

Принципы построения интеллектуальных программно-аппаратных ассистентов двигательной активности человека

Principles of constructing intelligent software and hardware assistants for human motion activity

Стариков С.М., Улыбин В.В., Улыбина Л.В.

Стариков Сергей Михайлович / Starikov Sergey Mihailovich - кандидат медицинских наук, доцент, кафедра медицинской реабилитации и физических методов лечения МИНО ФГБУ ВО МГУПП, врач - невролог высшей категории, президент, НКО Национальная ассоциации физической терапии, лечебной физкультуры, физической реабилитации и кинезиологии, г. Москва

Улыбин Виталий Вячеславович / Ulybin Vitaliy Viacheslavovich - магистр техники и технологии по направлению “Приборостроение”, научный руководитель, компания по разработке промышленного программного обеспечения ООО “Russian IT Group”, технический директор, малое инновационное предприятие ООО “Muscles.AI”, г. Ульяновск

Улыбина Людмила Владимировна / Ulybina Ludmila Vladimirovna - магистр социальной работы по направлению “ Социальная работа”, генеральный директор, малое инновационное предприятие ООО “Muscles.AI”, г. Ульяновск

Аннотация: актуальность выбранной темы обусловлена широкой распространенностью нарушений и заболеваний опорно-двигательного аппарата тела человека и различного рода социально-экономическими барьерами для своевременной диагностики и профилактики, а также проблемой низкой приверженности пациентов протоколам двигательной реабилитации. В представленной статье рассматриваются научно-методологические концептуальные основы разработки программно-аппаратного комплекса для автоматизации задачи диагностики, профилактики и реабилитации нарушений опорно-двигательного аппарата тела человека. Работа носит междисциплинарный характер и строится на основе исследований в области физиологии, биомеханики, приборостроения, математического моделирования и машинного обучения.

Abstract: The relevance of the chosen topic is due to the widespread prevalence of disorders and diseases of the musculoskeletal system of the human body and various socio-economic barriers for it timely diagnosis and prevention, as well as the problem of low adherence of patients to the protocol of motor rehabilitation. The presented article examines the scientific and methodological conceptual foundations for the development of a software and hardware complex for automating the problem of diagnostics, prevention and rehabilitation of disorders of the musculoskeletal system of the human body. The work is

interdisciplinary in nature and is based on research in the field of physiology, biomechanics, instrumentation, mathematical modeling and machine learning.

Ключевые слова: нарушения опорно-двигательного аппарата, биомеханика движений тела человека, математическое моделирование биомеханики тела человека, машинное распознавание движений тела человека, синтез сверточно-рекуррентных нейронных сетей, рекуррентные нейронные сети, распознавание человеческой деятельности, анализ мышечной активности, анализ физической активности

Keywords: disorders of the musculoskeletal system, biomechanics of human body movements, mathematical modeling of biomechanics of the human body, machine recognition of human body movements, synthesis of convolutional-recurrent neural networks, recurrent neural networks, recognition of human activity, analysis of muscle activity, analysis of physical activity

По данным ВОЗ [1] от 20 до 33% людей в мире в период от подросткового до пожилого возраста страдают заболеваниями опорно-двигательного аппарата, это первая причина инвалидности в мире.

Только в России за 2011 год практикой государственных поликлиник РФ было зарегистрировано 11 762 тыс. случаев болевых синдромов и воспалений мышечных тканей в результате мышечных асимметрий [2].

Можно выделить двенадцать основных причин возникновения мышечных асимметрий:

1. Травматические повреждения
2. Чрезмерные физические нагрузки
3. Малоподвижный образ жизни
4. Постинсультные двигательные нарушения
5. Дегенеративно - дистрофические заболевания суставов и позвоночника (остеохондроз, артроз, остеопороз и др.)
6. Перенесенные заболевания инфекционного характера
7. Ожирение
8. Идиопатические и врожденные заболевания (нарушения развития костей и суставов, сколиоз, разная длина конечностей)
9. Общая интоксикация организма
10. Заболевания психосоматического характера
11. Нейромышечные заболевания (сирингомиелия и др.)

При этом более 90% всех случаев нарушений приходится на первые пять групп основных причин нарушений.

Очень большой экономический урон наносит так называемая “сидячая болезнь” или “офисный синдром”. Минздрав США посчитал: 11 часов в день в позе сидя - причина 20% смертей до 35 лет и 24 млрд. долларов прямых медицинских расходов (статистика приведена только по жителям США) [4].

1. Предлагаемое решение

Для работы с описанной выше проблемой необходимо выполнять:

- оценку состояния мышечных асимметрий;
- предоставление программы физиотерапевтического тренинга для коррекции асимметрий;
- контроль техники выполнения физиотерапевтического тренинга для коррекции асимметрий;

Обычно три вышеуказанных этапа разнесены по времени и пространству, требуют участия разных специалистов, дорогостоящего лабораторного оборудования, времени на обработку данных и согласования графика клиента с графиками специалистов и загрузки оборудования.

В данной статье рассматривается разработка технологии построения интеллектуального программно-аппаратного ассистента (ИПАА), которая позволит автоматизированно выполнять все этапы реабилитационного процесса в реальном масштабе времени вне зависимости от географического нахождения клиента.

Использование ИПАА позволит осуществлять индивидуализацию реабилитационных программ и постоянного функционального мониторинга клиента, что позволит дифференцированно подбирать лечебные мероприятия с учетом функциональных и структурных асимметрий.

В качестве сенсорной системы предлагается использовать сеть инерциальных измерительных блоков (IMU), включающих в себя акселерометры, гироскопы и магнитометры с тремя степенями свободы.

Программное обеспечение для функционирования ИПАА представляет собой информационный комплекс, состоящий из цифрового ядра, располагающегося на сервере; нейропроцессора, измерительного модуля, модуля принятия решений и модуля обратной связи, размещенных в приборной части; а также мобильного приложения.

Функционально распознавание движений, диагностика состояния мышц и выработка персонализированных рекомендаций по коррекции выявленных нарушений посредством программы тренировок строится на основе алгоритмов глубокого машинного обучения, предобученных на массиве биомеханических данных.

Технологически система управления тренировкой включает два типа нейронных сетей. Первый тип: базовые нейронные сети - обучаются под программы тренировки и представляют собой носитель эталонного знания. Второй тип: персонализированные нейросетевые модели на базе обучения с подкреплением, которые включают человека в обратный контур системы машинного обучения, что позволяет системе адаптироваться под психофизиологические особенности конкретного человека.

За счет множественности таких моделей достигается композиционное покрытие всего спектра контролируемых параметров и сводится до минимума ошибка работы системы, повышая общий уровень эффективности и безопасности тренировочного процесса.

С точки зрения задачи машинного распознавания, двигательную активность человека можно разделить на три больших класса: периодические движения, такие как ходьба и езда на велосипеде; статические движения, такие как сидение и стояние неподвижно; спорадические движения, такие как целенаправленные жесты (например, питье из чашки, уборка помещения). Решение задачи распознавания активности должно проводиться для наборов данных, включающих различные виды деятельности. Кроме того, действия человека часто встроены в большой нулевой класс (нулевой класс соответствует промежуткам времени, которые не охватывают “интересные” для анализа действия и могут рассматриваться как систематический шум). Распознавание действий, встроенных в нулевой класс, как правило, является более сложным, поскольку система распознавания должна неявно идентифицировать начальную и конечную точки данных, содержащих жест, а затем классифицировать их. Таким образом область исследований по машинному распознаванию двигательной активности человека является малоизученной и обладает высоким исследовательским потенциалом.

Математически данную проблему можно переформулировать как решение задачи подбора гиперпараметров модели машинного обучения и синтеза нейросетевых вычислителей для построения модуля принятия решений и выработке управляющих сигналов ИПАА.

Обеспечение функционирования измерительного комплекса интеллектуального костюма также содержит в себе разработку двух новаций. Первая из новаций — это автоматический подбор релевантных признаков каждого отдельного движения по выборке многократных повторений

движений. Движение человека имеют стохастическую природу и обусловлены индивидуальными характеристиками, такими как возраст, пол, вес и т.д. Задача оптимального выбора значимых признаков, характеризующих определенный тип движения, является нетривиальной. Данная задача может быть решена путем разработки соответствующих алгоритмов машинного обучения.

Вторая новация измерительного комплекса интеллектуального костюма состоит в решении задачи корректного анализа движений для различных значений временных интервалов их выполнения (обеспечение темпоральной индифферентности). Традиционно задача оценки корректности движений решается путем анализа признаков, полученных эвристическим путем. В настоящее время для автоматизации анализа признаков большинством исследователей используются сверточные нейронные сети. При этом измерительные сигналы развернуты во временной области, в результате чего одно и то же движение, выполненное с разной скоростью, может быть классифицированной сверточной нейронной сетью как различное. Для решения данной задачи необходимо явно моделировать временную динамику изменения измерительных сигналов, участвующих в формировании соответствующих признаков движения.

Учет временной динамики для обеспечения темпоральной индифферентности может быть реализована путем построения рекуррентной нейронной сети с LSTM-узлами. Решение задачи выделения движений в рамках нулевого класса может быть решена путем реализации последовательного сдвига темпорального окна модуля распознавания и классификации.

2. Нейрокибернетическая модель контроля двигательной активности человека.

Контроль двигательной активности человека относится к основным функциям нервной системы. При рассмотрении нервной системы как системы управления движениями человека принято представлять ее в виде сложного функционального звена преобразования сенсорных сигналов в управляющие сигналы, передаваемые гладким и скелетным мышцам человека.

Ограниченность вычислительной мощности центральной нервной системы (ЦНС) приводит к тому, что мозг вынужден преобразовывать сложные пространственные движения в *кинематические цепи*, представляющие собой многоэлементные программы, построенные из атомарных двигательных паттернов.

В соответствии с [3] в модели управления движением можно выделить два основных уровня:

1) Нижний уровень образован нервной сетью спинного мозга с ее главными выходными элементами – нижними мотонейронами. Эти мотонейроны – единственные нервные клетки, имеющие непосредственные синаптические соединения с исполнительной мышечной системой.

2) Верхний уровень охватывает многие надспинномозговые нервные структуры. На уровне спинного мозга осуществляется двойное управление: периферийное и центральное. Оба вида непосредственно влияют на нижние мотонейроны либо на сеть интернейронов и, в конечном счете, оказывают воздействие на конкретные мышечные комплексы.

3. Нейрокибернетическая модель ИПАА

В процессе накопления новых двигательных навыков многократное повторение запланированного движения позволяет закодировать в мозге требуемый образ мышечной активности вместе с соответствующим ему сенсорным образом. Благодаря такому подходу впоследствии можно выполнить требуемую двигательную программу без оперативной обработки обратной чувствительной информации. При этом, принцип использования при выполнении двигательной программы образа мышечного возбуждения и афферентного образа отнюдь не исключает сенсорного управления для текущего контроля траектории движения. В циклических движениях, таких как перемещение, поступающие в мотонейроны чувственные сигналы эффективно используются на последующих шагах. Фактически, это простое управление в открытой системе, т.е. управление движением сводится к каскаду преобразований управляющих программ в движение (рис.1).

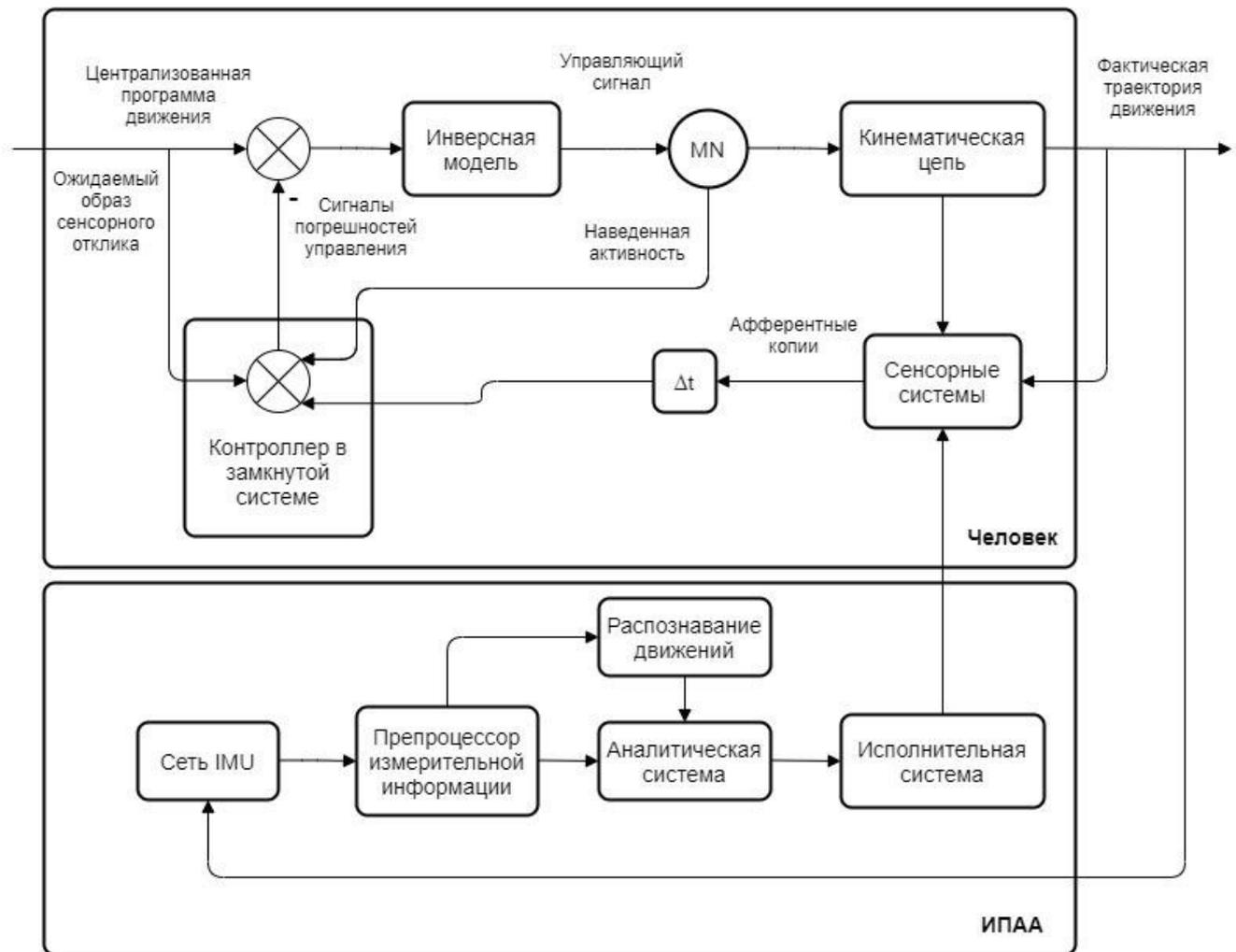


Рис.1 Организация нейронального контроля траектории движения с включенным ИПАА в обратную связь сенсорной системы.

Возбуждение мононейронов MN вызывает последующую активность, образ которой сравнивается с эфферентной копией реализуемой программы. В свою очередь, выполнение движения сопровождается возбуждением сенсорных систем, формирующих афферентную копию, которая с задержкой Δt_n сравнивается с афферентным образом реализуемой двигательной программы. Получаемая разность выступает в качестве погрешности управления, позволяющей корректировать траекторию движения.

Архитектура сети позволяет одновременно обучать несколько инверсных моделей, необходимых для управления, а также выбирать подмножество инверсных моделей релевантных окружающей среде. Благодаря такому комбинированному подходу контроллеры могут выбрать необходимую программу до начала движения, а в ходе его выполнения адаптировать программу к возникающим помехам, обусловленным контекстом окружающей среды.

4. Программно-аппаратная реализация ИПАА

В качестве IMU используется микросхема BMX055. Каждый IMU состоит из 3D-акселерометра, 3D-гироскопа и 3D-магнитного датчика, предоставляющего многомодальную сенсорную информацию. Каждая ось датчика обрабатывается как отдельный канал, в результате чего вводится пространство размерностью 108 каналов. Частота дискретизации этих датчиков составляет 50 Гц.

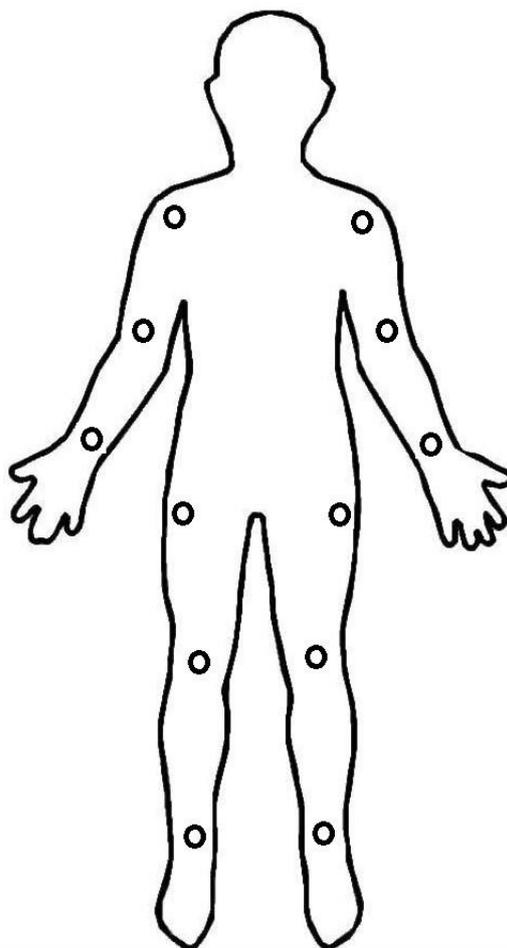


Рис.2 Схема размещения интегральных инерциальных измерительных модулей

В качестве аналитической системы используется нейронная сеть реализованы в TensorFlow с использованием, библиотеки с открытым исходным кодом для построения и обучения нейронных сетей. Обучение и классификация модели выполняются на GPU ASUS GeForce 1080 OC ROG Stix с 2560 ядрами, тактовой частотой 1733 МГц и 8 ГБ оперативной памяти.

В настоящее время система показала точность определения физической активности человека 86,46% на 19 классах двигательным программ.

Учитывая высокую актуальность исследования представляется необходимым его продолжение для накопления данных о движениях людей с различными антропометрическими параметрами, разной степенью развития физических качеств и выраженностью двигательных дисфункций.

Литература

1. Заболевания опорно-двигательного аппарата / Всемирная организация здравоохранения.
<https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>
2. Каратеев А.Е., Каратеев Д.Е., Орлова Е.С., Ермакова Ю.А. «Малая» ревматология: несистемная ревматическая патология околоуставных мягких тканей верхней конечности. Часть 1. / Современная ревматология №2, 2015, с.4-15.
3. Основы нейрокибернетики / Под. Редакцией профессора Рышарда Тадеусевича; пер. с польск. – М.: Горячая линия-Телеком, 2018 – 372 с.
4. Sitting disease is taking a toll on your body / LifeSpan, April, 2016. <https://www.lifespanfitness.com/workplace/resources/articles/sitting-all-day-is-taking-a-toll-on-your-body>