

Анил Сэт — получил докторскую степень в 2000 г. в Центре вычислительной нейронауки и робототехники в Университете Суссекса, Великобритания. В настоящее время работает в Институте нейронауки в Сан Диего. В круг его научных интересов входят: теоретическая нейроанатомия, моделирование биологических нейронных сетей, применения моделей агентов в теоретической экологии, исследование работы головного мозга человека при зрительном восприятии.

Анил Сэт

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВЫБОРА ДЕЙСТВИЯ И ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ БЕЗ ДЕЙСТВИЙ, ВНИМАНИЯ И ВЫБОРА¹

1. Введение

Для выживания и процветания в динамичном и сложном мире животным и аниматам² необходимо вовлекаться в разные моменты времени в разнообразные виды поведения, причем, по крайней мере, некоторые из них могут оказаться взаимно несовместимыми. Задача, состоящая в том как в любой данный момент времени они приходят к тому, чтобы совершать одно, а не другое действие, традиционно известна как проблема *выбора действия* (action selection) (далее будем именовать ее проблемой ВД). Различные подходы к этой проблеме, как в этологии, так и в исследованиях автономных агентов (autonomous agents), в целом предполагают необходимость существования внутренних механизмов арбитража для выбора наиболее подходящего действия или поведения в соответствии с внутренними или внешними условиями (Tinbergen, 1950; Tyrell, 1993).

В нашей работе доказывается утверждение о том, что внутренний арбитраж возможных поведений *не* является правильным подходом к рассмотрению проблемы ВД. Вместо этого рекомендуется схема, основанная на слаженных, непрерывных и параллельных сенсомоторных процессах (или связях). Эта схема навеяна работой (Braitenberg, 1984) и уже продемонстрировала свою жизнеспособность (Lambrinos, Scheier, 1995), см. также (Scheier, Pfeifer, 1995; Steels, 1994).

В работе применен оригинальный подход: для формирования функций активации сенсомоторных связей используется искусственная эволюция. Эта методология позволяет с помощью минимальной внутренней архитектуры породить полный набор феноменов ВД, а также избежать некоторых потенциальных проблем, связанных с проектированием вручную (обсуждается в разделе 2.3.).

В разделе 2 изложены теоретические основы данного подхода. Он базируется на преодолении двух недостатков общих для многих моделей ВД. Первый — путаница между поведенческим и механизменным уровнями описания и их смешение, второй — пренебрежение восприятием.

В разделе 3 описывается модель анимата. Архитектура этого анимата состоит всего лишь из набора эволюционно возникших прямых сенсомоторных связей без каких-либо взаимных соединений. Анимат существует в непрерывном модельном мире, в котором он должен избегать попаданий в "ловушки" и в то же время периодически посещать источники "пищи" и "воды". Раздел 3 также демонстрирует результаты, полученные на этой модели. Обсуждение полученных результатов изложено в разделе 4. Особое внимание было уделено тому, как связаны между собой проблема ВД и проблема "избирательного внимания". В завершение в разделах 5 и 6 описана дальнейшая работа по этому направлению, включая эксперименты с роботами, многие из которых уже находятся в стадии разработки, а также изложены выводы по данной работе.

¹ Перевод статьи Seth A.K. Evolving action selection and selective attention without actions, attention, or selection. In Pfeifer R., Blumberg B., Meyer J.-A., Wilson S.W. (Eds.) *From animals to animats 5: Proceedings of the Fifth International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour*, P.139-147. MIT Press. 1998. Оригинал статьи помещен также на сайте <http://www.cogs.susx.ac.uk/ccnr/Papers/>

² Термин "анимат" происходит от слов animal (животное) и robot: animal + robot = animat. Поведение анимата имитирует поведение животного. Этот искусственный (в виде компьютерной программы или физического робота) "организм", должен выполнять все действия, необходимые для достижения определенной цели в конкретной, пусть и виртуальной среде. *Прим. ред.*

2. Теоретические основы

2.1. *Поведение.* В данной работе поведение рассматривается как совместный продукт совокупности: «агент, среда и наблюдатель». Например, "плавание" требует большего, чем "движение конечностей" и "погруженность в воду". Оно требует еще наличия наблюдателя, который классифицировал бы эти действия как "плавание", потому что другой наблюдатель может классифицировать те же самые взаимодействия как-то иначе (например "подводная йога").

2.2. *Поведение и механизм в этологии и у аниматов.* Этология изучает поведение животных *in situ*³, поэтому в этологии широко распространено представление о том, что поведения являются продуктом непрерывных взаимодействий агента и среды. Это может быть весьма ценным представлением, однако его ценность в этологии ограничена тем, что большинство этологических теорий полагают, что целостные виды поведения имеют внутренние корреляты. Например, Тинберген (Tinbergen, 1950; см. также Logenz, 1985) предложил одно из первых решений проблемы ВД на основе иерархии "поведенческих центров" оживляемой потоком некой неспецифической "энергии активации". В каждом случае эти "поведения", такие как, кормление, схватка и т.д., четко рассматривались как имеющие прямые внутренние корреляты. Однако, как было показано в предыдущем пункте, поведения являются продуктами взаимодействий всей совокупности «среда-агент-наблюдатель», и поэтому компонент поведения со стороны агента (т.е. внутренний) не может быть идентичен самому поведению⁴.

Многие недавно разработанные модели ВД для аниматов основаны на тех же базовых посылах и делают упор на разработке внутренних архитектур аниматов с механизмом арбитража между внутренними коррелятами целостных поведений. Например, Тайрелл (Tyrell, 1993) расширяет фиксированную архитектуру поведенческих центров Тинбергена, работающую по принципу "победитель получает все", до иерархии "свободного потока" ("free-flow"), которая не подчиняется жесткому правилу "победитель получает все" и демонстрирует улучшение эффективности взаимодействия между поведением анимата. Однако компонентами в его иерархии все еще являются такие целостные поведения, как "избегание опасности" и "поиск пищи".

В другом случае Маэс (Maes, 1991) утверждает что "выбор поведения возникает децентрализованно, путем параллельных локальных взаимодействий между поведением и между поведением и средой". И хотя Маэс отметила важность взаимодействий агента со средой, она также исходит из предположения, что поведения могут быть *частью* агентов, а не рассматривает взаимодействия всех трех составляющих совокупности «среда-агент-наблюдатель».

Поведения, и любой наблюдаемый выбор между поведением должны, таким образом объясняться *не* на чисто поведенческом уровне, а на более механизменном уровне.

2.3. *Перцептивная депривация.* Как указывает Маэс (Maes, 1994), модели ВД в целом "имеют обывательскую концепцию соотношения между восприятием и действием". Эта ситуация сохраняется, несмотря на нынешнее широкое признание того что действие и восприятие должны рассматриваться совместно, как части непрерывного цикла взаимодействий агента со средой (Ballard, 1991). Что именно агент воспринимает, или чему "уделяет внимание", от этого, скорее всего, и зависит, какое именно поведение является адекватным. И именно поведение, в которое агент вовлечен, будет влиять на то, какие свойства среды являются значимыми для восприятия и внимания (соотношение между ВД и избирательным вниманием обсуждается в разделе 4).

Этологическое исследование, проводимое в реальной природной среде, вовсе не является идеальным средством для изучения роли восприятия в управлении поведением. С другой стороны,

³ *in situ*, лат., на месте, в месте нахождения. Прим. ред.

⁴ Конечно, этологи, работающие в полевых условиях, не имеют прямого доступа к внутреннему состоянию изучаемого ими организма, и поэтому в прошлом у них было не много других альтернатив, кроме как приписать животным произвольные поведенческие примитивы (McFarland, Sibly, 1975). Тем не менее, этологические теории определенно имеют большую ценность для сравнения и предсказания и существенно дополнили наше представление о функции поведения.

восприятие анимата, легко доступно исследованию. Тем не менее, большинство моделей ВД не развиты до удовлетворительного включения в них явления восприятия. В работе Маэс (Maes, 1991) перцептивные переменные сведены до предикатов. Тайрелл (Tyrell, 1993) пишет: "Было решено, что небольшая добавка реализма (за счет разработки восприятия анимата) не стоит тех больших затрат времени которые потребуются на ее реализацию". Действительно, ведь среда модели Тайрелла — дискретный "клеточный" мир. Это сразу же ограничивает какую бы ни было роль восприятия до довольно-таки тривиальной.

В настоящей работе отстаивается позиция, что роль восприятия крайне существенна в любом объяснении ВД, которое идет дальше предположения о существовании внутреннего арбитража между поведением. Утверждается, что механизменный уровень объяснения должен быть реализован с помощью сенсомоторных взаимодействий со средой, которые затем классифицируются наблюдателем в поведения и в "выбор" между поведением.

2.4. Выбор действия путем сенсомоторной слаженности. В данной статье принимается следующее положение. Управление множеством поведений лучше всего может быть описано в терминах слаженности⁵ автономных, непрерывно действующих, сенсомоторных связей или процессов⁶. Выбор действия (и избирательное внимание) являются вводящими в заблуждение интерпретациями общей проблемы слаженности этих процессов.

Ламбринос и Шейер (Lambrinos and Scheier, 1995) предлагают сходную точку зрения и описывают эксперимент, в котором мобильный робот Khepera добивается успеха, балансируя между сбором фишек, транспортировкой фишек на "базу" и периодическим посещением "области подзарядки". Этот баланс достигается путем координации между несколькими вручную созданными программами для непрерывно действующих сенсомоторных процессов. Эта работа является значительным шагом вперед и обладает достоинством реализуемости данного подхода в реальном мире.

Настоящая работа имеет следующие особенности, отличающие ее от других работ. Во-первых, среда задачи, хотя и не является реальным миром, обладает достаточной гибкостью для исследования выполняемых действий в соответствии со *списком требований*, предъявляемым к ВД (рассматриваемым в разделе 3). Во-вторых, использование искусственной эволюции для дизайна сенсомоторных процессов позволяет полностью и явно разделить поведение и механизм, который его реализует. В работе Ламбриноса и Шейера (Lambrinos and Scheier, 1995) использование ручной разработки программы анимата требует искусственного разбиения процесса дизайна (что каждый конкретный процесс должен делать) и компоновки (сочетания, объединения) процессов (как скомпоновать эти процессы, чтобы получить слаженное поведение). Если эти задачи разделяются, то каждый сенсомоторный процесс может потенциально рассматриваться исходя из того, что реальное поведение будет скомпоновано позднее и процессы, реализующие его, называются «идти-к-станции», «домой» и т.д. Хотя здесь и нет явного арбитража между этими процессами (они все автономны и одновременно активны), все же есть некоторая неувязка между сделанным авторами утверждением, что поведенческий и механизменный уровни не должны смешиваться, и этим потенциальным влиянием поведенческих описаний на дизайн внутреннего механизма. Использование же искусственной эволюции избегает этой проблемы, позволяя дизайну процессов и их компоновке происходить одновременно, не давая возможности проявиться какому бы то ни было влиянию поведенческих описаний на внутренний механизм.

3. Модель анимата

⁵ Под слаженностью здесь понимается взаимная согласованность действий во времени, гармонизация. *Прим. ред.*

⁶ Используемое в данной работе различие между "связью" и "процессом" таково: "процесс" используется как более общий термин для сенсомоторного соединения, которое может включать промежуточные этапы, а "связь" — понятие специфическое именно для нашей модели, в которой соединение состоит всего из одной передаточной функции (т.е. "связь" в таком контексте можно еще перевести как "звено". *Прим. перев.*).

Анимат состоит единственно из множества прямых, автономных, сенсомоторных связей без взаимных связей или "искусственных нейронов". Функции активации связей определяются в процессе искусственной эволюции. Все связи работают постоянно.

Целью этой модели является демонстрация того, как такая минимальная архитектура может отвечать требованиям, обычно предъявляемым к механизму ВД. Для оценки качества модели мы рассмотрим список таких требований, исходно проанализированный Тайреллом (Tyrell, 1993) и расширенный Вернером (Werner, 1994) (более обширные варианты этого списка, видимо, несколько произвольные, можно найти в любой из этих публикаций). Где было возможно, мы выполнили прямое тестирование для этих свойств.

Итак, эффективный механизм ВД должен:

- устанавливать приоритеты в поведении в соответствии с текущими потребностями анимата; например, направлять его к пище, если он голоден, но не позволять ему попадать по дороге в ловушки;
- смежные действия соединять в единую плавную последовательность;
- проявлять оппортунизм; например, отклоняться к близлежащему источнику пищи, даже если потребность в воде сильнее;
- балансировать между гибкостью и настойчивостью; например, напиться полностью, потом наесться досыта, вместо того чтобы колебаться между водой и пищей;
- прерывать текущее поведение; например, если неожиданно на пути появилась ловушка, то анимат должен изменить свой курс чтобы ее избежать;
- справляться со всеми подзадачами; механизм ВД должен быть эффективным в любых ситуациях;
- предпочитать действия, завершающие поведение, действиям, которые только начинают поведение;
- использовать всю доступную информацию (и внутреннюю и внешнюю);
- работать с сенсорами, выдающими действительные числа, и генерировать такой выход, который может быть непосредственно использован;
- быть развиваемым и обучаемым;
- позволять одновременное выполнение "параллельных действий" (например, ходьба и речь).

3.1. Анимат и среда. Архитектура этого анимата, навеянная работой Брайтенберга (Braitenberg, 1984), показана на рисунке 1. Анимат имеет два колеса, с 3 типами сенсоров, на каждой его стороне по одному сенсору каждого типа (всего, таким образом, 6 сенсоров). Каждый сенсор соединен 3 связями с колесом на своей стороне; таким образом, на каждой стороне по 9 связей.

Рис.1. Архитектура анимата: имеется 3 типа сенсоров, каждый сенсор соединен напрямую с колесом на той же стороне. Каждое нарисованное соединение на самом деле образуется тремя генетически задаваемыми связями, так что анимат состоит из 18 параллельных однозвенных преобразований сенсорного входа в моторный выход

У анимата есть 2 внутренние батареи, и его задача — поддерживать их уровни как можно выше. Эти уровни снижаются с постоянной скоростью в течение жизни анимата, а когда оба достигают нуля, — анимат "умирает".

Связи между сенсорами и моторами просто преобразуют сигнал сенсора (из диапазона от 0 до 100) в выходной сигнал (в диапазоне от -1 до 1) в соответствии с функцией передачи (которая также учитывает уровень заряда батарей; см. раздел 3.2). Выходы связей каждого колеса объединяются; выходные сигналы первых 9 связей суммируются, сумма подвергается сигмоидальному преобразованию, и результат затем масштабируется в диапазон от -10 до 10, что и устанавливает скорость левого колеса. Связи с номерами 9—18 аналогичным образом устанавливают скорость правого колеса.

Модельная среда является непрерывной (в пространстве, но не во времени) неограниченной областью, в которой, кроме анимата, могут существовать 3 типа объектов. Каждый объект имеет

форму круга с радиусом 16 единиц (анимат имеет радиус 8, и все объекты появляются только в части среды — в области размером 200 на 200 единиц). Объект первого типа (назовем его "пища") заряжает первую батарею анимата; второго типа ("вода") заряжает вторую батарею; третьего типа ("ловушка") представляет собой опасный объект и "убивает" анимат при контакте с ним. В среду помещаем по 3 экземпляра объекта типа "пища" и "вода" и 9 ловушек.

Каждый тип сенсора показывает расстояние от анимата до ближайшего объекта соответствующего типа, значение на выходе сенсора — в диапазоне от 100 (при контакте с объектом) до 0 (объект находится на расстоянии 200 единиц или дальше). Если объект находится слева от анимата, то значение на выходе соответствующего левого сенсора будет на 20% выше, чем у правого (и аналогично, если объект находится справа).

В начале каждого испытания объекты и анимат расставляются в среде случайным образом (в области 200 на 200 единиц). Перемещение анимата вычисляется путем изменения скорости его колес (если скорости обоих колес установлены в +10, то анимат движется вперед с максимальной скоростью 2.8 единиц в единицу времени). Максимальный (и стартовый) уровень каждой батареи равен 200, причем в единицу времени уровень уменьшается на 1. При контакте анимата с пищей или водой уровень соответствующей батареи подзаряжается до 200, и соответствующий объект переносится в другое случайно выбранное место. Контакт с ловушкой заканчивает испытание.

3.2. Схема декодирования генома. Каждый генотип состоит из 83 целых чисел в диапазоне от 0 до 99 —, составляя по 9 чисел для каждой из 9 связей, и по 1 числу для идентификации сигмоидов левого и правого колес. Ввиду того, что анимат устроен симметрично относительно левой и правой сторон, в геноме необходимо задать только 9 связей. На рисунке 2 показано, каким образом 9 чисел задают форму функции активации одной связи. Сдвиг и пороги масштабируются линейно из начального диапазона целых чисел от 0 до 99 в диапазон от -100 до +100, причем второй порог должен следовать за первым. Градиенты задаются путем взятия тангенса от результата масштабирования заданного геномом целого числа в диапазон от $-\pi/2$ до $\pi/2$. Пороги сигмоидов устанавливаются масштабированием в диапазон от -3.0 до 3.0.

Рис.2. Схема декодирования генома: каждой сенсомоторной связи требуется 9 целых чисел для определения всех ее параметров. Первые 6 целых чисел определяют базовую форму функции активации, преобразующей сенсорный вход в выходной сигнал, последние 3 — как эта форма модифицируется уровнем зарядки батарей. Каждая связь может модифицироваться только одной батареей (какой именно — определяется 9-м числом), и уровень заряда этой батареи влияет как на общий градиент функции (степень влияния определяется 7-м числом), так и на начальный сдвиг (определяется 8-м числом)

Влияние батарей несколько сложнее. Если девятое целое число четное, тогда функция передачи зависит от батареи 1; если нечетное, то от батареи 2. Уровень ($B \in (0:200)$) соответствующей батареи может влиять на два аспекта передаточной функции. Сначала, путем модуляции сдвига ($C \in (-1:1)$):

$$\text{Выход} =^7 \text{Выход} + (B / 2) * C$$

И, затем, путем модуляции наклона ($H \in (0:1)$) передаточной функции:

$$\text{Выход} = \text{Выход} + (\text{Выход} * (((B - 100) / 100) * H))$$

Заметьте, что не накладывается никакого ограничения на то, чтобы передаточная функция связи между сенсором объекта определенного типа и мотором колеса зависела бы от батареи того же самого типа.

⁷ Это не равенство, а операция присваивания. Она означает, что левому операнду присваивается значение выражения, которое записано справа. Сначала вычисляется значение выражения в правой части, используя текущее значение переменной "выход", а затем результат присваивается снова этой же переменной. Т.е., в данном случае, значение "выход" просто увеличивается на соответствующую величину. Символ "/" обозначает деление. *Прим. перев.*

3.3. *Генетический алгоритм.* Нами использован распределенный генетический алгоритм⁸ с вероятностью кроссинговера равной 0.5, и вероятностью мутации бита равной 0.04. Численность популяции — 100 особей. Функция оценки приспособленности особи направлена на подкрепление размножения тех особей, которые имеют более высокий усредненный по времени уровень зарядки батарей. Функция качества вычисляется в каждый момент времени:

$$K = (B_1 + B_2) / 400$$

Такая функция способствует более высокой оценке тех аниматов, которые живут довольно долго (поддерживая уровень хотя бы одной батареи выше 0 и избегая ловушек), посещают источники пищи и воды как можно чаще, вплоть до максимальной продолжительности жизни, равной 800 единиц времени. Эта оценочная функция *ничего* не утверждает относительно того, что именно анимат должен делать в какой-либо конкретной ситуации⁹.

Популяция эволюционировала порядка 200 поколений (что заняло около 2 часов рабочего времени персонального компьютера 143MHz Sun SparcStation). Однако результаты, описанные в следующем разделе, получены на лучших особях 430-го поколения.

3.4. *Результаты.* Полученные в результате эволюции аниматы продемонстрировали весьма эффективный ВД. Пример траектории показан на рисунке 3.

Рис.3. Пример траектории; анимат проходит через серию источников пищи и воды, отступает назад, избегая ловушки в точке 1, и демонстрирует оппортунистическое поведение в точке 2.

Сначала анимат эффективно движется через серию источников пищи и воды. В точке 1, он избегает близлежащих ловушек, откатываясь назад, и поворачивает направо по направлению к другим источникам пищи и воды. В точке 2 анимат проявляет оппортунизм, посещая другой источник пищи, несмотря на то, что он только что посетил такой же. Затем он проходит через другие источники воды и пищи до тех пор, пока не исчерпает максимальную продолжительность жизни, равную 800 единиц времени.

Возвращаясь к списку пожеланий к механизму ВД, можно отметить, что приведенный пример демонстрирует "эффективное установление приоритетов в поведении в соответствии с текущими потребностями". Анимат по большей части направляется к наиболее нужному типу источника, не попадая при этом в ловушки. "Соединение смежных действий в плавную последовательность" иллюстрируется тем, как гладко анимат меняет свою траекторию при посещении источников, а "умение проявлять оппортунизм" также показано в точке 2.

Следующие тесты доказывают более формально, что развившиеся аниматы действительно успешно справляются с требованиями, предъявляемыми к эффективному ВД:

Баланс между гибкостью и настойчивостью. Обычно анимат немного замедляется, если находится на равном расстоянии между двумя источниками, но лишь до тех пор, пока однозначно не встанет на один из путей. На рис. 4 показана ситуация, когда анимат был специально помещен между кластером, состоящим из трех источников пищи (слева), и кластером из трех источников воды (справа). Уровни обеих батарей были 100. Анимат сначала движется к пище, собирает все три источника, затем возвращается к воде. Таким образом, анимат при выполнении каждой задачи проявляет *настойчивость* соответствующей длительности, вместо того чтобы колебаться между кластерами воды и пищи.

⁸ Генетический алгоритм навеян дарвиновской концепцией эволюции и заключается в следующем. Последовательно и независимо эмулируется жизнь каждой особи популяции. Каждая особь затем оценивается некоторой "функцией качества" относительно ее приспособленности, "успешности" в течение жизни. Особи с большей оценкой качества дают потомство с большей вероятностью и количественно большее, чем особи, оцененные ниже. Геном потомку передается от родителей с учетом кроссинговера и мутации. Общий размер популяции не меняется, просто текущее поколение полностью сменяется новым. *Прим. перев.*

⁹ Имеется в виду отличие данного алгоритма от алгоритма "обучения с учителем", когда после каждой пробы обучаемому сообщается правильный ответ — что именно он должен был делать в данной ситуации. *Прим. перев.*

Рис.4. Баланс между гибкостью и упорством; анимат собирает все 3 источника пищи (слева) перед тем как собрать все три источника воды (справа). Анимат не "колеблется" между источниками пищи и воды.

Прерывать текущее поведение при необходимости. Анимат был установлен в точку (0, 0), а источник пищи — в (100, 0). Уровни обеих батарей были 150. Когда анимат приблизился к пище и достиг точки (30, 0), неожиданно была поставлена ловушка в (65, 0). На рисунке 6а показано, как анимат меняет свою траекторию, чтобы избежать ловушки, и все же добирается пищи. На рисунке 6б показано, что анимат движется по прямой при отсутствии ловушки, на рисунках 6в и 6г показаны траектории в моменты перед появлением ловушки и сразу после этого. Видно, что анимат действительно прерывает свое прямолинейное движение к пище, чтобы избежать ловушки. Кроме того, это прерывание зависит от уровня батарей. Для каждого из 10 значений стартового уровня батарей в диапазоне от 100 до 200, было проведено по 20 испытаний. Рисунок 5 показывает, что при низком заряде батарей анимат не смог избежать ловушки, но с увеличением уровня батареи он избегал ловушки все чаще¹⁰. Этот феномен был назван "вариация внимания" (пример с аниматом, см. Maes, 1991); нуждаясь в пище, анимат выглядит как "уделяющий мало внимания" ловушкам.

Проявлять оппортунизм. В дополнение к примеру оппортунизма показанному на рисунке 3, был проведен следующий эксперимент. Анимат был установлен в (-100, 0), источник пищи в (-90, 0), источник воды в (30, 0). Дополнительный источник пищи устанавливался в (-20, у), причем координата у варьировалась от 0 до 30.

После посещения первого источника пищи анимат сильнее нуждается в воде. Однако, если другой источник пищи оказывается *по пути*, анимат проявляя оппортунизм посещает его (рисунок 6д). Если, однако, второй источник пищи слишком далеко от пути следования, он игнорируется (рисунок 6е).

Для каждого из 8 различных положений второго источника, было проведено по 20 испытаний, и из рисунка 5 видно, что чем дальше этот источник находится от пути следования, тем реже анимат его посещает.

Расстановка приоритетов. Пример траектории, изображенный на рисунке 3, показывает, что в целом анимат всегда направляется к наиболее необходимому ему источнику. На рисунках 6ж и 6з это видно более отчетливо, здесь анимат помещен между двумя источниками и развернут перпендикулярно к соединяющей их линии. Уровень одной из его батарей установлен в 150, а другой - в 100. Если источники находятся на равном расстоянии от него (рисунок 6ж), он движется к тому, который ему нужнее (источник слева). Но если этот источник помещен слишком далеко (рисунок 6з), то анимат вместо него посещает правый источник. Таким образом, анимат устанавливает баланс между приоритетом и оппортунизмом.

Другие требования. Остальные требования не пригодны для проверки на данной модели, но кратко обсуждаются ниже:

- *справляться со всеми подзадачами:* никаких конкретных подзадач не возникало, кроме, избегания ловушек, с чем анимат справлялся очень хорошо;
- *предпочитать действия, завершающие поведение, действиям, которые только начинают поведение:* они не различались в модели;
- *использовать всю доступную информацию:* это действительно имеет место так как все сенсомоторные связи в определенной степени влияют на моторный выход;
- *работать с сенсорами, выдающими действительные числа, и генерировать такой выход, который может быть непосредственно использован:* анимат состоит только из сенсомоторных связей, так что это требование, безусловно, удовлетворяется;
- *позволять одновременное выполнение "параллельных действий":* "параллельные действия" не определены в данной модели;

¹⁰ Этот тест был особенно труден для анимата, т.к. там был всего один источник пищи, к тому же, на одной линии с ловушкой. В нормальных ситуациях (см. рисунок 3) столкновения с ловушками были редки, если вообще происходили.

- *быть легко развиваемым (возможно через обучение)*: нет никаких причин, по которым новые типы сенсоров и эффекторов не могли бы быть добавлены (возможно, для осуществления "параллельных действий"), и определенно могут быть добавлены "обучающие" связи.

Рис.5. Вариация внимания (вверху); анимат с большей вероятностью попадает в ловушки при низком уровне заряда батареи. Опportunизм (внизу); анимат отклоняется ко второму источнику пищи по пути к источнику воды, но делает это реже, если этот второй источник пищи находится дальше от его пути следования.

Рис.6. Тестирование выбора действия; потребляемые источники обозначены маленькими кружками; а) неожиданно появляется ловушка, и анимат прерывает свое движение к пище, чтобы избежать ее; б) когда нет ловушки, анимат движется к пище прямолинейно; в) траектория анимата в момент непосредственно перед появлением ловушки... г) ... и сразу после ее появления; д) анимат проходит через первый источник пищи и отклоняется ко второму (по пути к воде), если отклонение не слишком велико; е) если второй источник пищи слишком далеко, анимат проследует от первого источника пищи прямо до источника воды; ж) анимат стартует между двумя равноудаленными источниками и направляется к тому, который ему требуется больше; з) если "более необходимый источник" слишком далеко, анимат направляется к другому.

4. Обсуждение

Эта модель демонстрирует, что для эффективного поведения ВД не требуется (при условиях, принятых в данной модели) ничего кроме набора независимых сенсомоторных связей и учета влияния внутреннего состояния. В этой модели первостепенным является совместное рассмотрение восприятия и действия, и здесь нет механизма арбитража между внутренними представлениями поведений.

На рисунке 7 показаны формы функций активации связей, возникшие в результате эволюции. Все связи зависят от уровня одной или другой батареи, даже связи от сенсоров "ловушек". Интересно отметить, что каждый набор из трех связей зависит от *обеих* батарей. Сенсомоторная "пищевая" связь зависит не только от потребности в пище, но также и от потребности в воде. То же самое касается и "водяных" сенсомоторных связей. Это наводит на мысль об отсутствии какого-либо простого отображения поведений "добыть пищу", "добыть воду" и "избежать ловушку" на множество связей.

Рис.7. Образовавшиеся в результате эволюции активационные функции; связи 1—3 соединяют сенсоры "пищи" с колесом, связи 4—6 для сенсоров "воды", и связи 7—9 для сенсоров "ловушки". Все оси масштабированы в диапазон от -100 до 100 (вход отложен по оси x, выход — по оси y). Три линии на каждом графике представляют функцию активации при уровнях батареи 200, 100 и 0, а номер влияющей батареи дан в скобках. Все эти связи постоянно активны. Каждый набор из трех связей зависит от *обеих* батарей, и содержит смесь возбуждающих и тормозных выходов

Действительно, нет причин ожидать, чтобы это было так. Благодаря методологии искусственной эволюции не делается разделения между "дизайном связи" и "компоновкой связей", поэтому внутреннему механизму не требуется иметь отношения к той стратегии дизайна, которая кажется благоразумной с точки зрения наблюдателя.

Эта работа, таким образом, поддерживает позицию, в соответствии с которой, выбор действия не только не зависит от внутреннего арбитража, но и не зависит также от какого бы то ни было внутреннего представления целостных поведений. Это дает четкие основы и для этологии и для исследований аниматов: теории "выбора действия", предполагающие внутреннее представление поведений, не являются единственно возможными (и, как показано в разделе 2, действительно испытывают некоторые концептуальные трудности). Альтернативные перспективы, поддерживающие различие между поведением и механизмом, а также неразделимость восприятия

и действия, являются вполне жизнеспособными и более предпочтительными. Связь между слаженностью сенсомоторных процессов, наблюдением поведений и поведенческим "выбором" является задачей дальнейших исследований по аниматам.

Интересно также отметить, что в целом поведение анимата может быть легко описано как с помощью избирательного внимания, так и с помощью ВД. Кажется что анимат "уделяет внимание" разным деталям среды в разное время, и действительно, термин "вариация внимания", данный феномену в разделе 3.4, видимо тонко признает, что эти две проблемы неразличимы. Конечно, в данном случае эти две проблемы с необходимостью являются идентичными, так как наличие только набора прямых сенсомоторных связей предотвращает какую бы то ни было возможность разделения восприятия и действия. Все это заслуживает внимания ввиду того, что значительное число работ по когнитивным наукам все еще рассматривает избирательное внимание как некое "яркое пятно", предназначенное быть посредником между внешней средой и внутренней моделью мира, и при этом недостаточное внимание уделяется роли действия (см. например (Treisman, Gelade, 1980))¹¹.

5. Дальнейшая работа

Теперь предстоит расширить эту методологию на реальные ситуации и реальных роботов, использующих сенсоры, которые не могут селективно выдавать только одно расстояние до объектов заданного типа. Опять будет использоваться искусственная эволюция для формирования внутреннего механизма роботов ввиду того, что как только роботы и требования задачи существенно усложняются, действительная природа успешно работающих сенсомоторных процессов приобретает значительный интерес для понимания взаимосвязи между действием и механизмом. Изучение этого вопроса затруднится, если сенсомоторные процессы будут разрабатываться вручную.

6. Заключение

В данной работе продемонстрировано, что полный спектр феноменов выбора действия может быть реализован минимальной внутренней архитектурой, не использующей как явного механизма арбитража между внутренне представленными поведением, так и ручного конструирования сенсомоторных процессов. Модель была разработана именно для установления этого теоретического положения, и не навязывается как "лучший" способ управления поведением автономных агентов, хотя и работает более чем адекватно в своем контексте.

Новая методология порождения формы каждой функции активации эволюционным путем позволяет разрабатывать каждую сенсомоторную связь параллельно с компоновкой всех процессов в общее согласованное поведение. Это позволяет избежать возможных влияний поведенческих описаний на внутреннюю архитектуру, которые могут возникать при разработке внутренней архитектуры вручную, когда задачи дизайна процессов и их компоновки рассматриваются раздельно. И поэтому становится возможным исследование соотношения между поведением и механизмом.

Показано что поведение выбора действия возникает из слаженности автономных, прямых, постоянно работающих сенсомоторных связей. Обосновано также, что как термин "выбор действия" вводит в заблуждение из-за недоучета восприятия, так и термин "избирательное внимание" вводит в заблуждение из-за недоучета действия.

Работа была выполнена при финансовой поддержке EP-SRC проект № 96308700.

¹¹ Этот аргумент ни в коем случае не обесценивает этот пласт работ. Очевидно, существует целая пропасть между сенсорным аппаратом рассматриваемого здесь анимата и зрительной корой приматов, так что психология и нейронауки продолжают вносить огромный вклад в наше понимание механизмов восприятия приматов. Единственно, что здесь утверждается, это то, что исследования избирательного внимания, в какой бы области они ни были, только выиграют от более обстоятельного рассмотрения роли действия.

Литература

- Ballard D.* (1991). Animate vision // Artificial Intelligence. 48:57–86.
- Braitenberg V.* (1984). Vehicles: experiments in synthetic psychology. – MIT Press.
- Lambrinos D., Scheier C.* (1995). Extended braitenberg architectures // Technical Report AI Lab no. 95.10. – Computer Science Dept., University of Zurich.
- Lorenz K.* (1985). Foundations of ethology. Springer-Verlag.
- Maes P.* (1991). A bottom-up mechanism for behaviour-selection in an artificial creature // Meyer J. and Wilson S. (Ed.) Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behaviour.
- Maes P.* (1994). Modelling adaptive autonomous agents // Artificial Life. 1:135–162.
- McFarland D. and Sibly R.* (1975). The behavioural final common path. Philosophical Transactions of the Royal Society of London // B. Biological Sciences, 270(907):265–293.
- Scheier C. and Pfeifer R.* (1995). Classification as sensory-motor coordination. In Advance in Artificial Life: Proc. 3rd european conference on artificial life. P. 656–667.
- Steels L.* (1994). A case study in the behaviour-oriented design of autonomous agents // Cliff D., Husbands P., Meyer J., Wilson S. (Ed.) Proceedings of the 3rd International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour. P. 445–452. MIT Press.
- Tinbergen N.* (1950). The hierarchical organisation of nervous mechanisms underlying instinctive behaviour // Symposium for the society for experimental biology. 4 (305–312).
- Treisman A., Gelade G.* (1980). A feature-integration theory of attention. Cognitive Psychology. 12:97–136.
- Tyrell T.* (1993). Computational mechanisms for action selection. – PhD thesis, University of Edinburgh.
- Werner G.* (1994). Using second order neural connections for motivation of behavioural choice // Cliff, D., Husbands, P., Meyer, J., and Wilson, S. (Ed.) Proceedings of the 3rd International Conference on Simulation of Adaptive // Behaviour. P. 154–164. MIT Press.