

УДК 004.9

Г. К. Нгуен

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

**Аннотация.** Разработана информационная технология дистанционной двигательной реабилитации пациентов. Технология основана на количественном сравнении кинематических параметров движения врача-инструктора и пациента, поступающих с веб-камер в виде видеопотока. Указания по коррекции движений пациента выдаются автоматически. Для доступности широкому кругу потребителей информационная технология ориентирована на применение экономичных компьютеров с бесплатным программным обеспечением. Информационная технология реализована практически в клиент-серверной архитектуре.

**Ключевые слова:** информационная технология, двигательная реабилитация, обработка видеопотоков, реальное время, клиент-серверная архитектура

Н. С. Nguyen

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR REMOTE MOTOR REHABILITATION

**Abstract.** The information technology for remote motor rehabilitation of patients was offered. The technology is based on a quantitative comparison of doctor-instructor's and patient's movements kinematic parameters. The movements are coming in from webcams in the form of a video stream. Instructions for correcting the patient's movement are issued automatically. IT is focused on the use of economy computers with free software for availability to a wide range of consumers. IT is implemented practically in a client-server architecture.

**Keywords:** information technology, motor rehabilitation, video stream processing, real-time, client-server architecture

Г. К. Нгуен

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ РУХОВОЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ

**Анотація.** Розроблено інформаційну технологію дистанційної рухової реабілітації пацієнтів. Технологія заснована на кількісному порівнянні кінематичних параметрів руху лікаря-інструктора і пацієнта, що надходять з веб-камер у вигляді відеопотоку. Вказівки по корекції рухів пацієнта видаються автоматично. Для доступності широкому колу споживачів ІТ орієнтована на застосування економічних комп'ютерів з безкоштовним програмним забезпеченням. ІТ реалізована практично в клієнт-серверній архітектурі.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, рухова реабілітація, обробка відеопотоків, реальний час, клієнт-серверна архітектура

**Введение.** Одной из отраслей современной медицинской информатики является телемедицина [1]. Телемедицина – дистанционное оказание консультативных, лечебных и иных услуг пациентам с использованием телекоммуникационных и информационных технологий [2]. Телемедицина позволяет в условиях интегрированного информационного пространства эффективно использовать интеллектуальный потенциал и клинический опыт высококлассных специалистов с минимальными затратами. Одной из эффективных отраслей современной телемедицины является дистанционная двигательная реабили-

тация (ДДР) пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата, центральной нервной системы, детским церебральным параличом, раненых с ранениями конечностей и позвоночника.

Двигательная реабилитация построена на:

- удаленной демонстрации пациенту по видеоканалу врачом-инструктором комплекса двигательных упражнений;
- многократном повторении пациентом движений;
- выработке и сообщении пациенту корректирующих рекомендаций по правильно-му выполнению движений [3; 4].

В условиях кризисного финансирования социальных и, в частности, медицинских

© Нгуен Г.К., 2015

программ системы ДДР приобретают особо важную роль. Они не требуют специального оборудования, повышают эффективность использования рабочего времени врача, удобны для пациентов с ограниченной подвижностью. В этом плане новые решения в области создания доступных систем ДДР достаточно актуальны и представляют научный и практический интерес.

#### Анализ литературных данных и постановка проблемы

Известные системы ДДР имеют ряд недостатков. Действие большинства известных из них основано на применении технологий Microsoft Kinect [5 – 6]. Исторически Kinect-технологии разрабатывались как игровые для задач виртуальной реальности. Они предполагают использование видеочамеры, комбинированной с инфракрасной матрицей датчиков глубины и специализированного программного обеспечения (ПО). Kinect системы с учетом стоимости ПО требуют мощного вычислительного ресурса, достаточно дороги и недоступны рядовому пользователю или бюджетному лечебному учреждению.

Большинство систем ДДР, действующих в настоящее время, предполагают взаимодействие обеих сторон лечебного процесса – врача и пациента в режиме online, т.е. врач занят в процессе лечения столько времени, сколько пациент выполняет упражнения. Такая организация системы неэкономична с точки зрения распределения рабочего времени врача [7].

Практически во всех системах ДДР, известных сегодня, качество повторения обучающего упражнения врач оценивает субъективно [7 – 8], опираясь на свой профессиональный опыт. В то же время, как для врача, так и для пациента была бы весьма полезна объективная количественная оценка параметров движения.

Таким образом, разработка информационной технологии дистанционной двигательной реабилитации (ИТДДР), свободной от перечисленных недостатков, является нерешенной научной и практической проблемой.

**Целью данной работы** является синтез информационной технологии дистанционной двигательной реабилитации, со следующими характеристиками:

- ориентированность на применение экономичного оборудования: домашнего (для врача – офисного) компьютера с бытовой веб-камерой и бесплатным ПО с открытым кодом, это делает систему доступной широкому кругу пациентов и лечебных учреждений;

- возможность доступа в систему пациентов и врачей в разделенном времени, тогда, когда это удобно обеим сторонам, что повышает эффективность лечебного процесса;

- возможность количественного оценивания кинематических параметров движения пациента, сравнения количественных показателей обучающего и тренировочного движений и выработка системой автоматического решения по коррекции движений пациента в реальном масштабе времени.

#### Информационная технология

Обобщенная структура ИТДДР представлена на рис. 1.

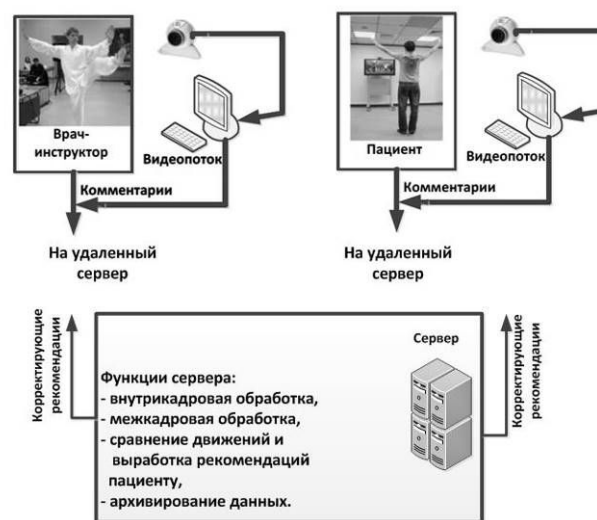


Рис. 1. Обобщенная структура ИТДДР

Входными потоками информации ИТ являются видеопотоки с камер, регистрирующих обучающие движения врача-инструктора и эти же движения, повторяемые пациентом. Видеопотоки сопровождаются комментариями обеих сторон (в тестовом или аудио формате).

Для обработки информационные потоки направляются на удаленный сервер, который выполняет следующие функции:

- внутрикадровая обработка;
- межкадровая обработка;
- сравнение движений и выработка корректирующих рекомендаций пациенту в реальном масштабе времени;
- архивирование всех данных системы.

Рассмотрим последовательно этапы ИТДДР.

*Этап 1.* Внутрикадровая обработка

Структура этапа внутрикадровой обработки представлена на рис.2.

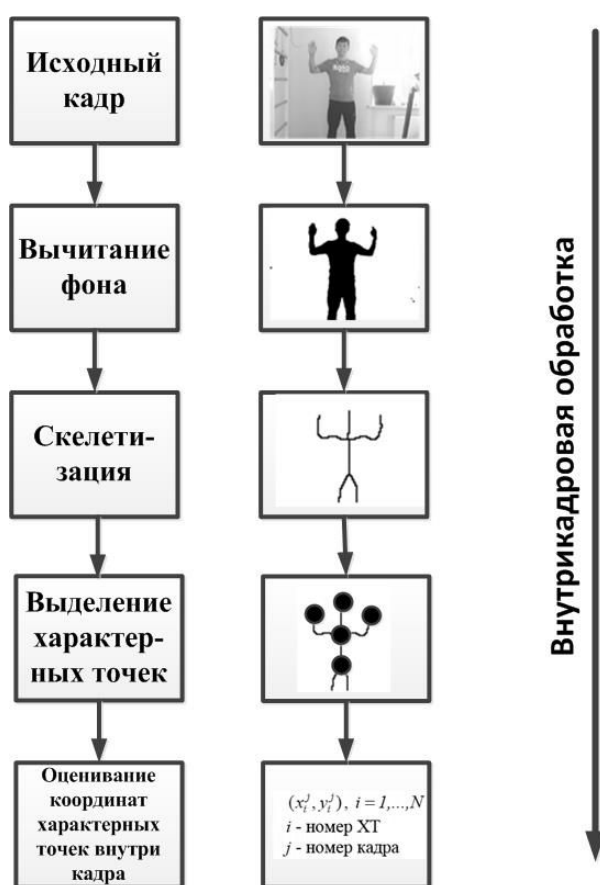


Рис. 2. Структура этапа внутрикадровой обработки

Для каждого кадра видеопотока пользователей обоих классов (врач, пациент) осуществляются следующие операции. Из кадра вычитается предварительный кадр оценки фона и осуществляется пороговая бинаризация. В результате фигура в кадре преобразуется в бинарное изображение. Дальнейшие действия основаны на предложенной плоской проективной модели представления

движения тела человека [9]. Согласно этой модели наблюдаемую в кадре фигуру человека можно представить в виде набора из 16-ти характерных точек (в реальном кадре могут в зависимости от положения тела и ракурса наблюдаться не все характерные точки (ХТ)). Для построения набора ХТ следующим этапом обработки является построение скелета (скелетизация) изображения тела. В [10] показано, что для системы ДДР следует использовать алгоритм скелетизации Жанг-Суена [11], сочетающий быстроедействие с высокими показателями качества полученного скелета. В результате скелетизации получаем скелет фигуры, т.е. фигуру толщиной в один пиксель, сохраняющую основные топологические характеристики формы тела. Далее на скелете выделяются характерные точки.

Во множество характерных точек включаются тупиковые точки скелета (центр головы, окончания рук и ног), точки ветвления скелета и точки излома скелета. Алгоритм поиска ХТ полным перебором точек скелета подробно описан в [9; 12]. Этап внутрикадровой обработки заканчивается построением массива набора координат ХТ:

$$(x_i^j, y_i^j), i = 1, \dots, N,$$

где  $i \in [1, 2, \dots, 16]$  – номер ХТ;

$y$  – номер кадра внутри обрабатываемого видеосегмента.

*Этап 2.* Межкадровая обработка

Структура этапа межкадровой обработки представлена на рис. 3. На этом этапе для видеозаписи длиной  $M$  кадров рассчитываются траектории ХТ  $(X_i^m, Y_i^m)$  их тангенциальные скорости  $v_a^m$  и тангенциальные ускорения  $a_a^m$ , где  $i \in [1, 2, \dots, 16]$  – номер ХТ;  $m$  – номер видеосегмента длиной 6 – 12 кадров внутри видеозаписи. Этап межкадровой обработки заканчивается построением матрицы кинематических параметров движения пользователя. Кинематическая матрица достаточно громоздка и не приводится здесь ввиду ограниченного объема статьи. Детально кинематическая матрица и процедура ее построения приведены в [9].

**Этап 3. Сравнение движений и выработка рекомендаций пациенту**

На данном этапе проводится количественный анализ мер отличия кинематических матриц обучающего движения и движения, повторяемого пациентом.

Для сравнения по координатам (траекториям) применяется чебышевская мера близости

$$l_{\infty}^x = \max_{\substack{m \in M \\ \text{для всех видимых } i \\ i \in \{1, 2, \dots, 16\}}} |X_{i \text{ врач}}^m - X_{i \text{ пациент}}^m|,$$

$$l_{\infty}^y = \max_{\substack{m \in M \\ \text{для всех видимых } i \\ i \in \{1, 2, \dots, 16\}}} |Y_{i \text{ врач}}^m - Y_{i \text{ пациент}}^m|.$$

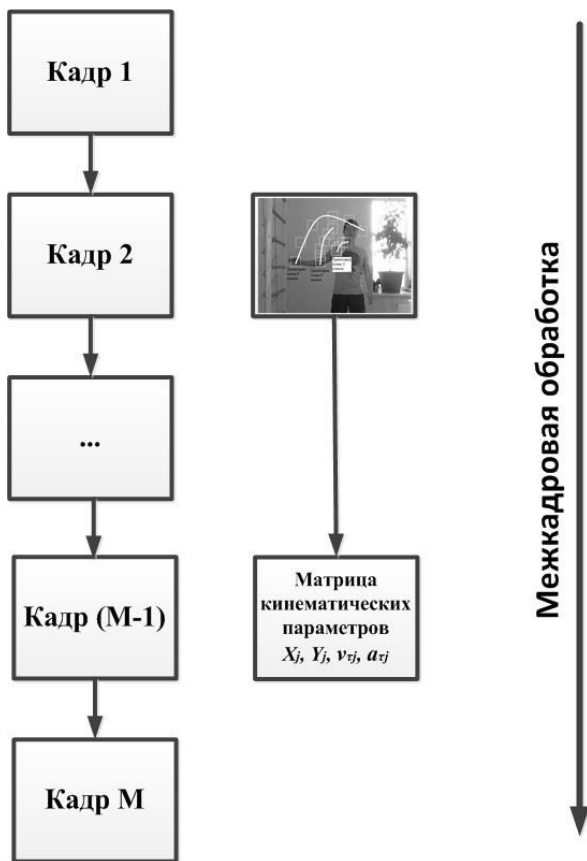


Рис. 3. Структура этапа межкадровой обработки

Для сравнения векторов скоростей и ускорений применяется косинусная мера близости:

$$l_{\cos}^v = \max_{\substack{m \in M \\ \text{для всех видимых } i \\ i \in \{1, 2, \dots, 16\}}} = \frac{v_{i \text{ врач}}^m \times v_{i \text{ пациент}}^m}{|v_{i \text{ пациент}}^m| \times |v_{i \text{ пациент}}^m|},$$

$$l_{\cos}^a = \max_{\substack{m \in M \\ \text{для всех видимых } i \\ i \in \{1, 2, \dots, 16\}}} = \frac{a_{i \text{ врач}}^m \times a_{i \text{ пациент}}^m}{|a_{i \text{ пациент}}^m| \times |a_{i \text{ пациент}}^m|}.$$

Построенные меры сравниваются с экспериментально установленными порогами. Если рассчитанные меры различия кинематических параметров не превышают соответствующих порогов, то движение считается повторенным правильно.

В противном случае выдаются рекомендации по коррекции движений пользователя по координатам (например, «левый локоть – выше», по скорости (например, «правая рука – быстрее», «наклон головы вправо – медленнее») и по ускорению – (например, «правая рука – резче», «наклон головы вправо – менее резко»).

Структурная схема этапа сравнения движений и выработки рекомендаций приведена на рис. 4.

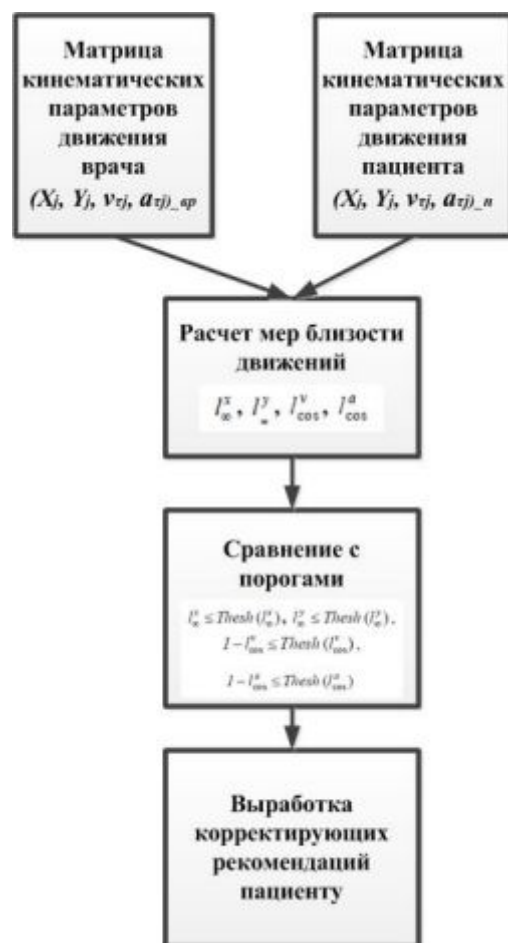


Рис. 4. Структура этапа сравнения движений и выработки рекомендаций

## Практическая реализация ИТДДР

Предварительные исследования, результаты которых изложены в [9; 10; 12] показали, что многие операции внутрикадровой и межкадровой обработки являются достаточно ресурсоемкими и требуют серьезных вычислительных ресурсов. Реализация ИТДДР на экономичных компьютерах показала, что в таких условиях практически невозможно организовать работу системы в реальном времени. Также практически невозможно организовать многопользовательскую систему с хранилищем данных. Поэтому ИТДДР была реализована в виде веб-приложения в клиент-серверной архитектуре с использованием облачного сервера высокой производительности. Общая структура системы ДДР представлена на рис. 5. 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.



Рис. 5. Общая структура системы ДДР

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 в формате сжатых строк.

Выполненная в такой архитектуре ИТДДР была реализована в виде опытного образца и испытана на многочисленных реальных двигательных видеоинструкциях и упражнениях, выполняемых участниками испытаний. В качестве клиентской платформы 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 в 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 специально достаточно мощного сервера в лечебном учреждении.

На рис. 6 показан пример экранной формы с корректирующей рекомендацией по результатам выполнения упражнения.

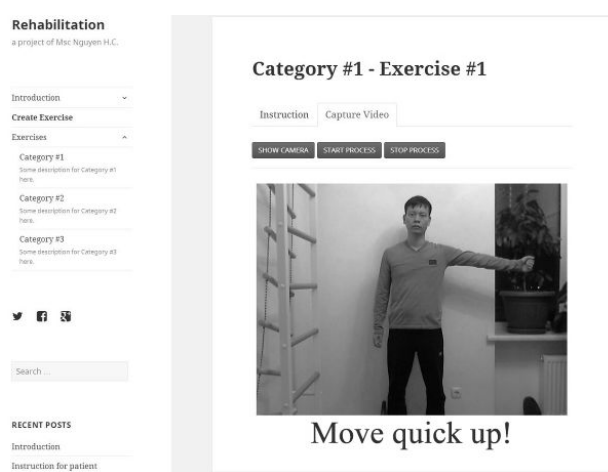


Рис. 6. Пример экранной формы систем ДД с корректирующей рекомендацией

Испытания системы на большой базе видеозаписей движений показали правильность работы системы как в части протоколов обмена данными, так и в части вынесения корректирующих рекомендаций пациенту. Описанная реализация ИТДДР обеспечивает функционирование системы в реальном времени, пациент практически не ощущает задержки в обмене данными и в поступлении корректирующих рекомендаций.

#### **Выводы и направления дальнейших исследований**

В результате исследований разработана информационная технология дистанционной двигательной реабилитации, позволяющая:

– реализовать доступную широкому кругу пользователей ДДР на экономичном компьютере с бесплатным программным обеспечением;

– организовать многопользовательскую систему с доступом клиентов в разделенном времени;

– количественно оценивать кинематические параметры движения пациента, сравнивать количественные показатели обучающего и тренировочного движений и вырабатывать автоматические решения по коррекции движений пациента в реальном масштабе времени.

В качестве направления дальнейших практических исследований можно указать поиск путей ускорения работы системы за счет совершенствования алгоритмов внутрикадровой алгоритмов обработки и улучшения алгоритмов сжатия видеопотоков.

Кроме того перспективным направлением исследований является предоставление возможности пользователям входить в систему и работать с ней с любого устройства, браузер которого поддерживает html5, websocket и имеет камеру (планшет, фablet, смартфон). Безусловно, такая модернизация ИТДДР потребует 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 принципиально в предложенную схему реализации ИТ ДДР возможность такой модернизации уже заложена.

#### **Список использованной литературы**

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 / Б. А. Кобринский, Т. В. Зарубина – М. : Издат. центр «Академия», 2009. – 192 с.

3. Rahman S.A., Shaheen Afaf A., (2011), Virtual Reality use in Motor Rehabilitation of Neurological Disorders: A Systematic Review, *Middle-East Journal of Scientific Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 63 – 70.

4. Holden M.K., (2005), Virtual Environments for Motor Rehabilitation: Review, *Cyberpsychology & Behavior*, Vol. 8, No. 5, pp. 187 – 211.

5. Chang, Y.-J., Chen S.-F., and Huang J.-D., (2011), A Kinect-based System for Physical Rehabilitation: A pilot Study for Young Adults with Motor Disabilities, *Research in Developmental Disabilities*, Vol. 32, Issue 6, pp. 2566 – 2570.

6. Kurakin A., Zhang Z. Liu, (2012), A real Time System for Dynamic Hand Gesture Recognition with a Depth Sensor, *EUSIPCO-2012: Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference*, pp. 1975 – 1979.

7. Pawlik P., and Bublinski Z., (2012), Visual Surveillance for Movement Rehabilitation [Text], *Image Processing & Communication*, Vol. 17, No. 4, pp. 173 – 178.

8. Metsis V., Jangyodsuk Pat, Athitsos V., Maura Iversen, and Makedon F., (2013), Computer Aided Rehabilitation for Patients with Rheumatoid Arthritis [Text], *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) – San Diego, CA*, pp. 97 – 102.

9. Болтенков В. А. Двумерная проективная модель движения тела человека и ее применение в задачах телемедицины [Текст] / В. А. Болтенков, Нгуен Гуи Кионг // Информатика и математические методы в моделировании. – 2014. – Т. 4. – № 4. – С. 312 – 323.

10. Болтенков В. А. Анализ алгоритмов скелетизации бинарных изображений [Текст] / В. А. Болтенков, Нгуен Гуи Кионг,

Д. В. Малявин // *Электротехнические и компьютерные системы* – Одесса : Наука и техника. – 2015. – № 17 (93). – С. 102 – 109.

11. Zhang T.Y., and Suen C.Y., (1984), A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns, *Communications of ACM*, Vol. 27( 3), pp. 236 –39.

12. Нгуен Г. К. Принципи побудови комп'ютерних систем дистанційного тренування на основі аналізу відеопотоку [Текст] / Нгуен Гуї Кюнг, В. О Болтънков, Д. В. Малявін // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – Харьков : Технологический центр. – 2014. – № 5/2 (71). – С. 25 – 33.

Получено 25.03.2015

#### References

1. Nazarenko G.I., Guliev Ya.I., and Ermakov D.E. *Meditsinskie informatsionnyie sistemy: teoriya i praktika* [Medical Information Systems: Theory and Practice], (2005), Moscow, Russian Federation, *Fizmatlit Publ.*, 320 p. (In Russian).

2. Kobrinskiy B.A., and Zarubina T.V. *Meditsinskaya informatika* [Medical Informatics], (2009), Moscow, Russian Federation, *Akademiya Publ.*, 320 p. (In Russian).

3. Rahman S.A., Shaheen Afaf A., (2011), Virtual Reality use in Motor Rehabilitation of Neurological Disorders: A Systematic Review, *Middle-East Journal of Scientific Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 63 – 70.

4. Maureen K. Holden *Virtual Environments for Motor Rehabilitation: Review*, (2005), *Cyberpsychology & Behavior*, Vol. 8 (5), pp. 187 – 211.

5. Chang Y.-J., Chen S.-F., and Huang J.-D., (2011), A Kinect-based System for Physical Rehabilitation: A pilot Study for Young Adults with Motor Disabilities *Research in Developmental Disabilities*, Vol. 32 (6), pp. 2566 – 2570.

6. Kurakin A., and Zhang Z. Liu, (2012), A real Time System for Dynamic Hand Gesture Recognition with a Depth Sensor, *EUSIPCO-2012: Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference*, pp. 1975 – 1979.

7. Pawlik P., and Bublinski Z., (2012), Visual Surveillance for Movement Rehabilitation [Text], *Image Processing & Communication*, Vol. 17, No. 4, pp. 173 – 178.

8. Metsis V., Jangyodsuk Pat, Athitsos V., Maura Iversen, and Makedon F., (2013), Computer Aided Rehabilitation for Patients with Rheumatoid Arthritis [Text], *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, San Diego, CA, pp. 97 – 102.

9. Boltenkov V.A., and Nguen Gui Kiong. *Dvumernaya proektivnaya model dvizheniya tela cheloveka i ee primenenie v zadachah telemeditsinyi* [Two-Dimensional Projective Model of the Motion of the Human Body and its Application to Telemedicine], (2014), *Informatika i Matematicheskie Metodyi v Modelirovanii*, Odessa, Ukraine, Vol. 4 (4), pp. 312 – 323 (In Russian).

10. Boltenkov V.A., Nguen Gui Kiong, and Malyavin D.V. *Analiz algoritmov skeletizatsii binarnyih izobrazheniy* [Analysis of Skeletonization Algorithms for Binary Images], (2015), *Elektrotehnicheskie i Kompyuternyye Sistemy*, Odessa, Ukraine, No. 17 (93), pp. 102 – 109 (In Russian).

11. Zhang T.Y., and Suen C.Y., (1984), A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns, *Communications of ACM*, Vol. 27( 3), pp. 236 –39.

12. Nguen Hui Kiong, Boltenkov V.O., and Malyavin D.V. *Printsipy pobudovi kompyuternih sistem distantsiynogo trenu-vannya na osnovi analizu videopotoku* [Principles of Computer Systems for Remote Training by Analyzing the Video Stream], (2014), *Vostochno-Evropeyskiy Zhurnal Peredovyih Tehnologiy*, Kharkov, Ukraine, Vol. 5/2 (71), pp. 25 – 33 (In Ukrainian).



Нгуен Гуи Кюнг,  
аспирант каф. информационных систем Одесского нац. политехн. ун-та,  
тел.: (093) 224-44-63.  
E-mail:  
cuongmits@gmail.com