

Оценка временных характеристик техники ходьбы с применением мобильной информационно-измерительной системы

Аннотация

Статья посвящена задаче разработки алгоритмического обеспечения оценки техники ходьбы пациента в послеоперационный период реабилитации. Приведена плоскость нормирования результатов измерений при помощи мобильной ИИС для оценки степени восстановления навыка ходьбы. Показаны разработанные функции соответствия количественных результатов качественным показателям шкалы для временных характеристик техники ходьбы.

Введение

Существующие в практике и рекомендованные к применению методики, направленные на оценку степени восстановления навыка ходьбы, такие как шкала Тинетти, шкала НИИ неврологии РАМН, классификационная шкала передвижений и другие, к сожалению, не могут считаться достаточными, поскольку опираются исключительно на метод визуальной оценки, отражают преимущественно степень независимости пациента от посторонней помощи, что является только косвенным признаком качества восстановления двигательного действия, и не затрагивают информативных пространственно-временных характеристик техники (темп, ритм, скорость и пр.). Результаты оценки восстановления способности к ходьбе выражаются в баллах, но не дают возможности детальной оценки и прогнозирования результатов реабилитации. Выявить не только качественные, но и количественные различия данных стереотипов помогут распределенные измерительные системы, позволяющие определять параметры линейных и угловых перемещений нижних конечностей.

В исследованиях ряда современных авторов, в частности С.А. Майорниковой (2006 г.), Д.В. Скворцова (2008 г.), Н.А. Румянцевой (2010 г.), А.С. Ключкова (2012 г.) [1]–[5], отмечается, что восстановление стереотипа ходьбы у пациентов, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения, является сложной задачей, однако следует отметить, что исследователями в редких случаях затрагивается вопрос соответствия итоговых биомеханических характеристик техники ходьбы, достигнутых в процессе реабилитации, эталонным характеристикам данного двигательного действия. В частности, в исследовании С.А. Майорниковой (2006 г.) указано, что исследование характеристик техники ходьбы проводилось (скорость, длина, симметрия шага), но в итоговых выводах по проведенной научной работе количественных результатов анализа не представлено. В исследовании Д.В. Скворцова (2008 г.) раскрывается возможность восстановления ходьбы при помощи

тренажера «Локомат». Несомненно, применение современных тренажерных устройств является прогрессивным направлением в медицине, но оценка характеристик техники ходьбы в искусственных условиях не отражает реальной картины восстановления ходьбы в естественных условиях. Очевидно, что вопрос разработки научно обоснованных методик для регистрации и оценки характеристик ходьбы именно в естественных условиях является крайне актуальным.

Интересно отметить, что в результатах научной работы И.В. Рябчикова (2015 г.) [5] предложено применение современной лечебно-диагностической аппаратуры для определения степени восстановления опорной и динамической функций нижних конечностей и баланса в вертикальной стойке у пациентов с последствиями около- и внутрисуставных переломов. Данное исследование имеет большое значение, поскольку указанные функции обеспечивают ходьбу, однако их характеристики являются далеко не исчерпывающими для полноценной оценки качества восстановления техники ходьбы.

Цель исследования – осуществить вывод функции соответствия количественных результатов качественным значениям шкалы для оценки временных характеристик техники ходьбы (ритм движения, темп) с использованием мобильной информационно-измерительной системы с целью определения результативности реабилитационных мероприятий для пациентов с функциональными нарушениями опорно-двигательного аппарата.

Материалы и методы

Система [6]–[8] в рассматриваемой работе представляет собой два измерительных модуля, размещенных в пяточной области правой и левой ноги соответственно.

Измерительный модуль основан на базе датчика MPU-6050, передача измерительной информации осуществляется по беспроводному каналу связи [9]. Измерительный модуль включает в себя 6 измерительных каналов; таким образом, на сервер передается следующая информация: время измерения, угловые

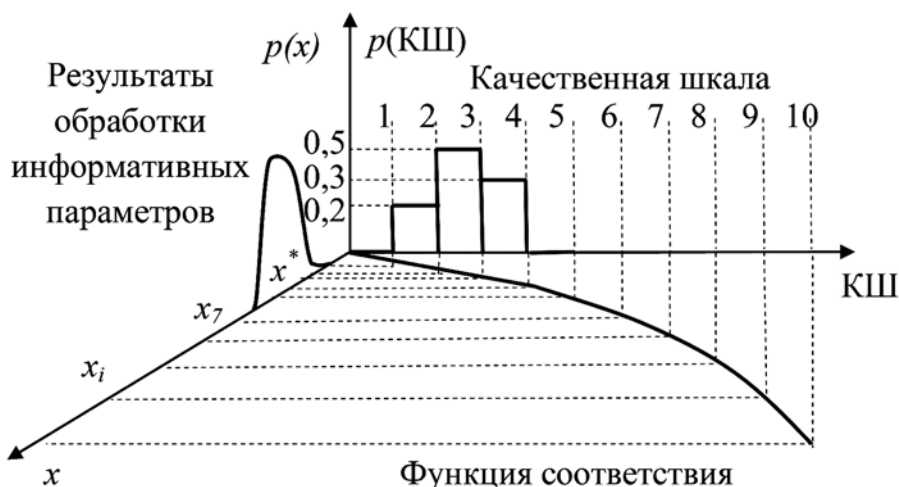


Рис. 1. Плоскость соответствия результата контрольных измерений (одно измерение СИ с заданными МХ) нормированным значениям качественной оценки

скорости по трем осям гироскопа, линейные ускорения по трем осям акселерометра. При этом устанавливаются следующие временные характеристики техники ходьбы: темп движения, ритм.

С целью представления в виде нормированных значений контролируемых параметров, имеющих разную природу, единицы измерений, физический смысл и свойства, необходимо сформировать качественные шкалы. Ниже приведен вариант нормирования количественных измерений. Плоскость соответствия нормированных значений количественных измерений и качественных оценок показана на *рис. 1*.

Функция соответствия значений результатов измерения контролируемого информативного параметра значениям качественной шкалы (КШ) определяется на основе анализа большого количества данных врачом-экспертом. Качественные отношения представлены в виде нормированной шкалы с равными отрезками и условными отношениями (см. *рис. 2*), где 1 – очень плохо, 10 – отлично. Значение контролируемой величины на нормированной шкале качественных отношений может быть определено как вероятность нахождения результата измерения информативного параметра в соответствующем интервале КШ. Вероятность принятия того или иного значения качества может быть определена как

$$p_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} p(x^*) \cdot dx, \quad i=1...10.$$

При повышении требования к надежности определения показателя необходимо провести серию дополнительных измерений, что приведет к уменьшению случайной составляющей и увеличению достоверности качественной характеристики.

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментов в РНХИ им. проф. А.Л. Поленова – филиале Центра Алмазова были установлены функции соответствия для таких временных параметров техники ходьбы, как ритм и темп. Баллы выставлялись в ходе экспериментов научной группой сотрудников НГУ им. Лесгафта, группа испытуемых составляла 42 человека.

Шкалы оценок для ритма и темпа, разработанные сотрудниками НГУ им. Лесгафта, приведены в *табл. 1*, где баллы имеют следующие качественные показатели: 1 – очень плохо; 2 – плохо; 3 – неудовлетворительно; 4 – посредственно; 5 – удовлетворительно; 6 – ниже нормы; 7 – нормально; 8 – хорошо; 9 – очень хорошо; 10 – отлично.

Таблица 1

Шкалы оценок для временных характеристик техники ходьбы

Временные характеристики	Баллы		
	1...3	4...7	8...10
Темп	Длительность двойного шага > 2 с	Длительность двойного шага > 1,6 с и ≤ 2 с	Длительность двойного шага ≤ 1,6 с
Ритм движения ног	Аритмичные	Дизритмичные	Ритмичные

Согласно принятым определениям в области лечебной физкультуры и спорта [10]:

- темп движений – это временная мера их повторности, измеряется количеством движений, повторяющихся в единицу времени (частота движений);
- ритм движений (временной) – это временная мера соотношения частей движений, определяется по соотношению длительности частей движения.

Таким образом, оценки темпа R и ритма Rh рассчитываются как

$$R_{i,j} = \frac{T_n}{T_n + T_l} = \frac{T_n \sum_{i,j=0}^N \left(\frac{1}{\theta_{5i} - \theta_{1i}} + \frac{1}{\theta_{5j} - \theta_{1j}} \right)}{N} = \frac{T_n \sum_{i,j=0}^N \left[\frac{\theta_{5j} - \theta_{1j} + \theta_{5i} - \theta_{1i}}{(\theta_{5i} - \theta_{1i}) \cdot (\theta_{5j} - \theta_{1j})} \right]}{N};$$

$$Rh_{i,j} = \frac{\sum \min(T_n, T_l)}{\max(T_n, T_l)} = \frac{\sum_{i,j=0}^N \frac{\theta_{5i} - \theta_{1i}}{\theta_{5j} - \theta_{1j}}}{N},$$

где T_n, T_l – длительности шагов правой и левой ног соответственно; N – количество шагов; θ_{1ij} – момент начала фазы отрыва стопы; θ_{5ij} – момент начала фазы опоры; i – номер шага правой ноги; j – номер шага левой ноги; T_n – нормирующее значение, рассчитанное экспериментально, исходя из наименьшего времени, необходимого испытуемому на выполнение двойного шага (1,1 с).

С целью обработки качественной экспертной информации количественными методами используются вербально-числовые шкалы, которые содержат наименования степени ухудшения и их численные значения или диапазоны значений. Так как в экспертных оценках применяется ранжирование, то соответственно такие методы экспертных оценок, как коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла, а также коэффициент конкордации Кендалла, не используются [11].

Количественные балльные оценки могут обрабатываться по-разному. Если считается, что эксперты равноправны, то групповая оценка определяется как

$$x = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n x_l,$$

где x_l – балльная оценка l -го эксперта; n – количество экспертов.

Если необходимо учесть компетентность экспертов, то вводят весовые показатели компетентности

$$x = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n q_l \cdot x_l,$$

где q_l – весовой показатель компетентности l -го эксперта.

Группа экспертов (специалисты в области реабилитационных мероприятий) составляла 11 человек, степень компетенции оценивалась в диапазоне от 0 до 1. Главные показатели компетенции: образование и стаж в области реабилитации. Группа экспертов составляла:

- 5 канд. педагог. наук и канд. мед. наук, практикующие специалисты в области реабилитации – степень компетенции 1;
- 1 д-р мед. наук, практикующий врач в области нейрохирургии – степень компетенции 1;
- 4 учащихся ординатуры – степень компетенции 0,9;
- 1 студент реабилитационного профиля – степень компетенции 0,7.

Коэффициент компетенции формировался совместно с коллективом экспертов.

На практике подобные средние баллы ведут себя устойчиво при изменении состава экспертной группы, однако следует оценивать дополнительно степень согласованности экспертов. Для таких оценок степень согласованности оценивается либо по дисперсиям

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{l=1}^n (x_l - x)^2, \quad l=1...n,$$

либо при помощи коэффициента вариации

$$V = \frac{\sqrt{D}}{x}.$$

При использовании коэффициентов вариации согласованность мнений экспертов считается хорошей, если все $V < 0,2$, и удовлетворительной, если все $V < 0,3$ [12].

В ходе работы рассчитаны коэффициенты вариации согласованности мнений экспертов для группы из 42 человек (пациенты нейрохирургического профиля). В табл. 2 приведен расчет общей балльной оценки и коэффициента вариации для одного испытуемого, где x_l – балльная оценка l -го эксперта; qx_l – значение балльной оценки с учетом весового коэффициента; x – значение групповой балльной оценки; D – дисперсия; V – коэффициент вариации.

Таблица 2

Расчет общей балльной оценки временной характеристики ритма для одного испытуемого и расчет коэффициента вариации

x_l	qx_l	x	D	V
8	8,0	8,06	0,49	0,09
8	8,0			
9	9,0			
8	8,0			
9	9,0			
8	8,0			
9	8,1			
9	8,1			
9	8,1			
9	8,1			
9	6,3			

Как видно из табл. 2, коэффициент вариации равен 0,09, что соответствует хорошей согласованности мнений экспертов.

В табл. 3 приведены некоторые экспериментальные данные, на основании которых проведен вывод функции соответствия, где *Расчет* – количественное значение результата измерения параметра; *О. э.* – групповая балльная оценка.

Таблица 3

Экспериментальные данные для вывода функции соответствия

№ п/п	Темп		Ритм	
	Расчет	О. э.	Расчет	О. э.
1	0,89	9	0,96	10
2	0,72	8	0,93	9
3	0,65	8	0,81	8
4	0,55	5	0,73	8
5	0,58	5	0,34	5
6	0,92	9	0,95	10
7	0,94	9	0,99	10
8	0,57	5	0,35	5
9	0,69	8	0,55	6
10	0,86	9	0,84	9

В результате обработки экспериментальных данных получены функции соответствия (представлены далее). Функции соответствия были аппроксимированы, при использовании МНК определены параметры.

Получены следующие функции соответствия согласно рис. 2, 3:

1) функцию соответствия темпа представляет собой выражение

$$KШ(R) = -2048,1R^5 + 7903,9R^4 - 11935R^3 + 8751,7R^2 - 3076,8R + 413,85;$$

2) функцию соответствия ритма описывает выражение

$$KШ(Rh) = -7,1Rh^3 + 4,5Rh^2 + 12,8Rh - 0,29,$$

где $KШ(R)$ – значение качественной шкалы, характеризующее темп; $KШ(Rh)$ – значение качественной шкалы, характеризующее ритм; R – количественное значение результата оценки темпа; Rh – количественное значение результата оценки ритма.

Проверка адекватности полученной модели проверялась по критерию Фишера [13]

$$F = \frac{S_n^2}{S_0^2},$$

где S_n^2 – выборочная дисперсия; S_0^2 – средневзвешенная оценка.

Значения F по критерию Фишера для временной характеристики: темп составляет 1,89; ритм – 1,55. Гипотеза подтверждается для обеих временных характеристик (темп, ритм), так как $F < F_{0,95}(4; 32)$ [при доверительной вероятности 95 % и числе степеней свободы (f_1, f_0), где $f_1 = m - l = 4$; $f_0 = mn - m = 32$, табличное значение F составляет 2,69], следовательно, функция адекватно описывает результаты измерений.

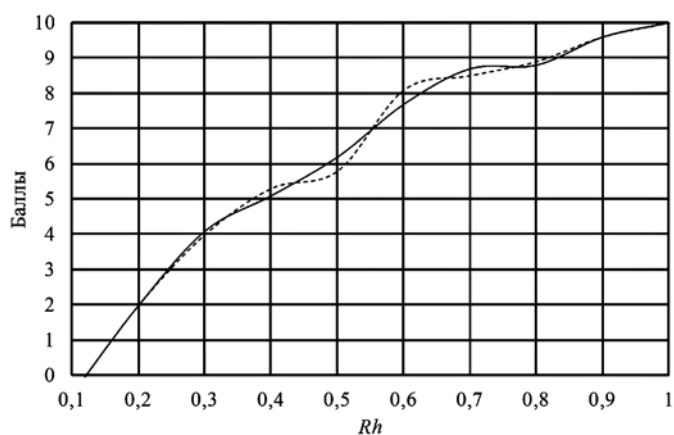


Рис. 2. Функция соответствия для оценки ритма, где практические данные представлены в виде пунктирной линии с маркерами, а аппроксимирующая функция – в виде непрерывной линии

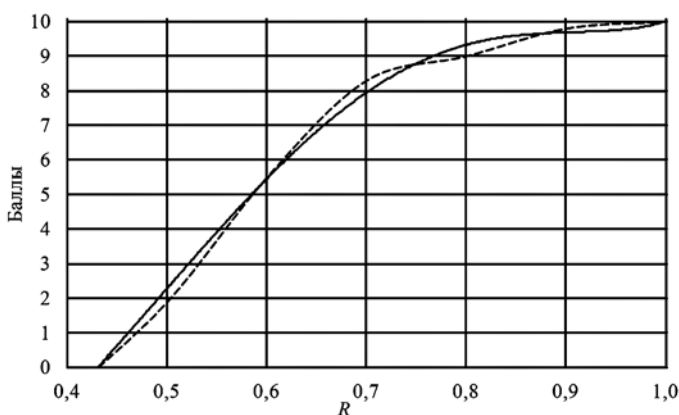


Рис. 3. Функция соответствия для оценки темпа, практические данные представлены в виде пунктирной линии с маркерами, а аппроксимирующая функция – в виде непрерывной линии

Заключение

В работе рассмотрен вопрос формирования функции соответствия количественных результатов качественным значениям шкалы для оценки временных характеристик техники ходьбы. Проведенные экспериментальные исследования на базе РНХИ им. проф. А.Л. Поленова – филиала Центра Алмазова позволили при помощи группы специалистов-экспертов в об-

ласти медицины, в частности в области физической реабилитации, установить функции соответствия, необходимые для количественной оценки временных характеристик техники ходьбы с последующим переходом к качественным значениям шкалы. Подобные качественные статистически обоснованные шкалы дадут возможность количественной оценки результатов реабилитации без применения органолептического метода.

Список литературы:

1. Ключков А.С. Роботизированные системы в восстановлении навыка ходьбы у пациентов, перенесших инсульт / Автореф. дис. канд. мед. наук: 14.01.11. – М.: Научный центр неврологии, 2012. 26 с.
2. Майорникова С.А. Методические приемы восстановления функции ходьбы у больных с постинсультными гемипарезами / Автореф. дис. канд. пед. наук: 14.01.11. – М.: Рос. гос. ун-т физ. культуры, спорта и туризма, 2006. 26 с.
3. Румянцева Н.А. Комплексная оценка патологического паттерна ходьбы и реабилитационных программ ее восстановления у больных в остром периоде церебрального инсульта / Автореф. дис. д-ра мед. наук: 14.01.11. – М.: Рос. гос. мед. ун-т Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию, 2010. 27 с.
4. Скворцов Д.В. Биомеханические методы реабилитации патологии походки и баланса тела / Автореф. дис. д-ра мед. наук: 14.00.51. – М.: ГОУВПО «Российский государственный медицинский университет», 2008. 41 с.
5. Рябчиков И.В. Биомеханические аспекты восстановления опорной и динамической функции пациентов с около- и внутрисуставными переломами костей нижних конечностей / Автореф. дис. д-ра мед. наук: 14.03.11; 14.01.15. – Казань: ГБУ ВПО «Казанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации», 2015. 55 с.
6. Алексеев В.В., Иванова Н.Е., Соколова Ф.М., Королев П.Г. Измерительная система для контроля параметров кинематического портрета человека. Ч. 1. Система контроля // Приборы. 2019. № 9. С. 16-24.
7. Алексеев В.В., Иванова Н.Е., Соколова Ф.М., Королев П.Г., Царева А.В. Измерительная система для контроля параметров кинематического портрета человека. Ч. 2. Система вывода // Приборы. 2019. № 9. С. 24-32.
8. Царева А.В., Алексеев В.В., Иванова Н.Е., Королев П.Г., Соколова Ф.М. Исследование кинематики движений пациентов нейрохирургического профиля на стационарном этапе // Современные технологии в медицине (СТМ). 2019. Т. 11. № 3. С. 81-88.
9. Царева А.В., Курочкин А.Ю., Алексеев В.В. Информационно-измерительная система для исследования кинематики движений человека. Беспроводная передача данных // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 3.
10. Соколова Н.Г. Физиотерапия. – Ростов н/Д: Феникс, 2018. 350 с.
11. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М., 1980. 263 с.
12. Чегодаев А.И. Математические методы анализа экспертных оценок // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2010. № 2 (64). С. 130-135.
13. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений / 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. 304 с.

Владимир Васильевич Алексеев,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,
кафедра информационно-измерительных
систем и технологий,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
Наталья Евгеньевна Иванова,
д-р мед. наук, профессор, гл. научный сотрудник,
зав. научным отделом,
Российский научно-исследовательский
нейрохирургический институт
им. проф. А.Л. Поленова – филиал
ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» МЗ РФ,
Алексей Юрьевич Иванов,
д-р мед. наук, профессор,
кафедра сердечно-сосудистой хирургии,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет» МЗ РФ,
кафедра нейрохирургии,
ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный
медицинский университет им. И.И. Мечникова» МЗ РФ,
Павел Геннадьевич Королев,
канд. техн. наук, доцент,
зам. заведующего кафедры по научной работе,
кафедра информационно-измерительных
систем и технологий,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
Фанида Менихановна Соколова,
канд. педагог. наук, доцент,
врач ЛФК высшей категории,
профессор,
кафедра физической реабилитации,
ФГБОУ ВПО «Национальный государственный
университет физической культуры, спорта
и здоровья им. П.Ф. Лесгафта»,
Анна Вячеславовна Царева,
ассистент,
кафедра информационно-измерительных
систем и технологий,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
г. С.-Петербург,
e-mail: caanyuta@yandex.ru

* * * * *