

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623412>

Квазидвижения и попытки движения — возможная альтернатива моторному воображению в нейрореабилитации на основе интерфейсов мозг–компьютер

С.Л. Шишкин^{1*}, Д.А. Бердышев^{1,2}, А.С. Яшин^{1,3}, А.Ю. Заболотный⁴, А.Е. Осадчий^{1,4},
А.Н. Васильев^{1,3}

¹ Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Российская Федерация;

² Московский физико-технический институт, Москва, Российская Федерация;

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация;

⁴ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Моторное воображение (МВ) является одним из самых популярных «ментальных триггеров» для неинвазивных интерфейсов мозг–компьютер (ИМК). В частности, неоднократно предпринимались попытки продемонстрировать полезность МВ-ИМК в постинсультной реабилитации. Однако результаты таких испытаний остаются неоднозначными. Одним из возможных факторов, препятствующих эффективности этого подхода, может быть противоречие между характерной для МВ направленностью умственной деятельности исключительно вовнутрь (где она сосредоточивается на моделировании реальности) и предполагаемой важностью сенсорной обратной связи с реальным, физическим окружением в контексте терапии с использованием ИМК. Необходимость распределять ресурсы внимания между внутренними действиями и их последствиями во внешнем мире, кроме того, может являться причиной низкой точности классификаторов МВ-ИМК у большинства пользователей. Внутренний фокус внимания в МВ также может объяснить, по крайней мере частично, почему попытки объединить МВ-ИМК с технологиями взаимодействия на основе айтрекинга всегда были крайне неудачными, так как управление взглядом требует внешнего фокуса внимания.

Перспективной альтернативой моторному воображению в ИМК являются попытки движения (ПД), которые, как неоднократно демонстрировалось, лучше декодируются классификаторами ИМК, чем МВ (например, [1]). ПД — это попытки совершить реальные движения, для которых было сформировано намерение их совершить, но они не были совершены из-за паралича или ампутации. До сих пор исследованиям ПД уделялось очень мало внимания, возможно, из-за сложности их моделирования у здоровых участников экспериментов, а также из-за большой популярности МВ-ИМК. Подход к их моделированию у здоровых существует: это использование квазидвижений (КД), то есть волевых движений, которые минимизируются испытуемым до такой степени, что они в итоге становятся необнаруживаемыми объективными измерениями [2]. Однако КД с момента их открытия В.В. Никулиным и коллегами [2] изучались ещё меньше, чем ПД — возможно, из-за недостаточного понимания их отличия от МВ.

Недавно мы показали, что связанная с событиями десинхронизация сенсомоторного ритма в КД не зависит от остаточной электромиограммы (ЭМГ), поэтому, вопреки ранее существовавшим представлениям, методика КМ, по-видимому, может реализовываться без тщательного отслеживания ЭМГ, которое нередко невозможно [3]. Это открывает возможность более широкого использования КД в качестве альтернативы МВ в ИМК [3]. Кроме того, мы подтвердили и развили предыдущие наблюдения [2], показывающие близкое сходство КД с реальными движениями [4]. В настоящем сообщении мы рассказываем о наших первых результатах асинхронной классификации КД, которые могут стать основой для КД-ИМК, работающего в реальном времени.

Мы использовали ЭЭГ, записанную в исследовании [3] у 23 участников, которые выполняли КД и МВ синхронно с ритмичными звуковыми триплетами. Высоко интерпретируемая сверточная нейронная сеть SimpleNet [5] была обучена на подмножестве индивидуальных данных отдельно для КД и МВ, каждый раз в паре с референтной, немоторной задачей. Она была применена в оффлайн-режиме, без использования информации о времени подачи звука, к отдельному набору данных в окне 1,5 с с шагом 0,1 с. КД/МВ детектировались, если тест был положительным в 4 последовательных окнах, с рефрактерным периодом 3 с.

Рукопись получена: 15.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

Учитывая высокую вариабельность показателей МВ-ИМК у необученных людей, мы оценивали работу классификатора только у участников, показавших TPR (частоту правильных срабатываний) $>0,5$. Мы обнаружили 7 таких участников при классификации КД и 5 при классификации МВ. КД имел тенденцию давать лучшее определение намерения, чем МИ: $M \pm SD$ в КД и МВ, соответственно, составили $0,81 \pm 0,12$ и $0,77 \pm 0,12$ для TPR, $0,03 \pm 0,02$ и $0,04 \pm 0,03$ для частоты ложных тревог (s^{-1}), $2,81 \pm 0,06$ и $2,86 \pm 0,10$ для времени ответа (с); различия между КД и МВ, согласно тесту Манна–Уитни, не были значимыми.

Наши начальные результаты по моделированию асинхронных ИМК согласуются с предыдущими исследованиями, которые показали, что в синхронных парадигмах КД классифицируется лучше, чем МВ [2]. Отметим, что мы лишь слегка оптимизировали гиперпараметры SimpleNet, так что дальнейшее улучшение классификации представляется вполне достижимым. Учитывая лучшую классификацию ПД по сравнению с МВ [1] и предварительные результаты, представленные здесь, использование ПД конечными пользователями представляется многообещающим, и, вероятно, эту технологию можно будет развивать далее на основе использования КД в исследованиях, моделирующих ПД. Более того, сходство между КД, ПД и явными движениями указывает на возможность использования КД и ПД для передачи намерения в интерфейсах, управляемых взглядом, где явное моторное подтверждение работает отлично, но применение МВ-ИМК крайне неэффективно.

Ключевые слова: нейрореабилитация; интерфейс мозг-компьютер; квазидвижения; попытки движения; моторное воображение; асинхронная классификация; ЭЭГ.

Как цитировать:

Шишкин С.Л., Бердышев Д.А., Яшин А.С., Заболотный А.Ю., Осадчий А.Е., Васильев А.Н. Квазидвижения и попытки движения — возможная альтернатива моторному воображению в нейрореабилитации на основе интерфейсов мозг-компьютер // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 687–690. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623412>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование поддержано Российским научным фондом, грант № 22-19-00528.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen S., Shu X., Wang H., et al. The differences between motor attempt and motor imagery in brain-computer interface accuracy and event-related desynchronization of patients with hemiplegia // *Frontiers in Neurorobotics*. 2021. Vol. 15. P. 706630. doi: 10.3389/fnbot.2021.706630
2. Nikulin V.V., Hohlefeld F.U., Jacobs A.M., Curio G. Quasi-movements: A novel motor-cognitive phenomenon // *Neuropsychologia*. 2008. Vol. 46, N 2. P. 727–742. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.008
3. Vasilyev A.N., Yashin A.S., Shishkin S.L. Quasi-movements and “quasi-quasi-movements”: Does residual muscle activation matter? // *Life*. 2023. Vol. 13, N 2. P. 303. doi: 10.3390/life13020303
4. Yashin A.S., Shishkin S.L., Vasilyev A.N. Is there a continuum of agentive awareness across physical and mental actions? The case of quasi-movements (submitted) // *Consciousness and Cognition*. 2023. Vol. 112. P. 103531. doi: 10.1016/j.concog.2023.103531
5. Petrosyan A., Voskoboynikov A., Sukhinin D., et al. decoding from a small set of spatially segregated minimally invasive intracranial EEG electrodes with a compact and interpretable neural network // *Journal of Neural Engineering*. 2022. Vol. 19, N 6. doi: 10.1088/1741-2552/aca1e1

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* С.Л. Шишкин; адрес: Российская Федерация, 127051, Москва, ул. Сретенка, д. 29; e-mail: sergshishkin@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623412>

Quasi-movements and attempted movements: a possible alternative to motor imagery in BCI-based neurorehabilitation

S.L. Shishkin^{1*}, D.A. Berdyshev^{1,2}, A.S. Yashin^{1,3}, A.Y. Zabolotniy⁴, A.E. Ossadtchii^{1,4},
A.N. Vasilyev^{1,3}¹ Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russian Federation;² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation;³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;⁴ National Research University "Higher School of economics", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Motor imagery (MI) is a frequently used "mental trigger" for non-invasive brain-computer interfaces (BCI). Numerous studies have examined the effectiveness of MI-BCI for post-stroke rehabilitation. However, the results remain inconclusive. A potential obstacle to the effectiveness of this method could stem from an ongoing debate between the internal focus of mental activity (i.e., modeling of reality) inherent in MI and the perceived significance of sensory feedback from the actual physical environment in BCI-facilitated therapy. The requirement to allocate attentional resources to both internal actions and external consequences may contribute to the low accuracy of MI-BCI classifiers in most users. Moreover, internal focus of attention in MI may partially account for the consistent failures in combining MI-BCI with eye tracker-based interaction technologies, since external focus of attention is crucial for gaze control.

A potentially effective replacement for motor imagery in BCIs is attempted movements (AMs). Studies have shown that BCIs are more successful in decoding AMs than MI (e.g., [1]). AMs involve attempted, but unrealized movements caused by paralysis or amputation. Despite their potential, AMs have received little attention, possibly because of modeling challenges with healthy participants and the widespread popularity of MI-BCIs. One approach to modeling them in healthy subjects is to use quasi-movements (QM), which are voluntary movements that are minimized by the subject to such an extent that they eventually become undetectable by objective measures [2]. However, QM has been studied even less than AM since its discovery by V.V. Nikulin and colleagues [2]. This may be due to the inadequate understanding of the difference between QM and MI.

We recently proved that the sensorimotor rhythm's event-related desynchronization in QM does not rely on the residual electromyogram (EMG), indicating that strict EMG control, which is often impossible, may not be necessary for QM contrary to prior views. As a result, QM can be embraced more frequently as an alternative to MI in BCIs [3]. Moreover, we substantiated and refined earlier findings [2] that QM possesses a striking similarity to actual movements [4]. Here, we present our initial findings on the asynchronous classification of QM. These findings may serve as a foundation for a real-time QM-BCI system. We used the EEG data recorded from 23 participants who synchronized their QM and MI with rhythmic sound triplets. A convolutional neural network called SimpleNet [5], with high interpretability, was trained on a subset of individual data separately for QM and IM, compared to a referential non-motor task. The network was applied offline and was unaware of sound timing, to another subset in 1.5-second windows with 0.1-second steps. QM/IM were detected when four consecutive positive windows occurred with a refractory period of three seconds.

Due to the high variability in MI-BCI performance among untrained individuals, we only assessed classifier performance amongst participants exhibiting a TPR (true positive rate) greater than 0.5. We identified 7 such participants in QM and 5 in MI. QM showed better intention detection than MI, though not significantly, according to the Mann-Whitney test. The mean values \pm standard deviation for TPR were 0.81 ± 0.12 in QM and 0.77 ± 0.12 in MI, while the false alarm rate (s^{-1}) was 0.03 ± 0.02 in QM and 0.04 ± 0.03 in MI, and the response time (s) was 2.81 ± 0.06 in QM and 2.86 ± 0.10 in MI.

Our initial findings on asynchronous BCI modeling are consistent with previous studies that have demonstrated superior QM classification in synchronous paradigms as compared to MI [2]. Notably, only minor hyperparameter optimization was performed for SimpleNet, leaving ample room for improvement in classification. Given the superior classification of AM over MI [1] and the promising preliminary findings presented here, the use of AM by end-users appears to be a viable option. Utilizing QM in studies that model AM could likely lead to further promotion and development of this technique. Additionally, the comparable nature of QM, AM, and overt movement implies their applicability in conveying intention via gaze-controlled interfaces. Although overt motor confirmation is suitable, MI-BCIs have shown inadequacies in this regard.

Received: 15.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

Keywords: neurorehabilitation; brain-computer interface; quasi-movements; movement attempts; motor imagery; asynchronous classification; EEG.

To cite this article:

Shishkin SL, Berdyshev DA, Yashin AS, Zabolotniy AY, Ossadtchii AE, Vasilyev AN. Quasi-movements and attempted movements: a possible alternative to motor imagery in BCI-based neurorehabilitation. *Genes & Cells*. 2023;18(4):687–690. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623412>

ADDITIONAL INFORMATION

Funding sources. The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-19-00528.

REFERENCES

1. Chen S, Shu X, Wang H, et al. The differences between motor attempt and motor imagery in brain-computer interface accuracy and event-related desynchronization of patients with with hemiplegia. *Frontiers in Neurobotics*. 2021;15:706630. doi: 10.3389/fnbot.2021.706630
2. Nikulin VV, Hohlefeld FU, Jacobs AM, Curio G. Quasi-movements: A novel motor-cognitive phenomenon. *Neuropsychologia*. 2008;46(2):727–742. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.008
3. Vasilyev AN, Yashin AS, Shishkin SL. Quasi-movements and “quasi-quasi-movements”: Does residual muscle activation matter? *Life*. 2023;13(2):303. doi: 10.3390/life13020303
4. Yashin AS, Shishkin SL, Vasilyev AN. Is there a continuum of agentive awareness across physical and mental actions? The case of quasi-movements (submitted). *Consciousness and Cognition*. 2023;112:103531. doi: 10.1016/j.concog.2023.103531
5. Petrosyan A, Voskoboinikov A, Sukhinin D, et al. decoding from a small set of spatially segregated minimally invasive intracranial EEG electrodes with a compact and interpretable neural network. *Journal of Neural Engineering*. 2022;19(6). doi: 10.1088/1741-2552/aca1e1

AUTHORS' CONTACT INFO

* S.L. Shishkin; address: 29 Sretenka street, 127051 Moscow, Russian Federation; e-mail: sergshishkin@mail.ru