

УДК 612.825

DOI: 10.35693/2500-1388-2019-4-3-30-35

Нейрофизиология моторного воображения в практике нейрореабилитации и технологии ИМК

Е.С. Коровина, М.С. Сергеева, А.В. Захаров, В.Ф. Пятин

Аннотация

Последние несколько десятилетий моторное воображение привлекает внимание исследователей как прототип «воплощенного познания», а также в качестве основы для нейрореабилитации и взаимодействия мозг – компьютер. В настоящем обзоре раскрываются понятие моторного воображения, факторы, характеризующие и влияющие на этот процесс, его нейронные корреляты и возможности для применения в нейрореабилитации и технологии интерфейс «мозг – компьютер». Объясняются некоторые расхождения и изменчивость результатов предыдущих исследований, что поможет оптимизировать дизайн исследований в соответствии с целью каждого исследования в будущем.

Ключевые слова: моторное воображение, интерфейс «мозг – компьютер», нейрореабилитация.

Конфликт интересов: не заявлен.

Для цитирования:

Коровина Е.С., Сергеева М.С., Захаров А.В., Пятин В.Ф. **Нейрофизиология моторного воображения в практике нейрореабилитации и технологии ИМК.** Наука и инновации в медицине. 2019;4(3):30-35.

doi: 10.35693/2500-1388-2019-4-3-30-35

ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России (Самара, Россия)

Сведения об авторах

Коровина Е.С. – ассистент кафедры физиологии с курсом безопасности жизнедеятельности и медицины катастроф. ORCID: 0000-0002-7448-3696

Сергеева М.С. – к.б.н., доцент, доцент кафедры физиологии с курсом безопасности жизнедеятельности и медицины катастроф. ORCID: 0000-0002-0926-8551

Захаров А.В. – к.м.н., доцент кафедры неврологии и нейрохирургии. ORCID: 0000-0003-1709-6195

Пятин В.Ф. – д.м.н., профессор, заведующий кафедрой физиологии с курсом безопасности жизнедеятельности и медицины катастроф. ORCID: 0000-0001-8777-3097; Scopus Author ID: 0000-0001-8777-3097

Автор для переписки

Коровина Екатерина Сергеевна

Адрес: Самарский государственный медицинский университет, ул. Чапаевская, 89, г. Самара, Россия, 443099.

E-mail: korovina_ekateri@mail.ru

Тел.: + 7 (846) 260 33 64.

ТМС – транскраниальная магнитная стимуляция; ИМК – интерфейс «мозг – машина», ИМК – интерфейс «мозг – компьютер»;

ЭЭГ – электроэнцефалография; ПЭТ – позитронно-эмиссионная

томография; МРТ – магнитно-резонансная томография;

МЭГ – магнитоэнцефалография.

Рукопись получена: 07.09.2019

Рецензия получена: 30.09.2019

Решение о публикации принято: 02.10.2019

Neurophysiology of motor imagery in neurorehabilitation and BCI technologies

Ekaterina S. Korovina, Mariya S. Segreeva, Aleksandr V. Zakharov, Vasilii F. Pyatin

Abstract

Over the last few decades, motor imagery was in the focus of the researchers' attention as a prototypical example of "embodied cognition", and as a basis for neuro-rehabilitation and brain-computer interfaces. This review reveals the concept of motor imagery, the factors characterizing and influencing this process, its neural correlates, and the possibilities for using in neurorehabilitation and brain-computer interfaces. The article explains some discrepancies and variability in findings from previous studies, that will help to optimize a study design in accordance with the purpose of each study in the future.

Keywords: motor imagery, brain-computer interface, neuro-rehabilitation.

Conflict of interest: nothing to disclose.

Citation

Korovina ES, Segreeva MS, Zakharov AV, Pyatin VF. **Neurophysiology of motor imagery in neurorehabilitation and BCI technologies.** Science & Innovations in Medicine. 2019;4(3):30-35.

doi: 10.35693/2500-1388-2019-4-3-30-35

Samara State Medical University (Samara, Russia)

Information about authors

Ekaterina S. Korovina – assistant of the Department of physiology with the course of life safety and disaster medicine. ORCID: 0000-0002-7448-3696

Mariya S. Segreeva – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of physiology with the course of life safety and disaster medicine. ORCID: 0000-0002-0926-8551

Aleksandr V. Zakharov – PhD, Associate Professor of the Department of neurology and neurosurgery. ORCID: 0000-0003-1709-6195

Vasilii F. Pyatin – PhD, Professor, Head of the Department of physiology with the course of life safety and disaster medicine. ORCID: 0000-0001-8777-3097; Scopus Author ID: 0000-0001-8777-3097

Corresponding Author

Ekaterina S. Korovina

Address: Samara State Medical University, 89 Chapayevskaya st., Samara, Russia, 443099.

E-mail: korovina_ekateri@mail.ru

Phone: + 7 (846) 260 33 64.

Received: 07.09.2019

Revision Received: 30.09.2019

Accepted: 02.10.2019

■ ВВЕДЕНИЕ

Моторные образы, или моторное воображение, стали популярной темой исследований, в том числе психологии, когнитивной нейробиологии, нейрофизиологии, нейровизуализации и клинической неврологии. Одна из причин такого распространенного интереса проистекает из уникальности моторных образов как когнитивной способности, привязанной к телу, или «воплощенном» в познании. Архетипическим примером являются двигательные изображения, неявно используемые для визуального распознавания формы. Более того, моторные образы, хотя и являются познавательной сущностью, по-видимому, включают механизмы контроля и нейрокорреляты фактического движения, предоставляя уникальную возможность для изучения нейронного контроля локомоции. Во многих исследованиях есть доказательства этого утверждения. Так, данные транскраниальной магнитной стимуляции (TMS) показывают, что моторные образы усиливают кортикоспинальную возбудимость [1–3]. Моторные образы также привлекают внимание ученых как техника спортивной тренировки и нейрореабилитации. Относительно недавно моторные образы стали важной основой в интерфейсе «мозг – машина» / «мозг – компьютер» (ИММ / ИМК) для людей с ограниченными физическими возможностями. Моторные образы – это когнитивная способность, обычно определяемая как «умственное моделирование», или «умственная репетиция», движений без реальных движений [4]. Следует отметить, что моторные воображения не представляют собой однородной способности. Дело в том, что моторный контроль и моторные образы связаны с планированием движения и подготовкой к выполнению движения, что может быть связано с «подавлением» моторного исполнения. Нейронные механизмы этих процессов различаются в зависимости от того, какая стадия моторного контроля задействована в конкретной задаче двигательной визуализации или в индивидуальной стратегии практического использования моторного воображения. Моторные образы могут расходиться в зависимости от задач или стратегии, связанной с виртуальным восприятием зрительных, слуховых, соматосенсорных (кинестетических) и вестибулярных ощущений. Кроме того, говоря о нейрофизиологии моторного воображения, необходимо понимать, в какой степени моторные образы намеренно генерируются и становятся осознанными. Следовательно, имеется различие между сознательными (явными) моторными образами и бессознательными (неявными) моторными образами. Эти факторы не в полной мере стали объектом исследований и обсуждений результатов исследований моторного воображения. Однако они могут существенно влиять на результаты нейропсихологических, физиологических и визуальных исследований.

■ ФАКТОРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ МОТОРНЫЕ ОБРАЗЫ

В рамках настоящего обзора по нейрофизиологии моторного воображения целесообразно остановиться на анализе таких ключевых нейрофизиологических

механизмов этой ментальной способности, как моторный контроль, эксплицитность, сенсорная модальность и корковое представительство.

Нейрофизиология моторного контроля. Способность человека создавать ментальные двигательные образы, по-видимому, основана на механизмах нейронного контроля движений. В исследованиях моторного воображения и в исследованиях реальных движений важным фактором является знание о задействованном моторном эффекторе и параметрах, например, амплитуды движения, которые необходимо представить. Эффекторы, которые могут быть задействованы в моторном воображении, хорошо известны в нейрофизиологии, а влияние планируемого действия эффектора на распределение мозговой активности также хорошо исследовано в нейрофизиологии. Так, известны исследования влияния уровней силы во время моторного воображения на деятельность мозга [5, 6] и кортикоспинальную возбудимость [2, 5]. Однако до настоящего времени нет однозначных данных и понимания того, каким образом различные этапы моторного контроля могут быть вовлечены в различные моторные образы. Известно, что нейрофизиологические этапы включают планирование движения, его подготовку и выполнение. В частности, на этапе планирования может быть указана цель, но пока не сообщается, в какой руке планируется моторное воображение. Следовательно, на этапе планирования может существовать несколько возможных планов действий, в то время как моторная команда может быть однозначно отправлена на мышцы на этапе подготовки. Моторное воображение должно иметь аналоги этих этапов, если оно определяется как моделирование процессов управления движением. Стадия планирования, или подготовки моторного контроля, не сопровождается мышечной активностью, а следовательно, в моторном образе реализуется процесс моторного торможения [7]. В связи с этим моторные образы особенно трудно использовать в нейрореабилитации с ИМК у пациентов с ампутированными конечностями или у парализованных людей из-за сложности с проведением грани между воображением движения и его выполнением.

Эксплицитность моторного воображения. Исследования в этой области связаны с кинестетическими образами от первого лица на стадии планирования (подготовки) моторного контроля с предварительно проиллюстрированными визуальными подсказками. Было обнаружено существенное совпадение между мозговой активностью, вызванной инструкцией, и явной мозговой активностью, связанной с моторными изображениями, в премоторно-теменных кортикальных областях. Это указывает на общий нейронный механизм между неявными моторными воображениями и явными, или осознаваемыми, моторными воображениями на стадии планирования моторного контроля [8]. Аналогичные результаты были получены при сравнении неявных воображений вращения руки и явного воображения вращения руки с использованием частотного анализа сигналов электроэнцефалографии (ЭЭГ) [9].

Роль сенсорной модальности. Традиционно виртуальные сенсорные ощущения во время моторного воображения подразделяются на два типа: кинестетический и визуальный. Исследование восприятия сенсорной стимуляции, тесно связанной с движением, часто вызывает активацию моторных воображений. Известный пример – наблюдения за движениями. Обнаружение систем зеркальных нейронов, которые активируются во время наблюдений, указывает на то, что анализ визуальной информации о движении совпадает с анализом выполнения того же самого движения [10]. Имеются данные о том, что системы зеркальных нейронов играют важную роль в моторных образах с подавлением реального движения [11, 12]. Важное значение в нейрофизиологии моторного воображения имеют условные сигналы [8], слуховые стимулы, такие как звук шагов [13] или музыка [14], а также сенсорные стимулы, вызывающие двигательные иллюзии [15, 16] и комбинация соматосенсорных и зрительных стимулов, которые могут вызывать вестибулярные ощущения [17]. Стратегии визуализации существенно модулируют паттерн мозговой активности и кортикомоторной возбудимости во время задач моторной визуализации [3, 18]. Таким образом, моторному воображению могут способствовать все типы сенсорных сигналов, которые могут быть связаны с движением. При этом ключевое значение в моторном воображении может иметь конкретный сенсорный тип сигнала в зависимости от основной цели нейрореабилитации.

Субъективный образ моторного воображения. Моторные изображения были классифицированы либо от первого лица, либо от третьего лица. Это различие использовалось в моторном воображении визуального типа [19]. Теоретически эта концепция может быть расширена до других модальностей. Более того, хотя традиционные исследования моторных изображений, как правило, фокусируются на перспективах от первого лица, исследования перспективных моторных изображений от третьего лица могут естественным образом распространяться в контексте социальной нейронауки.

■ НЕЙРОННЫЕ КОРРЕЛЯТЫ МОТОРНЫХ ОБРАЗОВ

В 1990-е годы начали исследовать нейронные корреляты моторных изображений, используя позитронно-эмиссионную компьютерную томографию (ПЭТ), функциональную магнитно-резонансную томографию (МРТ) и магнитоэнцефалографию (МЭГ). Эти методы нейровизуализации позволили продемонстрировать, что тесты с двигательной визуализацией активируют многие кортикальные и подкорковые области, которые в значительной степени перекрываются с таковыми при выполнении движения [8, 20, 21]. Доминирует мнение, что моторные образы рекрутируют корковые и подкорковые области, соответствующие выполнению движений. Однако в литературе существуют противоречия по этому вопросу.

Первичная моторная кора. Известное противоречие включает в себя величину и точное местоположение связанной с моторным воображением активации в

первичной моторной коре (M1). Так, одни исследователи, используя воображения движения пальцев, обнаружили значительную активность в M1 [22], а другие не выявили активации [8, 23]. Есть мнение, что стадия моторного контроля, вовлеченная в конкретную задачу формирования двигательного воображения, влияет на степень активности M1. Кроме этого, сенсорные модальности, сопровождаемые моторными образами, модулируют паттерн мозговой активности. В частности, во время моторных образов кинестетического и визуального типа визуальный тип активировал преимущественно зрительные области и верхнюю теменную долю, тогда как кинестетический тип активировал связанные с движением структуры и нижнюю теменную долю [18]. Кинестетические образы, но не визуальные образы модулируют кортикомоторную возбудимость при выполнении двигательных задач [24]. Моторное воображение от первого лица активирует сенсомоторные области более заметно, чем моторное воображение от третьего лица [19]. Наконец, несоответствие методик исследования коркового представительства моторного воображения имеет существенные различия в определении M1.

Премоторные и дополнительные моторные зоны. Нейрофизиология моторного воображения взаимосвязана с соматотопической организацией коры головного мозга человека [20, 25]. Так, моторное воображение вращений ног активировало дорсальные моторные и соматосенсорные области [21, 26], а при воображении вращений рук эти области не активировались [27]. Параллельность в соматотопической организации коры и ее активности проявляется также во время наблюдения и выполнения действий, главным образом, в премоторной и теменной областях [28]. Следовательно, соматотопически организованная активность во время моторного воображения включает премоторные и дополнительные моторные области, которые являются наиболее последовательно выявленными областями в качестве субстратов моторных образов [8, 21]. Недавние исследования с нейровизуализацией подтвердили фундаментальную роль этих моторных кортикальных зон в моторном воображении. При этом премоторная кора является ключевой областью коры головного мозга в генерации моторного воображения [29]. Этот вывод обосновывается тем, что часть премоторной коры соединяет между собой когнитивные и двигательные компартменты мозга [30]. Сравнение нейрофизиологии двигательных образов по выполнению задач захвата и вращения руки показали, что M1 и дополнительные двигательные зоны имеют лучшую прогностическую ценность во время движения и формирования изображений [31]. Исследование эффективности ИМК коррелировали с объемами активации серого вещества в премоторной и дополнительной моторной областях [32].

Задняя теменная кора. Исследования убедительно доказывают значимость задней теменной коры для инициации моторных образов. Различные двигательные задачи продемонстрировали активность в задней теменной коре [8, 20, 21, 23]. Эти области коры головного мозга участвуют в планировании движения [33,

34]. Пациенты с повреждением задней теменной коры имеют нарушения с воображаемыми движениями [35]. Другие сенсорные области также связаны с умственными двигательными образами. В частности, вибрационная стимуляция сухожилий мышц вызывает активацию первичной соматосенсорной области, а также М1 [15, 16]. Прослушивание звуков шагов индуцирует активность в задней верхней височной борозде [13]. Эта деятельность коры больших полушарий головного мозга осуществляет визуальный анализ движения на основе слуховой информации, так как задняя верхняя височная борозда играет существенную роль в визуальном анализе движения. Следовательно, типы виртуальных сенсорных модальностей, связанных с двигательными воображениями, могут существенно изменить активность указанных сенсорных областей коры.

Префронтальные области. Фронтальные когнитивные области могут иметь отношение к подавлению реального движения во время моторного воображения. В частности, известно, что вентральная префронтальная кора и передняя поясная извилина участвуют в подавлении движения на подготовительной стадии движения [36]. Роль премоторной коры также указывается в тормозном контроле движения, или «импульсном контроле» [36, 37]. Можно сделать заключение, что префронтальная кора, передняя поясная извилина и премоторная кора являются наиболее часто активизируемыми областями коры во время моторного воображения.

Подкорковые области. Моторные образы последовательно рекрутируют подкорковые двигательные зоны, такие как базальные ганглии и мозжечок. Хотя роль этих подкорковых областей для моторных изображений остается неясной, вполне вероятно, что вклад этих областей в моторные изображения будет осуществляться через нейронные сети, связанные с кортикальными моторными областями. Например, двигательные образы замедляются у пациентов с болезнью Паркинсона [38], поскольку базальные ганглии модулируют такой параметр моторного образа, как скорость. Мозжечок может участвовать в моделировании двигательного образа, поскольку обрабатывает эфферентную копию от моторной коры [39].

■ ПРИМЕНЕНИЕ МОТОРНОГО ВООБРАЖЕНИЯ В НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ И ИНТЕРФЕЙСАХ «МОЗГ – КОМПЬЮТЕР»

Моторное воображение относят к многообещающему методу нейрореабилитации [40], поскольку имеются общие нейронные механизмы между двигательным воображением и выполнением реального движения. Перспективность метода заключается в том, что можно тренировать моторные репрезентации в мозге через умственную практику движений [41, 42]. Объединение двигательных образов с традиционной физиотерапией приводит к дополнительным реабилитационным эффектам [43, 44]. Нейрореабилитационная эффективность метода моторного воображения, вероятно, зависит от того, как моторные изображения внедряются в реабилитацию. Разработки в области нейроинженерии

сделали возможным онлайн-мониторинг эффективности метода моторного воображения на основе нейророботной связи в устройствах ИМК. Известно, что сенсомоторные ритмы увеличиваются в состоянии покоя и уменьшаются во время выполнения движений и моторных воображений (десинхронизация, связанная с событием или ERD). В большинстве ИМК субъектам предлагается использовать моторные изображения для индукции десинхронизации [32, 45], чтобы ИМК могли определять двигательные намерения человека. Следовательно, уровень десинхронизации сенсомоторных ритмов ЭЭГ обычно используется в качестве показателя того, как субъект участвует в задаче двигательного воображения. Вместе с тем моторное воображение стоп вызывает индуцированную синхронизацию (ERS) в бета-диапазоне у пациентов с ампутированными нижними конечностями. Известно также различие степени нейромодулирующих эффектов при транскраниальной стимуляции постоянным током между пациентами с ампутированными конечностями и здоровыми людьми [46]. Таким образом, если моторное воображение вызывает десинхронизацию или синхронизацию сенсомоторных ритмов на записях ЭЭГ, они могут отличаться в зависимости от фактора использования и его физического состояния. В любом случае ИМК предлагают визуализацию уровня ERD / ERS, отражающего производительность, так что субъект может модулировать свою мозговую активность в режиме онлайн (то есть нейророботная связь). Нейрореабилитация на основе ИМК или нейроуправления является новым многообещающим направлением исследований [47–49].

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейрореабилитация на основе моторного воображения, включая ИМК, становится основным направлением исследований ментальных процессов мозга человека. Знания нейрофизиологии моторного воображения актуальны для проектирования этапов управления движением и виртуальными сенсорными модальностями двигательного образа. Сенсорная модальность выбора кинестетически-доминантной картины от первого лица работает при реорганизации моторно-соматосенсорных сетей лучше, чем другие типы модальностей. Тем не менее выбор стадии управления, например, экзоскелетом, не совсем прост, учитывая, что двигательные образы могут включать механизмы подавления / торможения движения. Для повышения силы мышц у пациентов во время нейрореабилитации важно выполнение моторного действия. При этом моторные образы как таковые наиболее эффективно работают в сочетании с определенной степенью дополнительной умственной практики. Тренировки на основе моторных воображений также могут быть полезны у пациентов с повышенной мышечной активностью из-за спастичности мышц. ■

Конфликт интересов: все авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Liang N, Ni Z, Takahashi M, Murakami T, et al. Effects of motor imagery are dependent on motor strategies. *Neuroreport*. 2007;6;18(12):1241–5. doi: 10.1097/WNR.0b013e3282202707 PMID: 17632275
2. Mizuguchi N, Umehara I, Nakata H, Kanosue K. Modulation of corticospinal excitability dependent upon imagined force level. *Exp Brain Res*. 2013;230(2):243–9. doi: 10.1007/s00221-013-3649-3 PMID: 23877227
3. Stinear CM, Byblow WD. Motor imagery of phasic thumb abduction temporally and spatially modulates corticospinal excitability. *Clin Neurophysiol*. 2003;114(5):909–14. doi: 10.1016/s1388-2457(02)00373-5 PMID: 12738438
4. Grush R. The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception. *Behav Brain Sci*. 2004;27(3):377–96; discussion 396–442. PMID: 15736871
5. Bonnard M, Gallea C, De Graaf JB, Pailhous J. Corticospinal control of the thumb-index grip depends on precision of force control: a transcranial magnetic stimulation and functional magnetic resonance imagery study in humans. *Eur J Neurosci*. 2007;25(3):872–80. doi: 10.1111/j.1460-9568.2007.05320.x PMID: 17328782
6. Mizuguchi N, Nakata H, Kanosue K. Effector-independent brain activity during motor imagery of the upper and lower limbs: an fMRI study. *Neurosci Lett*. 2014;3;581:69–74. doi: 10.1016/j.neulet.2014.08.025 PMID: 25150928
7. Guillot A, Di Rienzo F, Macintyre T, et al. Imagining is not doing but involves specific motor commands: a review of experimental data related to motor inhibition. *Front Hum Neurosci*. 2012;6:247.
8. Hanakawa T, Dimyan MA, Hallett M. 2008. Motor planning, imagery, and execution in the distributed motor network: a time-course study with functional MRI. *Cereb Cortex*. 2008;18(12):2775–88. doi: 10.1093/cercor/bhn036 PMID: 18359777
9. Osuagwu BA, Vuckovic A. Similarities between explicit and implicit motor imagery in mental rotation of hands: an EEG study. *Neuropsychologia*. 2014;65:197–210. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.029 PMID: 25446966
10. Rizzolatti G, Sinigaglia C. The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. *Nat Rev Neurosci*. 2010;11(4):264–74. doi: 10.1038/nrn2805 PMID: 20216547
11. Kraskov A, Dancause N, Quallo MM, et al. Corticospinal neurons in macaque ventral premotor cortex with mirror properties: a potential mechanism for action suppression? *Neuron*. 2009;64(6):922–30. doi: 10.1016/j.neuron.2009.12.010 PMID: 20064397
12. Vigneswaran G, Philipp R, Lemon RN, Kraskov A. M1 corticospinal mirror neurons and their role in movement suppression during action observation. *Curr Biol*. 2013;23(3):236–43. doi: 10.1016/j.cub.2012.12.006 PMID: 23290556
13. Bidet-Caulet A, Voisin J, Bertrand O, Fonlupt P. Listening to a walking human activates the temporal biological motion area. *NeuroImage*. 2005;28(1):132–9 doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.06.018 PMID: 16027008
14. Harris R, de Jong BM. Cerebral activations related to audition-driven performance imagery in professional musicians. *PLoS One*. 2014;9(4):e93681. doi: 10.1371/journal.pone.0093681 PMID: 24714661
15. Naito E, Roland PE, Ehrsson HH. I feel my hand moving: a new role of the primary motor cortex in somatic perception of limb movement. *Neuron*. 2002;36(5):979–88. doi: 10.1016/s0896-6273(02)00980-7 PMID: 12467600
16. Naito E, Matsumoto R, Hagura N, et al. Importance of precentral motor regions in human kinesthesia: a single case study. *Neurocase*. 2011;17(2):133–47. doi: 10.1080/13554794.2010.498428 PMID: 20830645
17. Ionta S, Heydrich L, Lenggenhager B, et al. Multisensory mechanisms in temporo-parietal cortex support self-location and first-person perspective. *Neuron*. 2011;70(2):363–74. doi: 10.1016/j.neuron.2011.03.009 PMID: 21521620
18. Guillot A, Collet C, Nguyen VA, et al. Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study. *Hum Brain Mapp*. 2009;30(7):2157–72. doi: 10.1002/hbm.20658 PMID: 18819106
19. Ruby P, Decety J. Effect of subjective perspective taking during simulation of action: a PET investigation of agency. *Nat Neurosci*. 2001;4(5):546–550. doi: 10.1038/87510 PMID: 11319565
20. Ehrsson HH, Geyer S, Naito E. Imagery of voluntary movement of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representations. *J Neurophysiol*. 2003;90(5):3304–3316. doi: 10.1152/jn.01113.2002 PMID: 14615433
21. Iseki K, Hanakawa T, Shinozaki J, et al. Neural mechanisms involved in mental imagery and observation of gait. *NeuroImage*. 2008;41(3):1021–31. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.03.010 PMID: 18450480
22. Lotze M, Montoya P, Erb M. Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *J Cogn Neurosci*. 1999;11(5):491–501. PMID: 10511638
23. Naito E, Kochiyama T, Kitada R. Internally simulated movement sensations during motor imagery activate cortical motor areas and the cerebellum. *J Neurosci*. 2002a;22(9):3683–3691. doi: 20026282 PMID: 11978844
24. Stinear CM, Byblow WD, Steyvers M, et al. Kinesthetic, but not visual, motor imagery modulates corticomotor excitability. *Exp Brain Res*. 2006;168:157–164.
25. Hanakawa T, Parikh S, Bruno MK, Hallett M. Finger and face representations in the ipsilateral precentral motor areas in humans. *J Neurophysiol*. 2005;93(5):2950–2958. doi: 10.1152/jn.00784.2004 PMID: 15625099
26. Malouin F, Richards CL, Jackson PL. Brain activations during motor imagery of locomotor-related tasks: a PET study. *Hum Brain Mapp*. 2003;19(1):47–62. doi: 10.1002/hbm.10103 PMID: 12731103
27. Hanakawa T, Hosoda C, Shindo S, Honda M. Mental rotation of hands and feet involves somatotopically organized brain regions. *Neurosci Res*. 2007;58:60.
28. Buccino G, Binkofski F, Fink GR, et al. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur J Neurosci*. 2001;13(2):400–404. PMID: 11168545
29. Xu L, Zhang H, Hui M, Long Z, et al. Motor execution and motor imagery: a comparison of functional connectivity patterns based on graph theory. *Neuroscience*. 2014;261:184–94. doi: 10.1016/j.neuroscience.2013.12.005. PMID: 24333970
30. Hanakawa T. Rostral premotor cortex as a gateway between motor and cognitive networks. *Neurosci Res*. 2011;70(2):144–54. doi: 10.1016/j.neures.2011.02.010 PMID: 21382425
31. Park CH, Chang WH, Lee M, et al. Which motor cortical region best predicts imagined movement? *NeuroImage*. 2015;113:101–10. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.03.033 PMID: 25800212
32. Kasahara K, DaSalla CS, Honda M, Hanakawa T. Neuroanatomical correlates of brain-computer interface performance. *NeuroImage*. 2015;110:95–100. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.01.055 PMID: 25659465
33. Aflalo T, Kellis S, Klaes C, et al. Neurophysiology. Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human. *Science*. 2015;348(6237):906–10. doi: 10.1126/science.aaa5417 PMID: 25999506
34. Cui H, Andersen RA. Different representations of potential and selected motor plans by distinct parietal areas. *J Neurosci*. 2011;31(49):18130–6. doi: 10.1523/JNEUROSCI.6247-10.2011 PMID: 22159124
35. Schwoebel J, Boronat CB, Branch Coslett H. The man who executed "imagined" movements: evidence for dissociable components of the body schema. *Brain Cognit*. 2002;50(1):1–16. PMID: 12372347
36. Duque J, Labruna L, Verset S, et al. Dissociating the role of prefrontal and premotor cortices in controlling inhibitory mechanisms during motor preparation. *J Neurosci*. 2012;32(3):806–16. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4299-12.2012 PMID: 22262879
37. Kroeger J, Baumer T, Jonas M, et al. Charting the excitability of premotor to motor connections while withholding or initiating a selected movement. *Eur J Neurosci*. 2010;32:1771–1779.
38. Dominey P, Decety J, Broussolle E, et al. Motor imagery of a lateralized sequential task is asymmetrically slowed in hemi-Parkinson's patients. *Neuropsychologia*. 1995;33(6):727–741. doi: 10.1016/0028-3932(95)00008-q PMID: 7675164

39. Grush R. The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception. *Behav Brain Sci.* 2004;27(3):377–396 (discussion 396–442). PMID: 15736871
40. Sharma N, Pomeroy VM, Baron JC. Motor imagery: a backdoor to the motor system after stroke? *Stroke: J Cereb Circ.* 2006;37(7):1941–1952. doi: 10.1161/01.STR.0000226902.43357.fc PMID: 16741183
41. Butler AJ, Page SJ. Mental practice with motor imagery: evidence for motor recovery and cortical reorganization after stroke. *Arch Phys Med Rehabil.* 2006;87:S2–S11. doi: 10.1016/j.apmr.2006.08.326 PMID: 17140874
42. Page SJ, Szaflarski JP, Eliassen JC, Pan H, Cramer SC. Cortical plasticity following motor skill learning during mental practice in stroke. *Neurorehabil. Neural Repair.* 2009;23(4):382–8. doi: 10.1177/1545968308326427 PMID: 19155350
43. Page SJ, Levine P, Leonard A. Mental practice in chronic stroke: results of a randomized, placebo-controlled trial. *Stroke.* 2007;38(4):1293–7. doi: 10.1161/01.STR.0000260205.67348.2b PMID: 17332444
44. Liu KP, Chan CC, Wong RS, et al. A randomized controlled trial of mental imagery augment generalization of learning in acute poststroke patients. *Stroke.* 2009;40(6):2222–5. doi: 10.1161/STROKEAHA.108.540997 PMID: 19390069
45. Wolpaw JR, McFarland DJ. Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain–computer interface in humans. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2004;101:17849–17854.
46. Takeuchi N, Mori T, Nishijima K, et al. Inhibitory transcranial direct current stimulation enhances weak beta event-related synchronization after foot motor imagery in patients with lower limb amputation. *J Clin Neurophysiol.* 2015;32(1):44–50. doi: 10.1097/WNP.000000000000123 PMID: 25159737
47. Pichiorri F, Morone G, Petti M, et al. Brain–computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery. *Ann Neurol.* 2015;77(5):851–65. doi: 10.1002/ana.24390 PMID: 25712802
48. Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M. Brain–machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Ann Neurol.* 2013;74:100–108.
49. Shindo K, Kawashima K, Ushiba J. Effects of neurofeedback training with an electroencephalogram-based brain–computer interface for hand paralysis in patients with chronic stroke: a preliminary case series study. *J Rehabil Med.* 2011;43(10):951–7. doi: 10.2340/16501977-0859 PMID: 21947184