

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2024-14-3-38-53>

Эффективность перемещения предмета в зависимости от его ориентации в пространстве: кинематический анализ моторного планирования и выполнения

А.О. Вязьмин¹, А.А. Рагимова^{1, 2}, Г.Л. Си¹, С. Бехера¹, О.И. Шевцов¹, М. Феурра¹¹Центр нейроэкономики и когнитивных исследований Института когнитивных нейронаук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; Россия, 101000 Москва, ул. Мясницкая, 20;²ФГБНУ «Научный центр неврологии»; Россия, 125367 Москва, Волоколамское шоссе, 80**Контакты:** Александр Олегович Вязьмин aovyzmin@hse.ru

Введение. Захват предметов рукой – одно из самых частых движений в повседневной жизни. Для его выполнения необходима подготовка, включающая когнитивные процессы выбора цели и моторного планирования.

Цель работы – исследовать влияние поворота объекта на моторное планирование с помощью эксперимента, в котором участники перемещали предметы простой геометрической формы, иногда требующие вращения под разными углами относительно вертикальной оси, а оценка движения проводилась с использованием системы кинематического анализа. Мы предположили, что время реакции и время движения будут больше для задач с вращением.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 16 испытуемых (11 женщин и 5 мужчин), их средний возраст – $23,375 \pm 2,277$ года. Участники выполняли задание по перемещению правой рукой 4 объектов простой геометрической формы на соответствующие платформы, при этом периодически объект поворачивался экспериментатором на 90, 180 или 270°. Система анализа отслеживала движение трекеров, расположенных на большом и указательном пальцах правой руки испытуемого, на запястье правой руки, а также на объекте и специальных очках испытуемого.

Результаты. Для оценки влияния изменения положения предмета относительно вертикальной оси на моторное планирование данные были сгруппированы по углу поворота. Использовался однофакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями. Результаты показали статистически значимые различия:

- полное время движения в зависимости от угла поворота: $F(3,45) = 5,014, p = 0,004$;
- время достижения цели захвата: $F(3,45) = 61,79, p = 0,001$;
- время движения объекта: $F(3,45) = 14,641, p = 0,001$;
- время достижения максимальной апертуры захвата: $F(3,45) = 8,559, p = 0,001$.

Выводы. В целом наши результаты подтверждают гипотезу о том, что факт поворота объекта во время движения влияет не только на время выполнения самого движения, но и на время планирования осуществляемого движения. Планирование и выполнение движения с объектом, повернутым на 180°, оказались проще и быстрее, чем с поворотом на 90 и 270°. Тестирование позволяет выделить этапы планирования и подготовки движения при выполнении самого движения. Использование подобного подхода у пациентов с поражениями центральной нервной системы помогает в оценке и мониторинге состояния моторной функции, что важно для контроля процесса восстановления.

Ключевые слова: моторное планирование, захват кистью, кинематический анализ

Для цитирования: Вязьмин А.О., Рагимова А.А., Си Г.Л. и др. Эффективность перемещения предмета в зависимости от его ориентации в пространстве: кинематический анализ моторного планирования и выполнения. Нервно-мышечные болезни 2024;14(3):38–53.

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2024-14-3-38-53>

Effectiveness of an object moving depending on its orientation in the environment: a kinematic analysis of motor planning and execution

A.O. Vyazmin¹, A.A. Ragimova^{1, 2}, G.L. Si¹, S. Behera¹, O.I. Shevtsov¹, M. Feurra¹

¹Centre for Cognition and Decision Making, Institute for Cognitive Neuroscience, National Research University "Higher School of Economics"; 20 Myasnitskaya St., Moscow 101000, Russia;

²Research Center of Neurology; 80 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125367, Russia

Contacts: Aleksandr Olegovich Vyazmin aovyazmin@hse.ru

Background. Grasping objects with the hand is one of the most common movements in everyday life. It requires training involving the cognitive processes of goal selection and motor planning.

Aim. To investigate the effect of object rotation on motor planning using an experiment where participants moved abstract objects that sometimes required rotation, and movement was assessed using a kinematic analysis system. We hypothesized that reaction times and movements would be longer for tasks with rotation.

Materials and methods. Sixteen subjects participated in the study (11 females and 5 males), mean age – 23.375 ± 2.277 years. Participants were required to perform a task of moving 4 abstract objects onto corresponding platforms with their right hand, while periodically rotating the object by 90°, 180°, or 270°. The motion tracking system monitored the movement of trackers located on the subject's right thumb and index finger, on the subject's right wrist, and on the object and the subject's special glasses.

Results. To assess the effect of object rotation on motor planning, the data were grouped according to the angle of rotation. A one-factor analysis of variance with repeated measures was used. The results showed statistically significant differences:

- total movement time as a function of turning angle: $F(3.45) = 5.014, p = 0.004$;
- time to reach the grasping target: $F(3.45) = 61.79, p = 0.001$;
- object motion time: $F(3.45) = 14.641, p = 0.001$;
- time to reach maximum capture aperture: $F(3.45) = 8.559, p = 0.001$.

Conclusion. Overall, our results support the hypothesis that object rotation during movement affects both the preparation and execution of the movement itself. The planning and executing the movement with the object rotated 180° was easier and faster than with 90° and 270° rotations. The testing allows distinguishing the stages of planning and preparation of the movement from the execution of the movement itself. Using this approach in patients with central nervous system lesions helps to assess and monitor the state of motor function, which is important for monitoring the recovery process.

Keywords: motor planning, hand grasping, kinematic analysis

For citation: Vyazmin A.O., Ragimova A.A., Si G.L. et al. Effectiveness of an object moving depending on its orientation in the environment: a kinematic analysis of motor planning and execution. *Nervno-myshechnye bolezni = Neuromuscular Diseases* 2024;14(3):38–53. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2024-14-3-38-53>

Введение

Одним из ключевых движений в повседневной жизни человека является захват предметов рукой. Это движение важно для взаимодействия с окружающим миром, общения и выполнения жизненно важных функций, включая питание [1]. Нарушения хватательных движений при патологии нервной системы значительно снижают способность выполнять повседневные задачи и ухудшают качество жизни. У пациентов с болезнью Паркинсона наблюдается дефицит интенсивности и координации движений, что затрудняет выполнение таких действий, как прием пищи, одевание и использование инструментов [2]. После перенесенного инсульта часто ухудшаются хватательная способность руки, замедляются движения рук и изменяется апертура захвата [3]. Потеря сенсорной и/или двигательной функции руки затрагивает до 60 % людей, перенесших инсульт, что представляет серьезную повседневную проблему [4–6]. Поражение периферических

нервов также нарушает хватательные движения, ограничивая способность к мелкой моторике. Нарушения координации досягаемости и хватания при разных неврологических состояниях указывают на нарушение нейронных механизмов, интегрирующих зрительную, тактильную и двигательную информацию [7]. Реабилитация данных дефицитов важна для улучшения результатов лечения и качества жизни пациентов [8, 9].

Необходимой составляющей любого движения является его подготовка, или инициация. Согласно концепции A.L. Wong и соавт. [10], инициация движения включает когнитивные процессы выбора двигательной цели и моторного планирования, которое делится на фазу абстрактной кинематики, фазу выбора траектории движения эффектора и фазу спецификации движения целиком, включая формирование набора моторных команд для постуральных корректировок. Важным аспектом моторного планирования является фаза абстрактной кинематики, которая возникает,

когда существует несколько путей достижения цели движения. A.L. Wong и соавт. отделяют фазы выбора траектории эффектора от планирования движения целиком [10]. Для понимания нейрональных основ моторного планирования важно знать зоны и сети головного мозга, участвующие в этом процессе.

Моторное планирование и подготовка к движению исследуются в системной нейробиологии в 3 аспектах: как неотъемлемая часть двигательного контроля, как связующее звено между принятием решений и их выполнением и как форма кратковременной памяти, связывающая прошлые события и будущие движения [11]. Большая часть коры головного мозга активно участвует в подготовке и выполнении произвольных движений. Сенсорные сигналы обрабатываются в задней теменной доле и передаются в премоторные области и префронтальную кору, которые играют ключевую роль в планировании и координации движений [12–14]. Премоторная кора активна на этапе подготовки движения, в то время как первичная моторная кора отвечает за его выполнение [15].

Одним из способов изучения моторного планирования являются эксперименты с мысленным вращением, задействующие схожие нейрональные механизмы. Мысленное вращение — это процесс вращения в уме представлений трехмерной фигуры [16]. Предполагается, что мысленное вращение активирует моторное планирование, даже когда движение не требуется [17, 18]. Кроме того, в исследованиях моторного планирования также используют физическое вращение предмета, требующее разных траекторий в зависимости от способа удержания предмета [19, 20].

Мы предполагаем, что перемещение предмета, требующее поворота, задействует моторное планирование в большей степени по сравнению с движением без поворота из-за повышенной сложности и требований к точности вращательных движений [21, 22]. Для подтверждения гипотезы проведен эксперимент с переносом предмета простой геометрической формы, требующего иногда вращения под разными углами относительно вертикальной оси. Для оценки движения использовалась система захвата движения с кинематическим анализом, широко применяемая для точной записи многомерных данных сложных двигательных схем [23, 24]. Мы предположили, что время реакции и время движения для задач, требующих вращения, будут больше по сравнению с движениями без вращения.

Цель исследования — изучить влияние поворота объекта на моторное планирование движения захвата кистью. Для этого необходимо было решить следующие задачи: 1) разделить движение захвата кистью на несколько компонентов движения, такие как подготовка движения, движение достижения цели захвата, непо-

средственно перенос объекта с поворотом; 2) разделить экспериментальные задания на 4 группы в зависимости от угла поворота объекта; 3) сравнить между собой временные характеристики 4 групп экспериментального задания в каждом из компонентов.

Материалы и методы

Испытуемые. В исследовании приняли участие 16 испытуемых (11 женщин и 5 мужчин), средний возраст которых составил $23,375 \pm 2,277$ года. Все участники, за исключением одного, были правшами, не имели анамнеза неврологических, психических или других хронических болезней, а также травм правой руки, не принимали препараты в связи с хроническими состояниями. Все участники не имели заболеваний глаз или обладали скорректированным зрением. Испытуемые были проинформированы о необходимости не употреблять алкоголь за сутки до эксперимента.

Задание. Испытуемые сидели за экспериментальным столом ($98 \times 60,5$ см). Правой рукой они удерживали металлический цилиндр (высота 2 см, диаметр 1 см) на правой стороне стола (рис. 1). Инструкция по выполнению задания предоставлялась как в письменном виде, так и устно. Задача заключалась в захвате деревянного объекта простой геометрической формы (рис. 2) и его последующем размещении на соответствующей платформе. Использовались 4 объекта разной формы одинакового объема, каждый из которых мог быть повернут на 90, 180 или 270° вдоль своей оси (рис. 3). Для каждой попытки также использовались 4 платформы (15×15 см) с изображением объекта, которые могли быть повернуты аналогично (рис. 4). Испытуемые выполняли 64 попытки, порядок которых был рандомизирован и сохранен в виде карты попыток.

Специальные очки с поднимающимися стеклами контролировали момент начала попытки. Во время подготовительной фазы экспериментатор раскладывал объект и платформу согласно карте попыток, затем поднимал переднюю часть очков, сигнализируя о начале фазы задания. Испытуемый захватывал объект и помещал его на платформу в соответствии с изображением, после чего возвращался в исходную позицию. Затем экспериментатор готовил следующую попытку. Среднее время 1 попытки составляло 10 с, а 1 сессии — около 30 мин, в зависимости от испытуемого. По окончании задания испытуемый должен вернуться на исходную позицию, т.е. удерживать большим и указательным пальцами металлический цилиндр, расположенный на столе по правую руку от испытуемого. После этого экспериментатор закрывал очки испытуемого, убирал со стола объект и платформу и переходил к подготовке следующей попытки (рис. 5).

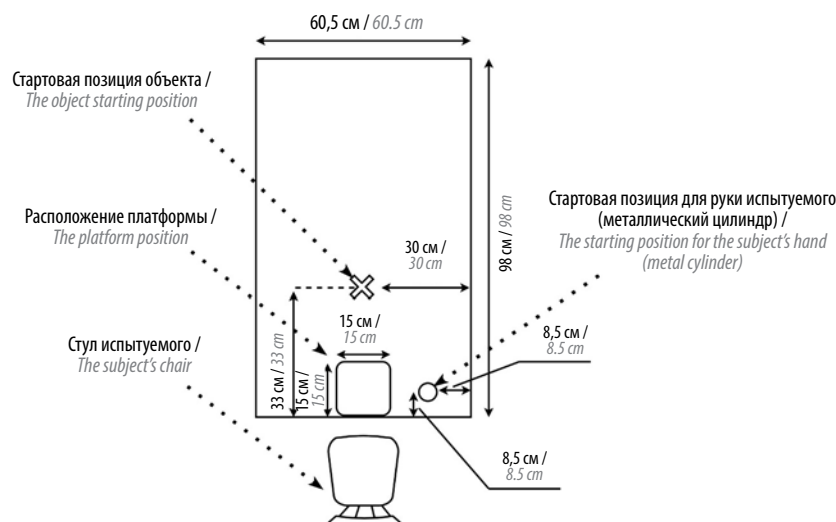


Рис. 1. Схема экспериментального стола. Размеры стола составляли $90 \times 60,5$ см. Стартовая позиция для руки испытуемого находилась в 5,5 см от короткого края стола и 8,5 см от длинного края стола. Платформа располагалась посередине короткого края стола таким образом, что край платформы совпадал с коротким краем стола. Размер платформы составлял 15×15 см. Стартовая позиция для объекта располагалась на расстоянии 33 см от короткого края стола и 30 см от длинного края стола

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental table. The dimensions of the table were $90 \times 60,5$ cm. The starting position for the subject's hand was 5.5 cm from the short edge of the table and 8.5 cm from the long edge of the table. The platform was positioned in the middle of the short edge of the table, so that the edge of the platform coincided with the short edge of the table. The size of the platform was 15×15 cm. The starting position for the subject was 33 cm from the short edge of the table and 30 cm from the long edge of the table



Рис. 2. Объекты. 4 объекта простой геометрической формы с одинаковой площадью поверхности и одинаковым объемом

Fig. 2. Objects. 4 objects of simple geometric shape with the same surface area and the same volume

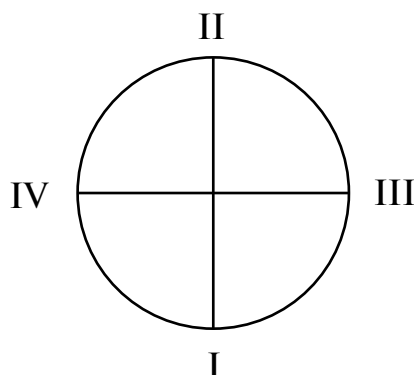


Рис. 3. Стартовая позиция для объекта. Экспериментатор должен был размещать объект в центре круга, числа предназначены для поворота объекта в соответствии с требованиями задания

Fig. 3. Starting position for the object. The experimenter had to place the object in the centre of the circle, the numbers are designed to rotate the object according to the requirements of the task

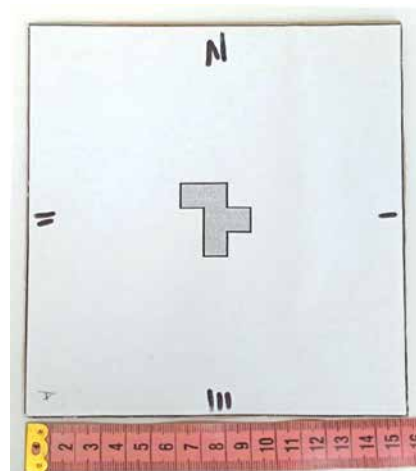


Рис. 4. Платформа. Изображение объекта размещено в центре картонной платформы. Цифры по краям платформы предназначены для указания сторон при повороте. Экспериментатор должен был повернуть платформу в соответствии с требованиями задания

Fig. 4. Platform. The image of the object is placed in the center of the cardboard platform. The numbers on the edges of the platform are intended to indicate the sides when rotating. The experimenter had to rotate the platform according to the requirements of the task

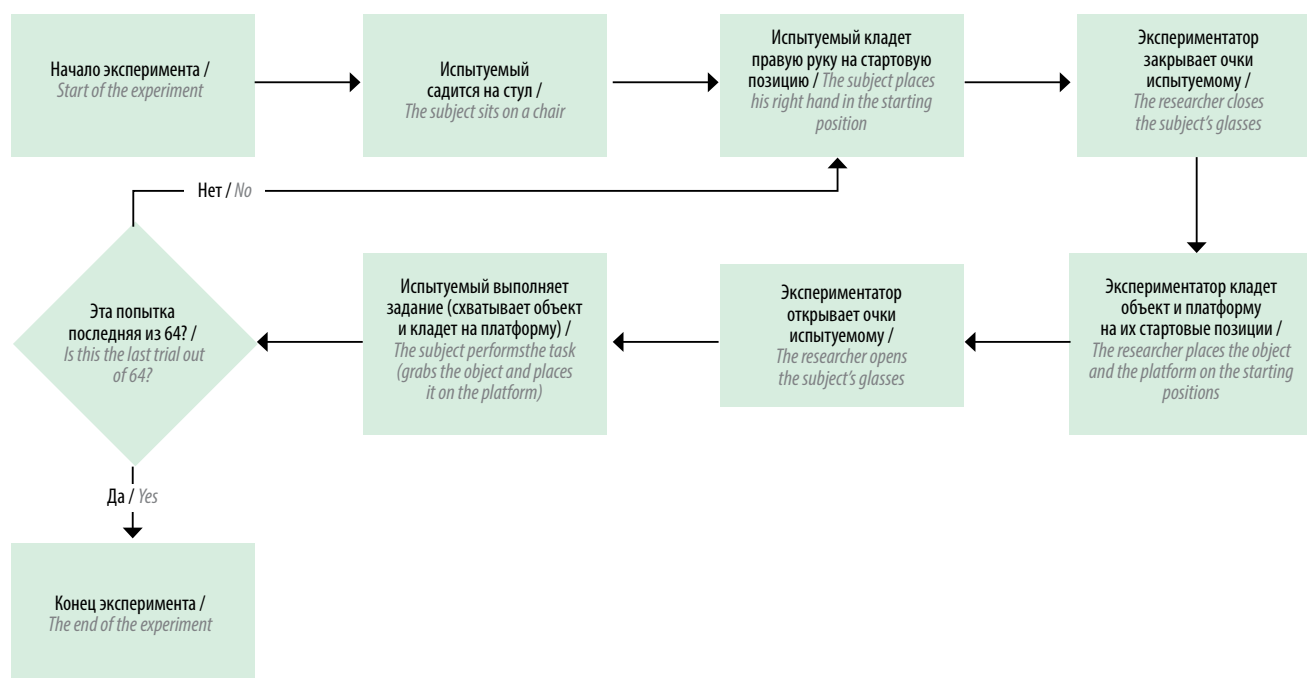


Рис. 5. Схема проведения эксперимента

Fig. 5. Schematic of the experiment

Кинематические данные. Для регистрации кинематических данных движения руки испытуемого использовали систему отслеживания движения Smart-DX (BTS Bioengineering, Италия) с 8 инфракрасными камерами с интегрированными источниками инфракрасного освещения. Камеры были размещены так, чтобы обеспечить прямую видимость трекеров, монтируемых на руке испытуемого (рис. 6). Частота записи данных составляла 250 Гц, а каждый трекер регистрировал 3D-координаты маленьких светоотражающих сфер. Для минимизации перекрытий между трекерами и рукой испытуемого камеры № 7 и 8 были размещены ближе к испытуемому.

Для записи биомеханических и поведенческих данных использовали 10 трекеров, установленных на следующих точках:

- центр ногтевой пластины большого пальца правой руки (трекер 1);
- центр ногтевой пластины указательного пальца правой руки (трекер 2);
- шиловидный отросток лучевой кости правой руки (трекер 3);
- шиловидный отросток локтевой кости правой руки (трекер 4);
- вершина специального выступа на каждом из 4 объектов (трекеры 5, 8–10; для анализа эти трекеры рассчитывались как один, а именно трекер 5).

Трекеры на очках (трекеры 6 и 7) использовались для определения момента открытия очков, сигнализирующего начало триала. Расстояние между этими трекерами изменялось только в процессе открытия и закрытия очков, что позволяло отслеживать их состояние в реальном времени.

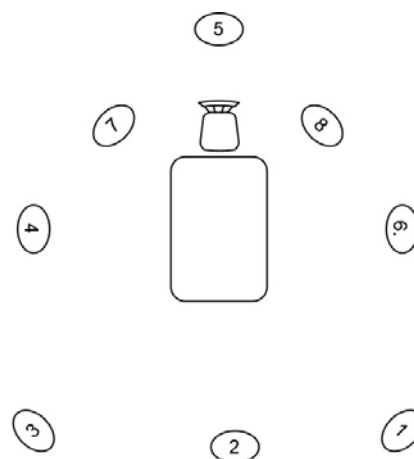


Рис. 6. Расположение камер. Камеры № 1–6 были расположены в 1 м от края стола, камеры № 7 и 8 – на расстоянии 0,5 м от края стола, камеры № 2, 4–6 – на высоте 2,25 м от пола, камеры № 1, 3, 7, 8 – на высоте 1,5 м от пола

Fig. 6. Location of the cameras. Cameras No. 1–6 were located 1 meter from the edge of the table. Cameras No. 7 and 8 were located 0.5 meters from the edge of the table. Cameras No. 2, 4–6 were located 2.25 meters from the floor. Cameras No. 1, 3, 7, 8 were located 1.5 meters from the floor

Анализ данных. Одна сессия для каждого участника состояла из 64 попыток, как было сказано ранее. Для того чтобы разделить 1 сессию на 64 отдельных измерения, мы разработали собственный скрипт в программном обеспечении Matlab (The Mathworks, США). Данные для обработки представляли собой трехмерные координаты каждого трекера. Перед началом анализа мы применили фильтр Гаусса ко всем данным для их

сглаживания. На I этапе мы рассчитали и построили следующие графики (рис. 7) по данным трекеров:

- график открывания—закрывания очков. Рассчитывается как расстояние между трекерами 7 и 6 во времени, в настоящем исследовании использован для определения начала каждой попытки;
- график апертуры захвата — график размыкания и смыкания большого и указательного пальцев правой руки участника, рассчитывается как расстояние между трекерами 1 и 2 во времени;
- график подъема запястья — график движения запястья правой руки участника по вертикальной оси, позволяет рассчитать трехмерные координаты виртуальной точки между трекерами 3 и 4 как среднее движения обоих трекеров. Для построения графика мы использовали только вертикальную составляющую этой виртуальной точки;
- график подъема объекта — график вертикального движения объекта, в данном случае вертикальной составляющей трехмерных координат трекера 5 во времени.

На II этапе вычислялись следующие временные моменты (рис. 8), используемые для дальнейшего анализа данных:

- время открывания очков (t_1) — момент, когда испытуемый начинает воспринимать задачу; время определяется как момент после максимального экстремума графика открытия очков, когда скорость его изменения становится положительной;
- время подъема запястья (t_2) — момент, когда испытуемый начинает выполнять задание, т.е. когда вертикальная скорость движения запястья становится положительной, а средняя вертикальная скорость за следующие 20 кадров становится больше 0,05 см/с;
- время подъема объекта (t_4) — момент, когда испытуемый начинает двигать схваченный объект, а именно как первый момент после открытия очков, когда вертикальная скорость объекта становится положительной, а средняя вертикальная скорость за следующие 20 кадров превышает 0,01 см/с;
- время максимальной апертуры захвата (t_3) — момент, когда испытуемый максимально раздвигает большой и указательный пальцы для захвата объекта. Для определения этого времени используется экстремум графика апертуры захвата после момента открытия очков;
- время размещения объекта на платформе (t_5): момент, когда испытуемый помещает объект на платформу. Это время определяется как первый момент после подъема объекта, когда абсолютная вертикальная скорость его движения становится меньше 0,01 см/с и средняя вертикальная скорость за следующие 75 кадров становится меньше 0,05 см/с.

Используя эти данные, нам удалось не только из-учить общее время движения испытуемого, но и раз-

бить это движение на несколько компонентов, для того чтобы определить, на какой компонент движения больше всего оказывает влияние поворот объекта:

- время инициации движения. Это время между моментами времени t_2 и t_1 . Это период от момента, когда испытуемый увидел задание, до момента, когда он приступил к его выполнению. Время инициации движения включает этапы принятия решения и подготовки к выполнению движения, исключая двигательную активность;
- время достижения цели хватания. Это время между моментами времени t_4 и t_2 . Это период от момента начала движения до момента захвата объекта 2 пальцами правой руки. Это время характеризует как транспортный компонент движения захвата рукой, так и хватательный компонент, т.е. смыкание пальцев вокруг объекта;
- время достижения максимальной апертуры захвата. Это время между моментами времени t_3 и t_2 . Это период от момента начала выполнения движения до момента максимального раскрытия пальцев для захвата объекта [25]. Оно характеризует хватательный компонент движения. Считается, что чем сложнее предстоящее хватательное движение, тем больше будет время достижения максимальной апертуры захвата [26, 27]. Данный параметр отражает сложность захвата объекта. При более сложном хватательном движении момент максимальной апертуры захвата должен происходить позже;
- время движения объекта. Это время между моментами времени t_5 и t_4 . Это период от момента захвата объекта до момента его установки на соответствующую платформу. Это время отражает перенос объекта испытуемым, а также корректировку движения для точного размещения объекта на платформе;
- полное время движения. Это время между моментами времени t_5 и t_1 . Полное время движения включает период от момента, когда испытуемый увидел задание, до момента его завершения. Оно охватывает этапы принятия решений, подготовки и планирования движения, а также выполнения самого движения. Оно включает как этапы принятия решений, моторного планирования, так и непосредственно двигательные функции.

Результаты

Для оценки влияния вращения предмета под разными углами относительно вертикальной оси на движение и моторное планирование этого движения мы сгруппировали данные в соответствии с углом, на который требовалось повернуть объект для размещения его на платформе (рис. 9, табл. 1).

Для анализа различных аспектов движения мы применили однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA)

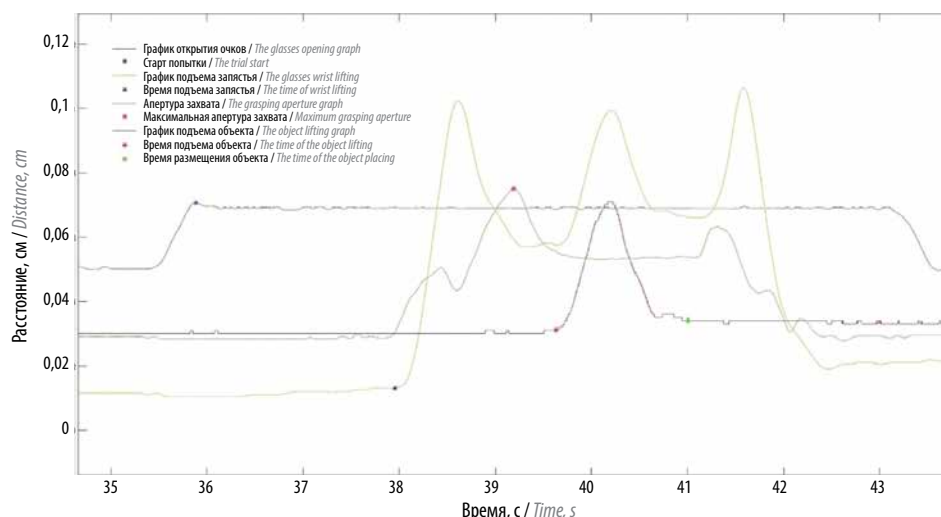


Рис. 7. Графики движения трекеров в течение одной попытки. На рисунке отображены графики движений в течение одной попытки эксперимента. График открытия очков служит для определения момента начала эксперимента. График подъема запястья служит для определения момента начала выполнения движения испытуемым. График апертуры захвата служит для определения момента максимальной апертуры захвата. И график движения объекта служит для определения моментов подъема объекта и момента размещения объекта на платформе

Fig. 7. Graphs of tracker movements during one trial. The figure shows the graphs of movements during one trial of the experiment. The graph of glasses opening is used to determine the moment when the experiment starts. The graph of wrist lifting is used to determine when the subject starts performing the movement. The grasping aperture graph is used to determine the moment of maximum grip aperture. And the graph of the object's movement is used to determine the moments of lifting the subject and the moment of placing the object on the platform

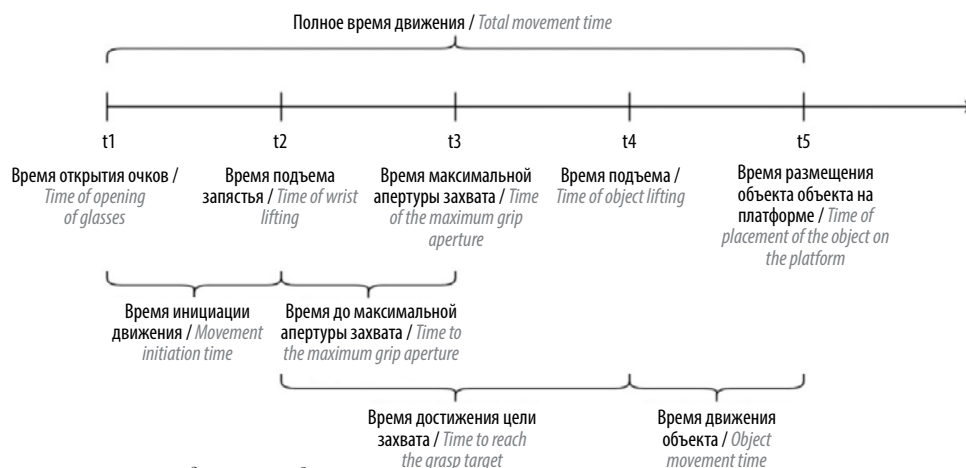


Рис. 8. Распределение полного времени движения объекта

Fig. 8. Distribution of total object movement time

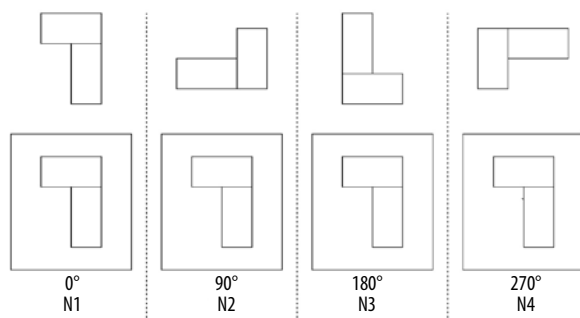


Рис. 9. Углы поворота объекта относительно платформы и соответствующие им названия групп данных

Fig. 9. Angles of object rotation relative to the platform and corresponding names of data groups

с повторными измерениями для следующих данных: полное время движения (N1–4), время инициации движения (N1–4), время достижения цели захвата (N1–4), время движения объекта (N1–4) и время достижения максимальной апертуры захвата (N1–4).

Поправка Гринхауса–Гейссера использовалась в тех случаях, когда необходимо было учесть отклонения от предположения о сферичности. Учитывая наличие значительных взаимодействий и исследовательский характер работы, для скорректированных парных сравнений применялся тест Бонферрони. Это позволяло контролировать уровень ошибок первого рода (α) и повышать эффективность теста для выявления парных различий.

Уровень значимости $p = 0,05$.

Таблица 1. Группы данных в зависимости от угла, на который необходимо было повернуть объект для размещения на платформе
Table 1. Data groups depending on the angle by which the object had to be rotated to be placed on the platform

Угол поворота объекта Object rotation angle	0°	90°	180°	270°
Группа данных Data groups	N1	N2	N3	N4

Полное время движения. Мы выявили статистически значимую разницу в полном времени движения в зависимости от угла поворота: $F(3,45) = 27,548$, сред-неквадратическое отклонение (СКО) = 6,232, $p = 0,00$, частичная $\eta^2 = 0,647$ (рис. 10). Апостериорные сравнения показали, что полное время движения в группе N1 было меньше, чем движение в остальных группах – N2 ($p = 0,000$), N3 ($p = 0,000$), N4 ($p = 0,000$), что подчерки-вает то, что совпадение угла объекта и платформы ло-гично увеличивает скорость выполнения данного дви-жения (табл. 2). Кроме того, ANOVA-анализ показал, что полное время движения в группе N3 (180°) было меньше, чем в группе N3 ($p = 0,004$) и N4 ($p = 0,021$). Это подчеркивает, что симметричное вращение повышает ско-рость движения по сравнению с несимметричным.

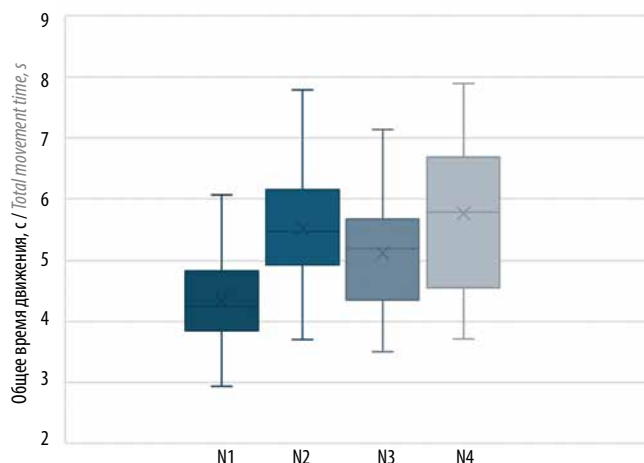


Рис. 10. Распределение полного времени движения по группам в зависи-мости от угла вращения объекта

Fig. 10. Distribution of total movement time by groups depending on the object rotation angle

Таблица 2. Результаты межгруппового дисперсионного анализа полного времени движения (парные сравнения)
Table 2. Results of intergroup analysis of variance for total movement time (paired comparisons)

Группа Group	Группа срав-нения Comparison group	Разность средних Mean difference	Стандартная ошибка Standard error	p	95 % доверительный интервал для разности 95 % confidence interval for the variance	
					нижняя граница lower bound	верхняя граница higher bound
N1	N2	−1,187	0,125	0,000	−1,566	−0,807
	N3	−0,779	0,132	0,000	−1,181	−0,377
	N4	−1,422	0,231	0,000	−2,124	−0,721
N2	N1	1,187	0,125	0,000	0,807	1,566
	N3	0,408	0,096	0,004	0,116	0,699
	N4	−0,236	0,198	1,000	−0,837	0,365
N3	N1	0,779	0,132	0,000	0,377	1,181
	N2	−0,408	0,096	0,004	−0,699	−0,116
	N4	−0,644	0,187	0,021	−1,210	−0,077
N4	N1	1,422	0,231	0,000	0,721	2,124
	N2	0,236	0,198	1,000	−0,365	0,837
	N3	0,644	0,187	0,021	0,077	1,210

Время инициации движения. Мы выявили статистически значимую разницу во времени инициации движения в зависимости от угла поворота: $F(3,45) = 5,014$, $СКО = 0,629$, $p = 0,004$, частичная $\eta^2 = 0,251$ (рис. 11). Апостериорные сравнения показали, что время инициации движения в группе данных N1 было статистически значимо меньше, чем в группе N2 ($p = 0,037$) (табл. 3). Различия между остальными группами были статистически недостоверными.

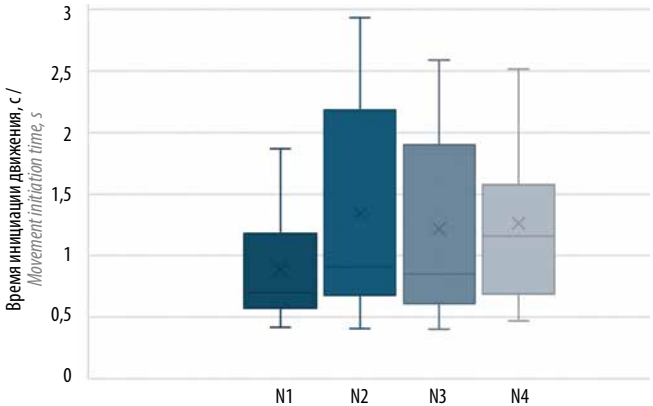


Рис. 11. Распределение времени инициации движения по группам в зависимости от угла вращения объекта

Fig. 11. Distribution of movement initiation time by groups depending on the object rotation angle

Таблица 3. Результаты межгруппового дисперсионного анализа времени инициации движения
Table 3. Results of intergroup analysis of variance for movement initiation time

Группа Group	Группа сравнения Comparison group	Разность средних Mean difference	Стандартная ошибка Standard error	p	95 % доверительный интервал для разности 95 % confidence interval for the variance	
					нижняя граница lower bound	верхняя граница higher bound
N1	N2	−0,451	0,142	0,037	−0,881	−0,021
	N3	−0,325	0,121	0,101	−0,692	0,042
	N4	−0,372	0,161	0,212	−0,860	0,116
N2	N1	0,451	0,142	0,037	0,021	0,881
	N3	0,127	0,062	0,366	−0,063	0,316
	N4	0,080	0,133	1,000	−0,326	0,485
N3	N1	0,325	0,121	0,101	−0,042	0,692
	N2	−0,127	0,062	0,366	−0,316	0,063
	N4	−0,047	0,109	1,000	−0,379	0,285
N4	N1	0,372	0,161	0,212	−0,116	0,860
	N2	−0,080	0,133	1,000	−0,485	0,326
	N3	0,047	0,109	1,000	−0,285	0,379

Время достижения цели захвата. По результатам ANOVA-анализа была выявлена статистически значимая разница во времени достижения цели захвата в зависимости от угла поворота объекта: $F(3,45) = 61,79$, $СКО = 0,883$, $p = 0,001$, частичная $\eta^2 = 0,805$ (рис. 12). Апостериорные сравнения показали, что время достижения цели захвата в группе N1 было меньше, чем в остальных группах N2 ($p = 0,000$), N3 ($p = 0,000$), N4 ($p = 0,000$) (табл. 4). Кроме того, апостериорный анализ показал меньшее время достижения цели захвата в группе N3 (180°) по сравнению с группой N4 ($p = 0,000$).

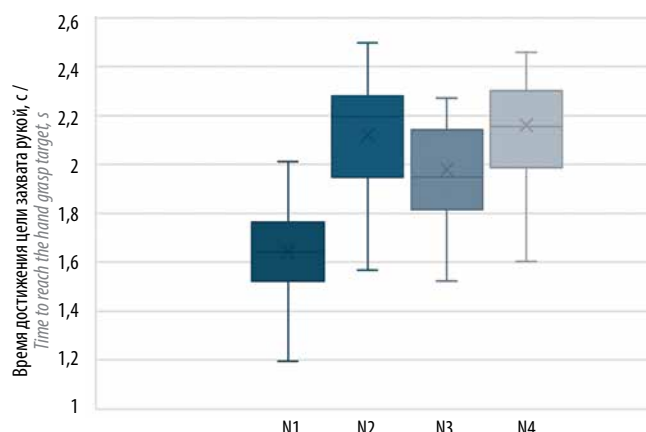


Рис. 12. Распределение времени достижения цели захвата рукой по группам в зависимости от угла вращения объекта

Fig. 12. Distribution of time to reach the hand grasping goal by groups depending on the object rotation angle

Таблица 4. Результаты межгруппового дисперсионного анализа времени достижения цели захвата рукой

Table 4. Results of intergroup analysis of variance for time to reach the hand grasping goal

Группа Group	Группа сравнения Comparison group	Разность средних Mean difference	Стандартная ошибка Standard error	p	95 % доверительный интервал для разности 95 % confidence interval for the variance	
					нижняя граница lower bound	верхняя граница higher bound
N1	N2	−0,476	0,039	0,000	−0,595	−0,356
	N3	−0,336	0,038	0,000	−0,450	−0,221
	N4	−0,518	0,041	0,000	−0,642	−0,394
N2	N1	0,476	0,039	0,000	0,356	0,595
	N3	0,140	0,051	0,095	−0,016	0,296
	N4	−0,043	0,050	1,000	−0,195	0,110
N3	N1	0,336	0,038	0,000	0,221	0,450
	N2	−0,140	0,051	0,095	−0,296	0,016
	N4	−0,183	0,030	0,000	−0,275	−0,091
N4	N1	0,518	0,041	0,000	0,394	0,642
	N2	0,043	0,050	1,000	−0,110	0,195
	N3	0,183	0,030	0,000	0,091	0,275

Время движения объекта. По результатам ANOVA-анализа была выявлена статистически значимая разница во времени движения объекта в зависимости от угла поворота объекта: $F(3,45) = 14,641$, $СКО = 0,278$, $p = 0,001$, частичная $\eta^2 = 0,494$ (рис. 13). Апостериорный анализ статистически достоверно показал более короткое время движения объекта в группе N1 по сравнению с остальными группами N2 ($p = 0,004$), N3 ($p = 0,048$), N4 ($p = 0,001$) (табл. 5). Кроме того, время движения объекта в группе N3 (180°) было статистически достоверно меньше по сравнению с группой N4 ($p = 0,032$).

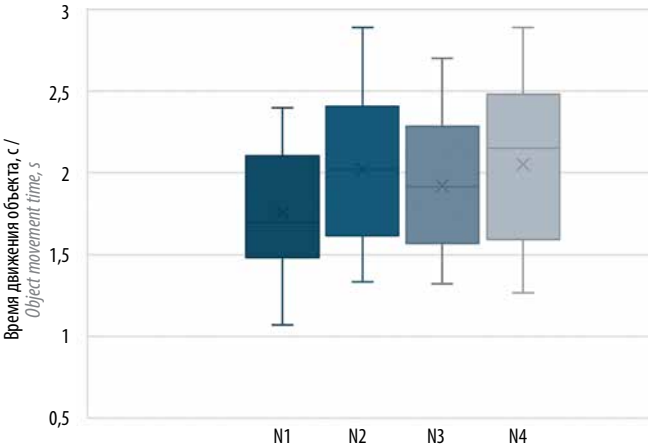


Рис. 13. Распределение времени движения объекта по группам в зависимости от угла вращения объекта

Fig. 13. Distribution of object movement time by groups depending on the object rotation angle

Таблица 5. Результаты межгруппового дисперсионного анализа времени движения объекта
Table 5. Results of intergroup analysis of variance for object movement time

Группа Group	Группа сравнения Comparison group	Разность средних Mean difference	Стандартная ошибка Standard error	p	95 % доверительный интервал для разности 95 % confidence interval for the variance	
					нижняя граница lower bound	верхняя граница higher bound
N1	N2	−0,262	0,061	0,004	−0,447	−0,076
	N3	−0,163	0,053	0,048	−0,324	−0,001
	N4	−0,293	0,058	0,001	−0,470	−0,116
N2	N1	0,262	0,061	0,004	0,076	0,447
	N3	0,099	0,037	0,104	−0,013	0,211
	N4	−0,031	0,036	1,000	−0,141	0,079
N3	N1	0,163	0,053	0,048	0,001	0,324
	N2	−0,099	0,037	0,104	−0,211	0,013
	N4	−0,130	0,040	0,032	−0,252	−0,009
N4	N1	0,293	0,058	0,001	0,116	0,470
	N2	0,031	0,036	1,000	−0,079	0,141
	N3	0,130	0,040	0,032	0,009	0,252

Время достижения максимальной апертуры захвата.

По результатам ANOVA-анализа была выявлена статистически значимая разница во времени достижения максимальной апертуры захвата объекта в зависимости от угла поворота объекта: $F(3,45) = 8,559$, СКО = 0,446, $p = 0,001$, частичная $\eta^2 = 0,363$ (рис. 14). Апостериорный анализ статистически достоверно показал более краткое время достижения максимальной апертуры захвата в группе N1 по сравнению с остальными группами N2 ($p = 0,025$), N3 ($p = 0,000$), N4 ($p = 0,000$) (табл. 6).

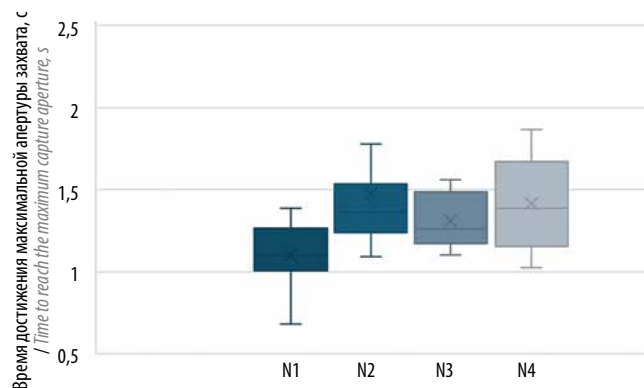


Рис. 14. Распределение времени достижения максимальной апертуры захвата по группам в зависимости от угла вращения объекта

Fig. 14. Distribution of time to reach the maximum capture aperture by groups depending on the object rotation angle

Таблица 6. Результаты межгруппового дисперсионного анализа времени достижения максимальной апертуры захвата

Table 6. Results of intergroup analysis of variance for time to reach the maximum grasping aperture

Группа Group	Группа сравнения Comparison group	Разность средних Mean difference	Стандартная ошибка Standard error	p	95 % доверительный интервал для разности 95 % confidence interval for the variance	
					нижняя граница lower bound	верхняя граница higher bound
N1	N2	−0,381	0,113	0,025	−0,724	−0,039
	N3	−0,213	0,040	0,000	−0,333	−0,092
	N4	−0,316	0,042	0,000	−0,443	−0,189
N2	N1	0,381	0,113	0,025	0,039	0,724
	N3	0,169	0,112	0,911	−0,171	0,509
	N4	0,065	0,089	1,000	−0,204	0,334
N3	N1	0,213	0,040	0,000	0,092	0,333
	N2	−0,169	0,112	0,911	−0,509	0,171
	N4	−0,104	0,051	0,364	−0,259	0,051
N4	N1	0,316	0,042	0,000	0,189	0,443
	N2	−0,065	0,089	1,000	−0,334	0,204
	N3	0,104	0,051	0,364	−0,051	0,259

Обсуждение

Настоящее исследование было посвящено вопросу, как вращение перемещаемого предмета влияет на моторное планирование. Для ответа на этот вопрос полное время движения разделили на 4 этапа с помощью системы отслеживания движения: время инициации движения, время до максимальной апертуры захвата, время достижения цели захвата и время движения объекта (см. рис. 8). Отделение начала движения от подготовки к нему является устоявшейся практикой в научных исследованиях. Согласно данным А.М. Naith и соавт., возможность начала движения проявляется на 80 мс раньше, чем это можно было предсказать по времени реакции [28]. Таким образом, время реакции включает задержку, которая составляет примерно 1/3 его общей продолжительности. Время задержки начала движения по сравнению с подготовкой снижает риск начала движения до его полной готовности и отображает этап выбора последующего действия [28–30].

Каждый из данных этапов, как и полное время движения, мы сгруппировали в зависимости от угла, на который требовалось повернуть объект во время движения. Рассмотрим каждый этап подробно.

Полное время движения. Наши результаты показали достоверное различие между полным временем движения без поворота объекта и полным временем движения с поворотом объекта на 90, 180 и 270° ($p = 0,00$). Движение без поворота объекта оказалось быстрее остальных. Вероятно, это связано с тем, что поворот объекта требует решения дополнительных двигательных и когнитивных задач [31–33].

Кроме того, выявлено статистически значимое различие между движением с поворотом объекта на 180° и движениями с поворотом на 90 и 270°: полное время движения с поворотом на 180° было меньше остальных. Хотя поворот объекта на 90° требует более короткой траектории движения по сравнению с поворотом на 180° и, соответственно, предполагает меньшее зна-

чение времени движения, мы наблюдали обратное. Более того, не обнаружено статистически значимой разницы между движениями с поворотом на 90 и 270°. Констатация данного факта обращает на себя внимание и требует дальнейших исследований с увеличением числа испытуемых.

Время инициации движения. Обнаружено статистически значимое различие между временем инициации движения без поворота объекта и временем инициации движения с поворотом объекта на 90°. Достоверных различий во времени инициации движения с другими углами поворота объекта не было выявлено, что может быть связано с недостаточным числом включенных в исследование испытуемых. Если сравнивать средние значения разных групп без учета стандартных отклонений, то во всех этапах анализа виден один и тот же паттерн (табл. 7). Для более точного изучения этой части инициации движения необходимо набрать большую группу испытуемых.

Время достижения цели хватания. По результатам однофакторного сравнения ANOVA была отмечена разница во времени между заданиями без поворота и с поворотом объекта на 90, 180 и 270°. Оказалось, что время движения в группе с поворотом объекта на 180° было меньше времени движения в группе с поворотом на 270°. При этом в группе с поворотом объекта на 180° по сравнению с группой с поворотом на 90° при отсутствии достоверных различий выявлена тенденция к наличию изменений ($p = 0,095$), что также требует проведения исследований у большего числа испытуемых. Стоит отметить, что это та часть движения испытуемого, в которой непосредственно поворот объекта не происходит, однако влияние предстоящего поворота имеет место. Таким образом, можно сделать вывод, что сложные движения оказывают влияние на простые движения, которые им предшествуют. Это может быть связано с тем, что более сложные движения требуют корректировки непосредственно во время самого движения.

Таблица 7. Соотношение средних значений времени и задания без поворота объекта. Таблица показывает, во сколько раз среднее значение каждого компонента движения при повороте объекта на разные углы больше аналогичного компонента движения без поворота объекта. Во всех компонентах движения видна одна тенденция: движение без поворота самое быстрое, затем идет движение с поворотом на 180°, а затем либо 270°, либо 90°

Table 7. Ratio of mean time values to the task without object rotation. The table shows how many times the mean value of each component of motion when the object is rotated by different angles is greater than the same component of motion without rotating the object. One tendency can be seen in all motion components: motion without turning is the fastest, followed by motion with a 180° turn, and then either 270° or 90°

Угол поворота объекта Object rotation angle	Время инициации движения, с Movement initiation time, s	Время достижения цели захвата, с Time to reach the goal of grasping, s	Время до макс. апертуры захвата, с Time to reach max. grasping aperture, s	Время движения объекта, с Object movement time, s	Общее время движения, с Total movement time, s
0°	1	1	1	1	1
90°	1,508	1,289	1,248	1,149	1,273
180°	1,365	1,204	1,193	1,092	1,179
270°	1,418	1,315	1,288	1,166	1,328

Время движения объекта. Наши результаты показали статистически значимую разницу между временем движения объекта в задании, где не требовался поворот объекта, и остальными заданиями. Также значимая разница была обнаружена между заданием, где требовался поворот объекта на 180° , и заданием с поворотом объекта на 270° . Между заданиями, где требовался поворот объекта на 180 и 90° , статистически достоверной разницы не отмечено, однако наблюдалась тенденция к этому ($p = 0,104$). Эти результаты можно было бы объяснить тем, что движения с поворотом требуют большего движения рукой и, соответственно, более длительного времени, однако время движения с поворотом на 180° оказалось меньше, чем время движения с поворотом на 90 и 270° . Время движения с поворотом на 90 и 270° было статистически одинаковым ($p = 1,000$). Таким образом, можно сделать вывод о том, что на время движения объекта влияет скорее сам факт поворота, а не только путь, пройденный рукой для выполнения этого движения. Это подтверждает, что изменения во времени обусловлены не только двигательным компонентом, но и процессами моторного планирования и моторного контроля в центральной нервной системе.

Время достижения максимальной апертуры захвата. Полученные результаты показали, что время достижения максимальной апертуры захвата статистически достоверно меньше в задании, где не требовался поворот объекта, по сравнению с заданиями, где поворот объекта требовался (см. рис. 14). Можно сделать вывод о том, что захват объекта, требующего последующего сложного движения, требует более сложного движения пальцев для выполнения самого захвата. Кроме того, мы обнаружили, что, несмотря на то что все испытуемые были уверены, что их движение захвата объекта состояло из одного цикла «разжать пальцы для начала движения — сомкнуть пальцы для захвата», на самом

деле этих циклов было несколько. Более того, первый цикл характеризовал снятие пальцев со стартового цилиндра, а второй — подготовку к захвату. Несомненно, этот феномен следует исследовать в дальнейшем, чтобы изучить особенности подготовки руки к захвату объекта. Статистически достоверной разницы между заданиями с поворотом объекта на 180° и заданиями с поворотом на 90 и 270° не было обнаружено.

Выводы

Полученные результаты подтвердили гипотезу о том, что поворот объекта во время его движения влияет не только на само движение, но и на подготовку к нему, особенно на этап моторного планирования. Результаты нашего эксперимента показали, что предстоящий поворот объекта влияет на предшествующее ему движение. Также планирование и выполнение движения с объектом, повернутым на 180° , оказались проще и быстрее по сравнению с движением с поворотом на 90 и 270° . Мы не обнаружили статистически значимой разницы в инициации движения без поворота по сравнению с движением с поворотом. Однако если рассматривать исключительно средние значения данных (рис. 15), можно увидеть одинаковую тенденцию на всех этапах движения: среднее время в задании без поворота всегда минимальное, несколько большее значение имеет среднее время движения с поворотом на 180° , а самое большое — среднее время движения с углами поворота 90 и 270° . Обращает на себя внимание тот факт, что для углов поворота на 90 и 270° среднее время движения достоверно не различается. Таким образом, отсутствие статистической значимости при инициации движения без поворота по сравнению с движением с поворотом на 180 и 270° , вероятно, связано с разбросом данных у испытуемых, а не с их средними значениями. Мы считаем, что при увеличении числа

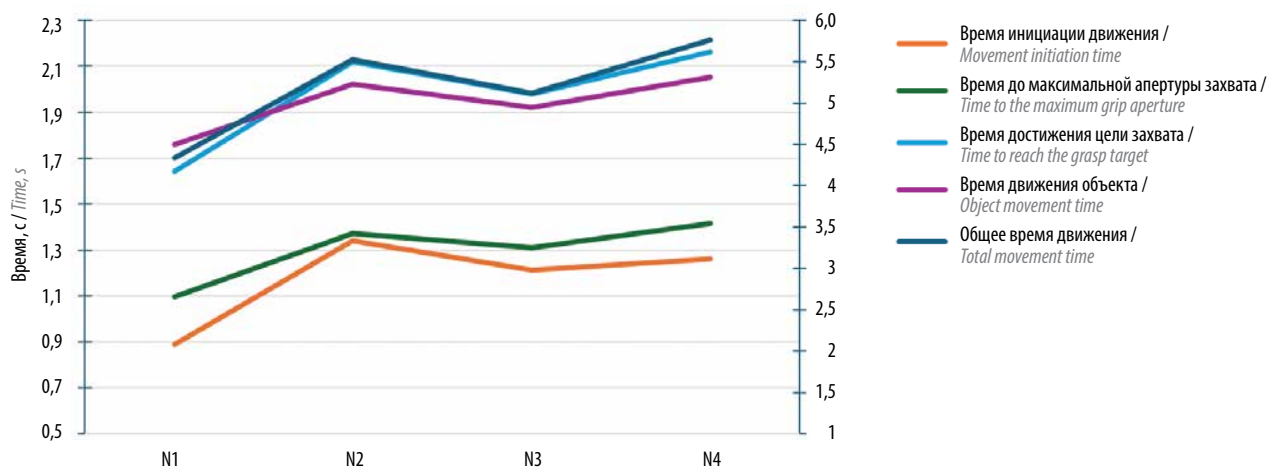


Рис. 15. График средних значений данных в зависимости от угла поворота. N1 — 0° , N2 — 90° , N3 — 180° , N4 — 270° . Можно увидеть одинаковую тенденцию у всех блоков движения

Fig. 15. Graph of mean data values as a function of rotation angle. N1 — 0° , N2 — 90° , N3 — 180° , N4 — 270° . It can be seen the same trend in all movements

испытуемых мы увидим статистически значимую разницу между движением без поворота и всеми остальными заданиями. В целом наши данные подтверждают гипотезу о том, что поворот объекта во время движения влияет не только на выполнение самого движения, но и на его подготовку. Это исследование имеет перспективы применения не только в фундаментальной науке, но и в клинической практике. Тестирование на базе нашего эксперимента позволяет отделить компонент планирования и подготовки движения от непосредственно выполнения самого движения. Компонент планирования движения является функцией центральной нервной системы, тогда

как выполнение самого движения включает как центральную, так и периферическую нервную системы. Применение подобного тестирования у пациентов с поражениями центральной нервной системы может позволить оценивать и мониторировать состояние моторной функции для контроля восстановления данной функции.

К ограничениям данного исследования мы относим число испытуемых, а также то, что один из объектов имел симметричную форму, что могло повлиять на результаты эксперимента. В следующих стадиях данного эксперимента данный объект должен быть заменен на несимметричный.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- MacKenzie C.L., Iberall T. The grasping hand. Elsevier, 1994. Pp. 3, 4.
- Fasano A., Mazzoni A., Falotico E. Reaching and grasping movements in Parkinson's disease: A review. *J Parkinsons Dis* 2022;12(4):1083–113. DOI: 10.3233/JPD-213082
- Parry R., Macias Soria S., Pradat-Diehl P. et al. Effects of hand configuration on the grasping, holding, and placement of an instrumented object in patients with hemiparesis. *Front Neurol* 2019;10(240):1–15. DOI: 10.3389/fneur.2019.00240
- Milinis K., Young C.A. Trajectories of Outcome in Neurological Conditions (TONiC) study. Systematic review of the influence of spasticity on quality of life in adults with chronic neurological conditions. *Disabil Rehabil* 2016;38(15):1431–41. DOI: 10.3109/09638288.2015.1106592
- Nowak D.A. The impact of stroke on the performance of grasping: usefulness of kinetic and kinematic motion analysis. *Neurosci Biobehav Rev* 2008;32(8):1439–50. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2008.05.021
- Vissani M., Palmisano C., Volkmann J. et al. Impaired reach-to-grasp kinematics in parkinsonian patients relates to dopamine-dependent, subthalamic beta bursts. *NPJ Parkinsons Dis* 2021;7(1):53. DOI: 10.1038/s41531-021-00187-6
- Osumi M., Sumitani M., Otake Y. et al. Influence of vibrotactile random noise on the smoothness of the grasp movement in patients with chemotherapy-induced peripheral neuropathy. *Exp Brain Res* 2023;241(2):407–15. DOI: 10.1007/s00221-022-06532-2
- Lu C., Bharmal A., Kiss Z.H. et al. Attention and reach-to-grasp movements in Parkinson's disease. *Exp Brain Res* 2010;205(1):69–80. DOI: 10.1007/s00221-010-2341-0
- Li X., Yin J., Li H. et al. Effects of ordered grasping movement on brain function in the performance virtual reality task: A near-infrared spectroscopy study. *Front Hum Neurosci* 2022;16:798416. DOI: 10.3389/fnhum.2022.798416
- Wong A.L., Haith A.M., Krakauer J.W. Motor planning. *Neuroscientist* 2015;21(4):385–98. DOI: 10.1177/1073858414541484
- Svoboda K., Li N. Neural mechanisms of movement planning: Motor cortex and beyond. *Curr Opin Neurobiol* 2018;49:33–41. DOI: 10.1016/j.conb.2017.10.023
- Dagher A., Owen A.M., Boecker H. et al. Mapping the network for planning: A correlational PET activation study with the Tower of London task. *Brain* 1999;122(Pt 10):1973–87. DOI: 10.1093/brain/122.10.1973
- Takei S., Hoffman D.S., Strick P.L. Direction of action is represented in the ventral premotor cortex. *Nat Neurosci* 2001;4(10):1020–5. DOI: 10.1038/nn726
- Hoshi E., Tanji J. Differential roles of neuronal activity in the supplementary and presupplementary motor areas: From information retrieval to motor planning and execution. *J Neurophysiol* 2004;92(6):3482–99. DOI: 10.1152/jn.00547.2004
- Roland P.E., Larsen B., Lassen N.A. et al. Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J Neurophysiol* 1980;43(1):118–36. DOI: 10.1152/jn.1980.43.1.118
- Shepard R.N., Metzler J. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 1971;171(3972):701–3. DOI: 10.1126/science.171.3972.701
- Wohlschläger A. Mental object rotation and the planning of hand movements. *Percept Psychophys* 2001;63(4):709–18. DOI: 10.3758/bf03194431
- Wexler M., Kosslyn S.M., Berthoz A. Motor processes in mental rotation. *Cognition* 1998;68(1):77–94. DOI: 10.1016/S0010-0277(98)00032-8
- Cohen R.G., Rosenbaum D.A. Prospective and retrospective effects in human motor control: Planning grasps for object rotation and translation. *Psychol Res* 2017;75(4):341–9. DOI: 10.1007/s00426-010-0311-6
- Herbert O., Büschelberger J., Janczyk M. Preschool children adapt grasping movements to upcoming object manipulations: Evidence from a dial rotation task. *J Exp Child Psychol* 2018;167:62–77. DOI: 10.1016/j.jecp.2017.09.025
- Krajenbrink H., Lust J., Wilson P. et al. Development of motor planning in children: Disentangling elements of the planning process. *J Exp Child Psychol* 2020;199:104945. DOI: 10.1016/j.jecp.2020.104945
- Nishihara S., Imai F., Fujiki A. et al. Interaction between mental rotation and manual rotation with and without motor planning. *Psychology* 2015;6(9):1086–95. DOI: 10.4236/psych.2015.69106
- Betti S., Zani G., Guerra S. et al. Reach-to-grasp movements: A multimodal techniques study. *Front Psychol* 2018;9:990. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00990
- Casartelli L., Cesaro A., Biffi E. et al. Vitality form expression in autism. *Sci Rep* 2020;10(1):17182. DOI: 10.1038/s41598-020-73364-x
- Ingvardsdóttir K.Ó., Balkenius C. The visual perception of material properties affects motor planning in prehension: an analysis of temporal and spatial components of lifting cups. *Front Psychol* 2020;11:215. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.00215
- Van de Kamp C., Zaal F.T. Prehension is really reaching and grasping. *Exp Brain Res* 2007;182(1):27–34. DOI: 10.1007/s00221-007-0968-2
- Runnarong N., Tretriluxana J., Waiyasil W. et al. Age-related changes in reach-to-grasp movements with partial visual occlusion. *PLoS One* 2019;14(8):e0221320. DOI: 10.1371/journal.pone.0221320
- Haith A.M., Pakpoor J., Krakauer J.W. Independence of movement preparation and movement initiation. *J Neurosci* 2016;36(10):3007–15. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3245-15.2016
- Weinberg I. Are movement preparation and movement initiation truly independent? *J Neurosci* 2016;36(27):7076–8. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1135-16.2016
- Cisek P. Cortical mechanisms of action selection: the affordance competition hypothesis. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2007;362(1485):1585–99. DOI: 10.1098/rstb.2007.2054

31. Milivojevic B., Hamm J.P., Corballis M.C. About turn: how object orientation affects categorisation and mental rotation. *Neuropsychologia* 2011;49(13):3758–67. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.09.034
32. Jovanovic B., Schwarzer G. The influence of grasping habits and object orientation on motor planning in children and adults. *Dev Psychobiol* 2017;59(8):949–57. DOI: 10.1002/dev.21573
33. Jost L., Jansen P. Manual training of mental rotation performance: Visual representation of rotating figures is the main driver for improvements. *Q J Exp Psychol (Hove)* 2022;75(4):695–711. DOI: 10.1177/17470218211039494

Вклад авторов

А.О. Вязьмин: написание статьи, разработка дизайна исследования, анализ данных;
А.А. Рагимова: написание статьи, обзор публикаций по теме статьи;
С. Бехера, Г.Л. Си: получение данных для анализа;
О.И. Шевцов: разработка моделей для эксперимента, получение данных для анализа;
М. Феурра: разработка дизайна исследования.

Authors' contribution

A.O. Vyazmin: writing the article, research design developing, data analysis;
A.A. Ragimova: writing the article, reviewing publications on the topic of the article;
S. Bekhera, G.L. Si: obtaining data for analysis;
O.I. Shevtsov: developing models for the experiment, obtaining data for analysis;
M. Feurra: research design developing.

ORCID авторов / ORCID of authors

А.О. Вязьмин / A.O. Vyazmin: <https://orcid.org/0000-0003-2346-4222>
А.А. Рагимова / A.A. Ragimova: <https://orcid.org/0000-0002-4370-4249>
Г.Л. Си / G.L. Si: <https://orcid.org/0009-0006-7162-8462>
С. Бехера / S. Behera: <https://orcid.org/0000-0001-6542-7054>
О.И. Шевцов / O.I. Shevtsov: <https://orcid.org/0009-0008-3460-0633>
М. Феурра / M. Feurra: <https://orcid.org/0000-0003-0934-6764>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и стратегического проекта «Устойчивый мозг: нейрокогнитивные технологии адаптации, обучения, развития и реабилитации человека в изменяющейся среде» по программе развития Университета в рамках участия в программе Минобрнауки России «Приоритет-2030». Программа «Приоритет-2030» реализуется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

Funding. This work is an output of a research project implemented as part of the Basic Research Program at the National Research University “Higher School of Economics” (HSE University) and the strategic project “Resilient Brain: Neurocognitive Technologies for Adaptation, Learning, Development, and Rehabilitation of Humans in a Changing Environment”, under the HSE University development program as part of participation in the Ministry of Education and Science of Russia’s “Priority-2030” program. The “Priority-2030” program is implemented within the framework of the national project “Science and Universities”.

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики. Работа одобрена этическим комитетом ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и выполнена в соответствии с рекомендациями Хельсинкской декларации. Все участники подписали информированное согласие на участие в исследовании и получили денежное вознаграждение.

Compliance with patient rights and bioethics rules. The work was approved by the ethics committee of the National Research University “Higher School of Economics” and was performed in accordance with the recommendations of the Declaration of Helsinki. All participants signed informed consent to participate in the study and received monetary compensation.

Статья поступила: 28.06.2024. **Принята к публикации:** 29.07.2024. **Опубликована онлайн:** 23.09.2024.

Article submitted: 28.06.2024. **Accepted for publication:** 29.07.2024. **Published online:** 23.09.2024.