**Иллюзорное восприятие движения улучшает двигательный контроль за протезом кисти.**

Источник: Клевеландская клиника

Введение

Пространственная ориентация тела лежит в основе целенаправленного движения и сообщается множеством сигналов, исходящих от мышц, сухожилий, суставов и кожи. Во время выполнения движений внутренняя модель мозга использует эти данные для прогнозирования физических результатов двигательных комманд. Далее эти прогнозы сравниваются с результатами обратной связи, поступающими с датчиков движения мышц (кинестезия/ приоперцепция), для вычисления ошибок движения и более точного управления. Несмотря на то, что кинестезия выполняет основную роль в движении, она не изучена в полной мере и в настоящеее время нет эффективных методов лечения по ее восстановлению.

Людям, подвергнувшимся ампутации, предоставляют все более усовершенствованные протезы, предназначенные для восстановления утраченной способности движения, в то время как кинестезии, которая отвечает за направление этого движения, уделяется меньшее внимание. На сегодняшний день при ампутации верхних конечностей отдается предпочтение старым вариантам протезирования с кабельным захватом с помошью крюков, либо же механическим протезам, так как через кабельную систему совместные движения могут ощущаться интуитивно. Бионические протезы кисти, напротив, не обеспечивают значительной обратной связи от движения либо касания и должны все время тщательно контролироваться для выполнения даже самых простых операций, во многом в ущерб эффективному контролю или многозадачности. К тому же зрение является недостаточной заменой кинестезии и не может полностью компенсировать потерю собственных сенсорных ощущений для прогнозирования движения, корректировки ошибок, эмпирического познания и самоориентации.

Заметные успехи в получении обратной связи были достигнуты в работе соматосенсорной системы (давление, постукивание, касание во время движения, ощущение вибрации, текстуры) у людей, использующих протезы с регенеративными нейронными интерфейсами. Однако кинестезия (ощущение реального движения) является совершенно отличной сенсорной модальностью от прикосновения (ощущение контакта и силы).

Электростимуляция коры головного мозга, замена обратной внешней связи и подходы к обучению приматов показали, что информация о положении кисти рук имеет важное значение для улучшения двигательного контроля. Однако замена ранее не связанного утраченного внутреннего ощущения обратной внешней связью требует изучения новых ассоциаций между ними. Стимуляция с помощью имплантированных периферических нервных электродов позволяет людям с ампутированными конечностями ощутить пассивное положение локтевого сустава и движения пальцев, и при доказательстве этой концепции автоматическое управление движением стало достижимым и эффективным у каждого отдельного участника. Однако полная функциональная и перцептивная кинестетическая структура в системах протезов на данный момент все еще отсутствует.

Помимо важной роли кинестезии в исполнении движений и исправлении ошибок, согласованность целенаправленного движения и мгновенной обратной связи от него обеспечивает чувство самостоятельности, которое отличает собственные действия от иных. Протезы не обеспечивают обратную связь, которая дает возможность человеку почувствовать, будто он или она контролирует собственные движения. Придание с помощью этих устройств чувства самостоятельности в действительности поможет пациентам осуществлять контроль за протезированными конечностями, в чем и состоит ключевой аспект их использования.

Для воссоздания кинестезии при выполнении комплексных совместных хватательных движений мы решили применить иллюзию восприятия движения, вызванную выбрациями в двунаправленных нейронных интерфейсах. Таким образом, восприятие воссоздается автоматически при работе внутреннего кольцевого управления движениями у пациента с ампутированной конечностью, улучшая функционирование в реальном времени и не прибегая к зрительным или иным видам обратной связи, объединяет намерение и действие путем посредничества, передается к протезированной кисти и сразу транслируется в протезной системе.

Результаты

Кинестетические иллюзии, вызванные вибрациями, воссоздают восприятие комплексных хватательных движений у людей с ампутированными конечностями

У здоровых людей при вибрации сухожилий конечности с частотой от 70 до 150 Гц возникает определенное восприятие движения в суставах, даже если эти суставы, пересекаемые сухожилием, не меняют своей позиции. Эта кинестетическая иллюзия настолько сильна, что может создать у человека впечатление, будто его конечности принимают неестественное положение. Так, сложные пространственные движения руками моделируются путем создания кинестетических иллюзий множества суставов. Мы исследовали применение вибрации для создания иллюзии движения у людей, подвергшихся направленной реиннервации после ампутации верхних конечностей. Нашей целью являлось создание биологического интерфейса нервной системы для контроля за протезированной конечностью и возникновения обратной связи. В связи с этим, двигательные и центростремительные нервы, оставшиеся после ампутации, подверглись хирургическому перенаправлению для реиннервации новых проксимальных участков мышц и кожи. Таким образом, попытки произвести движение утраченной конечностью провоцируют сокращение реиннервированных мышц. В результате полученные электромиографические (ЭМГ) сигналы используются впоследствие для интуитивного управления протезированной конечностью. Прикосновение к реиннервированной коже ощущается как прикосновение к утраченной кисти с такой же чувствительностью к вибрации, давлению, жаре, холоду и боли.

Используя портативную вибрационную установку, мы производили вибрацию оставшихся проксимальных реиннервированных мышц шестерых участников с ампутированными конечностями (Уч. 1-6; 90 Гц, 500 мкм в нейтральном режиме до пика). Они также использовали свою неповрежденную кисть для демонстрации своих ощущений. Несмотря на полное отсутствие дистальных отделов верхних конечностей от локтя и выше, все участники самостоятельно сообщали о восприятии функционально значимого комплексного движения утраченной кисти, запястья или локтя (рис. 1). Среди шестерых участников мы выделили 22 индивидуальных восприятий движения. Так, мышцы, реиннервированные срединным нервом, порождали различное восприятие сгибания пальцев. Мышцы, реиннервированные лучевым нервом, обеспечивали восприятие разгибания. Воспринимаемые движения ощущались как жесты рук, несмотря на то, что они возникали в бицепсах, трицепсах, плечах и грудных мышцах без какого- либо тактильного соответствия в кожном покрове. Данные результаты свидетельствуют о том, что локтевая и плечевая нервно- сенсорная структура мышц была переназначена посредством реиннервации нервных тканей, которые первоначально располагались в кисти. У пятерых участников мы исследовали взаимосвязь между частотой и амплитудой вибрации и сообщаемой величиной виброиндуцированной иллюзии. Используя линейный электродвигатель, мы применили вибрацию к самому сильному реинервированному участку восприятия мышцы у каждого участника при изменении в диапазоне от 100, 300 или 500 мкм (пик) при 10, 30, 50, 70, 90 или 110 Гц. Мы обнаружили, что участники давали самые высокие оценки значению иллюзорного движения на частотах между 70 и 110 Гц (0-5 по шкале Лайкерта) для каждой из трех амплитуд, которые попадают в отраженный диапазон кинестетической иллюзии.

Рисунок 1

**Восприятие движения у всех участников**

Схема отражает воспринимаемые движения, вызванные вибрацией 90 Гц реиннервированных оставшихся мышц у 6 участников, подвергшихся ампутации ( Уч.1-6), сообщенные при помощи здоровой руки. Все детали отодражены на Рис. 1.

 От начальной позиции ( рис. серого цвета, старт) участники воспринимали движение в направлении и с относительной величиной, обозначенной оранжевыми стрелками, до конечной позиции (рис.черного цвета, финиш). Пальцы указаны как D1 = большой палец, D2 = указательный палец, D3 = средний палец, D4 = безымянный палец, D5 = мизинец.

**Illusory movement perception improves motor control for prosthetic hands**

Source: Cleveland Clinic.

[Go to:](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5906050/)Introduction To effortlessly complete an intentional movement, the brain needs feedback from the body regarding the movement’s progress. This largely non-conscious kinesthetic sense helps the brain to learn relationships between motor commands and outcomes to correct movement errors. Prosthetic systems for restoring function have predominantly focused on controlling motorized joint movement. Without the kinesthetic sense, however, these devices do not become intuitively controllable. Here we report a method for endowing human amputees with a kinesthetic perception of dexterous robotic hands. Vibrating the muscles used for prosthetic control via a neural-machine interface produced the illusory perception of complex grip movements. Within minutes, three amputees integrated this kinesthetic feedback and improved movement control. Combining intent, kinesthesia, and vision instilled participants with a sense of agency over the robotic movements. This feedback approach for closed-loop control opens a pathway to seamless integration of minds and machines.

Spatial awareness of the body, a cornerstone of purposeful movement, is informed by a host of sensory inputs from muscles, tendons, joints, and skin. During motor execution, this sense is used by the brain’s internal forward model to predict the physical outcomes of motor commands. These predictions are then compared to feedback coming from muscle motion sensors (the kinesthetic sense) to compute movement errors and make fine adjustments. Despite its central role in movement, how the kinesthetic sense operates is poorly understood, and currently there are no effective treatments to restore impaired kinesthesia.

Individuals with amputation are provided with increasingly sophisticated prosthetic options for restoring the lost ability to move, but less emphasis has been placed on restoring the lost kinesthetic sensation that guides movements. Many upper limb amputees still prefer older cable-actuated split-hook grippers and body-powered elbows because joint movements can be intuitively felt through the cable system. By contrast, motorized prosthetic hands provide no meaningful feedback for movement or touch and must be carefully watched during the entirety of movement to perform even the simplest of tasks, much to the detriment of efficient control or multi-tasking. In addition, vision is a poor substitute for kinesthesia and cannot fully compensate for the loss of the intrinsic sensory mechanisms for movement prediction, error correction, experiential learning, and self-reference.

Substantial advances have been made in cutaneous touch feedback (pressure, tapping, moving touch, vibration, texture) in humans through the use of implanted and regenerative neural interfaces. However, kinesthesia (pure movement sensation) is an entirely distinct sensory modality from touch (contact and force sensation). Brain cortical electrical microstimulation, external feedback substitution, and learning approaches in a primate model showed that hand position information is critical for improving motor control. However, substituting external feedback for the lost intrinsic sensation requires learning new associations between these previously unrelated pathways. In human amputees, stimulation via implanted peripheral nerve electrodes can provide the ability to sense passive elbow joint positions and finger movements and movement feedback in closed-loop motor control was feasible and effective in functional single participant and single percept demonstrations of concept. However, a comprehensive functional and perceptual framework for kinesthesia in applied prosthetic systems is still lacking.

Beyond the critical role of kinesthesia in motor execution and error correction, the congruency between intentional movements and the immediate sensory feedback from the movements themselves provides a sense of authorship (agency) that distinguishes one’s own actions from those of others. Prosthetic limbs do not provide the movement feedback that makes the user feel as though he or she is in control of their actions. Establishing a sense of agency for these devices will help amputees intrinsically feel in control of their artificial limbs, a key aspect of user acceptance.

Here we used vibration-induced perceptual movement illusions in a human bidirectional neural-machine interface to generate the kinesthetic sensations of complex synergistic grip movements. This engineered perception of movement runs automatically within the amputee user’s intrinsic motor-control loop to improve real-time function without vision or other feedback, fuses intent and action through agency, directly applies to prosthetic hands, and is immediately translatable to a clinical prosthetic system.

Results

Vibration-induced kinesthetic illusions produce perception of complex grip movements in human amputees

In able-bodied individuals, vibrating limb tendons at 70 to 115 Hz generates a joint-specific perception of movement, even though the joint crossed by the tendon is not physically changing position. This kinesthetic illusion is strong enough to give an individual the impression that their extremities are assuming impossible positions and complex 3-dimensional arm movements have been simulated by inducing multi-joint kinesthetic illusions. We investigated the use of vibration to elicit illusions of movement in a group of individuals with upper limb amputation who had undergone targeted reinnervation to create a biological neural-machine interface for prosthetic control and feedback. Specifically, motor and sensory nerves remaining after amputation were surgically redirected to reinnervate new proximal muscle and skin sites. Therefore, attempts to move the missing limbs, trigger contraction of the reinnervated muscles. The resulting electromyographic (EMG) signals are then used to intuitively control computerized motor-driven prosthetic limbs. A touch to the reinnervated skin feels like a touch to the hand that is no longer there, with normal sensory thresholds for vibration, pressure, heat, cold, and pain.

Using a hand-held vibration unit, we vibrated the proximal reinnervated residual muscles of 6 amputee participants (Par1-6; 90 Hz, 500 μm neutral to peak and they used their intact hand to demonstrate what they felt. Despite the complete absence of the distal limb from above the elbow or higher, every amputee participant spontaneously reported perceiving functionally relevant complex movement in their missing hand, wrist, or elbow (Fig. 1) We isolated 22 individual movement percepts across the 6 amputees. Muscles reinnervated by the median nerve provided various percepts of digit flexion. Muscles reinnervated by the radial nerve provided percepts of extension. The perceived movements were experienced as synergistic hand gestures despite being elicited in the biceps, triceps, brachialis, and pectoralis, without cutaneous tactile correspondence in the overlying skin. These results suggest that the sensory-neural structure of the elbow and shoulder muscles was reassigned through reinnervation by the nerves originally serving the hand. In 5 participants, we investigated the relationship between vibrational frequency and amplitude, and the reported magnitude of the vibration-induced illusion. Using a linear motor we applied vibration to the strongest reinnervated muscle percept site for each participant at 100, 300, or 500 μm (neutral-peak) displacements at 10, 30, 50, 70, 90, or 110 Hz. We found that the participants reported the highest magnitude estimates of illusory movement strength (0-5 on a Likert scale) for each of the three amplitudes at frequencies between 70 and 110 Hz, which falls within the reported band of the kinesthetic illusion.

Fig. 1

**Movement percepts for all participants**

Schematics representing perceived movements induced by 90 Hz vibration to the reinnervated residual muscles in 6 amputee participants (Par1-6) reported using the intact hand. Participant details are shown in Fig. 1.

From a start position (grey outlines, Start), participants perceived movement in the direction and relative magnitude indicated by orange arrows to an end position (black outlines, Finish). Digits are specified by D1=thumb, D2=index finger, D3=middle finger, D4=ring finger, D5=little finger.