

Разработка интерфейса группового взаимодействия агентов при передаче команды через ЭЭГ сигнал

С. М. Акопян, И.В. Брак, Г.А. Киселёв

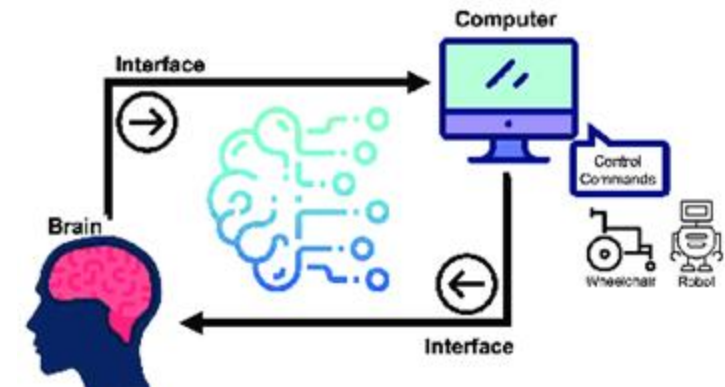
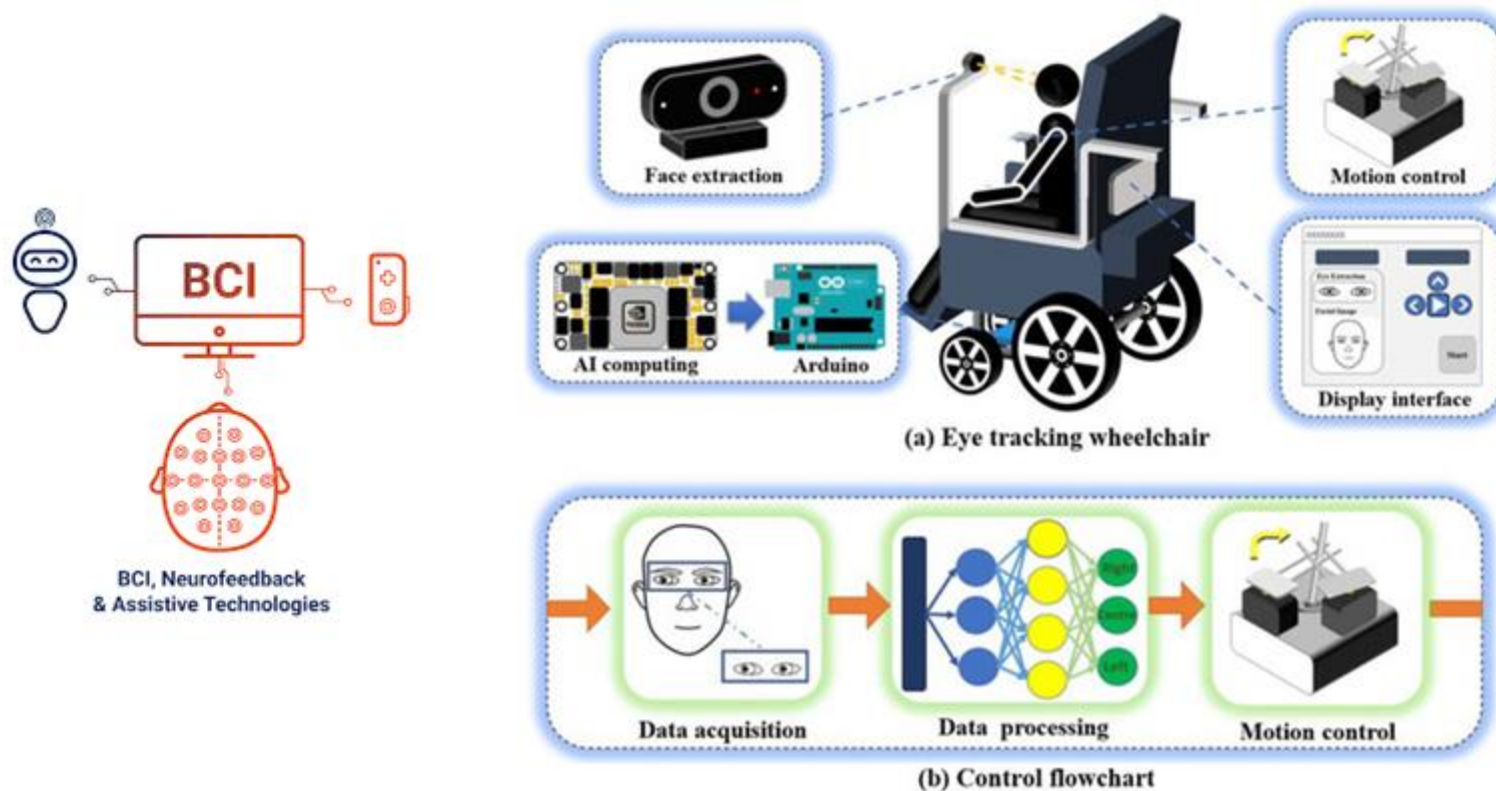
Российский университет дружбы народов



Кафедра Математического
моделирования и
Искусственного интеллекта

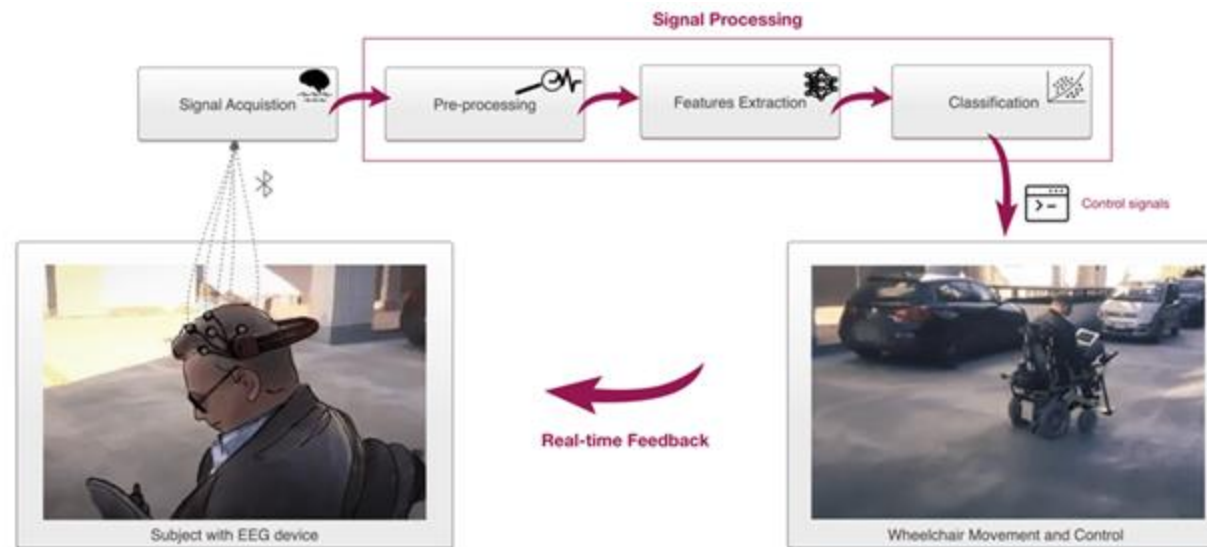
Введение

Использование интерфейса мозг-компьютер (BCI) на базе ЭЭГ совместно с трекингом взгляда для управления электрической инвалидной коляской позволяет тяжело ограниченным в движении людям задавать намерения напрямую мозговыми сигналами, подтверждая их направлением взгляда.



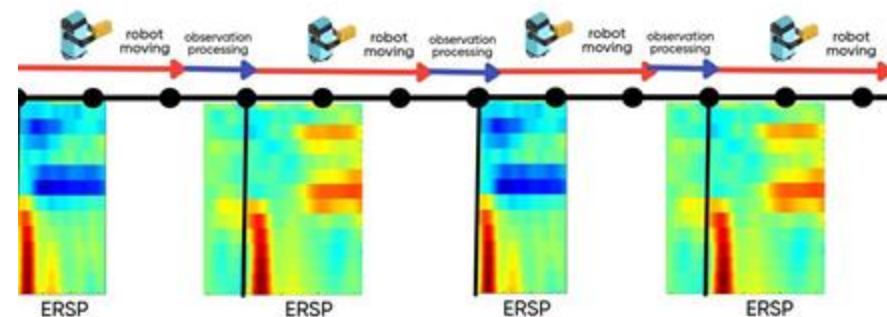
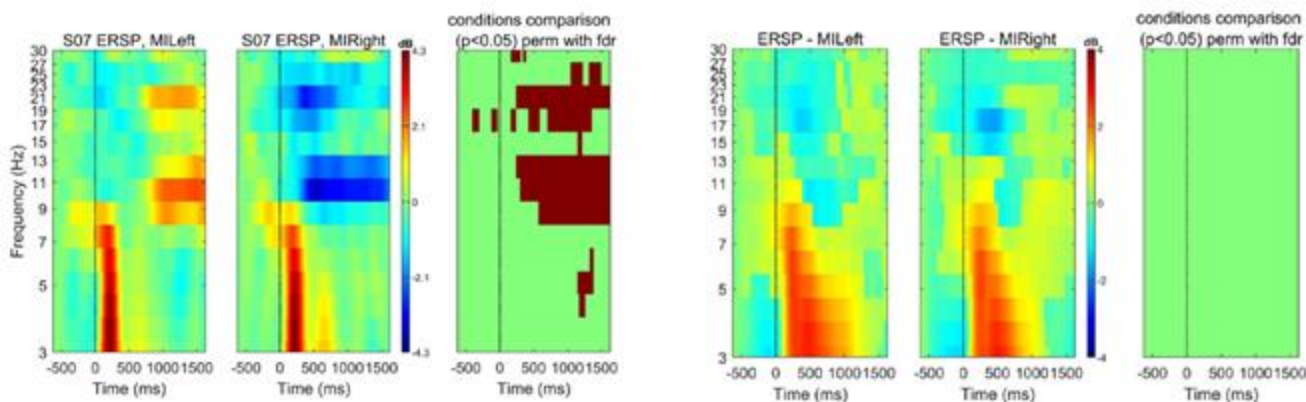
BCI

В предлагаемой архитектуре BCI-коляски пользователь надевает *ЭЭГ-гарнитуру* и *гарнитуру-трекер глаз*. Коляска оснащена бортовым компьютером с модулями обработки сигналов и автономной навигации. Взаимодействие пользователя и коляски происходит по принципу *расширенного управления*: человек задаёт намерение с помощью мысли (определяемой по ЭЭГ) и взгляда, а система самостоятельно планирует и исполняет движение к цели, минимизируя нагрузку на пользователя.



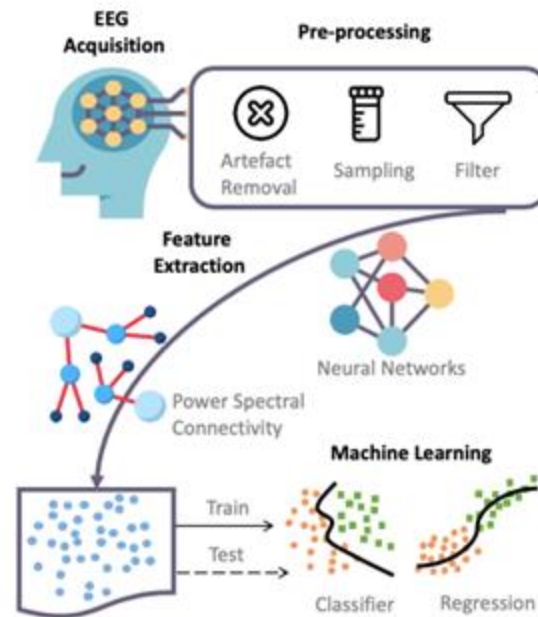
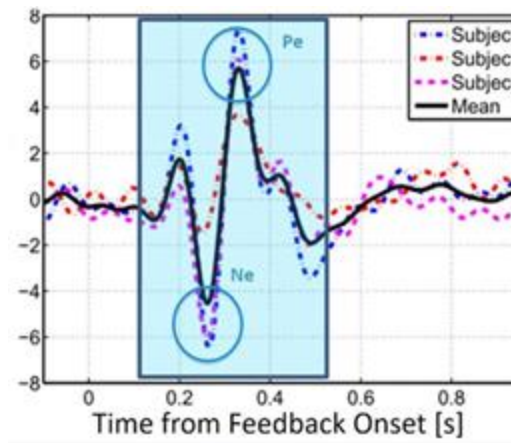
Захват сигналов пользователя

ЭЭГ-модуль (BCI): Электроэнцефалографическая гарнитура регистрирует электрическую активность мозга пользователя. В основе лежат парадигмы *моторных образов* (motor imagery, MI) и реакций на ошибки (*ErrP*, error-related potentials). При мысленном выполнении движений (например, воображаемый поворот головы или движение рукой) в определённых ритмических диапазонах ЭЭГ возникают характерные паттерны, которые можно выделить в реальном времени. Кроме того, если пользователь ощущает ошибку в работе системы, его мозг генерирует особый сигнал ошибки – *ErrP*, обнаруживаемый спустя -200–500 мс после события.



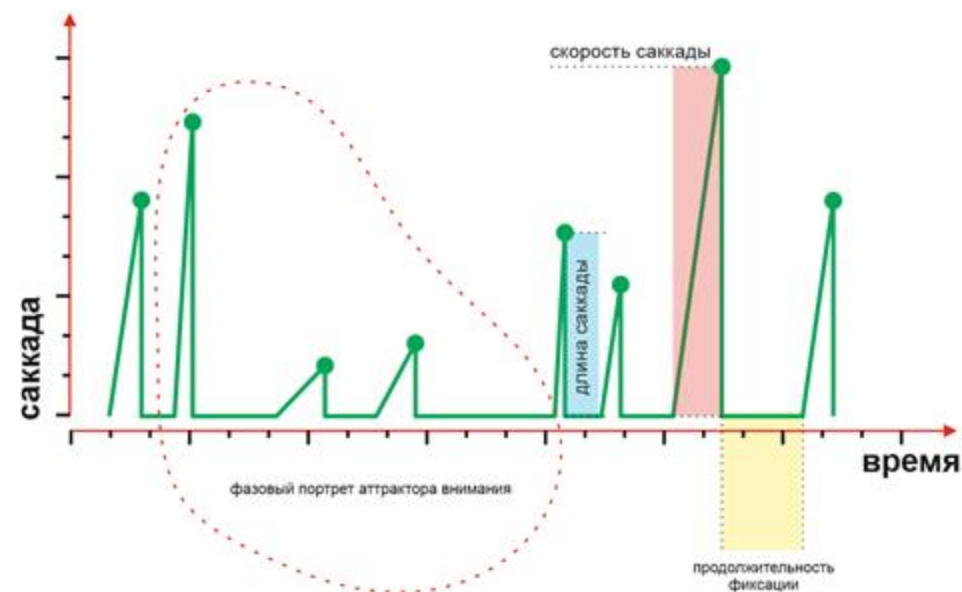
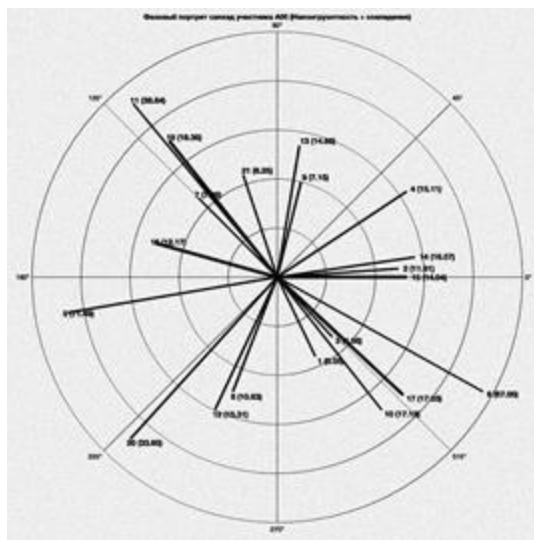
Обработка ЭЭГ сигнала

Обработка ЭЭГ: Сырые сигналы проходят фильтрацию и очищаются от артефактов. Затем извлекаются информативные признаки – например, мощности в определённых частотных диапазонах, пространственные распределения по электродам, статистические характеристики – которые подаются на алгоритм классификации. В исследованиях ВСІ-колясок успешно применяются методы машинного обучения: от линейных дискриминантов и SVM до нейросетей. Классификатор обучается распознавать несколько мысленных команд пользователя (например, «вперёд», «налево», «направо», «стоп»), достигая значимой точности.



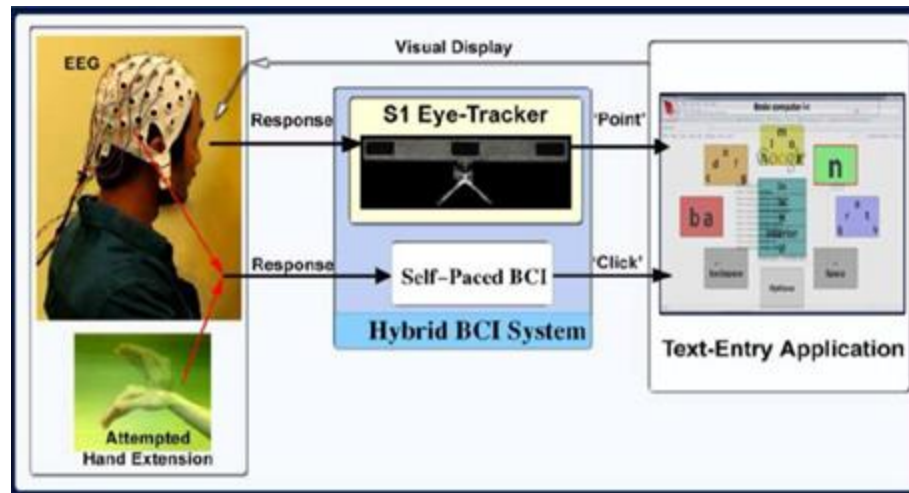
Анализ сигналов взгляда (айтрекер)

Параллельно камера отслеживания глаз фиксирует положение зрачков пользователя и определяет, куда именно он смотрит. Анализатор EyeTracker вычисляет точку пересечения взгляда в пространстве или объект, на который направлено внимание пользователя. Современные системы используют алгоритмы компьютерного зрения и даже нейросети для устойчивого определения направления взгляда. В рассматриваемой архитектуре трекер глаза служит сразу двум целям: (1) уточнение намерения – указание конкретной цели или направления и (2) неявная обратная связь – мониторинг реакции пользователя на движение.



Синтез команд на основе намерений

Модуль синтезатора команд принимает на вход декодированное *мысленное намерение* от BCI-классификатора и данные от анализатора взгляда. Задача синтезатора – объединить эти модальности и сформировать однозначную команду движения. Например, если ЭЭГ-модуль выявил намерение «*двигаться к цели*», а айтрекер определил, что пользователь смотрит на дверь в конце коридора, то синтезатор выпустит глобальную команду «*направляйся к этой двери*». В случае противоречия (например, ЭЭГ распознал «*повернуть налево*», но пользователь при этом смотрит вправо) система может запросить подтверждение или воздержаться от действия, что повышает надёжность.



Автономная навигация и управление движением

Основной задачей оптимального управления в робототехнических системах является поиск закона управления, оптимизирующий следующий заданный критерий качества в интегральной форме:

$$J_0 = \int_0^{t_f} f_0(x^1(t, x^{1,0}), \dots, x^N(t, x^{N,0}), u^1, \dots, u^N) dt \rightarrow \min(u^1, \dots, u^N \in U)$$

где x – вектор состояний агента i , u^i – вектор управлений агента i , N – количество агентов в группе

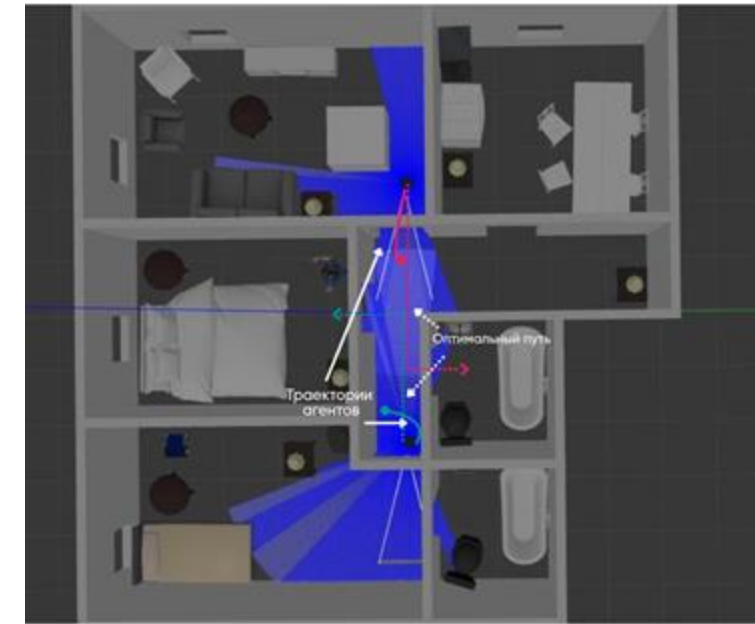
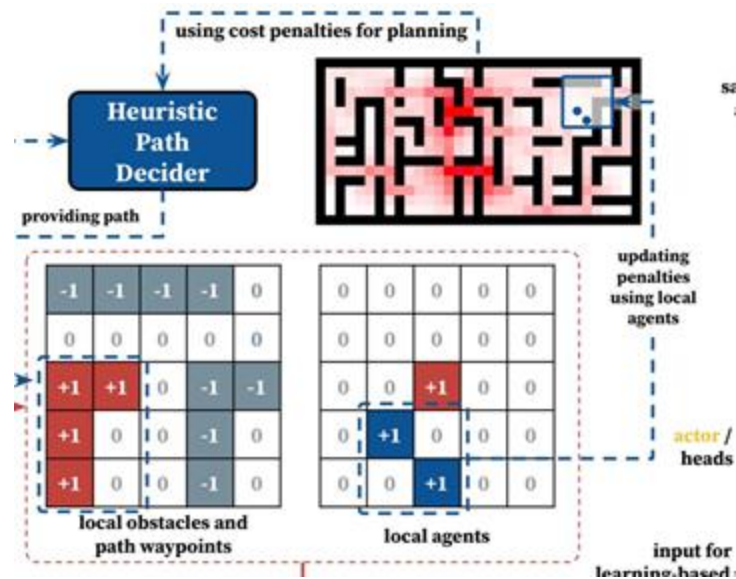
Для группы агентов задача расширяется до многоагентного управления с учетом *динамических фазовых ограничений*, которые описывают условия отсутствия столкновений между агентами:

$$J_0 = \int_0^{t_f} f_0(x(t, x^0), u) dt + p_1 \sum_{i=1}^M \int_0^{t_f} \vartheta(\varphi_i(x(t, x^0))) dt \rightarrow \min(u \in U)$$

Значение второго интеграла равно длительности времени нарушения фазовых ограничений.

Глобальный планировщик траектории

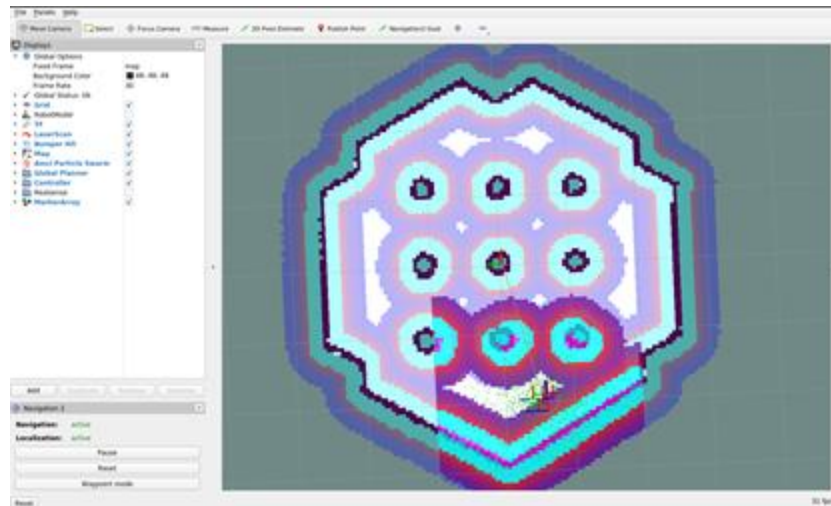
Получив цель (например, координаты точки на карте или команду «к двери»), система управления коляской строит оптимальный маршрут в известном пространстве. Используется алгоритм планирования пути Theta* – вариант алгоритма A*, позволяющий прокладывать гладкие траектории произвольного угла. Для мультиагентной системы использовался модифицированный алгоритм.



Локальный контроллер движения

Роботизированная коляска оснащена приводами колес, датчиками одометри и часто лидара/ультразвука для обнаружения *динамических препятствий* (людей, движущихся объектов).

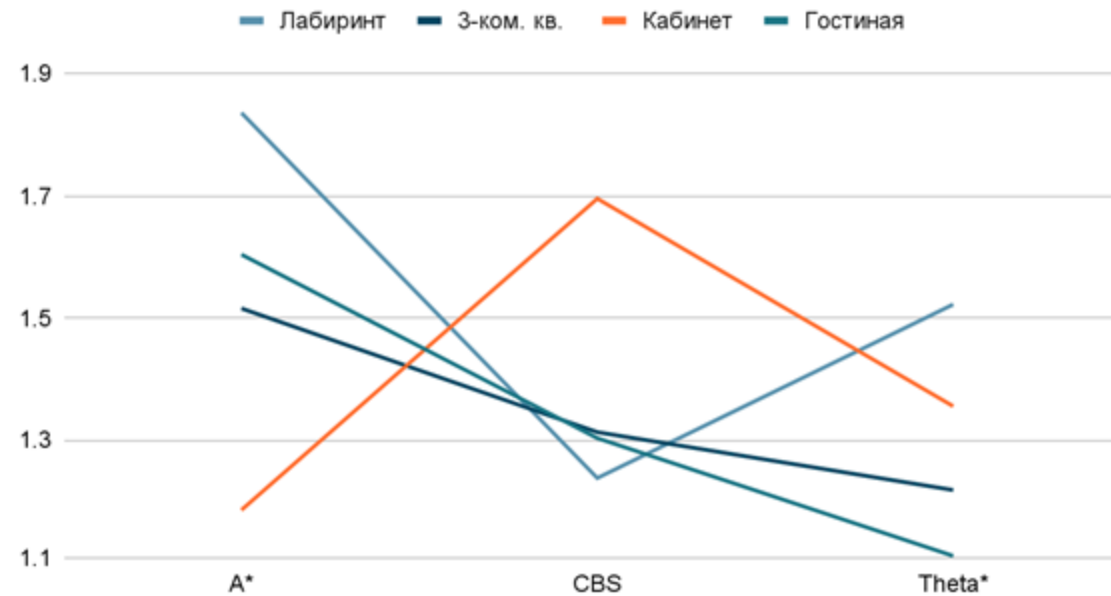
Таким образом достигается совместное управление: высокоуровневое направление задаёт человек через ВСИ-команду, а точное маневрирование, торможение перед преградами и объезды выполняет автопилот коляски. Такой принцип «shared control» хорошо зарекомендовал себя в ассистивной робототехнике, повышая безопасность движения



Эксперименты

Эксперименты подтвердили эффективность подхода: система демонстрирует бесконфликтный обход и перестроение агентов, генерирует естественные траектории без резких поворотов и быстро адаптируется к внезапным препятствиям, сохраняя низкие значения J . Результаты доказывают применимость архитектуры для надежного управления группами мобильных роботов, таких как интеллектуальные коляски.

Критерий качества J



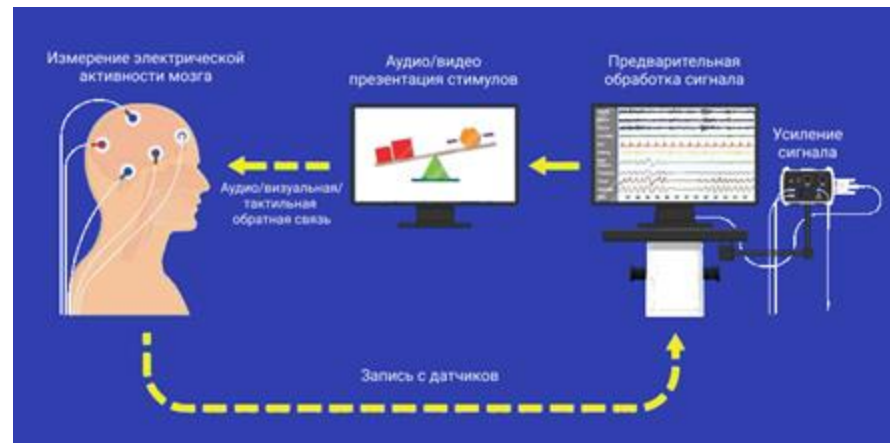
Исполнительный уровень (агент)

Непосредственно коляской управляет микроконтроллер на основе команд локального контроллера. Он отправляет сигналы двигателям, рулевым механизмам (если есть) и мониторит обратную связь. С По сути, роботизированная коляска выступает агентом, чьё поведение адаптируется: она может двигаться автономно к указанной цели, автоматически замедляться перед препятствиями и останавливаться по команде «*Стоп*» от пользователя.



Обратная связь и обработка системы

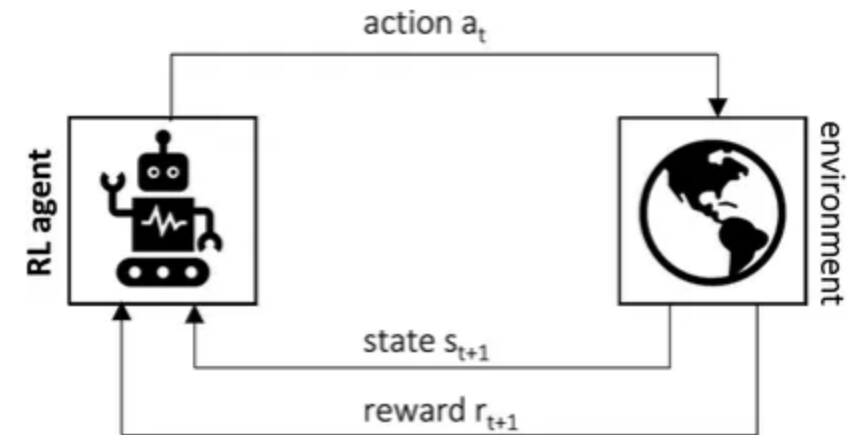
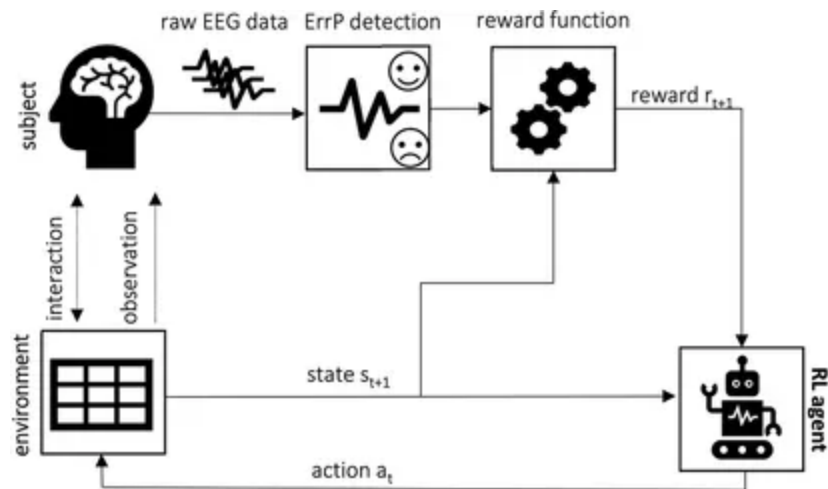
Визуальная обратная связь: Пользователь постоянно получает визуально–проприоцептивную информацию о результате своих команд – он *видит*, как коляска движется в выбранном направлении, ощущает ускорения. Дополнительно интерфейс может отображать на экране текущее целевое положение или подтверждать распознанную команду. Такой прозрачный интерфейс важен для доверия пользователя системе и снижения тревожности. Если система неверно поняла намерение, пользователь это заметит по неверному движению и сможет скорректировать (мысленно подать сигнал «Стоп» или «Ошибка»).



ErrP и RL

Ключевым элементом адаптации является использование *ошибочных потенциалов* (ErrP) как сигналов обратной связи. Идея состоит в том, что мозг пользователя непроизвольно генерирует ErrP, когда замечает ошибочное действие системы, и это можно рассматривать как «мгновенную критику» для алгоритма управления.

Встраивая детектор ErrP в замкнутый цикл, разработчики превращают мозг пользователя в источник *награды/штрафа* для агента.

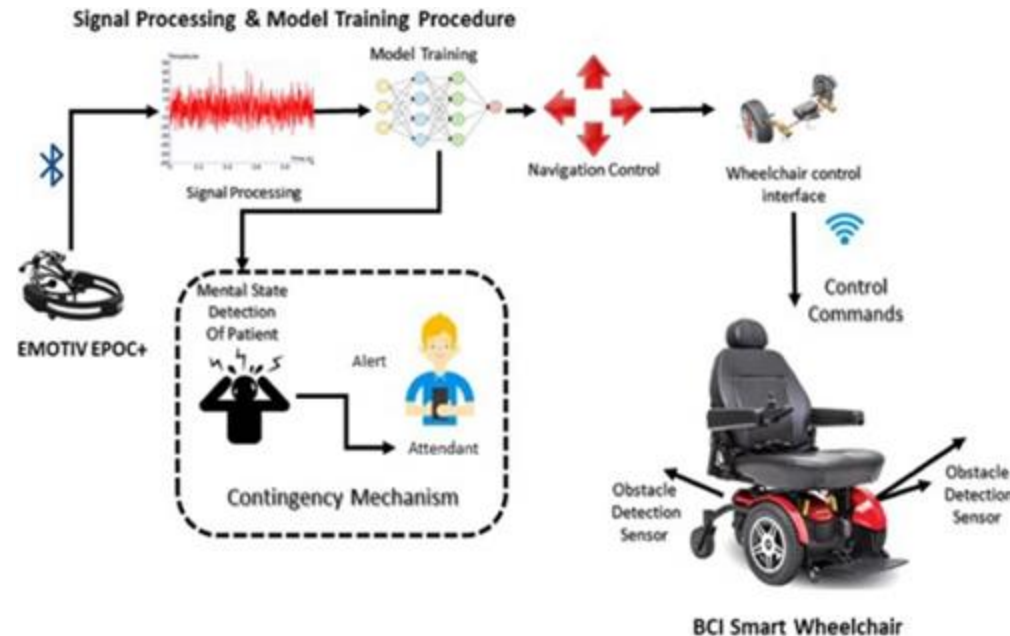


Роль трекера взгляда в обратной связи

Помимо ЭЭГ-ErrP, отслеживание глаз может служить дополнительным каналом оценки удовлетворённости пользователя. Инстинктивно, если робот едет неверно или появляется помеха, человек переведёт взгляд на проблему (например, на приближающееся препятствие) или начнёт оглядываться. Анализатор взгляда способен уловить такие паттерны – внезапное отведение глаз от целевой точки или хаотичное моргание – и расценить их как признак дезориентации пользователя. В архитектуре системы это может генерировать сигнал о неправильном действии, схожий с ErrP-подсказкой.

Научные результаты и примеры реализации

Разработка гибридных BCI-колясок – активное направление исследований. В научной литературе описаны прототипы, подтверждающие работоспособность описанной архитектуры. Так, Cruz *и соавт.* внедрили интеграцию трекинга глаз и ЭЭГ для управления электроколяской: они используют слияние сигналов, позволяющее людям с боковым амиотрофическим склерозом указывать взглядом направление, а мозговым сигналом – подтвердить движение.



Научные результаты и примеры реализации

Dillen и др. (2024) представили систему *совместного управления*: пользователь в AR-очках смотрит на объект, к которому хочет приблизиться робот, и затем выполняет моторное воображение для выбора действия с этим объектом; система предлагает возможные действия и требует явного подтверждения распознанной команды перед выполнением. Несмотря на сложность декодирования ЭЭГ, в их экспериментах 15 участников достигали в финальной фазе –83% успеха в задачах с роботизированной рукой, используя только взгляд и мысли (для сравнения: чисто взглядом – 100% успех, но BCI-вариант обеспечил работоспособность без рук). Это подтверждает жизнеспособность подхода: даже если BCI пока медленнее и менее точен, комбинация с трекингом взгляда обеспечивает интуитивность и достаточную эффективность для реальных условий.

Заключение

В заключение, архитектура гибридной BCI-системы с ЭЭГ и айтрекером позволяет пользователю высокоуровнево контролировать роботизированную коляску, в то время как алгоритмы планирования и обучения с подкреплением берут на себя низкоуровневую навигацию и адаптацию. Такая система повышает автономность и безопасность передвижения: робот избегает препятствий и корректирует поведение на основе неявных биосигналов пользователя, а пользователь может минимальными ментальными усилиями направлять коляску к желаемой цели. Продолжающиеся научные разработки и рост точности распознавания ЭЭГ (например, с применением глубокого обучения) вселяют уверенность, что в ближайшем будущем подобные умные коляски выйдут из лабораторий в повседневную жизнь, возвращая мобильность и независимость людям с нарушениями движения.