

УДК 51-76; 612.741.1; 612.76

ОЦЕНКА КООРДИНАЦИОННЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ ДВИЖЕНИЙ

Н.С. ДАВЫДОВА¹, И.Ю. МИХУТА², А.Н. ОСИПОВ¹, А.А. БОРИСКЕВИЧ¹,
В.Е. ВАСЮК², А.А. ХОХОЛКО²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроник, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 ноября 2018

Аннотация. Предложен эффективный подход к оценке координационных способностей спортсменов, основанный на анализе воспроизводимости электромиографических паттернов тестов со сложной двигательной структурой при внешних возмущающих факторах (выключение зрительного и звукового анализаторов человека). Введены два коэффициента для количественной оценки влияния зрительного и звукового анализатора на устойчивость воспроизведения движений со сложной координационной структурой. Даны рекомендации по практическому использованию полученных результатов исследования.

Ключевые слова: координационная способность, многоканальная электромиография, электромиографический паттерн движения, цифровая обработка сигнала, статистический анализ.

Abstract. The effective approach to the estimation of athletes coordination abilities based on the reproducibility analysis of the electromyographic patterns of motion tests under the influence of external destabilizing factors is proposed. The following factors are chosen as external perturbing ones: disabling the visual and disabling the sound analyzer of a person. Two coefficients for the quantitative estimation of influence of the visual and sound analyzer on the stability of reproduction of movements with a complex coordination structure are introduced. The recommendations on the practical use of the research results for young athletes are given.

Keywords: coordination abilities, multichannel electromyography, electromyographic motion pattern, digital signal processing, statistical analysis.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 117, No. 7, pp. 52-57

Estimation of coordinating abilities of a person based on analysis of electromyographic patterns of movements

N.S. Davydova, I.Yu. Mihuta, A.N. Osipov, A.A. Boriskevich, V.E. Vasyuk, A.A. Hoholko

Введение

Задача оценки координационных способностей человека является актуальной для различных областей: физическое воспитание, спорт, трудовая и военная деятельность, спортивная и диагностическая медицина [1]. Под координационной способностью понимается готовность человека к оптимальному управлению двигательным действием и регулированию им. Базовые координационные способности имеют широкий спектр применения и включают в себя: способность ориентироваться в пространстве, дифференцировать свои мышечные ощущения и регулировать степень напряжения мышц, реагировать на сигналы внешней среды, способность сохранять статическое и динамическое равновесие, чувство ритма. Эффективность выполнения сложно-координационных технических действий зависит от многих факторов, их сочетания и взаимодействия [2].

Функциональная сложность и многокомпонентность организации двигательной системы человека определяет необходимость комплексного подхода к изучению сложно-координационных движений человека, сущность которого сводится к совместному рассмотрению внешних двигательных проявлений (биомеханических параметров движения) и внутренних механизмов управления (электрофизиологических параметров движения) [3].

Электромиографический (ЭМГ) паттерн движения представляет собой пространственно-временной шаблон, отображающий направление, степень и последовательность включения комплекса мышц, участвующих в выполнении движения [3]. Распознавание ЭМГ паттернов различных движений сегодня является актуальной задачей, решение которой может быть использовано в биоуправлении внешними устройствами (протезы, экзоскелет, интерфейс человек-машина) [4]. Существуют работы, посвященные анализу ЭМГ паттернов спортивных движений [5].

Целью работы является оценка воспроизводимости электромиографических паттернов сложно-координационных движений при наличии внешних дестабилизирующих факторов для оценки координационных способностей человека.

Методика исследования

Исследование координационных способностей спортсменов проводилось на кафедре «Спортивная инженерия» Белорусского национального технического университета. В исследовании принимали участие юные спортсмены, занимающиеся в специализированных спортивных секциях (теннис и фигурное катание): 12 мужчин (возраст от 8 до 13 лет) и 4 женщины (возраст от 8 до 13 лет).

Предложен комплекс тестовых заданий со сложной двигательной структурой [6] для нижних (рис. 1, *а*) и верхних (рис. 1, *б*) конечностей в следующей последовательности: тест 1 – с открытыми глазами; тест 2 – с закрытыми глазами; тест 3 – перекрестная координация со счетом (рис. 1, *в*); тест 4 – перекрестная координация без счета.

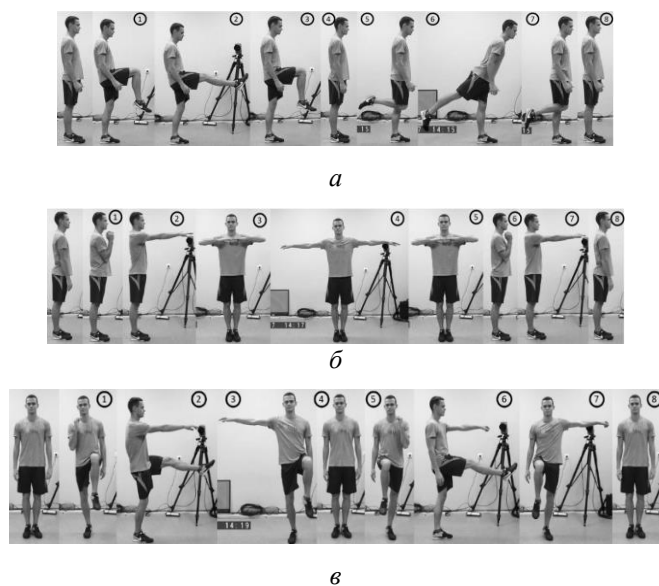


Рис. 1. Двигательные тесты для: *а* – нижних конечностей; *б* – верхних конечностей; *в* – перекрестной координации

Для исследования были выбраны 7 крупных групп мышц верхних и нижних конечностей [7]: *m. Rectus Femoris* (четырёхглавая мышца бедра), *m. Viceps Femoris* (двуглавая мышца бедра), *m. Gastrocnemius* (икроножная мышца – медиальная и латеральная головка), *m. Tibialis anterior* (передняя большеберцовая мышца), *m. Viceps Brachii* (двуглавая мышца плеча), *m. Triceps Brachii* (трехглавая мышца плеча).

Для выявления электромиографического паттерна движений осуществлялась регистрация многоканальных электромиограмм (14 каналов) и акселерометрия движения. Регистрация электромиографических сигналов мышц и акселерометрия движения проводилась

с помощью мобильного электромиографического аппаратно-программного комплекса Delsys Trigno™ Wireless System (Delsys Inc., Бостон, США) [8]. Беспроводные ЭМГ датчики имеют встроенные акселерометры (3 канала) и диапазон передачи сигнала до 20 м [8].

Анализ электромиографических паттернов движений

Для анализа многоканальных электромиограмм мышц и акселерометрии движения в системе математического программирования MatLab была разработана специальная программа Motionalyzer.

Методика оценки координационных способностей человека, основанная на анализе воспроизводимости электромиографических паттернов сложно-координационных движений, состоит из следующих этапов:

1. Предварительная обработка электромиографических сигналов мышц с целью удаления искажений в спектре полезного сигнала.
2. Анализ пространственно-временной структуры сложно-координационного движения для выделения фаз двигательного упражнения.
3. Анализ амплитудно-временных характеристик ЭМГ сигналов мышц в соответствии с пространственно-временной структурой движения.
4. Количественная оценка координационных способностей спортсменов на основе анализа воспроизводимости электромиографических паттернов двигательных тестов.

Этап 1. Предварительная обработка электромиографических сигналов исследуемых мышц.

В предложенной методике осуществляется цифровая фильтрация сигналов ЭМГ с помощью фильтра высоких частот (ФВЧ) Чебушева с частотой среза 10 Гц (удаление двигательных артефактов), режекторного фильтра Баттерворта 50 Гц (удаление помех с частотой питающей сети), а также осуществляется удаление постоянной составляющей в спектре полезного сигнала.

Этап 2. Анализ пространственно-временной структуры акселерометрических сигналов движения.

Выделение фаз сложно-координационного тестового движения реализуется посредством анализа акселерометрических сигналов с четкими структурными паттернами. Для исследуемых тестовых заданий были выбраны сигналы акселерометрии мышц Rectus Femoris и Biceps Femoris для упражнений, выполняемых нижними конечностями, правый и левый Biceps Brachii – верхними конечностями. На рис. 2 представлен пример анализа пространственно-временного паттерна тестового упражнения для нижних конечностей. Сигналы акселерометрии мышц Rectus Femoris и Biceps Femoris позволили выделить семь специфических фаз движения.

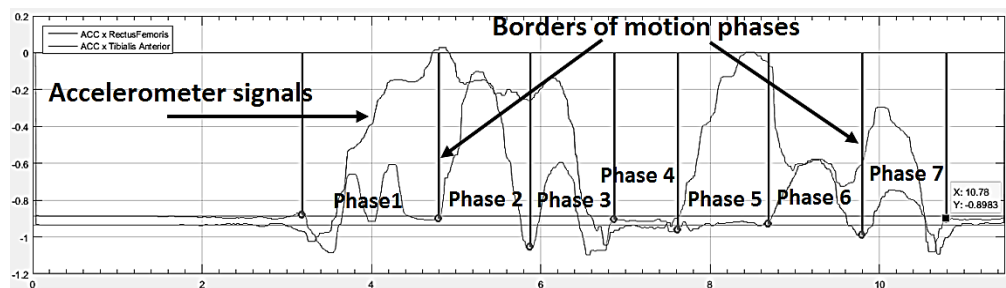


Рис. 2. Выделение фаз движения на основе анализа сигналов акселерометрии мышц Rectus Femoris и Biceps Femoris

Этап 3. Анализ амплитудно-временных характеристик ЭМГ сигналов мышц в соответствии с пространственно-временной структурой движения.

Анализ электромиографического паттерна движения основан на исследовании во временной области многоканальных сигналов ЭМГ работающих мышц. Это связано с необходимостью сопоставления рисунка возбуждения мышц с пространственно-временными характеристиками выполняемых действий.

Установлено, что анализ энергии ЭМГ сигнала в выделенных фазах двигательного упражнения (рис. 3) позволяет количественно оценить распределение мышечных усилий по фазам в процессе выполнения тестового движения [3].

Для каждой мышцы (m) рассчитывается средняя энергия E_m ЭМГ сигнала, приходящая на отсчет:

$$E_m = \sum_{i=1}^n (x_m[i])^2 / n, \quad (1)$$

где m – номер мышцы; $x_m[i]$ – значение i -го дискретного отсчета сигнала ЭМГ m -й мышцы; n – число дискретных отсчетов ЭМГ сигнала.

Аналогично для каждой мышцы m рассчитывается средняя энергия ЭМГ сигнала в пределах каждой фазы f исследуемого движения $E_{m,f}$.

На рис. 3 а показан пример сигнала энергии ЭМГ мышцы Tibialis Anterior правой ноги при выполнении двигательного теста 1. На рис. 3 б показан пример распределения энергии ЭМГ сигналов мышц правой ноги по фазам движения при выполнении двигательного теста 1.

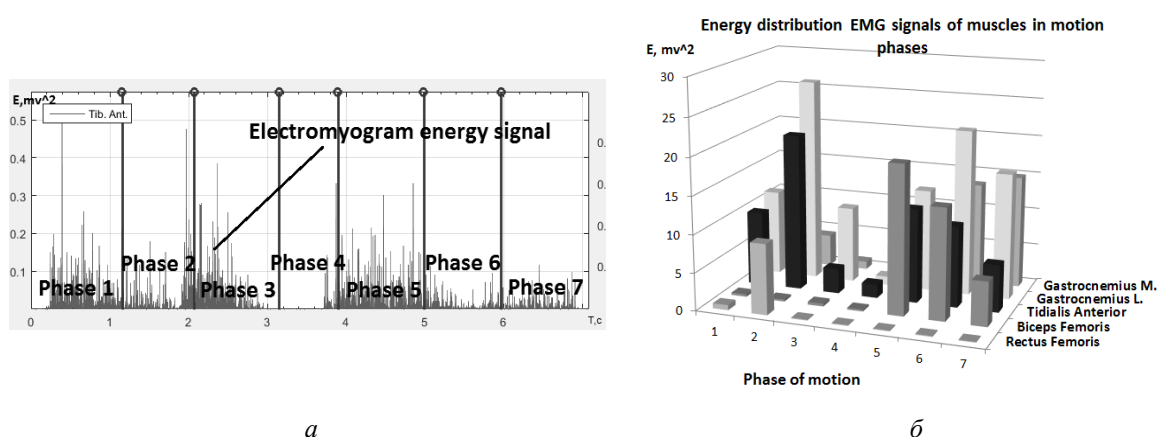


Рис. 3. Амплитудно-временной анализ ЭМГ сигналов мышц: а – сигнал энергии ЭМГ мышцы Tibialis Anterior правой ноги при выполнении двигательного теста 1; б – распределения энергии ЭМГ сигналов мышц правой ноги по фазам движения при выполнении двигательного теста 1

Этап 4. Анализ воспроизводимости электромиографических паттернов двигательных тестов.

Количественная оценка координационных способностей спортсменов осуществляется на основе анализа воспроизводимости электромиографических паттернов двигательных тестов при наличии внешних возмущающих факторов. В качестве внешних дестабилизирующих факторов выбраны: отключение зрительного анализатора (тест 2 выполняется с закрытыми глазами) и отключение звукового анализатора (тест 4 выполняется без счета).

В основу предложенной оценки координационных способностей спортсменов положен метод оценки воспроизводимости двигательных навыков человека [3]. Данный метод основан на оценке степени варибельности распределения мышечных усилий по фазам движения с использованием выражения $\Delta E_{m,f} = |(E_{m,f,2} / E_{m,2} - E_{m,f,1} / E_{m,1}) \cdot 100\%|$ при наличии (2) и отсутствии (1) внешнего дестабилизирующего фактора. При этом учитывается степень вклада каждой мышцы в формирование исследуемого движения (k_m), а также степень значимости каждой фазы движения (k_f).

Коэффициент варибельности движения K_v при наличии внешних возмущающих факторов рассчитывается как сумма взвешенных отклонений процентной доли энергии ЭМГ сигнала $\Delta E_{m,f}$ исследуемых мышц во всех фазах движения:

$$K_v = \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F k_m * k_f * \Delta E_{m,f}, \quad (2)$$

где M – количество исследуемых мышц, F – количество фаз движения, m – номер мышцы, f – номер фазы движения, k_m – коэффициент значимости мышцы, k_f – коэффициент значимости фаз движения.

Коэффициент влияния зрительного анализатора γ рассчитывается как коэффициент вариальности (2) для двигательных тестов 1 и 2 без использования зрительного анализатора относительно тестов, где упражнения выполняются с открытыми глазами.

Коэффициент τ , характеризующий воспроизводимость структуры и темпа движения, рассчитывается как коэффициент вариальности (2) для двигательных тестов 3 и 4 без выполнения счета относительно тестов, где упражнения выполняются со счетом.

Результаты и обсуждение

В результате экспериментальных исследований дана оценка влияния зрительного анализатора и звукового анализатора на устойчивость воспроизведения движений со сложной координационной структурой. Для юных спортсменов, специализирующихся на фигурном катании, коэффициент влияния зрительного анализатора составляет $\gamma = 2,09 \pm 0,49$, коэффициент влияния звукового анализатора составляет $\tau = 1,98 \pm 0,58$. Для юных теннисистов коэффициент влияния зрительного анализатора равен $\gamma = 1,97 \pm 0,48$, коэффициент влияния звукового анализатора составляет $\tau = 2,12 \pm 0,61$.

Определено, что существует значительная корреляция между возрастом спортсмена и коэффициентом влияния зрительного анализатора. Коэффициент корреляции Пирсона для фигуристов равен $r = -0,63$, а для теннисистов $r = -0,62$. Данные результаты указывают на улучшение данного компонента координационных способностей с возрастом спортсмена.

Заключение

Предложен эффективный подход к оценке координационных способностей человека, основанный на анализе воспроизводимости электромиографических паттернов сложнокоординационных движений при наличии внешних дестабилизирующих факторов. В качестве внешних возмущающих факторов были выбраны: выключение зрительного и звукового анализаторов испытуемого. Определено, что выбранный комплекс тестовых упражнений со сложной двигательной структурой является информативным для исследования компонентов координационных способностей.

Значения коэффициентов влияния визуального и звукового анализатора будут равны нулю при полном совпадении ЭМГ паттернов движения до и после введения дестабилизирующего фактора. Установлено, что в реальных условиях дисперсия значений этих коэффициентов изменяется от 1,28 до 3,14. Анализ данных коэффициентов позволяет выявлять спортсменов с высокими координационными способностями и давать рекомендации юным спортсменам при выборе спортивной специализации. Оценка влияния зрительного анализатора может быть использована при выборе видов спорта, которые требуют высокой визуальной концентрации: спортивные игры (теннис, бадминтон), стрельба, биатлон. Предложенный подход может быть использован для объективного контроля за уровнем проявления отдельных компонентов координационных способностей спортсменов.

Список литературы

1. Лях В.И. Координационные способности: диагностика и развитие. М.: ТВТ Дивизион, 2006. 290 с.
2. Рогожников М.А. Обучение юных тхэквондистов безопорным сложнокоординационным техническим действиям: дис. ... канд. пед. наук. Санкт-Петербург, 2016.
3. Давыдова Н.С. Аппаратно-программный комплекс многоканальной электромиографии для диагностики двигательных навыков человека: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2012.
4. Рукина Н.Н. [и др.] Метод поверхностной электромиографии: роль и возможности при разработке экзоскелета // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8. № 2. С. 109–118.
5. Kinematics and electromyography of landing preparation in vertical stop-jump: risks for noncontact anterior cruciate ligament injury / Chappell J.D. [et al.] // The American journal of sports medicine. 2007. Т. 35. № 2. P. 235–241.
6. Хохолко А.А., Михута И.Ю. Факторная структура межмышечной координации при выполнении тестовых заданий со сложной двигательной структурой // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім.Т.Г. Шевченка. 2017. № 147 (1). С. 215–220.
7. Agur A.M.R., Dalley A.F. Grant's Atlas of Anatomy. Lippincott Williams & Wilkins, 2016. 896 p.

8. Trigno™ Wireless System [Электронный ресурс]. URL: <http://www.delsys.com/products/wireless-emg/trigno-lab/> (дата обращения: 03.11.2018).

References

1. Lyakh V.I. Koordinatsionnyye sposobnosti: diagnostika i razvitiye. M.: TVT Divizion, 2006. 290 s. (in Russ.)
2. Rogozhnikov M.A. Obucheniye yunykh tkhekvdistov bezopornym slozhnokoordinatsionnym tekhnicheskim deystviyam: dis. ... kand. ped. nauk. Sankt-Peterburg, 2016. (in Russ.)
3. Davydova N.S. Apparatno-programmnyy kompleks mnogokanal'noy elektromiografii dlya diagnostiki dvigatel'nykh navykov cheloveka: dis. ... kand. tekhn. nauk. Minsk, 2012. (in Russ.)
4. Rukina N.N. [i dr.] Metod poverkhnostnoy elektromiografii: rol' i vozmozhnosti pri razrabotke ekzoskeleta // Sovremennyye tekhnologii v meditsine. 2016. T. 8. №. 2. S. 109–118. (in Russ.)
5. Chappell J.D. [et al.] Kinematics and electromyography of landing preparation in vertical stop-jump: risks for noncontact anterior cruciate ligament injury //The American journal of sports medicine. 2007. T. 35. №. 2. P. 235–241.
6. Khokholko A.A., Mikhuta I.Yu. Faktornaya struktura mezhmyshechnoy koordinatsii pri vypolnenii testovykh zadaniy so slozhnoy dvigatel'noy strukturoy // Vestnik Chernigovskogo natsional'nogo pedagogicheskogo universiteta im.T.G. Shevchenka. 2017. № 147(1). S. 215–220. (in Russ.)
7. Agur A.M.R., Dalley A.F. Grant's Atlas of Anatomy. Lippincott Williams & Wilkins, 2016. 896 p.
8. Trigno™ Wireless System [Electronic resource]. URL: <http://www.delsys.com/products/wireless-emg/trigno-lab/> (date of access: 03.11.2018).

Сведения об авторах

Давыдова Н.С., к.т.н., доцент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Михута И.Ю., к.пед.н., доцент, доцент кафедры спортивной инженерии Белорусского национального технического университета.

Осипов А.Н., к.т.н., доцент, проректор по научной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борискевич А.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Васюк В.Е., к.пед.н., доцент, заведующий кафедрой спортивной инженерии Белорусского национального технического университета.

Хохолко А.А., инженер кафедры спортивной инженерии Белорусского национального технического университета.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-312-49-90;
e-mail: davydova-ns@bsuir.by
Давыдова Надежда Сергеевна

Information about the authors

Davydova N.S., PhD, associate professor of infocommunication technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Mikhuta I.Yu., PhD, associate professor, associate professor of the sports engineering department of Belarusian national technical university.

Osipov A.N., PhD, associate professor, vice-rector for research work of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Boriskevich A.A., D.Sci, professor, professor of infocommunication technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Vasiuk V., PhD, associate professor, head of sports engineering department of Belarusian national technical university.

Khokholko A.A., engineer of sports engineering department of Belarusian national technical university.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovki st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. + 375-29-312-49-90;
e-mail: davydova-ns@bsuir.by
Davydova Nadezhda Sergeevna