических исследований по сравнительному влиянию долгосрочных эффектов локомоторной роботизированной тренировки и стандартной тренировки на беговой дорожке в изменении корковой активности у лиц с гемипаретическим инсультом является работа южнокорейской группы ученых (Kim et al., 2020). Авторами показаны значительные нейропластические перестройки в областях первичной сенсомоторной коры, дополнительной моторной области и премоторной коры пораженного полушария у пациентов с гемипаретическим инсультом под влиянием 14-дневной тренировки с применением роботизированного экзоскелета нижних конечностей (Kim et al., 2020).

Методом функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (fNIRS) показано, что 4-недельный курс роботизированной локомоторной тренировки приводил к достоверному увеличению уровня оксигемоглобина (оxHb) в областях первичной сенсомоторной коры, дополнительной моторной области и премоторной коры пораженного полушария у пациентов с гемипаретическим инсультом. Кроме того, лонгитюдное исследование fNIRS также выявило существенное увеличение кортикальных уровней оxHb пораженного полушария наряду с улучшением двигательной функции после двух месяцев реабилитации пациентов с подострым инсультом. Полученные авторами данные подтверждают гипотезу о том, что роботизированная локомоторная тренировка вызывает реорганизацию коры больших полушарий. При этом факторами, которые, возможно, лежат в основе нейропластичности, вызванной роботизированной тренировкой, являются точная кинематическая обратная связь в реальном времени и визуальная обратная связь с информацией о распределении веса во время локомоторной роботизированной тренировки. Так, правильная зрительная и проприоцептивная обратная связь являются важными сенсорными входами в моторном обучении, которые помогают прогнозировать и корректировать двигательные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, быстрорастущее количество научных публикаций по обеспечению моторного контроля за формированием “гибридных” поз во время использования роботизированных устройств промышленного и медицинского назначения свидетельствует о передовом характере данных исследований.

В ряде научных работ показано, что поддержание “гибридных” поз у операторов экзоскелетов и других роботизированных устройств напрямую обусловлено перераспределением крутящих моментов в суставах, изменением естественных сиnergий и паттернов коактивации мышц. При этом подстройка мышечного тонуса под рабочую задачу происходит с участием афферентного сенсорного влияния от зрительной системы, а также вестибуло-, проприо- и механорецепторов, а ведущую роль за контролем постурального мышечного тонуса отводят структурам стриопаллидарной системы, понтомедуллярной ретикулярной формации, ядрам продолговатого и среднего мозга. Кроме того, с использованием методов нейровизуализации показано, что в процессе адаптации организма к использованию роботизированных устройств важное участие принимает первичная сенсомоторная, а также премоторная и дополнительная моторная кора. Однако, несмотря на большое количество публикаций, связанных с применением роботизированных устройств, на данный момент нет достаточной ясности в вопросе о том, за счет каких именно нейронных механизмов и при каких условиях меняется стратегия моторной и мышечной организаций при поддержании “гибридных” поз у операторов роботизированных устройств. Кроме того, на сегодняшний день в литературе практически отсутствуют исследования, описывающие долгосрочные эффекты использования экзоскелетов и других роботизированных устройств.

Полагаем, что важным резервом для развития знаний в области применения экзоскелетов и других роботизированных устройств являются комплексные исследования центрального обеспечения регуляции позы и движений при их использовании. Полученные в настоящем обзоре сведения могут быть использованы в физиологии спорта, двигательной реабилитации пациентов, при разработке экзоскелетов верхних и нижних конечностей, организации работы операторов, обучении специфическим движениям.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

В рамках работы ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского” и ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии имени П.К. Анохина”, согласно Соглашению о сотрудничестве № 13-15/5-2869, 14.02.2017. Поддержано грантом ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского” №AAAA-A20-120012090164-8.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Н.Д. Бабанов — подготовка обзора литературы, оформление рукописи; Е.А. Бирюкова — подготовка обзора литературы, оформление рукописи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агаджанян Н.А., Власова И.Г., Ермакова Н.В., Торшин В.И. *Основы физиологии человека*. Под ред. В.И. Торшина. Москва. Российский университет дружбы народов. 2017. Т. 2. С. 262.
- Бабанов Н.Д., Кубряк О.В. Физиологические методики в изучении “пассивных” промышленных экзоскелетов спины и нижних конечностей. *Мед. труда и пром. экол.* 2020. Т. 60. № 5. С. 318–328. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-5-318-328>
- Бабанов Н.Д., Кобрин А.И. Применение стабиллографии для исследования влияния ограничения подвижности суставов человека в задаче сохранения вертикальной позы. *Инфорино-2018*. 2018. С. 371–375.
- Кобелев А.В., Смолюк Л.Т., Кобелева Р.М., Проценко Ю.Л. *Нелинейные вязкоупругие свойства биологических тканей*. Екатеринбург. УрО РАН. 2012. Т. 244. 204 с.
- Кондур А.А. *Эффективность использования нейроинтерфейса в восстановлении двигательной функции руки после инсульта*. Дис. на соискание уч. ст. канд. мед. наук: спец. 14.01.11 “Нервные болезни”. М.: 2017. 42 с.
- Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Котов С.В. и др. Клинико-биомеханическое обоснование применения экзоскелета “Экзоатлет” при ходьбе больных с последствиями ишемического инсульта. *Russian Journal of Biomechanics*. 2019. Т. 23. № 2. С. 204.
- Чуян Е.Н., Бирюкова Е.А., Бабанов Н.Д. Двигательная реабилитация пациентов с нарушениями моторики верхних конечностей: анализ современного состояния исследований (обзор литературы). *Уч. зап. Крымского фед. ун-та им. В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2019. Т. 5 (71). № 1. С. 163–178.
- Фролов А.А., Александров А.В. “Концепция” Естественных синергий” как развитие представлений на Бернштейна о двигательных синергиях. *Идеи НА Бернштейна в наши дни*. 2019. С. 126–147.
- Хайбуллин Т.И., Гранатов Е.В., Шакирзянова С.Р. “Коротколатентные и длиннолатентные рефлексы: механизм генерации, их интерпретация и клиническая применимость” *Практическая медицина*. 2017. Т. 1. № 1 (102). С. 52–59.
- Afschrift M., Jonkers I., De Schutter J., De Groote F. Mechanical effort predicts the selection of ankle over hip strategies in nonstepping postural responses. *J. Neurophysiology*. 2016. V. 116 (4). P. 1937–1945. <https://doi.org/10.1152/jn.00127.2016>
- Armstrong D.M. The supraspinal control of mammalian locomotion. *J. Physiol.* 1988. V. 405. P. 1–37.
- Boudreau S.A., Farina D., Falla D. The role of motor learning and neuroplasticity in designing rehabilitation approaches for musculoskeletal pain disorders. *Man Ther.* 2010. V. 15 (5). P. 410–414. <https://doi.org/10.1016/j.math.2010.05.00820615749>
- Buch E., Weber C., Cohen L.G., Braun C., Dimyan M.A., Ard T., Mellinger J., Caria A., Soekadar S.R., Fourkas A., Birbaumer N. Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic. *Stroke*. 2008. V. 39 P. 910–917.
- Calabrò R.S., Naro A., Russo M. Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial. *J. Neuro Engin. Rehabil.* 2018. V. 15 (1). P. 35–40. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0377-8>
- Casas J., Senft E., Gutiérrez L.F., Rincón-Rocancio M., Múnera M., Belpaeme T., Cifuentes C.A. Social Assistive Robots: Assessing the Impact of a Training Assistant Robot in Cardiac Rehabilitation. *Intern. J. Soc. Robotics*. 2020. P. 1–15.
- Collins S.H., Wiggin M.B., Sawicki G.S. Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton. *Nature*. 2015. V. 522 (7555). P. 212–215. <https://doi.org/10.1038/nature14288>
- Day J.J., Cheng R., Rogers J., Litinas K., Hrovat K., Dohring M. Feasibility of a new application of noninvasive brain computer interface (BCI): a case study of training for recovery of volitional motor control after stroke. *J. Neurol. Phys. Therapy*. 2014. V. 33. P. 203–211.
- Farkhatdinov I., Ebert J., van Oort G., Vlutters M., van Asseldonk E. Assisting human balance in standing with a robotic exoskeleton. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. V. 4 (2). P. 414–421. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2890671>
- Fasola J., Vouga T., Baud R., Bleuler H., Bouri M. Balance Control Strategies during Standing in a Locked-Ankle Passive Exoskeleton. *IEEE 16th Intern. Conf. Rehabil. Robotics (ICORR)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/icorr.2019.8779500>
- Ganesh G., Haruno M., Kawato M., Burdet E. Motor memory and local minimization of error and effort, not global optimization, determine motor behavior. *J Neurophysiol.* 2010 V. 104 (1). P. 382–390.
- Gao Y., Cronin N.J., Pesola A.J., Finni T. Muscle activity patterns and spinal shrinkage in office workers using a sit-stand workstation versus a sit workstation. *Ergonomics*. 2016. V. 59 (10). P. 1267–1274. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1139750>
- Gottlieb G.L., Corcos D.M., Agarwal G.C. Strategies for the control of voluntary movements with one mechanical degree of freedom. *Behav Brain Sci*. 1989. V. 12 (2). P. 189–250. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00048238>
- Hassan M., Kadone H., Ueno T., Hada Y., Sankai Y., Suzuki K. Feasibility of synergy-based exoskeleton robot control in hemiplegia. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2018. V. 26 (6). P. 1233–1242. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2832657>
- Howard J., Murashov V.V., Lowe B.D., Lu M.L. Industrial exoskeletons: Need for intervention effectiveness research. *Am. J. Ind. Med.* 2020. V. 63 (3). P. 201–208. <https://doi.org/10.1002/ajim.23080>
- Hulliger M., Dürmüller N., Prochazka A., Trend P. Flexible fusimotor control of muscle spindle feedback during a variety of natural movements. *Prog Brain Res*. 1989. V. 80. P. 87–101.

- Inoue T., Kato Y., Ozawa J. Prediction sit-to-stand movement using trunk angle and lower limb EMG for assist system. *IEEE Intern. Conf. Consumer Electron. (ICCE)*. 2017. P. 143–144.
- Jackson R.W., Dembia C.L., Delp S.L., Collins S.H. Muscle-tendon mechanics explain unexpected effects of exoskeleton assistance on metabolic rate during walking. *J. Exp. Biol.* 2017. V. 220 (11). P. 2082–2095. <https://doi.org/10.1242/jeb.150011>
- Kaoru T. Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control. *J. Mov. Disord.* 2017. V. 10 (1). P. 1–17. <https://doi.org/10.14802/jmd.16062>
- Kim H., Park G., Shin J.H. Neuroplastic effects of end-effector robotic gait training for hemiparetic stroke: a randomised controlled trial. *Sci. Rep.* 2020. V. 10 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69367-3>
- Knaepen K., Mierau A., Swinnen E. Human-Robot Interaction: Does Robotic Guidance Force Affect Gait-Related Brain Dynamics during Robot-Assisted Treadmill Walking? *PLoS One*. 2015. V. 10. e0140626. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140626>
- Koyama S., Tanabe S., Otaka Y., Kato T., Furuzawa S., Tatemoto T., Saitoh E. Novel lateral transfer assist robot decreases the difficulty of transfer in post-stroke hemiparesis patients: a pilot study. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2020. P. 1–5.
- Lanza M.B., Balshaw T.G., Folland J.P. Do changes in neuromuscular activation contribute to the knee extensor angle-torque relationship? *Exper. Physiol.* 2017. V. 102 (8). P. 962–973. <https://doi.org/10.1113/ep086343>
- Latash M.L. Muscle coactivation: definitions, mechanisms, and functions. *J. Neurophysiol.* 2018. V. 120 (1). P. 88–104. <https://doi.org/10.1152/jn.00084.2018>
- Li J., Thakor N., Bezerianos A. Unilateral Exoskeleton Imposes Significantly Different Hemispherical Effect in Parietooccipital Region, but Not in Other Regions. *Sci. Rep.* 2018. V. 8 (1). P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31828-1>
- Li Z., Liu H., Yin Z., Chen K. Muscle Synergy Alteration of Human During Walking With Lower Limb Exoskeleton. *Front Neurosci.* 2019. V. 12. P. 1050. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.0105030760972>
- Luger T., Seibt R., Cobb T.J., Rieger M.A., Steinhilber B. Influence of a passive lower-limb exoskeleton during simulated industrial work tasks on physical load, upper body posture, postural control and discomfort. *Applied Ergonomics*. 2019. V. 80. P. 152–160.
- Madinei S., Alemi M.M., Kim S., Srinivasan D., Nussbaum M.A. Biomechanical Evaluation of Passive Back-Support Exoskeletons in a Precision Manual Assembly Task: “Expected” Effects on Trunk Muscle Activity, Perceived Exertion, and Task Performance. *Hum Factors*. 2020. V. 62 (3). P. 441–457. <https://doi.org/10.1177/0018720819890966>
- Martinez A., Lawson B., Goldfarb M. A controller for guiding leg movement during overground walking with a lower limb exoskeleton *IEEE Transactions on Robotics*. 2017. V. 34 (1). P. 183–193.
- Morasso P.G., Sanguineti V. Ankle muscle stiffness alone cannot stabilize balance during quiet standing. *J. Neurophysiol.* 2002. V. 88 (4). P. 2157–2162.
- Mori S., Matsuyama K., Mori F., Nakajima K. Supraspinal sites that induce locomotion in the vertebrate central nervous system. *Adv. Neurol.* 2001. V. 87. P. 25–40.
- Nakanishi Y., Wada F., Saeki S., Hachisuka K. Rapid changes in arousal states of healthy volunteers during robot-assisted gait training: a quantitative time-series electroencephalography study. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2014. V. 11 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-59>
- Noguchi M., Glinka M., Mayberry G.R. et al. Are hybrid sit-stand postures a good compromise between sitting and standing? *Ergonomics*. 2019. V. 62(6). P. 811–822. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1577496>
- Nuckols R.W., Sawicki G.S. Impact of elastic ankle exoskeleton stiffness on neuromechanics and energetics of human walking across multiple speeds. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2020a. <https://doi.org/10.21203/rs.2.20510/v1>
- Nuckols R.W., Dick T.J.M., Beck O.N., Sawicki G.S. Ultrasound imaging links soleus muscle neuromechanics and energetics during human walking with elastic ankle exoskeletons. *Sci Rep.* 2020b. V. 10 (1). P. 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60360-4>
- Nuckols R.W., Takahashi K.Z., Farris D.J., Mizrachi S., Riemer R., Sawicki G.S. Mechanics of walking and running up and downhill: A joint-level perspective to guide design of lower-limb exoskeletons. *PLoS One*. 2020c. V. 15 (8):e0231996. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231996>
- Peterka R. J. Sensory integration for human balance control. *Handbook of clinical neurology*. Elsevier. 2018. V. 159 P. 27–42.
- Pirondini E., Coscia M., Marcheschi S. Evaluation of the effects of the Arm Light Exoskeleton on movement execution and muscle activities: a pilot study on healthy subjects. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2016. V. 13 (1). P. 9–15. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0117-x>
- Prasad G., Herman P., Coyle D., McDonough S., Crosbie J. Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study. *J. Neuro. Engineer. Rehabil. itat.* 2010. V. 7 (1). P. 60–68.
- Proietti T., Guigon E., Roby-Brami A., Jarrassé N. Modifying upper-limb inter-joint coordination in healthy subjects by training with a robotic exoskeleton. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2017. V. 14 (1). P. 55–60. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0254-x>
- Robertson B.D., Vadakkeveedu S., Sawicki G.S. A bench-top biorobotic platform for in vitro observation of muscle-tendon dynamics with parallel mechanical assistance from an elastic exoskeleton. *J. Biomech.* 2017. V. 57. P. 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.03.009>
- Rong W., Li W., Pang M., Hu J., Wei X., Yang B., Wai H., Zheng X., Hu X. A Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) and robot hybrid system for multi-joint coordinated upper limb rehabilitation after stroke. *J. Neuroeng Rehabil.* 2017. V. 14 (1). P. 34–40. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0245-y>

- Rowley K.M., Engel T., Kulig K. Trunk and hip muscle activity during the Balance-Dexterity task in persons with and without recurrent low back pain. *J. Electromyography and Kinesiology*. 2020. V. 50 P. 102378.
- Saleh S., Fluet G., Qiu Q., Merians A., Adamovich S.V., Tunik E. Neural patterns of reorganization after intensive robot-assisted virtual reality therapy and repetitive task practice in patients with chronic stroke. *Front. Neurol.* 2017. V. 8. P. 452–458.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00452>
- Schmalz T., Schändlinger J., Schuler M. et al. Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. V. 16 (23). P. 4792.
- Shik M.L., Orlovsky G.N. Neurophysiology of locomotor automatism. *Physiol.* 1976. V. 56 (3). P. 465–501.
- Shindo K. Effects of neurofeedback training with an electroencephalogram-based brain-computer interface for hand paralysis in patients with chronic stroke: a preliminary case series study. *J. Rehabil. Medicine*. 2011. V. 43 (10). P. 951–957.
- Stetter B.J., Ringhof S., Krafft F.C. Sell S. Stein T. Estimation of knee joint forces in sport movements using wearable sensors and machine learning. *Sensors*. 2019. V. 19 (17). P. 3690.
- Surgent O.J., Dadalco O.I., Pickett K.A., Travers B.G. Balance and the brain: A review of structural brain correlates of postural balance and balance training in humans. *Gait Posture*. 2019. V. 71. P. 245–252.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.05.011>
- Takakusaki K. Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control. *J. Mov. Disord.* 2017. V. 10 (1). P. 1–17.
<https://doi.org/10.14802/jmd.16062>
- Takakusaki K., Chiba R., Nozu T., Okumura T. Brainstem control of locomotion and muscle tone with special reference to the role of the mesopontine tegmentum and medullary reticulospinal systems. *J. Neural. Transmis.* 2016. V. 123 (7). P. 695–729.
- Theurel J., Desbrosses K., Roux T., Savescu A. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*. 2018. V. 67. P. 211–217.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.10.008>
- Thibault R.T., Raz A. Imaging Posture Veils Neural Signals. *Front Hum Neurosci*. 2016. V. 10. P. 520–525.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00520>
- Tucker M.R., Olivier J., Pagel A., Bleuler H., Bouri M., Lambercy O., Gassert R. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review. *J. Neuroengineer. Rehabil.* 2015. V. 12 (1). P. 1–10.
- Veneman J.F., Seyfarth A., Barralon P. *Evaluating postural balance performance in exoskeleton robots*. 2013.
- Yang N., Zhang M., Huang C., Jin D. Synergic analysis of upper limb target-reaching movements. *J. Biomech.* 2002. V. 35 (6). P. 739–746.
- Zonnino A., Farrens A.J., Ress D., Sergi F. StretchfMRI: a new technique to quantify the contribution of the reticular formation to long-latency responses via fMRI. *IEEE*. 2019. P. 1247–1253.
<https://doi.org/10.1101/582692>
- Wang W., Li R., Diekel Z., Chen Y., Zhang Z., Jia Y. Controlling object hand-over in human-robot collaboration via natural wearable sensing. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2018. V. 49 (1). P. 59–71.

Neurophysiological support of motor control in “Hybrid” positions. Literature review

N. D. Babanov^{a, #} and E. A. Biryukova^b

^a Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia

^b Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

[#] E-mail: n.babanov@nphys.ru

The article is devoted to the analysis of the current state of research in the field of aspects of neurophysiological control of parameters of atypical postures in humans associated with the use of external devices of the type of exoskeleton. The results of this review of the literature demonstrate the problem of the need to develop a theoretical model describing the adaptive mechanisms and interaction of the internal structures of the body in conditions of limited joint mobility, changes in tactile sensations as a result of interaction with external devices. The information obtained can be used in the physiology of sports, motor rehabilitation of patients, in the development of exoskeletons of the upper and lower extremities, in organizing the work of operators, in teaching specific movements.

Key words: functional state, muscle synergy, muscles, exoskeleton, robotic systems, motor learning, functional state

REFERENCES

- Agadzhanian N.A., Vlasova I.G., Ermakova N.V., Torshin V.I. Osnovy fiziologii cheloveka [*Fundamentals of human physiology*]. Moscow. Peoples' Friendship University of Russia. 2017. V. 2. P. 262 (in Russian).
- Babanov N.D., Kubryak O.V. Fiziologicheskie metodiki v izuchenii “passivnykh” promyshlennykh ekzoskeletov spiny i nizhnikh konechnostei. [Physiological methods in the study of “passive” industrial exoskeletons of the back and lower extremities]. [*Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*] Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology. 2020. V. (5). P. 318–328.
<https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-5-318-328> (in Russian).

- Babanov N.D., Kobrin A.I. Primenenie stabilografii dlya issledovaniya vliyaniya ogranicheniya podvizhnosti sustavov cheloveka v zadache sokhraneniya vertikal'noi pozy [Application of stabilography to study the effect of limiting the mobility of human joints in the task of maintaining an upright posture]. *Inforino-2018*. 2018. P. 371–375 (in Russian).
- Chuyan E.N., Birukova E.A., Babanov N.D. Dvigatel'naya reabilitatsiya pacientov s narusheniyami motoriki verhnih konechnostej: analiz sovremennogo sostoyaniya issledovaniy (obzor literatury). [Upper limbs disorders patients motor rehabilitation: of the modern studies analysis (review)] *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo Biologiya. Himiya [Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry]*. 2019. V 5 (71). № 1. P. 163–178 (in Russian).
- Khaybullin T.I., Granatov E.V., Shakirzyanova S.R. Korotkolatentnye i dlinnolatentnye refleksy: mekhanizm generatsii, ih interpretatsiya i klinicheskaya primenimost' [Short and long latency reflexes: generation mechanism, their interpretation and clinical utility]. *Prakticheskaya medicina [Practical Medicine]*. 2017. V. 102 (1). P. 52–60 (in Russian).
- Kobelev A.V. Nelineinnye vyazkouprugie svoystva biologicheskikh tkanei [Nonlinear viscoelastic properties of biological tissues]. *Ekaterinburg. UrO RAN*. 2012. V. 244. P. 204–209 (in Russian).
- Kondur A.A. Effektivnost' ispol'zovaniya nejrointerfejsa v vosstanovlenii dvigatel'noj funktsii ruki posle insulta [Efficiency of using a neurointerface in restoring motor function of the hand after a stroke: dis. for the degree of Candidate of Medical Sciences]: spec. 14.01.11 "Nervnye bolezni [Nervous diseases]". Moscow, 2017. P. 42–50 (in Russian).
- Pismennaya E.V., Petrushanskaya K.A., Kotov S.V. Kliniko-biomekhanicheskoe obosnovanie primeneniya ekzoskeleta "Ekzoatlet" pri khod'be bol'nykh s posledstviyami ishemicheskogo insulta [Clinical and biomechanical foundation of application of the exoskeleton exoatlet at walking of patients with poststroke disturbances]. *Rossiyski Zhurnal Biomehaniki [Russian Journal of Biomechanics]*. 2019. V. 23. № 2. P. 168 (in Russian).
- Frolov A.A., Aleksandrov A.V. Kontseptsiya "Estestvennykh sinergii" kak razvitiye predstavlenii na Bernshhteina o dvigatel'nykh sinergiyakh [The concept of "Natural synergies" as a development of Bernstein's ideas about motor synergies]. *Idei NA Bernshhteina v nashi dni [Ideas on Bernstein today]*. 2019 P. 126–147 (in Russian).
- Afschrift M., Jonkers I., De Schutter J., De Groote F. Mechanical effort predicts the selection of ankle over hip strategies in nonstepping postural responses. *Journal of Neurophysiology*. 2016. V. 116 (4). P. 1937–1945. <https://doi.org/10.1152/jn.00127.2016>
- Armstrong D.M. The supraspinal control of mammalian locomotion. *J. Physiol*. 1988. V. 405. P. 1–37.
- Boudreau S.A., Farina D., Falla D. The role of motor learning and neuroplasticity in designing rehabilitation approaches for musculoskeletal pain disorders. *Man Ther*. 2010. V. 15 (5). P. 410–414. <https://doi.org/10.1016/j.math.2010.05.008>. Epub 2010 Jul 7. PMID: 20615749.
- Buch E., Weber C., Cohen L.G., Braun C., Dimyan M.A., Ard T., Mellinger J., Caria A., Soekadar S.R., Fourkas A., Birbaumer N. Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic. *Stroke*. 2008. V. 39. P. 910–917.
- Calabrò R.S., Naro A., Russo M. Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial. *J. Neuro. Engineering Rehabil*. 2018. V. 15 (1). P. 35–40. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0377-8>
- Casas J., Senft E., Gutiérrez L.F., Rincón-Rocancio M., Múnera M., Belpaeme T., Cifuentes C. A. Social Assistive Robots: Assessing the Impact of a Training Assistant Robot in Cardiac Rehabilitation. *Intern. J. Soc. Robotics*. 2020. P. 1–15.
- Collins S.H., Wiggin M.B., Sawicki G.S. Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton. *Nature*. 2015. V. 522 (7555). P. 212–215. <https://doi.org/10.1038/nature14288>
- Day J.J., Cheng R., Rogers J., Litinas K., Hrovat K., Dohring M. Feasibility of a new application of noninvasive brain computer interface (BCI): a case study of training for recovery of volitional motor control after stroke. *J. Neurologic. Physical. Therapy*. 2014. V. 33. P. 203–211.
- Farkhatdinov I., Ebert J., van Oort G., Vlutters M., van Asseldonk E. Assisting human balance in standing with a robotic exoskeleton. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. V. 4 (2). P. 414–421. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2890671>. hal-02045870
- Fasola J., Vouga T., Baud R., Bleuler H., Bourri M. Balance Control Strategies during Standing in a Locked-Ankle Passive Exoskeleton. *IEEE 16th Intern. Conf. Rehabil. Robotics (ICORR)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/icorr.2019.8779500>
- Ganesh G., Haruno M., Kawato M., Burdet E. Motor memory and local minimization of error and effort, not global optimization, determine motor behavior. *J. Neurophysiol*. 2010. V. 104 (1). P. 382–390.
- Gao Y., Cronin N.J., Pesola A.J., Finni T. Muscle activity patterns and spinal shrinkage in office workers using a sit-stand workstation versus a sit workstation. *Ergonomics*. 2016. V. 59 (10). P. 1267–1274. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1139750>
- Gottlieb G.L., Corcos D.M., Agarwal G.C. Strategies for the control of voluntary movements with one mechanical degree of freedom. *Behav Brain Sci*. 1989. V. 12 (2). P. 189–250. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00048238>.
- Hassan M., Kadone H., Ueno T., Hada Y., Sankai Y., Suzuki K. Feasibility of synergy-based exoskeleton robot control in hemiplegia. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng*. 2018. V. 26 (6). P. 1233–1242. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2832657>
- Howard J., Murashov V.V., Lowe B.D., Lu M.L. Industrial exoskeletons: Need for intervention effectiveness research. *Am. J. Ind. Med*. 2020. V. 63 (3). P.201–208. <https://doi.org/10.1002/ajim.23080>.
- Hulliger M., Dürmüller N., Prochazka A., Trend P. Flexible fusimotor control of muscle spindle feedback during a variety of natural movements. *Prog Brain Res*. 1989. V. 80 P. 87–101.

- Inoue T., Kato Y., Ozawa J. Prediction sit-to-stand movement using trunk angle and lower limb EMG for assist system. *IEEE Intern. Conf. Consumer Electron. (ICCE)*. 2017. P. 143–144.
- Jackson R.W., Dembia C.L., Delp S.L., Collins S.H. Muscle-tendon mechanics explain unexpected effects of exoskeleton assistance on metabolic rate during walking. *J. Exp. Biol.* 2017. V. 220 (11). P. 2082–2095. <https://doi.org/10.1242/jeb.150011>
- Kaoru T. Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control. *J. Mov. Disord.* 2017. V. 10 (1). P. 1–17. <https://doi.org/10.14802/jmd.16062>
- Kim H., Park G., Shin J.H. Neuroplastic effects of end-effector robotic gait training for hemiparetic stroke: a randomised controlled trial. *Sci. Rep.* 2020. V. 10 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69367-3>
- Knaepen K., Mierau A., Swinnen E. Human-Robot Interaction: Does Robotic Guidance Force Affect Gait-Related Brain Dynamics during Robot-Assisted Treadmill Walking?. *PLoS One*. 2015. V. 10 (10):e0140626. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140626>
- Koyama S., Tanabe S., Otaka Y., Kato T., Furuzawa S., Tatemoto T., Saitoh E. Novel lateral transfer assist robot decreases the difficulty of transfer in post-stroke hemiparesis patients: a pilot study. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2020. P. 1–5.
- Lanza M.B., Balshaw T.G., Folland J.P. Do changes in neuromuscular activation contribute to the knee extensor angle-torque relationship? *Exper. Physiol.* 2017. V. 102 (8). P. 962–973. <https://doi.org/10.1113/ep086343>
- Latash M.L. Muscle coactivation: definitions, mechanisms, and functions. *J. Neurophysiol.* 2018. V. 120 (1). P. 88–104. <https://doi.org/10.1152/jn.00084.2018>
- Li J., Thakor N., Bezerianos A. Unilateral Exoskeleton Imposes Significantly Different Hemispherical Effect in Parietooccipital Region, but Not in Other Regions. *Sci Rep.* 2018. V. 8 (1). P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31828-1>
- Li Z., Liu H., Yin Z., Chen K. Muscle Synergy Alteration of Human During Walking With Lower Limb Exoskeleton. *Front Neurosci.* 2019. V. 12. P. 1050. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.01050>. PMID: 30760972; PMCID: PMC6361853
- Luger T., Seibt R., Cobb T. J., Rieger M. A., Steinhilber B., Influence of a passive lower-limb exoskeleton during simulated industrial work tasks on physical load, upper body posture, postural control and discomfort. *Applied Ergonomics*. 2019. V. 80. P. 152–160.
- Madinei S., Alemi M.M., Kim S., Srinivasan D., Nussbaum M.A. Biomechanical Evaluation of Passive Back-Support Exoskeletons in a Precision Manual Assembly Task: “Expected” Effects on Trunk Muscle Activity, Perceived Exertion, and Task Performance. *Hum Factors*. 2020. V. 62 (3). P. 441–457. <https://doi.org/10.1177/0018720819890966>
- Martinez A., Lawson B., Goldfarb M. A controller for guiding leg movement during overground walking with a lower limb exoskeleton. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017. V. 34 (1). P. 183–193.
- Morasso P.G., Sanguineti V. Ankle muscle stiffness alone cannot stabilize balance during quiet standing. *J. Neurophysiol.* 2002. V. 88 (4). P. 2157–2162.
- Mori S., Matsuyama K., Mori F., Nakajima K. Supraspinal sites that induce locomotion in the vertebrate central nervous system. *Adv. Neurol.* 2001. V. 87. P. 25–40.
- Nakanishi Y., Wada F., Saeki S., Hachisuka K. Rapid changes in arousal states of healthy volunteers during robot-assisted gait training: a quantitative time-series electroencephalography study. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2014. V. 11 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-59> 1743-0003-11-59
- Noguchi M., Glinka M., Mayberry G.R. Are hybrid sit-stand postures a good compromise between sitting and standing? *Ergonomics*. 2019. V. 62(6). P. 811–822. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1577496>
- Nuckols R.W., Sawicki G.S. Impact of elastic ankle exoskeleton stiffness on neuromechanics and energetics of human walking across multiple speeds. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2020a. Preprint available at 10.21203/rs.2.20510/v1
- Nuckols R.W., Dick T.J.M., Beck O.N., Sawicki G.S. Ultrasound imaging links soleus muscle neuromechanics and energetics during human walking with elastic ankle exoskeletons. *Sci Rep.* 2020b. V. 10 (1). P. 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60360-4>
- Nuckols R.W., Takahashi K.Z., Farris D.J., Mizrachi S., Riemer R., Sawicki G.S. Mechanics of walking and running up and downhill: A joint-level perspective to guide design of lower-limb exoskeletons. *PLoS One*. 2020c. V. 15 (8): e0231996. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231996>
- Peterka R.J. Sensory integration for human balance control. *Handbook of clinical neurology. Elsevier*. 2018. V. 159. P. 27–42.
- Pirondini E., Coscia M., Marcheschi S. Evaluation of the effects of the Arm Light Exoskeleton on movement execution and muscle activities: a pilot study on healthy subjects. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2016. V. 13 (1). P. 9–15. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0117-x>
- Prasad G., Herman P., Coyle D., McDonough S., Crosbie J. Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study. *J. Neuro.Engin. Rehabilitat.* 2010. V. 7 (1). P. 60–68.
- Proietti T., Guigon E., Roby-Brami A., Jarrassé N. Modifying upper-limb inter-joint coordination in healthy subjects by training with a robotic exoskeleton. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2017. V. 14 (1). P. 55–60. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0254-x>
- Robertson B.D., Vadakkevedu S., Sawicki G.S. A bench-top biorobotic platform for in vitro observation of muscle-tendon dynamics with parallel mechanical assistance from an elastic exoskeleton. *J. Biomech.* 2017. V. 57. P. 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.03.009>
- Rong W., Li W., Pang M., Hu J., Wei X., Yang B., Wai H., Zheng X., Hu X. A Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) and robot hybrid system for multi-joint coordinated upper limb rehabilitation after stroke.

- J. Neuroeng. Rehabil.* 2017. V. 14 (1). P. 34–40.
<https://doi.org/10.1186/s12984-017-0245-y>
- Rowley K.M., Engel T., Kulig K. Trunk and hip muscle activity during the Balance-Dexterity task in persons with and without recurrent low back pain. *J. Electromyography and Kinesiology*. 2020. V. 50. P. 102378.
- Saleh S., Fluet G., Qiu Q., Merians A., Adamovich S.V., Tunik E. Neural patterns of reorganization after intensive robot-assisted virtual reality therapy and repetitive task practice in patients with chronic stroke. *Front. Neurol.* 2017. V. 8. P. 452–458.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00452>
- Schmalz T., Schändlinger J., Schuler M. Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. V. 16 (23). P. 4792.
- Shik M.L., Orlovsky G.N. Neurophysiology of locomotor automatism. *Physiol.* 1976. V. 56 (3). P. 465–501.
- Shindo K. Effects of neurofeedback training with an electroencephalogram-based brain-computer interface for hand paralysis in patients with chronic stroke: a preliminary case series study. *J. Rehabilitation Medicine*. 2011. V. 43 (10). P. 951–957.
- Stetter B.J., Ringhof S., Krafft F.C., Sell S., Stein T. Estimation of Knee Joint Forces in Sport Movements Using Wearable Sensors and Machine Learning. *Sensors*. 2019. V. 19 (17). P. 3690.
- Surgent O.J., Dadalko O.I., Pickett K.A., Travers B.G. Balance and the brain: A review of structural brain correlates of postural balance and balance training in humans. *Gait Posture*. 2019. V. 71. P. 245–252.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.05.011>
- Takakusaki K. Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control. *J. Mov Disord.* 2017. V. 10 (1). P. 1–17.
<https://doi.org/10.14802/jmd.16062>
- Takakusaki K., Chiba R., Nozu, T., Okumura T. Brainstem control of locomotion and muscle tone with special reference to the role of the mesopontine tegmentum and medullary reticulospinal systems. *J. Neural. Transmission*. 2016. V. 123 (7). P. 695–729.
- Theurel J., Desbrosses K., Roux T., Savescu A. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*. 2018. V. 67. P. 211–217.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.10.008>
- Thibault R.T., Raz A. Imaging Posture Veils Neural Signals. *Front Hum Neurosci*. 2016. V. 10. P. 520–525.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00520>
- Tucker M.R., Olivier J., Pagel A., Bleuler H., Bouri M., Lambercy O., Gassert R. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review. *J. Neuroengin. Rehabil.* 2015. V. 12 (1). P. 1–10.
- Veneman J.F., Seyfarth A., Barralon P. Evaluating postural balance performance in exoskeleton robots. 2013.
- Yang N., Zhang M., Huang C., Jin D. Synergic analysis of upper limb target-reaching movements. *J. Biomech.* 2002. V. 35 (6). P. 739–746.
- Zonnino A., Farrens A.J., Ress D., Sergi F. StretchfMRI: a new technique to quantify the contribution of the reticular formation to long-latency responses via fMRI. *IEEE*. 2019. P. 1247–1253.
<https://doi.org/10.1101/582692>
- Wang W., Li R., Diekel Z.M., Chen Y., Zhang Z., Jia Y. Controlling object hand-over in human–robot collaboration via natural wearable sensing. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2018. V. 49 (1). P. 59–71.