

УДК 004.93

Болтенков В.А. к.т.н., Нгуєн Гуї Кіонг

Одесский национальный политехнический университет

## АРХИТЕКТУРА КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

**Болтъонков В.А., Нгуєн Гуї Кіонг. Архітектура комп'ютерної системи дистанційної рухової реабілітації.**

Розроблено архітектуру комп'ютерної реалізації системи дистанційної рухової реабілітації. Система заснована на кількісному порівнянні навчальних рухів лікаря-інструктора та віддаленого пацієнта. Для зменшення витрат на обладнання та можливості функціонування системи в реальному масштабі часу застосована клієнт-серверна архітектура. Реалізовано і випробувано дослідний зразок системи. Застосовано прогресивні програмні технології, що прискорюють швидкодію системи та економлять комп'ютерні ресурси.

**Ключові слова:** телемедицина, дистанційна рухова реабілітація, обробка відеопотоків, клієнт-серверна архітектура, бази даних.

**Болтенков В.А., Нгуєн Гуї Кіонг. Архитектура компьютерной системы дистанционной двигательной реабилитации.** Разработана архитектура компьютерной реализации системы дистанционной двигательной реабилитации. Система основана на количественном сравнении обучающих движений врача-инструктора и удаленного пациента. Для уменьшения затрат на оборудование и возможности функционирования системы в реальном масштабе времени применена клиент-серверная архитектура. Реализован и испытан опытный образец системы. Применены прогрессивные программные технологии, ускоряющие быстрдействие системы и экономящие компьютерные ресурсы.

**Ключевые слова:** телемедицина, дистанционное двигательная реабилитация, обработка видеопотоков, клиент-серверная архитектура, базы данных.

**Boltenkov V.A., Nguyen Huy Cuong. The architecture of a computer system for remote motor rehabilitation.**

The architecture of the remote motor rehabilitation computer implementation has been developed. The system is based on a quantitative comparison of training movements of the doctor-instructor and remote patient. The client-server architecture has been employed to enable the functioning of the system in real time and to reduce the cost of equipment. A system prototype has been implemented and tested. The advanced software technologies were applied to accelerate system performance and saving computer resources.

**Keywords:** telemedicine, distance motor rehabilitation, video stream processing, client-server architecture, database.

**Постановка научной проблемы.** В условиях кризисного финансирования социальных и, в частности, медицинских программ особо важную роль приобретает телемедицина – дистанционное оказание консультативных, лечебных и иных услуг пациентам с использованием телекоммуникационных и информационных технологий. Телемедицина позволяет в условиях интегрированного информационного пространства эффективно использовать интеллектуальный потенциал и клинический опыт высококлассных специалистов с минимальными затратами [1, 2]. Одной из эффективных отраслей современной телемедицины является дистанционная двигательная реабилитация (ДДР) пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата, центральной нервной системы, детским церебральным параличом. ДДР построена на удаленной демонстрации пациенту врачом-инструктором комплекса двигательных упражнений, повторении его пациентом и корректирующих рекомендации врача пациенту по правильному выполнению движений [3]. Большинство систем ДДР, действующих в настоящее время предполагают online взаимодействие обеих сторон лечебного процесса – врача и пациента [4]. Такая организация ДДР не является оптимальной по удобству пользования как для специалиста, так и для больного. Наилучшим вариантом построения подобной системы является разделенная во времени система ДДР: врач-инструктор на основании истории болезни больного назначает и демонстрирует ему комплекс двигательных упражнений и отправляет видеоинструкцию на хранение в базу данных, пациент в удобное для него время извлекает видеоинструкцию, изучает ее, выполняет комплекс упражнений и получает корректирующие рекомендации в реальном масштабе времени. Для такой системы ДДР рекомендации пациенту выдает программное средство, объективно оценивающее разницу движений пациента и обучающего движения врача-инструктора. По окончании выполнения упражнения пациентом видеоотчет отправляется на хранение в базу данных, откуда врач может извлечь ее в удобное время для анализа и коррекции программы дальнейшего лечения. Такие компьютерные системы ДДР пока существуют в единичных экземплярах в виде экспериментальных образцов с ограниченными возможностями (в частности, реабилитация двигательной активности кистей рук после сосудистых катастроф) [5]. Таким образом, создание принципов построения компьютерных систем ДДР с широкими возможностями и разделенным во

времени доступом врача и пациента и их практическая реализация является актуальной научной и практической задачей.

Системы ДДР, применяемые сегодня и позволяющие количественно оценить качество выполняемых пациентом движений, основаны на технологиях Microsoft Kinect с применением трехмерной видеокамеры с датчиком глубины и специализированного программного обеспечения. Kinect системы ДДР позволяют строить траектории движения частей тела пациента и оценивать параметры движения, однако являются достаточно затратными и недоступными рядовому потребителю [6, 7]. Большинство отечественных пациентов – потенциальных пользователей систем ДДР – располагают бюджетным домашним компьютером с ограниченным вычислительным ресурсом и бытовой веб-камерой. Поэтому **целью исследования** является разработка принципов построения системы дистанционной двигательной реабилитации, ориентированной на применение бытового компьютера со бесплатным программным обеспечением, обеспечивающей несинхронную работу врача и пациента и автоматически выдающей корректирующие рекомендации пациенту в реальном масштабе времени, а также практическая реализация такой системы.

**Изложение основного материала и обоснование полученных результатов исследования.** В работах авторов [8, 9] были представлены основные принципы и алгоритмы функционирования системы ДДР. Изложим их в виде краткой последовательности. Врач-инструктор выполняет обучающее упражнение, которое регистрируется веб-камерой в виде видеопотока в стандартном формате. Обучающий видеопоток поступает на систему обработки, которая делится на внутрикадровую и межкадровую. В рамках внутрикадровой обработки для каждого кадра производится:

- вычитание фона и представление тела человека в виде бинарной фигуры,
- построение скелета бинарной фигуры (скелетизация),
- выделение характерных точек скелета на основании предложенной 16-точечной модели движения тела человека [9] .

В рамках межкадровой обработки для фрагментов видеопотока длиной 25-100 кадров производится расчет кинематических параметров характерных точек тела - координат и траекторий, тангенциальной скорости и тангенциального ускорения. На основании расчета формируется матрица кинематических параметров обучающего движения.

Во время повторения движения пациентом для его движения производится такая же обработка. Далее для двух матриц движения рассчитываются количественные меры подобия – для координат характерных точек – чебышевская мера, для скоростей и ускорений – косинусная мера близости соответствующих векторов. Если рассчитанные меры подобия укладываются в выбранные экспериментально пороги, движение пациента считается повторенным правильно. В противном случае – программно вырабатывается корректирующая команда пациенту в естественном понятном виде: например, "правый локоть – выше", "левая рука – быстрее", "наклон головы – резче".

Исследования, проведенные при программной реализации системы на компьютерах среднего экономичного ресурса показали, что многие из перечисленных выше операций обработки достаточно ресурсоемки (скелетизация фигуры, расчет кинематических параметров) и не позволяют организовать функционирование системы с коррекцией движений пациента в реальном времени [8]. Поэтому система ДДР была выполнена в виде веб-приложения в клиент-серверной архитектуре с использованием облачного сервера высокой производительности. Общая архитектура системы ДДР представлена на рис.1. В архитектуре две "тонкие" клиентские части – "Врач-инструктор" и "Пациент", использующие экономичные платформы. Серверная часть состоит из четырех компонентов: веб-сервер, сервер базы данных (БД), где размещается общая БД системы, сервер файлов, где хранятся все видеозаписи движений, выполненных клиентами и сервер приложений, на котором выполняется обработка видеопотоков.

Веб-сервер и сервер БД выполнены как единый веб-сервер сервер управления LAMP. Для управления пользователями (пациентом, врачом) и управления упражнениями использована технология Open Source CMS Wordpress, выполненная на PHP. Сервер приложений обрабатывает видеопотоки и вырабатывает рекомендации пациенту. Он выполнен на C++ с использованием библиотек Boost и OpenCV. Обмен видеопотоками осуществляется с использованием протокола WebSocket, который заметно облегчает нагрузку на веб-сервер. Кроме того, для ускорения обмена видеопотоками видеофайлы перекодируются в формат Base64 и сжимаются, так что передача их осуществляется как в формате сжатых строк.

Рассмотрим организацию БД системы. СУБД выбиралась из требований: поддержка языков PHP и C/C++, выполнение базовых запросов (INSERT, SELECT, UPDATE, DELETE) с высокой

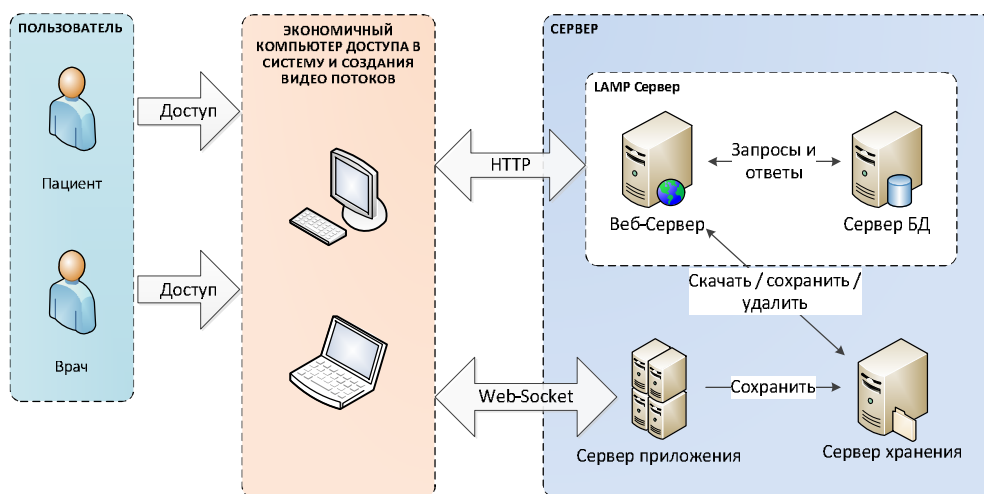


Рис.1. Общая архитектура системы дистанционной двигательной реабилитации

скоростью, легкое расширение, возможность сохранения и скачивания как локальных, так и удаленных данных. С этой точки зрения была выбрана СУБД MySQL Community Server. MySQL Community Server является самой популярной СУБД с открытым кодом и имеет на рынке пользователей СУБД самый высокий рейтинг. Кроме того MySQL Community Server позволяет поддерживать примененный нами WordPress — популярную и удобную программу для управления контентом (CMS). Упрощенная структура БД системы ДДР представлена на рис.2.

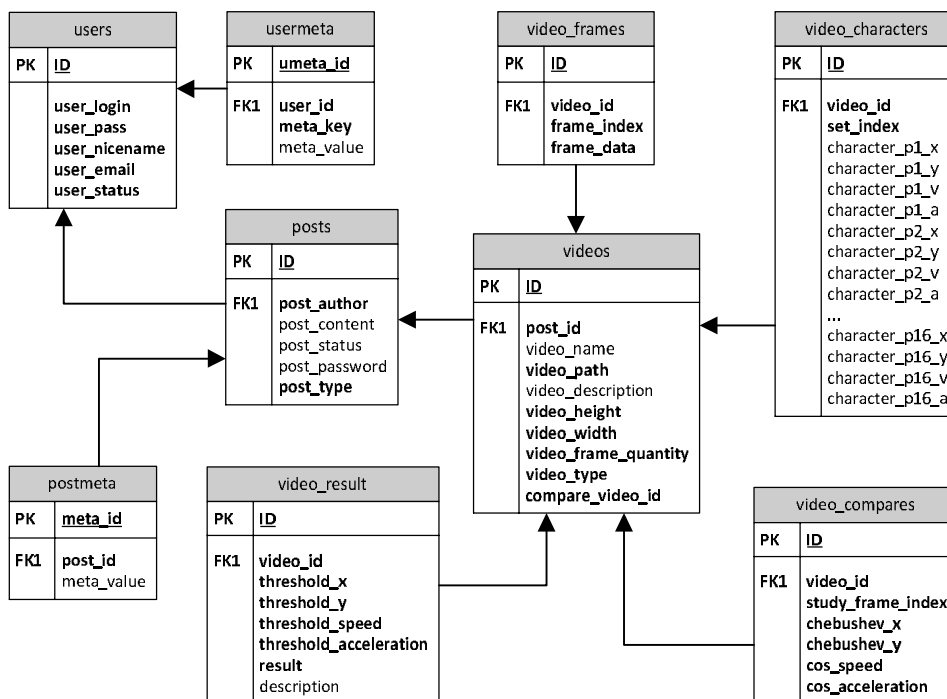


Рис.2. Структура БД системы дистанционной двигательной реабилитации

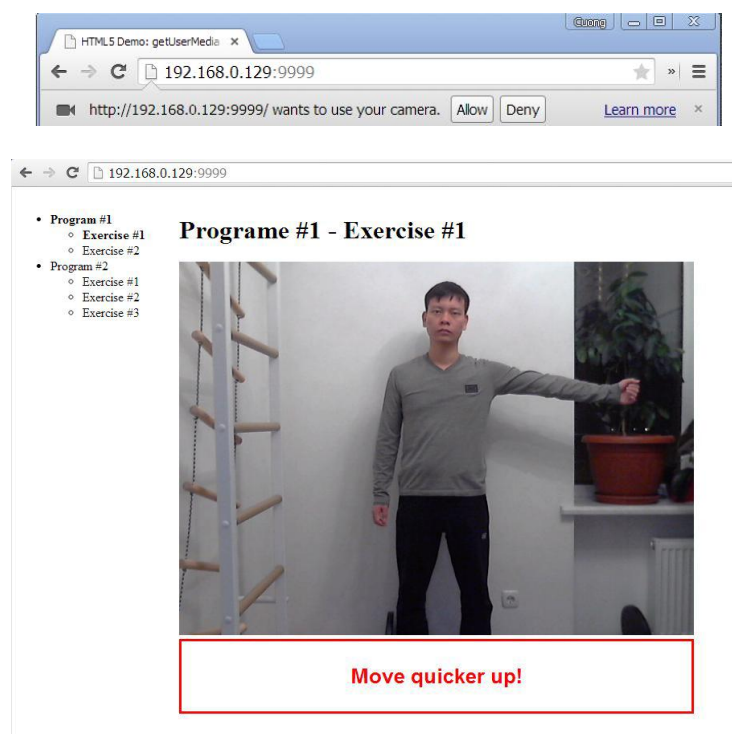
Основные таблицы БД:

- таблиця user содержит основную информацию о пользователе (логин, e-mail адрес, пароль для входа в систему, фамилия, имя, отчество, и статус пациента: активирован или нет),
- таблица usermeta содержит дополнительную информацию о пользователе (роль: врач или пациент, пол (м/ж), возраст, диагноз, рост, вес и т.д. эта таблица построена как модель Сущность-Атрибут-Значение (EAV model) [10], что позволяет легко расширять систему при появлении новых требований к ней,
- таблица posts – тема, создаваемая пользователем, каждый пользователь может создать тему для себя и других пользователей, содержанием которой могут быть комментарии, замечания или просто описание пациентом или врачом деталей выполнения какого-нибудь упражнения,
- таблица postmeta – содержит дополнительную информацию по теме,
- таблица videos – содержит информацию о каждой видеозаписи,
- таблица video\_frames – содержит данные о каждом кадре всех видеопотоков,
- таблица video\_characters – содержит результаты обработки каждого фрагмента видеопотока, соответствующего одному движению,
- таблица video\_results – содержит окончательные результаты обработки видеопотоков,
- таблица video\_compares содержит результаты сравнения кинематических параметров (координаты, скорость, ускорение) движения пациента и обучающего движения врача-инструктора по различным мерам подобия и рекомендации, выработанные программой для коррекции движений.

Организованная по изложенной архитектуре система ДДР была реализована в виде опытного образца и испытана на реальных двигательных видеоинструкциях врача и упражнениях, выполняемых пациентами. В качестве клиентской платформы врача-инструктора и пациента были использованы компьютеры с характеристиками CPU: Intel Hex-Core CPUs 2.5 GHz; RAM: 1 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Ubuntu 14.04x64 и бытовой камерой Logitech HD Webcam C310 с используемым разрешением 640\*480 пикселей.

Серверная часть с описанной выше архитектурой размещалась на экономичном облачном датацентре digitalocean.com (арендная плата 10 USD в месяц с возможностью легко модернизировать количество пользователей и их статус в любое время). Такое решение вопроса представляется более экономичным, чем установка специального достаточно мощного сервера в лечебном учреждении.

На рис.3 показаны экранная форма входного интерфейса пользователя и корректирующей рекомендации по результатам выполнения упражнения.



*Рис.3. Основные экранные формы системы*

Испытания системы на видеозаписях более 350 движений показали правильность работы системы как в части обмена данными, так и в части вынесения корректирующих рекомендаций пациенту. Описанная архитектура обеспечивает функционирование системы в реальном времени, пациент практически не ощущает задержки в обмене данными и поступлении корректирующих рекомендаций.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Изложенные выше результаты исследований позволяют сделать следующие выводы. Разработаны принципы построения и архитектура необходимой сегодняшнему отечественному здравоохранению системы дистанционной двигательной реабилитации пациентов. Система ориентирована на применение экономичных и доступных вычислительных ресурсов. Она обеспечивает возможность несинхронного доступа врача-инструктора и пациента. Система автоматически выдает корректирующие рекомендации больному при выполнении им двигательных упражнений. Система реализована практически в клиент-серверной архитектуре. Испытания системы показали правильность заложенных в ее проект решений и подтвердили работоспособность в реальном масштабе времени.

В качестве направления дальнейших практических исследований укажем поиск путей ускорения работы системы за счет совершенствования алгоритмов обработки кадров (в частности, алгоритма скелетизации) и улучшении алгоритма видео сжатия. Основным направлением перспективных исследований системы является предоставление возможности пользователям возможности входить в систему и работать с ней с любого устройства, браузер которого поддерживает html5, websocket и имеет камеру (планшет, фаблет, смартфон). Безусловно такая модернизация системы может потребовать серьезной доработки алгоритмов обработки видеопотоков в связи с необходимостью масштабирования изображений тела. Однако преимуществом такой модернизации являются большие удобства для пользователей (как врачей, так и пациентов). Отметим, что в изложенную архитектуру системы ДДР возможность такой модернизации уже заложена.

1. Назаренко Г. И. Медицинские информационные системы: теория и практика / Г. И. Назаренко, Я. И. Гулиев Д. Е. Ермаков – М. : Физматлит, 2005. – 320 с.
2. Кобринский Б.А. Медицинская информатика: учеб. для студ. высш. учеб.заведений / Б.А. Кобринский, Т.В. Зарубина – М.: Издат центр "Академия", 2009. – 192 с.
3. Holden M. K. Virtual Environments for Motor Rehabilitation: Review [Text] / Maureen K. Holden // Cyberpsychology & Behavior. – 2005. – Vol.8. – No.5. – P. 187-211.
4. Pawlik P. Visual Surveillance for Movement Rehabilitation [Text] / P. Pawlik , Z.Bublinski // Image Processing & Communication – 2012. – Vol. 17. – No. 4. – P. 173-178.
5. Metsis V. Computer Aided Rehabilitation for Patients with Rheumatoid Arthritis [Text] / Vangelis Metsis, Pat Jangyodsuk, Vassilis Athitsos, Maura Iversen, Fillia Makedon // International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) – San Diego, CA – 2013. – P.97-102.
6. Chang, Y.-J. A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities [Text] / Y.-J. Chang, S.-F. Chen, J.-D. Huang // Research in Developmental Disabilities. – 2011. – Vol. 32, Issue 6. – P. 2566–2570.
7. Kurakin, A. A real time system for dynamic hand gesture recognition with a depth sensor [Text] / A. Kurakin, Zhang, Z. Liu // EUSIPCO-2012: Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference, 2012. – P. 1975–1979.
8. Кіонг Н.Г. Принципи побудови комп'ютерних систем дистанційного тренування на основі аналізу відеопотоку [Текст] / Нгуєн Гуї Кіонг , В.О. Болтъонков , Д.В. Малявін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5/2 (71). – С. 25 – 33.
9. Болтенков В.А. Двумерная проективная модель движения тела человека и ее применение в задачах телемедицины [Текст] / В.А. Болтенков , Нгуєн Гуї Кіонг // Информатика и математические методы в моделировании. – 2014. – Том 4. – №4. – С. 312-323.
10. Архитектура базы данных EAV (Entity-Attribute-Value, Сущность-Атрибут-Значение) (2015) [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://gurumagento.varshevsky.com/struktura-bazy-dannyx-magento-znakomstvo-s-eav.htm>.