

Новая робототехника – на пути к человекоцентризму машины

Стефан Шааль¹

¹Компьютерные науки и нейронауки, Университет Южной Калифорнии, 3710 S. McClintock Avenue — RTN 401, Лос-Анджелес, Калифорния 90089-2905 и Лаборатории вычислительной нейронауки ATR, 2-2 Хикаридай, Сэйка-чо, Сораку-гун, Киото 619-02

Поступила 26 декабря 2006 г.; принят 21 мая 2007 г.; опубликовано онлайн 16 июля 2007 г.)

Исследования в области робототехники отошли от своего основного внимания промышленным Приложения. Новая робототехника — это концепция, разработанная в последние годы. нашим собственным университетом и многими другими национальными и международными исследованиями учреждений и рассказывает о том, как могут жить все более человекоподобные роботы. среди нас и взять на себя задачи, в которых наше нынешнее общество имеет недостатки. Старейшина уход, физиотерапия, образование детей, поиск и спасение и общие помощь в повседневных жизненных ситуациях — вот лишь некоторые из примеров, которые принесут пользу Новая Робототехника в ближайшем будущем. Имея в виду эти цели, исследования для Новая робототехника должна использовать широкий междисциплинарный подход, начиная от традиционные математические проблемы робототехники до новых проблем психологии, нейробиология и этика. В этой статье излагаются некоторые важные исследования проблемы, которые необходимо будет решить, чтобы новая робототехника стала реальностью. [DOI: 10.2976/1.2748612]

ПЕРЕПИСКА

Стефан Шааль: sschaal@usc.edu

В 1921 году пьеса Карела Чапека « Универсальные роботы Росум » — многие считают началом эры робототехники [например, [Шьявикко и Сицилиано](#) (1996)] — представил два интересных видения. Во-первых, роботы были похожи на людей. во-вторых, они взаимодействовали с человеком естественным, т. е. человеческим образом. Спустя более полувека после концепции робота Ка Пека, реализации сильно отставал от его идей: роботы были минималистичные механические устройства, далеко от достижения каких-либо общечеловеческих производительность, и по существу никакого взаимодействия между людьми и роботами, за исключением загрузки кода программистом. Конечно, все это сделало смысле, поскольку роботы использовались просто для повторяющиеся и высокоточные задачи позиционирования в промышленности. И это в эта область, которой до сих пор обладали роботы изменил ситуацию и внес свой вклад в полезные пути развития технологий и повышения производительности промышленности. Начало 21 века, однако стал свидетелем замечательного

изменение фокуса исследований робототехники. По инициативе искусственного интеллекта в 1980-х и 1990-х годах появилось всегда был большой интерес к созданию более универсальных и интеллектуальных роботизированных машин. Как было мало применения для таких роботов в промышленность — т. е. промышленные роботы специального назначения трудно превзойти по производительности при выполнении той задачи, для которой они были разработаны — работа над интеллектуальными роботами первоначально в основном ограничивался университетскими исследованиями и некоторыми уникальными исследованиями. такие программы, как исследование космоса, исследование подводного мира и т. д. С развитием информационных технологий и механическая конструкция, однако, Чапека видение человекоподобного, автономного и интерактивные роботы постепенно стали доступными для исследовательских прототипов. В конце 1990-х годов появилась новая область робототехники стали заметными, гуманоидными робототехника, прежде всего за счет новаторских работа в Университете Васэда, Sarcos Inc., и корпорация Honda [например, для обзор см. [Мензеля и Д'Алузио](#).

(2000)]. В этих местах появились первые полнотелые роботы-гуманоиды.

были созданы и представлены научному сообществу и

Популярная пресса. Серия людей Wabian Университета Васэда

Роботы в первую очередь сосредоточились на навыках двуногой ходьбы, как

и робот Хонда Асмио, который из-за своей связи с очень

крупная компания и свой весьма изысканный внешний вид, получила много внимания во всем мире. Гуманоид Саркоса

робот «DB» сосредоточился на навыках автономного манипулирования, из

десяти в сочетании со способностями к обучению, полученными из

идеи вычислительной нейробиологии (Аткесон и др.,

2000). К настоящему времени существует множество роботов-гуманоидов, в первую очередь

в Азии и Японии в частности, но также и в Европе и

НАС. С 2000 года существует даже специализированная конференция, посвященная гуманоидной робототехнике, — IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robotics.

Помимо давней научной проблемы понимания того, как работает

человеческий мозг и как создать

Искусственная система с возможностями, подобными человеческим, есть ли

реальная польза от роботов-гуманоидов? От

взгляд на традиционное производство в промышленности,

ответ, вероятно, будет отрицательным, поскольку соотношение затрат и выгод роботов-гуманоидов – на данный момент и в среднесрочном будущем – совсем непривлекательно. Но традиционная промышленность, скорее всего, не

на что повлияет новая робототехника. Скорее человекоподобные и подобные ему роботы станут частью нашей обычной жизни, т.е.

они возьмут на себя функции в нашем обществе, где есть

просто слишком мало людей, чтобы справиться с потребностями общества.

Этот иск был признан и выдвинут многими странами.

в мире, что часто вызвано тенденцией увеличения доли пожилых людей в

обществе и связанным с этим

опасность будущей нехватки надлежащего ухода. Однако есть много других областей, где роботы могут быть полезны.

Среди наиболее часто упоминаемых вопросов – работа в опасных условиях и поисково-спасательные операции после стихийных бедствий. Роботы также могут выступать в роли физиотерапевтов.

помочь пациентам правильно тренироваться и восстановить утраченную моторику функций — например, нехватка физиотерапевтов дает пациентам, перенесшим инсульт, в США лишь около 40 минут

тренировки в день, в то время как в

непосредственный постинсультный период для восстановления двигательных функций (Тауб и Вольф, 1997; ван дер Ли и др., 1999; Вольф и Блэнтон,

1999) — было бы здорово, если бы можно было «проверить» робота

физиотерапевт из местной аптеки? Конечно, роботы могли бы помочь людям, выздоравливающим и инвалидам, доставать, переносить и манипулировать предметами.

тема часто обсуждается под названием персональная робототехника или вспомогательная робототехника. Эти роботы также могут брать на себя

наставнические и когнитивные функции, например, напоминать людям о необходимости предполагается, что робот-робот будет работать в человеческой среде с

вовремя принимать лекарства или не забывать другие запланированные деятельность. Есть и интересные возможности для роботов.

в образовании и повседневной жизни детей. Например,

аутичные дети, кажется, очень положительно реагируют на образовательные игры с роботами (например, Robins et al., 2005). И роботы

также могут стать товарищами по играм и помощниками в обучении



Рисунок 1. Художественный набросок будущего участия роботов в обществе: «а... вспомогательные роботы, „б... роботы-товарищи в детстве образование, „с... роботы для наставничества и помощи в манипуляционных задачах, „d... роботы, обучающие двигательным упражнениям, „e... персональные роботы для пожилых людей, „f... роботы для наблюдения и защиты детей и взрослых.

школьные сценарии, при которых дети приобретают и сохраняют интерес к

высшему образованию в области науки и технологий. Много

здесь можно перечислить больше сценариев — рис. 1 обеспечивает эскиз художника некоторых из этих идей.

Важно подчеркнуть, что «Новая робототехника» будет ориентирована на человека¹.

, т. е. роботы будут работать с ху

человек в нормальной человеческой среде. И именно в этой роли

вспомогательных роботов, многие новые и междисциплинарные компоненты

становятся частью исследований в области робототехники. Например, если

предполагается, что робот будет принят детьми и взрослыми,

необходимо придерживаться определенного социального поведения и стандартов, которые

мы, люди, считаем это приемлемым. Таким образом, необходимо изучить

психологию и этику взаимодействия человека и робота. Если робот-бот

собирается действовать в качестве физиотерапевта, ему необходимо

включать знания о нарушениях нервной системы и скелетно-мышечной

системы пациента, а также адаптировать упражнения и

предложения по улучшению соответственно. По сути, такой

робот должен иметь некоторые знания о том, как работает человеческий мозг

контролирует движение, и как нейронные нарушения, например, из-за

инсульт, влияют на двигательные способности пациента. Или, если

те же предметы и инструменты, которые люди используют в повседневной жизни, это может быть

полезно понять, как люди осуществляют моторику

навыков и того, как структурирован репертуар человеческих навыков. Таким образом,

¹Есть также несколько специализированных семинаров по робототехнике, ориентированной на человека.

недавно начался, например, Международный семинар по робототехнике, ориентированной на человека.

робототехники, традиционно глубоко знакомые с прикладной математикой, механикой, теорией управления и теорией оптимизации, внезапно столкнулись с множеством новых тем, начиная от психологии, биологии и нейробиологии до этики.

Новая робототехника потребует нового типа ученых, которые смогут охватывают очень широкий спектр различных дисциплин.

Рисунок 2 представляет собой попытку структурировать темы исследований в этом новую робототехнику, ориентированную на человека, на три основные категории: (i) действие, (ii) взаимодействие и (iii) взаимодействие. Исследование действий в первую очередь занимается вопросами двигательного контроля как в люди и роботы. В исследованиях взаимодействия особое внимание уделяется взаимодействию человека-робота или робота-робота, т. е. фундаментальному исследованию, как две системы могут действовать вместе, чтобы достичь цель — в одном крайнем случае это означает, что одна система, например, человек инструктирует другую систему, робота, что делать. В другая крайность: две системы могут работать вместе, чтобы достичь цели, например, совместно неся тяжелый предмет. Наконец, исследование вовлеченности изучает когнитивные и психологические компоненты человекоориентированной робототехники. Естественно, структура, предложенная на рис. 2, не является четкой, т. е. Существует большое количество совпадений между исследованиями действий, взаимодействия и вовлеченности. Перечень тем исследований, представленный на рис. 2, также не является исчерпывающим. Но с целью дать взгляд на будущее исследований в области робототехники и для того, чтобы Просмотрите некоторую соответствующую недавнюю литературу. На рис. 2 представлены полезные рекомендации для следующих разделов этой статьи. Должно Следует отметить, что в литературе можно найти несколько других точек зрения на будущее робототехники (например, [Khatib et al., 2004](#); [Брок и др., 2005](#)).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ

Исследование действия основано на теории управления моторикой, который был в основном заложен в классических инженерных областях, таких как кибернетика ([Винер, 1948](#)), оптимальное управление ([Беллман, 1957](#)) и теории управления ([Slotine and Li, 1991](#); [Narendra и Аннасами, 2005](#)). Эти области касались многих важных проблемы систем движения, включая отрицательные отзывы

управление, упреждающее управление, нелинейное управление, движение планирование с критериями оптимизации, стабильность, контроль с система с задержкой, адаптивное управление, стохастическое управление, оценка состояния, контроль переактивированности и недоактивности системы и т. д. На рис. 3 представлена классическая схема управления. для управления двигателем, в котором выделены различные этапы схемы управления, каждый из которых связан с большим количеством тем исследований. Многие из этих тем получили широкое распространение внимание к исследованиям в области робототехники, так что они стали знания из учебников (например, [Рассел и Норвиг, 1995](#); [Scia vicco и Siciliano, 2000](#)). Однако некоторые вопросы заслуживают особое внимание. Следует отметить, что большое количество исследования в области биологического управления моторикой сосредоточены на темах аналогичны показанным на рис. 3 ([Sabes, 2000](#); [Schaal and Schweighofer, 2005](#); [Shadmehr and Wise, 2005](#)).

МОТОРНЫЕ ПРИМИТИВЫ И МОТОРНЫЕ БИБЛИОТЕКИ

Хотя такие вопросы, как преобразования координат и двигатель Генерация команд в робототехнике (рис. 3) к настоящему времени достаточно хорошо изучена (например, [Sciavicco and Siciliano, 2000](#)), они полагаться на то, что кто-то предоставит роботу соответствующий план что делать. Во многих проектах робототехники эта часть отведена над человеком-дизайнером, который вручную создает план для определенное поведение. Хотя этот подход весьма успешен в статических средах, новая робототехника по своей сути является о роботах, действующих в нормальной человеческой, т. е. динамической среде. Таким образом, возникает вопрос, как создать гибкую и реактивное управление моторикой и планирование. Чаще всего ответ ищут путем создания набора элементарных движений, которые в последовательности или суперпозиции создают достаточно большой спектр сложных двигательных навыков. Мы называем таких элементарные движения — моторные примитивы, но в литературе их обозначают и как схемы, базисы поведения, варианты, макросы и т. д. (обзор см. [Mataric, 1998](#); [Шааль, 1999 г.](#); [Шаал и др., 2003](#)).

Можно выделить по крайней мере два основных направления в исследованиях. на примитивах движения. Во-первых, примитивы движения могут быть

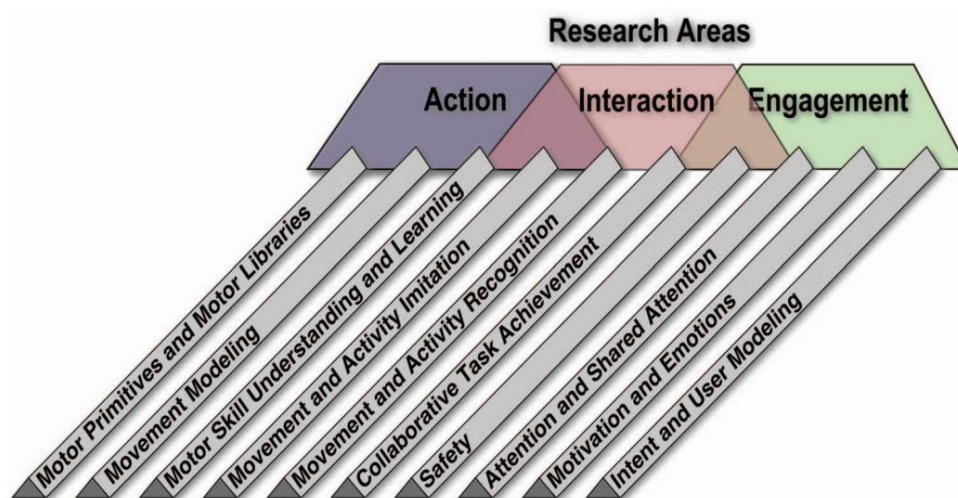


Рисунок 2. Темы исследований в робототехнике, ориентированная на человека.

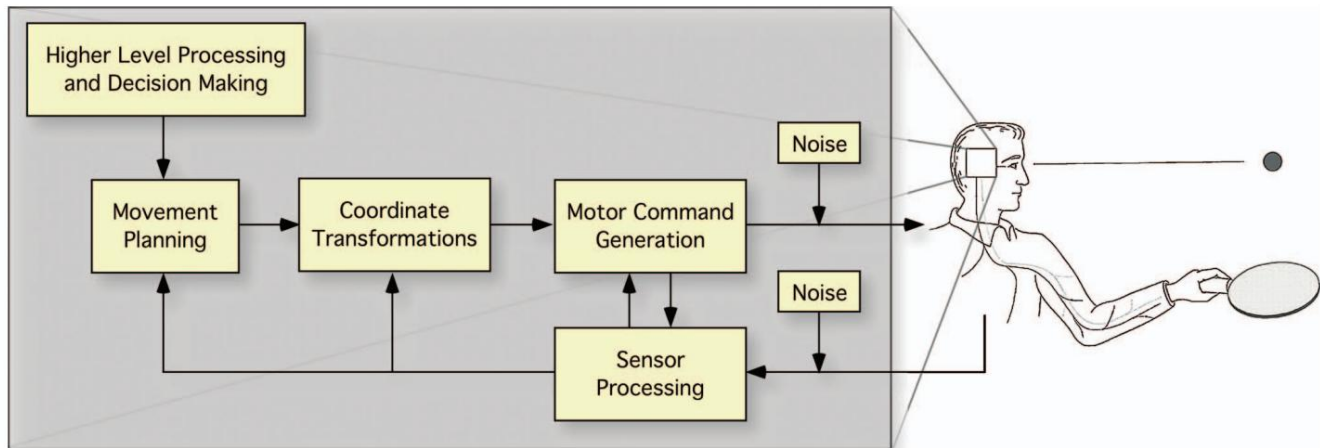


Рисунок 3. Эскиз типовой схемы управления, которая обычно используется в исследованиях в области робототехники.

моделируются как динамические системы, такие как точечные аттракторы и предельные циклы (например, [Bullock and Grossberg, 1988](#); [Burridge et al., 1999](#) год; [Шаал и др., 2004](#); [Ригетти и Эйспирт, 2006](#)).

Подход динамических систем позволяет естественным образом решать различные важные проблемы человекоподобного движения, например: проблемы устойчивости, сопряженность восприятия и действия, избегание препятствий с помощью потенциальных полей и т. д. Часто динамические системы двигательные примитивы легко интерпретируются как поведенческие единицы, например, достижение цели, передвижение на двух ногах и т. д. Недостатком является то, что моделирование с помощью нелинейных дифференциальных уравнений часто довольно сложно и не всегда аналитически разрешима.

Второй основной подход к примитивам движения заключается в средствах статистических методов (например, [Atkeson et al., 2000](#); [Харуно и др., 2001](#); [Доя и др., 2002](#); [Дженкинс, 2003 г.](#); [Ина Мура и др., 2004](#)). В качестве преимуществ статистические методы предлагают хорошо понятные инструменты и механизмы для извлечения движения модули из эмпирических данных, например, примитивы движения может быть основано на поведенческих записях людей. Как недостаток, кажется, что статистически извлекаемое движение примитивы часто не имеют поведенческого значения, например что неясно, насколько хорошо такие примитивы движения обобщаются на новое поведение. Более того, такие феномены, как взаимодействие восприятия, действия, избегание препятствий и т. д., естественно, не включаются в статистические модели примитивов движения.

До сих пор отсутствуют всеобъемлющие реализации какого-либо примитивного подхода к движению, и трудно объективно отдать предпочтение одному подходу перед другим.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ

Чтобы работать в средах, созданных для людей, роботам часто бывает выгодно использовать аналогичные стратегии движения как люди. Кроме того, если роботы движутся как и люди, люди легче принимают их как партнеров из-за нашей присущей нам настройки на естественное движение ([Йоханссон, 1973](#); [Вивиани и Шнайдер, 1991](#); [Вивиани и др. др., 1997](#)). Таким образом, необходимо задаться вопросом, какие принципы (или модели) люди используют при генерации движений и

каковы основные стратегии двигательных навыков человека.

Эти вопросы сложны, поскольку они были решены область поведенческой психологии, занимающаяся моторным и нейромоторным контролем, в течение нескольких десятилетий (например, см. [Schmidt, 1988](#); [Арбиб, 1995а](#); [Арбиб, 1995б](#); [Шадмер и Уайз, 2005](#)) и однозначные выводы до сих пор отсутствуют.

Однако можно выделить несколько особенностей. движения человека, в частности, если эти характеристики в значительной степени отсутствуют в роботизированных системах. Одним из них является то, что генерация движений человека в высшей степени совместима, в то время как большинство (даже современные) роботы используют довольно жесткое (с высоким коэффициентом усиления) управление. Причина, по которой робототехники предпочитают управление с высоким коэффициентом усиления, заключается в том, что оно снижает потребность в точных моделях робота и его окружения. ронмент. Управление высоким усилением просто означает, что положение и ошибки скорости между желаемой и достигнутой траекторией умножаются на большое число, и эти результаты затем добавлены к моторным командам. Таким образом, небольшие отклонения от желаемое движение приводит к сильным корректирующим двигательным командам, т. е. робот чувствует себя очень жестким. Проблема с жесткостью контроль заключается в том, что с любым непредвиденным возмущением борются очень большие усилия, потенциально настолько большие, что либо сам робот окружающей среды может быть поврежден. Люди и животные, с другой стороны, мягко поддаваться возмущению и тем самым избегают причинения вреда окружающей среде (которым может быть другой человек) или себе. Учитывая, что в динамичной среде столкновения с окружающей средой неизбежны, соответствует требованиям контроль, кажется, имеет решающее значение для Новой Робототехники.

Альтернативой регулированию высокого усиления является регулирование низкого усиления. с моделями прямого распространения ([An et al., 1988](#); [Miall and Wolpert, 1996](#); [Kawato, 1999](#)), т.е. моделями динамики робот, который поддерживает прогнозирование оптимальной команды двигателя для любое положение, скорость и ускорение робота в градусах свободы. Теоретически характеристики конструкции робота позволяют достаточно точно генерировать эти модели. Но на практике теоретические модели и реальная динамика десяти робота не совпадают из-за сложной динамики привода, проводов, шланги, защитные кожу и т. д. на работе. Таким образом, низкий выигрыш

управление сложными человекоподобными роботами на основе моделей на самом деле довольно сложно и все еще является темой продолжающихся исследований (Виджая Кумар и Шаал, 2000; Виджаякумар и др., 2005).

тема становится еще более сложной, если принять во внимание динамику взаимодействия между роботом и его средой.

Например, каждая шагающая система имеет такую динамику взаимодействия из-за сил реакции земли. Взаимодействие с окружающей средой создает ограничения, и математика управления на основе моделей становится значительно более сложной.

комплекс (Peters et al., 2005a; Nakanishi et al., представлено). Как следствие, совместимое управление в человекоподобных роботах практически не было достигнуто ни теоретически, ни экспериментально (за некоторыми исключениями, см. Albu-Schäffer et al., 2007), и, потенциально, многому можно научиться из движений человека. исследования (Гоми и Кавато, 1996; Франклин и др., 2003; Осу и др., 2004) и свойствам опорно-двигательного аппарата человека (Brown et al., 1999; Brown and Loeb, 1999; Леб, 2001).

Еще одна интересная особенность двигательного контроля человека. что большую часть времени мы выполняем несколько задач параллельно, например, балансирование на двух ногах и ухватывание предмета. Теория робототехники разработала методы иерархической расстановки приоритетов задач (Nakamura, 1991; Khatib et al., 2004; Sentis and Хатиб, 2004 г.; Аримото и др., 2005; Peters et al., 2005b), что теоретически весьма привлекательны и способны. В недавней работе Сентис и Хатиб (Хатиб и др., 2002; Хатиб и др., 2004; Сентис и Хатиб, 2004) продемонстрировали, что вполне естественно Поисковое поведение можно генерировать с помощью соответствующих контроллеров и иерархий пространства задач. Однако большая часть методов основаны на точных моделях робота и становятся довольно сложно, когда робот находится в контакте с окружающей средой, особенно когда условия контакта меняются (как в передвижение или манипулирование объектами). Существует довольно мало экспериментальных оценок иерархического управления задачами по сложным задачам. роботизированные системы и поведенческие исследования на людях вряд ли решал столь сложные проблемы.

ПОНИМАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАВЫКОВ

Необходимо гораздо больше понять, как представлять двигательные навыки. Обычно есть выбор, будет ли специальная задача координаты, общие внешние координаты (например, декартовы координаты) или внутренние координаты (угол сочленения) являются наиболее подходит (Зальцман, 1979; Шаал и др., 1992). Специальные стратегии контроля могут облегчить или усложнить двигательные навыки (например, Бик, 1989 г.; Шаал и др., 1992). Существуют некоторые идеи, как генерировать общие представления о двигательных навыках (Вада и Кавато, 1995 г.; Миямото и др., 1996; Миямото и Кавато, 1998 г.; Ijspeert et al., 2003), но до сих пор не существует общего подхода к приобретению навыков.

Еще один важный компонент в понимании моторики. навыков заключается в представлении цели задачи, т. е. своего рода метрика, которая измеряет достижение задачи. Для некоторых задач, например достижения объекта, это просто, как метрика успех — это просто расстояние руки от объекта.

Для других задач, например, на прямохождение, задача Цель гораздо более абстрактна и ее нелегко измерить. Для передвижение на двух ногах, основная задача – не упасть, но второстепенная цель — сохранение энергии, третья цель. Целью задачи является снижение износа двигательной системы, и Другая цель задачи может состоять в том, чтобы сохранять равновесие и одновременно тянуться за чашкой кофе. Цель – сбалансировать себя нелегко поддается количественной оценке: мы могли бы выбрать желаемое положение центра тяжести, но также и желаемое положение точка нулевого момента (Каджита и Тани, 1996). Другие исследователи могут заявить, что такие меры, как передвижение двуногих, непригодны для человека, и прибегнуть к описанию передвижения двуногих в терминах меры устойчивости ассоциированного движения. предельный цикл (McGeer, 1990; Collins et al., 2005). По сути, определить критерии оптимизации для конкретной задачи непросто.

Если предположить, что у нас есть представление задачи и метрика для измерения успешности задачи до сих пор не ясно, как выбрать соответствующие двигательные команды для выполнения задачи. Одна из возможностей — это взгляды человека-проектировщика, но, как упоминалось ранее, Новая робототехника потребует роботов, которые смогут реагировать на динамичную среду, и маловероятно, что человек дизайнеры могут предвидеть все возможные события, в которых будет участвовать робот подвергать. Таким образом, обучающиеся роботы были бы очень желательны. поле, которое называется контролем обучения. Полезно следовать одному из наиболее общих рамок контроля обучения, первоначально разработанных в середине 20-го века в областях теории оптимизации, оптимального управления и, в частности, динамического программирования (Bellman, 1957; Dyer and McReynolds, 1970). Здесь цель обучения управлению была формализована как необходимость освоить политику управления, зависящую от задачи. который отображает непрерывный вектор состояния x элемента управления система и ее окружение, возможно, во времени образом, к непрерывнозначному вектору управления u :

$$u = x, t. \quad 1$$

Вектор параметров содержит конкретные параметры политики, • которые необходимо скорректировать в процессе обучения. система. Поскольку управляемую систему в общем случае можно представить как нелинейную функцию

$$x' = f(x, u) \quad 2$$

в соответствии со стандартной теорией динамических систем (Штрогац, 1994), комбинированная динамика системы и регулятора результат в

$$x' = f(x, x, t). \quad 3$$

Таким образом, контроль обучения означает нахождение (обычно нелинейного) функция • которая адекватна данному желаемому поведению и система движения.

Общий подход к политике контроля обучения – это обучение с подкреплением (Sutton and Barto, 1998; Schaal, 2002; Барто и Махадеван, 2003). К сожалению, усиление Обучение — довольно медленный метод, с огромными вычислительными и теоретическими проблемами, когда дело доходит до применения.

Журнал HFSP

это к настоящим роботам (Peters et al., 2003a; Peters et al., 2003b; Питерс и др., 2005c). Альтернативно, можно подать заявку обучение только некоторым частям задачи управления, например, как в изучение внутренних моделей, которые необходимы для прямой связи контроль. Такие задачи могут быть решены с помощью контролируемого обучения. методов, что требует больших вычислительных и практических затрат. более сговорчивы (Atkeson et al., 1986; Schaal and Atkeson, 1994 год; Аткесон и др., 1997a; Аткесон и др., 1997b; Шааль и др., 2002; Петерс и Шаал, 2006). К сожалению, обучение применительно к человекоподобным роботам преследовалось лишь до некоторой степени. сравнительно небольшой объем и большой объем исследований как по теоретическая и практическая сторона машинного обучения и робототехники еще предстоит сделать (обзор см. Schaal, 2002; Шааль, в печати).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Исследование взаимодействия добавляет в робототехнику интересный компонент, а именно: как координировать две системы движения для совместной работы над одной и той же задачей. Конечно, это сотрудничество не ограничено механическим сотрудничеством, но допускает любое вид взаимодействия, например, язык, жесты и т. д. Взаимодействие. Недавно компания открыла собственное направление исследований и связанные с ним конференции: взаимодействие человека и робота (HRI). Чтобы проиллюстрировать сложность HRI, мы могли бы предварительно определить аналогично термину «взаимодействие человека и компьютера»:

HRI – это то место, где и люди, и роботы участвуют в опыт взаимного воздействия. В техническом с точки зрения, у нас есть (по крайней мере) двойная политика контроля, одна разработка человека, другая работа робота

Проблема здесь в том, что HRI объединяет как минимум два нелинейных динамические системы. Один из них, робот, возможно, неплохо себя чувствует. понял. Другой, человек, менее понятен, и даже рискуя пострадать, если HRI пойдет не так. В общем, хорошо понятно, что связанная нелинейная динамика системы могут вести себя предсказуемо или непредсказуемо, в высшей степени сложной манере (Строгац, 1994). Таким образом, исследование должно быть довольно осторожны при разработке методов HRI, всегда соблюдая Имея в виду, что простые алгоритмы, которые хорошо понятны в изоляция может привести к повреждению при соединении нескольких систем. То есть вопросы этики и безопасности очень важны. в области прав человека, а также четкое понимание динамики человеческие действия и восприятие, а также какие стимулы или поведение может спровоцировать опасные ситуации для человека, например, припадки от перцептивной стимуляции, эмоциональные реакции или неадекватные физические реакции.

ИМИТАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Культурное и имитационное обучение являются одними из наиболее интересных элементов человеческого существования и часто считаются краеугольным камнем того, как люди могут развить такой высокий уровень интеллекта (см. обзоры Piaget, 1951; Tomasello et al., 1993 год; Мельцов и Мур, 1994; Бирн и Рассон, 1998 г.; Риццоллати и Арбиб, 1998 г.; Даутенхан и Неханив, 2002). Уже более 20 лет робототехники пытаются добавить имитацию.

ционное обучение или обучение на демонстрации, как это называлось изначально к репертуару обучения роботов. Имитация движений знакома каждому из повседневного опыта: педагог демонстрирует движение, и ученик сразу же способен примерно повторить его. С точки зрения обучение, демонстрация учителя как отправная точка собственное обучение может значительно ускорить обучение процесс, поскольку имитация обычно резко снижает количество метод проб и ошибок, необходимый для осуществления движения цель, предоставив хороший пример успешного движения (Шааль, 1999). Таким образом, с точки зрения робототехники важно понимать подробные принципы, алгоритмы и показатели, обеспечивающие подражание, начиная от зрительного восприятия учителя и заканчивая подачей двигательных команд, которые двигать конечностями ученика.

На рис. 4 показаны основные компоненты концептуального подхода. система имитационного обучения [обзор многих статей по теме см. в Schaal (1999)]. Визуальная сенсорная информация должна быть разобраны на информацию об объектах и их пространственном положении во внутренней или внешней системе координат; изображенная организация во многом вдохновлена дорсальным (каким) и вентральный (где) поток, как обнаружено в нейробиологии. исследования (ван Эссен и Маунселл, 1983). В результате некоторые форма постральной информации движения педагога и/или трехмерная объектная информация об манипулируемом объекте (если объект задействован) должна стать доступный. Далее возникает один из главных вопросов. о том, как такую информацию можно преобразовать в действие.

Для этой цели рис. 4 отсылает к концепции движения. примитивы, о которых уже говорилось выше. В общем, мы думаем о примитивах движения, чтобы закодировать полную временную поведение, такое как «хватание чашки», «ходьба», «теннисная подача», и т. д. Рисунок 4 предполагает, что воспринимаемое действие учителя отображается на набор существующих примитивов в процессе ассимиляции фазу, также предложенную Демирисом и Хейсом (2002) и (Волперт и др., представлено). Этот процесс картирования также требует решить проблему соответствия, касающуюся несоответствия между телом учителя и телом ученика (Даутенхан и Неханив, 2002). Впоследствии наиболее подходящие примитивы корректируются путем обучения улучшению работоспособность на этапе аккомодации. Рисунок 4 показывает такой процесс, выделяя наиболее соответствующие примитивы с увеличением ширины линий. Если ни один существующий примитив не является хорошим соответствовать наблюдаемому поведению, должен быть создан новый примитив. генерируется. После начальной фазы подражания можно заняться самосовершенствованием, например, с помощью подкрепления. критерий оценки эффективности (Саттон и Барто, 1998), может уточнить как примитивы движения, так и предполагаемую стадию генерации команд двигателя (см. ниже) до желаемого достигается уровень двигательной активности (например, Peters et al., 2003a; Бентивенья и др., 2004a).

Обучение имитации требует высокого уровня двигательной и перцептивной компетентности, ни один из которых до сих пор не был реализован в роботизированных системах. Тем не менее, область подражания в

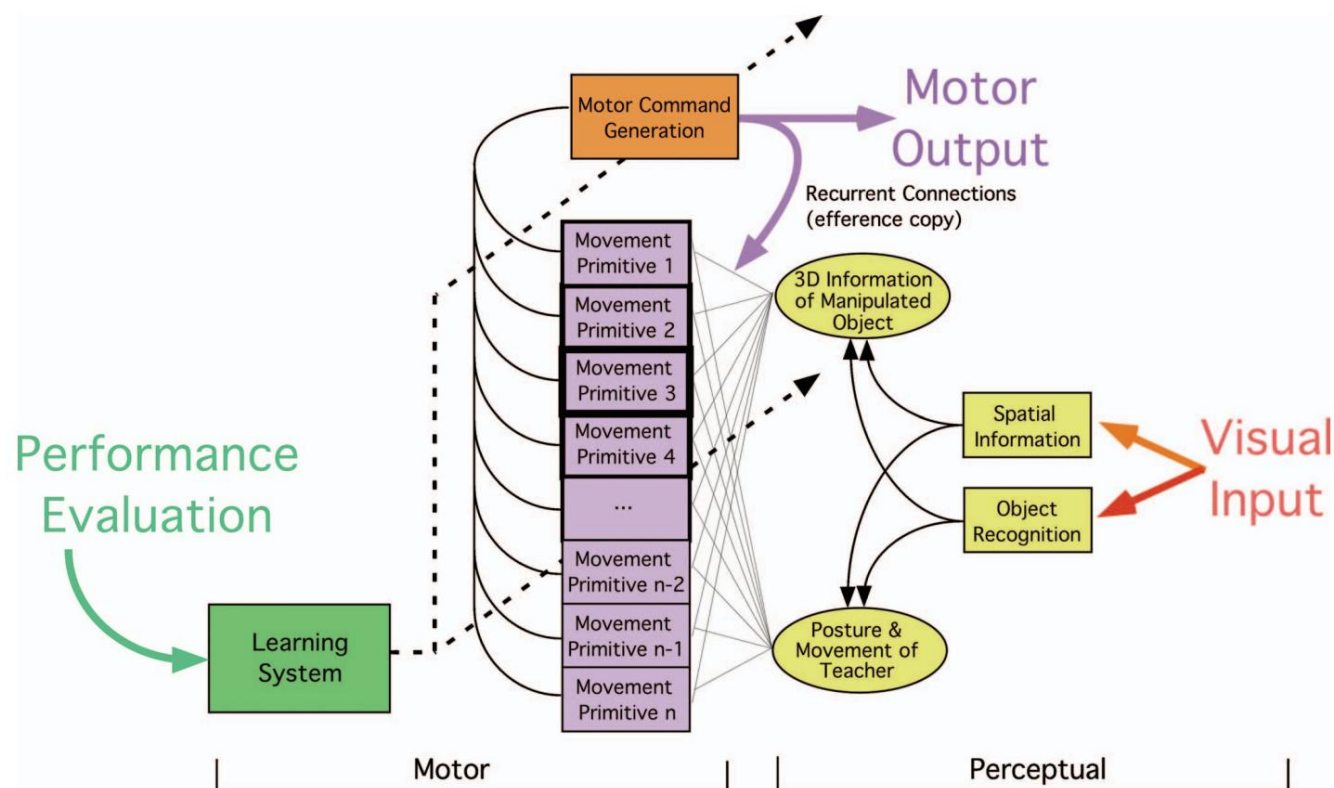


Рисунок 4. Концептуальный эскиз системы имитационного обучения. Правая часть рисунка содержит в основном перцептивные элементы и указывает на то, как зрительная информация преобразуется в пространственную и предметную информацию. Левая часть фокусируется на двигательных элементах, иллюстрируя, как набор примитивов движения конкурирует за продемонстрированное поведение. Команды двигателя генерируются на основе ввода наиболее подходящего примитивный. Обучение позволяет корректировать как примитивы движения, так и генератор двигательных команд.

За последние десять лет в робототехнике было проведено большое количество исследований. лет, существуют отличные обзоры и сборники статей (например, [Шааль, 1999 г.](#); [Матарик, 2000](#); [Даутенган и Неханив, 2002 г.](#); [Шаал и др.](#); [Арбиб, 2006](#)).

РАСПОЗНАВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И АКТИВНОСТИ

Понимание движений и деятельности человека станет важным компонентом Новой Робототехники, поскольку роботам потребуется делать выводы и реагировать автономно на контекст того, что происходит вокруг них. Таким образом, обнаружение людей в окружающей среде и распознавание того, кто они и что делают, будет иметь решающее значение. Хотя большинство соответствующих исследований было проведено в компьютерное зрение (например, обзоры см. в [Gavrila, 1997](#); [Aggarwal and Cai, 1999](#)) и выходит за рамки данной статьи, с точки зрения генерации движения, потенциальный недостаток этих подходов является то, что используемые представления признания, в большинстве случаев не подходят для контроля движения, так как они не относятся к понятию суставов, мышцы, крутящие моменты суставов или цели задачи. Учитывая, что роботы в Новая робототехника будет использоваться не только для наблюдения, но и для наблюдения. скорее, нам нужно действовать в соответствии с тем, что они воспринимают, например, при имитации движений или физиотерапии, нам нужны ориентированные на действие действия. восприятие, а не восприятие изолированно.

Это было вызвано открытием «зеркальных нейронов» в нервной системе.

биологические исследования, т. е. некоторые нейроны, расположенные в интерфейс восприятия и действия у человека и обезьяны ([Риццоллати и Арбиб, 1998](#); [Шаал, 1999](#); [Фрит и Вольперт, 2004 г.](#); [Арбиб, 2006](#)), и это действительно похоже на участие в Восприятие, ориентированное на действие, несколько исследовательских проектов в области робототехники и смежных областях приступили к разработке соответствующих теорий и алгоритмов. То есть модульный двигатель подход управления [Wolpert и Kawato \(1998\)](#), подход динамических систем [Ijspeert et al.](#) (Ийсперт и др., 2003), а также статистический подход [Inamura et al.](#) ([Ина Мура и др., 2004](#)) и [Дженкинса \(Jenkins, 2003\)](#) — все это методы, которые осуществляют восприятие, ориентированное на действие, и могут быть применены к робототехнике. Однако необходимо подчеркнуть, что Восприятие в этих подходах обычно упрощено, т.е. авторы не используют необработанные видеовходы для распознавания движений, а скорее снабжают своих объектов маркерами или другими означает снижение сложности визуальной обработки. Таким образом, необходимо сделать гораздо больше для достижения ориентированного на действие восприятия в действительно естественной среде.

СОВМЕСТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

В определенных ситуациях будет полезно, если несколько роботов или роботы и человек сотрудничают для достижения определенной цели. Существует два вида сотрудничества: сотрудничество

Журнал HFSP

посредством физического контакта (например, совместного переноса объекта) и сотрудничества исключительно посредством обмена информацией (например, как в случае с несколькими роботами, картографирующими окружающую среду). Последняя область в последние годы привлекла изрядное внимание благодаря соревнованиям RoboCup, т.е. мобильным роботам, играющим в командах в футбол (например, см. [Bredenfeld et al., 2006](#)), а также проводится техническая конференция по мультироботам. системы (например, см. [Parker et al., 2005](#)). Многие из методов, разработанных в этой области исследований, будут иметь отношение к «Новой робототехнике», но расширив эту статью до этой области. уменьшило бы наше внимание к междисциплинарным, ориентированным на человека слишком много исследований.

Физическое сотрудничество роботов (или роботов и людей) в робототехнике в основном рассматривается под названием силового управления, поскольку сумма сил, действующих на совместно манипулируемый объект, является наиболее важной для поведения объекта. Теоретически очень привлекательная схема такого манипулирования была разработан Хатибом ([Хатиб, 1987](#)), первоначально с целью объясняя, как сила может быть наиболее важной переменной в кодирование двигательных задач (в отличие от положения, скорости или ускорения). В [Физерстоуне и Хатибе \(1997\)](#) это было реализовано. что концепция Хатиба по силовому контролю на уровне задач (он же оперативное управление пространством) очень подходил для совместного решения задач, так как специальная формулировка Хатиб избегает сложного математического взаимодействия между сотрудничающих двигательных систем, т. е. каждая система может индивидуально вносить свой силовой вклад, не принимая на себя учитывается совокупное состояние всех задействованных двигательных систем. Таким образом, формулировка Хатиба о контроле задач остается единой. Один из наиболее привлекательных теоретических подходов к формированию двигательных навыков роботов, поскольку он сочетает в себе способность податливого управления, иерархического управления и даже координации нескольких роботов. Как упоминалось ранее, единственным недостатком является то, что эти свойства требуют достаточно точных моделей робота система. Будет интересно посмотреть в будущих работах, будет ли Можно показать, что человеческий двигательный контроль действует в соответствии с аналогичные принципы, предложенные в работе Хатиба, и некоторые работа в этом направлении ведется ([Шольц и Шонер, 1999 год](#); [Тодоров и Джордан, 2002 г.](#); [Тодоров, 2005](#)).

БЕЗОПАСНОСТЬ Хотя в этом документе не рассматриваются технические вопросы безопасности в Новая робототехника, тем не менее, важно отметить эта безопасность станет серьезной проблемой и препятствием на пути развития новой робототехники. Неизбежно, что существуют будут несчастные случаи между людьми и роботами в робототехнической среде, ориентированной на человека. Робот может не срабатывать такие проблемы, но кто сможет помешать людям случайно толкнув роботов, дети залезли на них, и т. д.? Самые мощные способы снижения риска травм за счет легкой и совместимой конструкции робота (например, [Zinn et al., 2004](#)), а также приняв поведение по восстановлению, подобное тому, что делаем мы, люди (например, [Fujiwara et al., 2002](#)).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Наблюдая за тем, как промышленный робот собирает автомобиль, можно быть очарован технологией на мгновение, но через несколько повторений, этот интерес угасает. Исследование вовлеченности пытается понять, что нужно, чтобы поддерживать интерес людей при взаимодействии с роботом, что будет иметь решающее значение в Новой робототехнике, когда роботы станут педагогами, физиотерапевтами, личными помощниками или даже домашними животными. Исследование вовлеченности наименее оригинальная тема робототехники и многое другое уходит корнями в психологию и когнитивные науки. В этой статье, поэтому мы сосредоточимся только на нескольких вопросах исследования вовлеченности, которые наиболее тесно связаны с техническими исследованиями. робототехники.

ВНИМАНИЕ И ОБЩЕЕ ВНИМАНИЕ Движения глаз имеют решающее значение в поведении человека, по крайней мере, в двух аспектах. пути. Во-первых, мы используем их, чтобы переключить фокус нашего внимания на объект интереса, такой, что его можно осмотреть с помощью фовеальную область сетчатки с высоким разрешением, и, во-вторых, мы использовать глаза, чтобы сообщать другим об интересных объектах, т.е. мы разделяем внимание и вызываем вовлеченность. Кроме того, Глазодвигательная система человека имеет несколько типов поведения более низкого уровня. которые обеспечивают стабилизацию зрительной информации (вестибулоокулярный рефлекс, оптокинетический рефлекс, плавное преследование и вергентность, например, см. [Shibata et al., 2001](#)). Наконец, движения глаз, по-видимому, являются важным компонентом в создании сложных двигательных последовательностей ([Flanagan, Johansson, 2003](#); [Flanagan et al., 2006](#)), так что генерация последовательных действий может потребоваться понимание принципов зрительного внимания и планирование в визуальном пространстве.

С точки зрения робототехники, это было справедливо. работы по созданию низкоуровневой моторики зрения головы (например, [Demiris et al., 1997](#); [Breazeal et al., 2001](#); [Shibata et al., 2001](#); [Panerai et al., 2003](#); [Aryananda and Weber, 2004](#)). Однако на данный момент полная реализация всех Глазодвигательное поведение глазодвигательной системы человека отсутствующий. Пока головы роботов устанавливались на статических платформах, зачастую не было особой необходимости в полноценной окулomotorной системе, но если предполагалось, что голова будет двигаться роботу-гуманоиду потребуются все стабилизационные рефлексы и двигательное поведение более высокого уровня. Дело не в том, что кто-то из такое поведение само по себе является технической проблемой, а скорее Задача заключается в сочетании и арбитраже всех видов поведения и некоторых необходимых способностей к обучению для настройки поведенческие параметры ([Шибата и др., 2001](#)). Визуальное внимание с помощью роботизированных головок также широко исследовалось (например, [Braun, 1994](#); [Driscoll et al., 1998](#); [Бризил и др., 2001](#); [Шибата и др., 2001](#); [Виджаякумар и др. al., 2001](#)), но совсем недавно появилось довольно полное Система зрительного внимания для технических приложений была разработана на основе идей нейробиологии ([Кох и Ульман, 1985 год](#); [Итти и Кох, 2000а](#); [Итти и Кох, 2000b](#); [Итти и Кох, 2001](#); [Итти и др., 2003](#)). Эта работа в настоящее время находится на стадии

способ изучить, как намерение (т. е. предубеждения, относящиеся к задаче сверху вниз) могут влиять на внимание и принятие решений (Навальпа Ккам и Итти, 2005; Карми и Итти, 2006).

Наконец, общее внимание, которое имеет решающее значение для взаимодействия исследования, начали изучаться в некоторых проектах робототехники (Козима и Ито, 1998; Скасселлати, 1998; Скасселлати, 2002).

Возможности, необходимые для мониторинга внимания, включают взгляд, отслеживание, интерпретация позы, распознавание выражения лица и т. д. (например, Breazeal and Scassellati, 2002). Это займет значительное количество исследований и технологических разработок, пока такие системы не станут хорошо понятными, сравнимыми по своим возможностям с деятельностью человека и практичными в реальные среды.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАМЕРЕНИЙ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Довольно неисследованный и трудный вопрос взаимодействия человека и робота заключается в том, как определить намерение и предпочтения движения какого-либо тела. Если мы понимаем эти вопросы, соответствующие протоколы могут быть разработаны во взаимодействии и взаимодействиях исследования, которые обращаются к отдельным пользователям и принимают во внимание их индивидуальные склонности. Достаточно мало исследований можно найти проекты, которые касаются этих вопросов. Первый шагом могло бы стать понимание человеческого движения и деятельности в с точки зрения функций стоимости, т. е. связать конкретную стоимость функционировать с определенным поведением. Обучение с подкреплением генерирует политику управления на основе таких функций затрат и выведение функции стоимости из заданной политики (т. е. поведения) можно назвать обратным обучением с подкреплением (Ng и Рассел, 2000). Альтернативно, поведенческая статистика может быть собрана на основе наблюдаемого поведения, которое впоследствии характеризует определенные предпочтения пользователей и движений (Bentivegna et др., 2004; Биллард и др., 2004). Требуется большая исследовательская работа что необходимо сделать, чтобы найти возможные подходы к теме и цели и моделирование пользователей, которое, по сути, пытается приблизиться к тема «теории разума» алгоритмическими способами (Галлезе и Голдман, 1998 г.; Скасселлати, 2002 г.; Вольперт и др., 2003).

МОТИВАЦИЯ И ЭМОЦИИ

С моделированием намерений и пользователей тесно связан вопрос как понять мотивацию и эмоции людей в

автоматический способ и, конечно же, как создать поведение робота в Новой Робототехнике, которые относятся к тем характеристикам человеческой личности. На данный момент существуют эмпирические и исследовательские работа в сообществе робототехники по этой теме (например, Breazeal и Скасселлати, 2002 г.; Канда и др., 2004; Корадески и др., 2006), обычно путем сопоставления испытуемых с некоторыми форму человекоподобного робота и изучая их реакцию по некоторым психологическим показателям. Интересный новый подход заключается в изучении нейробиологических основ мотивация и эмоции, исследованные в контексте обучения и вовлеченности. Исследования по обучению и вовлечению начинается с гипотезы о том, что моторное обучение само по себе может генерировать внутреннее вознаграждение. В частности, предлагается, чтобы нервная система вычисляет скорость обучения двигательным навыкам,

что служит внутренним вознаграждением и дополняет внешние условия вознаграждения. Согласно предварительной модели (Дой и Турецкий, 2002; Швайгофер и Дойя, 2003 г.; Schweighofer et al., 2004), мотивация к обучению будет зависеть от баланс между успехами, неудачами и внешними вознаграждениями. В

В частности, решающее значение имеет сложность наблюдаемого движения, которое необходимо выучить. Если слишком легко или слишком сложно, скорость обучения скоро станет нулевой. Таким образом, только умеренные и снижающиеся ошибки обучения дадут высокий выигрыш в положительной обратной связи цикл, который максимизирует мотивацию к обучению. Эти интуиции могут быть формализованы в программах обучения и могут привести к методы, которые оптимально поддерживают вовлеченность учащихся для быстрого обучения. Аналогичная методология исследования может быть применима и к другим ситуациям, в которых человеческая мотивация и эмоции играть важные роли.

ВЫВОДЫ

Эта точка зрения выдвинула на первый план междисциплинарные исследования программа, которая могла бы проложить путь к новой робототехнике. Предполагается, что в какой-то момент в ближайшем будущем роботы будут быть повсеместно среди нас и помогать нам выполнять задачи в все более сложное общество, общество, которое становится все более и более сталкиваются со старением населения, проблемами образования, катастрофами, болезнями и т. д. Чтобы функционировать среди нас, роботам Новой Робототехники потребуются гораздо больше

человеческие способности в своем двигательном поведении, и они будут также должны иметь соответствующее социальное поведение. Таким образом, исследования в области робототехники должны охватывать новый междисциплинарный подход программа, начиная от традиционных технических тем управления вплоть до нейробиологии, психологии, когнитивных наук и этики. В этой статье основное внимание уделялось привнесению – в некомплексном способ – некоторая структура потенциальных тем исследований в Новая робототехника. Некоторые из этих тем, например упомянутые в рамках Action Research, уже имеют более солидную научную базу. Foundation и собираются провести пилотные исследования на реальных роботах. Другие темы, особенно те, которые перечислены в разделе «Исследование вовлеченности», находятся еще в зачаточном состоянии, и это задача исследования, чтобы выяснить, какие вопросы являются правильными спросите, и какие подходы могут быть многообещающими. В некоторых В этом смысле «Новая робототехника» — это не что иное, как старая мечта об искусственном интеллекте создать искусственную систему с подобными способности, чем у человека. Просто средства и подходы к этой теме существенно изменились от классических идей символического мышления, а в благодаря усовершенствованным компьютерным технологиям и пониманию человеческий мозг, а скорее использовать методы статистического обучения, вычислительная нейробиология и вычислительная психология. Также важно, чтобы амбиции «Новой робототехники» сокращаются: они действительно могут сосредоточиться на социальных потребностях и сделать прогресс в четко определенных проблемных областях, например, робототехника терапия или роботизированное обучение детей с особыми потребностями (например, дети-аутисты), а не пытаться создать всепотенциальную роботизированную систему для решения всех проблем. Во многих странах, исследовательские агентства начали финансировать саженцы

Журнал HFSP

Новая робототехника, и будет интересно наблюдать за развитием этой новой области в течение следующего десятилетия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Это исследование было частично поддержано грантами Национального научного фонда № ECS-0325383, IIS-0312802, IIS 0082995, ECS-0326095, ANI-0224419, грантом NACA № AC#98-516, грант AFOSR на интеллектуальное управление, проект ERATO Kawato Dynamic Brain Project, финансируемый Японским агентством науки и технологий, и Лабораториями вычислительной нейронауки ATR.

ССЫЛКИ Аггарвал Дж.К.
и Кай К. (1999). «Анализ движений человека: обзор». Вычислить. Вис. Изображение Понимание. 73, 428–440.
Альбу-Шеффер А., Отт К. и Хирцингер Г. (2007). «Единая система управления на основе пассивности для управления положением, крутящим моментом и импедансом роботов с гибкими суставами». Межд. Джей Робот. Рез. 26, 23–39.
Ан, Ч., Аткесон, К. Г. и Холлербах, Дж. М. (1988). Модельное управление роботом-манипулятором, MIT Press, Кембридж, Массачусетс.
Арбиб, М (1995a). Справочник по теории мозга и нейронным сетям, MIT Press, Кембридж, Массачусетс.
Арбиб, Массачусетс (1995b). «Теория схем». В «Справочнике по теории мозга и нейронных сетях», Арбиб, Массачусетс (редактор), стр. 830–834, MIT Press, Кембридж, Массачусетс.
Арбиб, Массачусетс (2006). Воздействие на язык через систему зеркальных нейронов, Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Массачусетс.
Аримото С., Секимото М., Хасигути Х. и Оздава Р. (2005). «Естественное разрешение некорректности обратной кинематики для избыточных роботов: вызов проблеме степеней свободы Бернштейна». Адв. Роб. 19, 401–434.
Ариананда Л. и Вебер Дж. (2004). «MERTZ: поиск надежного и масштабируемого робота с гуманоидной головой и активным зрением». В, Том 2, стр. 513–532.
Аткесон, Калифорния, Абоаф, Э.В., Макинтайр, Дж., и Рейнкенсмейер, DJ (1986). «Обучение роботов на основе моделей». Четвертый международный симпозиум по исследованиям в области робототехники, 23:18–23:30.
Аткесон, К.Г., Хейл, Дж., Кавато, М., Котосака, С., Поллик, Ф., Райли, М., Шаал, С., Шибата, С., Теватия, Г. и Уде, А. (2000). «Использование роботов-гуманоидов для изучения поведения человека». IEEE Интелл. Сист. 15, 46–56.
Аткесон К.Г., Мур А.В. и Шаал С. (1997a). «Локально взвешенный обучение.» Артиф. Интел. Откр. 11, 11–73.
Аткесон К.Г., Мур А.В. и Шаал С. (1997b). «Локально взвешенное обучение для контроля.» Артиф. Интел. Откр. 11, 75–113.
Барто А.Г. и Махадеван С. (2003). «Последние достижения в области иерархического обучения с подкреплением». Дискретное событие Дин. Сист. 13, 341–379.
Бик, П.Дж. (1989). Жонглирование динамикой, Издательство Свободного университета, Амстердам.
Беллман, Р. (1957). Динамическое программирование, Принстонский университет Пресс, Принстон, Нью-Джерси.
Бентивенья, округ Колумбия, Аткесон, Калифорния, и Ченг, Дж. (2004a). «Изучение задач на основе наблюдения и практики». Роб. Автон. Сист. 47, 163–169.
Бентивенья, округ Колумбия, Ченг, Дж., и Аткесон, К.Г. (2004b). «Обучение на основе наблюдения и практики с использованием поведенческих примитивов». 11-й Международный симпозиум по исследованиям в области робототехники (ISRR2003), Спрингер, Сиена, Италия.
Биллард А., Эпарс Ю., Калинон С., Ченг Г. и Шаал С. (2004). «Открытие оптимальных стратегий имитации». Роб. Автон. Сист. 47, 68–77.
Браун, Дж (1994). «Визуальный поиск среди предметов разной значимости: Отсутствие зрительного внимания имитирует поражение экстрастриарной области V4». Дж. Неврология. 14, 554–567.
Бризил К., Эдсигер А., Фитцпатрик П. и Скасселлати Б. (2001). «Активное видение для общительных роботов». IEEE Транс. Сист. Человек Киберн. 31, 443–453.
Бризил К. и Скасселлати Б. (2002). «Роботы, имитирующие людей». Тенденции Когн. наук. 6, 481–487.
Бреденфельд А., Якофф А., Нода И. и Такахаши Ю. (2006). Робокуб 2005: IX чемпионат мира по футболу среди роботов, Спрингер, Нью-Йорк.

Брок О., Фагг А.Х., Группен Р., Платт Р., Розенштейн М. и Суини Дж. (2005). «Система обучения и управления интеллектуальными роботами-гуманоидами». Межд. Дж. Гуманоидная робототехника 2, 301–336.
Браун, И.Э., Ченг, Э.Дж. и Леб, GE (1999). «Измеренные и смоделированные свойства скелетных мышц млекопитающих. II. Влияние частоты стимула на соотношение силы-длины и силы-скорости». Дж. Мышечная рез. Сотовый Мотиль. 20, 627–643.
Браун, И.Э. и Леб, GE (1999). «Измеренные и смоделированные свойства скелетных мышц млекопитающих. I. Влияние постактиваационного потенцирования на зависимость производства силы от времени и скорости». Дж. Мышцы Res. Сотовый Мотиль. 20, 443–456.
Буллок Д. и Гроссберг С. (1988). «Нейронная динамика запланированных движений рук: возникающие инварианты и свойства скорости и точности при формировании траектории». Психол. Откр. 95, 49–90.
Берридж Р.Р., Рицци А.А. и Кодичек Д.Э. (1999). «Последовательная композиция динамически ловкого поведения робота». Межд. Джей Робот. Рез. 18, 534–555.
Бирн Р.В. и Рассон А.Е. (1998). «Обучение путем подражания: А. иерархический подход». Поведение. Наука о мозге. 21, 667–684; обсуждение 684–721.

Карми Р. и Итти Л. (2006). «Визуальные причины и корреляты выбора внимания в динамических сценах». Видение Рез. 46, 4333–4345.
Коллинз С., Руина А., Тедрейк Р. и Висс М. (2005). «Эффективные двуногие роботы на основе пассивно-динамических ходунков». Наука 307, 1082–1085.

Корадески С., Исигуро Х., Асада М., Шапиро С.С., Тильшер М., Бризил К., Матарик М.Дж. и Исида Х. (2006). «Роботы, вдохновленные человеком». IEEE Интелл. Сист. 21, 74–85.
Даутенхан К. и Неханив К.Л. (редакторы) (2002). Подражание животным и Артефакты, MIT Press, Кембридж, Массачусетс.
Доу, Н.Д. и Турецкий, Д.С. (2002). «Долгосрочное предсказание вознаграждения в Т. Д. модели дофаминовой системы». Нейронный компьютер. 14, 2567–2583.

Демирис Дж. и Хейс Дж. (2002). «Имитация как двойной процесс, включающий компоненты прогнозирования и обучения. Биологически правдоподобная вычислительная модель». В книге «Имитация животных и искусственных материалов», Даутенхан К. и Неханив К.Л. (ред.), стр. 327–361, MIT Press, Кембридж, Массачусетс.

Демирис Дж., Ружо С., Хейс Г.М., Бертуз Л. и Кунисеи Ю. (1997). «Отложенная имитация движений головы человека активной стереозрительной головой». Международный семинар IEEE по общению роботов и людей, Сендай, Япония.

Доя К., Самеджима К., Катагири К. и Кавато М. (2002). «Обучение с подкреплением на основе множественных моделей». Нейронный компьютер. 14, 1347–1369.

Дрисколл Дж., Питерс Р. и Кейв К. (1998). «Сеть визуального внимания для робота-гуманоида». Учеб. Международная конференция IEEE/RSJ по интеллектуальным роботам и системам (IROS-98).
Дайер П. и Макрейнольдс С.Р. (1970). Расчеты и теория оптимального управления, учеб.

Физерстоун Р. и Хатиб О. (1997). «Независимость от нагрузки динамически согласованной обратной матрицы Якоби». Межд. Дж. Робот. Рез. 16, 168–170.
Флананган, младший, Боуман, МС, и Йоханссон, RS (2006). "Контроль стратегии в задачах манипулирования объектами". Курс. Мнение. Нейробиол. 16, 650–659.

Флананган-младший и Йоханссон Р.С. (2003). «Планы действий, используемые в действии наблюдение». Природа (Лондон) 424, 769–771.
Франклин Д.В., Осу Р., Бурдет Э., Кавато М. и Милнер Т.Э. (2003). «Адаптация к стабильной и нестабильной динамике достигается за счет комбинированного управления импедансом и модели обратной динамики». Дж. Нейрофизиология. 90, 3270–3282.

Фрит, К.Д., и Вулперт, Д.М. (2004). Нейронаука социальных Взаимодействие: декодирование, имитация и влияние на действия других, Королевское общество, Oxford University Press, Оксфорд.
Фудзивара К., Канехиро Ф., Кадзита С., Канеко К., Ёкои К. и Хирукава Х. (2002). UKEMI: управление падающим движением для минимизации повреждений двуногого робота-гуманоида. В, том 3, стр. 2521–2526.
Галлезе В. и Голдман А. (1998). «Зеркальные нейроны и симуляционная теория чтения мыслей». Тенденции Когн. наук. 2, 493–501.
Гаврила, ДМ (1997). «Визуальный анализ движений человека: опрос». Вычислить. Вис. Изображение Понимание. 73, 82–98.
Гоми Х. и Кавато М. (1996). «Гипотеза контроля точки равновесия

- исследовали путем измерения жесткости руки во время многосуставного движения». Наука 272, 117-220.
- Харуно М., Вулперт Д.М. и Кавато М. (2001). «Мозаичная модель сенсомоторного обучения и контроля». Нейронный компьютер. 13, 2201-2220 гг.
- Эйспирт А., Наканиши Дж. и Шаал С. (2003). «Изучение аттракторных ландшафтов для изучения двигательных примитивов». В книге «Достижения в области нейронных систем обработки информации» 15, Беккер С., Трун С. и Обермайер К. (ред.), стр. 1547-1554, MIT Press, Кембридж, Массачусетс.
- Инамура Т., Иваки Т., Тани Х. и Накамура Ю. (2004). «Появление воплощенного символа на основе теории мимесиса». Межд. Джей Робот. Рез. 23, 363-377.
- Итти Л., Дхавале Н. и Пигин Ф. (2003). «Реалистичная анимация глаз и головы аватара с использованием нейробиологической модели зрительного внимания». Материалы 48-го ежегодного международного симпозиума SPIE по оптической науке и технологиям, 64-78.
- Итти Л. и Кох К. (2000а). «Сравнение стратегий комбинирования функций для систем визуального внимания, основанных на значимости». Труды SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV (HVEI99), 3644, 473-482.
- Итти Л. и Кох К. (2000b). «Механизм поиска на основе значимости для явных и скрытых изменений визуального внимания». Видение Рез. 40, 1489-1506.
- Итти Л. и Кох К. (2001). «Вычислительное моделирование зрительного внимания». Нат. Преподобный Нейроски. 2, 194-203.
- Дженкинс, О.К. (2003). «Выработка навыков автономных гуманоидных агентов на основе данных». Департамент компьютерных наук Университета Южной Калифорнии, Лос-Анджелес.
- Йоханссон, Дж. (1973). «Визуальное восприятие биологического движения и модель для его анализа». Восприятие. Психофизика. 14, 201-211.
- Каджита С. и Тани К. (1996). «Экспериментальное исследование двуногой динамической ходьбы». Система управления IEEE. Mag. 16, 13-19.
- Канда Т., Исигуро Х., Имаи М. и Оно Т. (2004). «Разработка и оценка интерактивных роботов-гуманоидов». Учеб. IEEE 92, 1839-1850 гг.
- Кавато, М. (1999). «Внутренние модели управления двигателем и планирования траектории». Курс. Мнение. Нейробиол. 9, 718-727.
- Хатиб, О. (1987). «Единый подход к управлению движением и силой роботов-манипуляторов: формулировка оперативного пространства». Межд. Джей Робот. Рез. 31, 43-53.
- Хатиб О., Брок О., Чанг К., Конти Ф., Руспини Д. и Сентис Л. (2002). «Робототехника и интерактивное моделирование». Коммун. ACM X, 46-51.
- Хатиб О., Сентис Л., Парк Дж. и Уоррент Дж. (2004). «Динамическое поведение всего тела и управление человекоподобными роботами». Межд. Дж. Робот-гуманоид. 1, 1-15.
- Кох К. и Ульман С. (1985). «Сдвиги в избирательном зрительном внимании: к лежащим в основе нейронным схемам». Хм. Нейробиол. 4, 219-227.
- Козима Х. и Ито А. (1998). Подход к приобретению символов, основанный на внимании. В, стр. 852-856.
- Леб, GE (2001). «Обучение у спинного мозга». Дж. Физиол. 533, 111-117.
- Матарик, М. (1998). «Поведенческая робототехника как инструмент синтеза искусственного поведения и анализа естественного поведения». Тенденции Когн. наук. 2, 82-86.
- Матарик, М. (2000). «Заставить гуманоидов двигаться и подражать». IEEE Интелл. Сист. 15, 18-24.
- МакГир, Т. (1990). «Пассивно-динамическая ходьба». Межд. Джей Робот. Рез. 9, 633-643.
- Мельцов А.Н. и Мур М.К. (1994). «Подражание, память и изображение лиц». Младенческое поведение. Дев. 17, 83-99.
- Мензель П. и Д'Алузио Ф. (2000). Робосапиенс: эволюция нового Виды, MIT Press, Кембридж, Массачусетс.
- Миалл, Р.К. и Вольперт, Д.М. (1996). «Перспективные модели физиологических блок управления двигателем.» Нейронные сети 9, 1265-1285.
- Миямото Х. и Кавато М. (1998). «Робот, обучающий теннисной подаче и подъемам, основанный на теории двунаправленного движения». Нейронные сети 11, 1331-1344.
- Миямото Х., Шаал С., Гандольфо Ф., Койке Ю., Осу Р., Накано Э., Вада Ю. и Кавато М. (1996). «Обучающийся робот Kendama, основанный на теории двунаправленного движения». Нейронные сети 9, 1281-1302.
- Накамура, Ю. (1991). Передовая робототехника: избыточность и оптимизация, Аддисон-Уэсли, Ридинг, Массачусетс.
- Наканиши Дж., Мистри М. и Шаал С. (представлено). «Управление обратной динамикой с плавающей базой и ограничениями». Международная конференция по робототехнике и автоматизации (ICRA2007).
- Нарендра К.С. и Аннасвами А.М. (2005). Стабильные адаптивные системы, Дувр, Минеола, Нью-Йорк.
- Навалпакхам В. и Итти Л. (2005). «Моделирование влияния задачи на внимание.» Видение Рез. 45, 205-231.
- Нг, А.Ю. и Рассел, С. (2000). «Алгоритмы обучения с обратным подкреплением». Материалы семнадцатой международной конференции по машинному обучению (ICML 2000), Стэнфорд, Калифорния.
- Осу Р., Камимура Н., Ивасаки Х., Накано Э., Харрис К.М., Вада Ю. и Кавато М. (2004). «Оптимальное управление импедансом для достижения задач при наличии шума, зависящего от сигнала». Дж. Нейрофизиология. 92, 1199.
- Панерай Ф., Метта Г. и Сандини Г. (2003). «Изучение рефлексов визуальной стабилизации у роботов с движущимися глазами». Нейрокомпьютинг 48, 16.
- Паркер, Л.Е., Шнайдер, Ф.Е. и Шульц, АС (2005). «Мультироботные системы: от роев к интеллектуальным автоматам». Том. III, Материалы Международного семинара по мультироботным системам 2005 г., Springer, Дордрехт.
- Питерс Дж., Мистри М., Удвадиа Ф.Е., Кори Р., Наканиши Дж. и Шаал С. (2005а). «Объединяющая структура для управления системами робототехники». Международная конференция IEEE по интеллектуальным роботам и системам (IROS 2005), Эдмонтон, Альберта, Канада, 2-6 августа 1824-1831 гг.
- Питерс Дж., Мистри М., Удвадиа Ф.Е. и Шаал С. (2005b). «Новая методология проектирования управления роботами». Пятая международная конференция ASME по системам многих тел, нелинейной динамике и управлению (MSNDC 2005), Лонг-Бич, Калифорния, 24-28 сентября.
- Питерс Дж. и Шаал С. (2006). «Обучение оперативному управлению пространством». В книге «Робототехника: наука и системы» (RSS, 2006), Бургард В., Сукхатме Г.С. и Шаал С. (редакторы), MIT Press, Кембридж, Массачусетс.
- Питерс Дж., Виджаякумар С. и Шаал С. (2003а). «Обучение с подкреплением для гуманоидной робототехники». Гуманоиды 2003, Третья Международная конференция IEEE-RAS по гуманоидным роботам, Карлсруэ, Германия, 29-30 сентября.
- Питерс Дж., Виджаякумар С. и Шаал С. (2003b). «Масштабирование парадигм обучения с подкреплением для моторного обучения». Материалы 10-го совместного симпозиума по нейронным вычислениям (JNSC, 2003), Ирвин, Калифорния, май.
- Питерс Дж., Виджаякумар С. и Шаал С. (2005c). «Природный актер-критик». Гама Дж., Камачо Р., Браздил П., Хорхе А. и Торго Л. (редакторы), Труды 16-й Европейской конференции по машинному обучению (ECML 2005), том 3720, Springer, Порту, Португалия, 3 октября. -7, стр. 280-291.
- Пиаже, Дж (1951). Игра, мечты и подражание в детстве, Нортон, Нью-Йорк.
- Ригетти Л. и Эйспирт А. (2006). «Методологии проектирования центральных генераторов шаблонов: применение к ползающим гуманоидам». Труды по робототехнике: наука и системы, MIT Press, Филадельфия.
- Риццоллати Г. и Арбиб Массачусетс (1998). «Язык в нашей власти». Тенденции Неврологии. 21, 188-194.
- Робинс Б., Даутенхан К., Боксхорст Р. и Биллард А. (2005). «Роботы-помощники в терапии и обучении детей с аутизмом: может ли маленький гуманоидный робот способствовать развитию навыков социального взаимодействия?» Универсальный доступ в информационном обществе 4.
- Рассел С. Дж. и Норвиг П. (1995). Искусственный интеллект: современный подход, Прентис-Холл, Энглвуд Клиффс, Нью-Джерси.
- Сабес, ПН (2000). «Планирование и контроль досягаемости». Курс. Мнение. Нейробиол. 10, 740-746.
- Зальцман, Э.Л. (1979). «Уровни сенсомоторной репрезентации». Дж. Математика. Психол. 20, 91-163.
- Скасселлати, Б. (1998). «Имитация и механизмы совместного внимания: А. Структура развития для формирования социальных навыков у робота-гуманоида». В «Вычислении метафор, аналогий и агентов», Неханив, К.Л., стр. 176-195, Спрингер, Нью-Йорк.
- Скасселлати, Б. (2002). «Теория разума робота-гуманоида». Автон. Роб. 12.
- Шааль, С. (1999). «Прокладывает ли имитация путь к гуманоидным роботам?» Тенденции Когн. наук. 3, 233-242.

Журнал HFSP

Шаал, С. (2002) «Обучение управлению роботом». В Справочнике по теории мозга и нейронных сетях, 2-е изд., Арбиб, Массачусетс, MIT Press, Кембридж, Массачусетс, стр. 983-987.

Шааль С. Динамические системы: мозг, тело и имитация. В воздействии на язык через систему зеркальных нейронов (в печати).

Шаал С. и Аткесон К.Г. (1994). «Обучение роботов с помощью непараметрической регрессии». Материалы Международной конференции по интеллектуальным роботам и системам (IROS'94). Мюнхен, Германия, стр. 478-485.

Шаал С., Аткесон К.Г. и Ботрос С. (1992). «Чему следует научиться?» Материалы седьмого Йельского семинара по адаптивным и обучающим системам, Нью-Хейвен, Коннектикут, 20-22 мая, стр. 199-204.

Шаал С., Аткесон К.Г. и Виджаякумар С. (2002). «Масштабируемые методы непараметрической статистики для обучения роботов в реальном времени». Прил. Интел. 17, 49-60.

Шаал С., Эйспирт А. и Биллард А. (2003). «Вычислительные подходы к моторному обучению путем подражания». Филос. Пер. Р. Сок. Лондон, сер. Б 358, 537-547.

Шаал С., Питерс Дж., Наканиши Дж. и Эйспирт А. (2004). «Изучение примитивов движений». Международный симпозиум по исследованиям в области робототехники (ISRR2003), Спрингер, Сиена, Италия.

Шаал С. и Швайгофер Н. (2005). «Вычислительное управление моторикой у людей и роботов». Курс. Мнение. Нейробиол. 15, 675-682.

Шмидт, Р.А. (1988). «Управление моторикой и обучение». Кинетика человека, Шампейн, Иллинойс.

Шольц Дж. П. и Шонер Г. (1999). «Концепция неконтролируемого многообразия: определение управляющих переменных для функциональной задачи». Эксп. Мозговой Рес. 126, 289-306.

Швайгофер Н. и Доя К. (2003). «Метаобучение в подкреплении обучение." Нейронные сети 16, 5-9.

Швайгофер Н., Доя К. и Курода С. (2004). «Мозжечковая аминергическая нейромодуляция: к функциональному пониманию». Мозговой Рес. Преподобный (в печати).

Скьявикко Л. и Сицилиано Б. (1996). Моделирование и управление роботами-манипуляторами, МакГроу-Хилл, Нью-Йорк.

Скьявикко, Л., и Сицилиано, Б. (2000). Моделирование и управление роботами-манипуляторами, Спрингер, Лондон.

Сентис Л. и Хатиб О. (2004). «Целево-ориентированное управление гуманоидными роботами посредством расстановки приоритетов». Международная конференция IEEE-RAS/RSJ по гуманоидным роботам, Санта-Моника, Калифорния, 10-12 ноября.

Шадмер Р. и Уайз С.П. (2005). «Вычислительная нейробиология достижения и указания: основа моторного обучения». MIT Press, Кембридж, Массачусетс.

Шибата Т., Виджаякумар С., Конрад Дж. и Шаал С. (2001). «Биомиметический глазодвигательный контроль». Адаптивное поведение 9, 189-207.

Слотин, Дж.Дж. Э. и Ли В. (1991). Прикладное нелинейное управление, Прентис-Холл, Энглвуд Клиффс, Нью-Джерси.

Строгац, С.Х. (1994). «Нелинейная динамика и хаос: с приложениями к физике, биологии, химии и технике». Аддисон-Уэсли, Ридинг, Массачусетс.

Саттон Р.С. и Барто А.Г. (1998). Обучение с подкреплением. Введение. MIT Press, Кембридж.

Тауб Э. и Вольф С.Л. (1997). «Техники, вызывающие ограничения, для облегчения использования верхних конечностей у пациентов, перенесших инсульт». Темы реабилитации после инсульта 3, 38-61.

Тодоров, Э (2005). «Стохастические оптимальные методы управления и оценки, адаптированные к шумовым характеристикам сенсомоторной системы». Нейронный компьютер. 17, 1084-1108.

Тодоров Э. и Джордан М.И. (2002). «Оптимальное управление с обратной связью как теория координации движений». Нат. Неврология. 5, 1226-1235.

Томаселло М., Свидж-Рамбо С. и Крюгер АС (1993). «Имитационное обучение действиям на предметах детьми, шимпанзе и инкультурированными шимпанзе». Хим. Огги 64, 1688-1705. ван дер Ли, Дж.Х., Вагенаар, Р.К., Ланкхорст, Г.Дж.,

Фогелаар, Т.В., Девиль, В.Л., и Баутер, Л.М. (1999). «Принудительное использование верхних конечностей у пациентов с хроническим инсультом: результаты одинарного слепого рандомизированного клинического исследования». Инсульт 30, 2369-2375 гг.

ван Эссен, округ Колумбия, и Маунселл, Дж. М. Р (1983). «Иерархическая организация и функциональные потоки в зрительной коре». Тенденции Неврологии. 6, 370-375.

Виджаякумар С., Конрад Дж., Шибата Т. и Шаал С. (2001). «Открытое визуальное внимание для робота-гуманоида». Международная конференция IEEE по интеллектуальным роботам и системам (IROS 2001).

Виджаякумар С., Д'Суза А. и Шаал С. (2005). «Посттапное онлайн-обучение в больших измерениях». Нейронный компьютер. 17, 1-33.

Виджаякумар С. и Шаал С. (2000). «Обучение гуманоидов в реальном времени: проблема масштабируемости онлайн-алгоритмов». Гуманоиды 2000, Первая международная конференция IEEE-RAS по роботам-гуманоидам. CD-Proceedings, Кембридж, Массачусетс.

Вивиани П., Бауд-Бови Г. и Редольфи М. (1997). «Восприятие и отслеживание кинестетических стимулов: дополнительные доказательства моторно-перцептивных взаимодействий». Дж. Эксп. Психол. Хм. Восприятие. Выполнять. 23, 1232-1252.

Вивиани П. и Шнайдер Р. (1991). «Развивающее исследование взаимосвязи между геометрией и кинематикой при рисовании движений». Дж. Эксп. Психол. Хм. Восприятие. Выполнять. 17, 198-218.

Вада Ю. и Кавато М. (1995). «Теория рукописного письма, основанная на принципе минимизации». Биол. Киберн. 73, 3-13.

Винер, Н. (1948). Кибернетика, Уайли, Нью-Йорк.

Вольф С.Л. и Блэнтон С. (1999). «Применение двигательной терапии, вызванной ограничением верхних конечностей, у пациента с подострым инсультом». Физ. Там. 79, 847-953.

Вулперт Д.М., Доя К. и Кавато М. (2003). «Объединяющая вычислительная система для управления моторикой и социального взаимодействия». Филос. Пер. Р. Соц. Лондон, сер. Б 358, 593-602.

Вулперт Д.М., Доя К. и Кавато М. (представлено) «Объединяющее вычислительная система для управления моторикой и социального взаимодействия». Филос. Пер. Р. Сок. Лондон, сер. Б.

Вулперт, Д.М., и Кавато, М. (1998). «Несколько парных моделей прямого и обратного хода для управления двигателем». Нейронные сети 11, 1317-1329.

Зинн М., Хатиб О., Рот Б. и Солсбери Дж. К. (2004). «Действуйте осторожно [роботы, дружелюбные к человеку]». Робот. Автомат. Маг. 11, 12-21.