

ГЕНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОРФОГЕНЕЗОМ АГЕНТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ «ФИЗИЧЕСКИ-КОРРЕКТНОЙ» СРЕДЕ

Ключевые слова: *искусственный интеллект, виртуальные агенты, виртуальные физически-корректные среды, морфогенез агентов, геномное управление, генетические алгоритмы.*

ВВЕДЕНИЕ

Задача геномного управления морфогенезом телесных агентов (embodied agents) в виртуальной «физически-корректной» среде (ВФКС) возникает в связи с необходимостью моделирования эволюции в сообществах виртуальных агентов [1–3]. Идея использования эволюционного алгоритма в мультиагентной системе для оптимизации популяции по совокупности каких-либо признаков не нова [4, 5]. В настоящее время моделирование естественного отбора (ЕО) является основой эволюционного подхода в задачах таких направлений информатики, как искусственный интеллект [6], искусственная жизнь (Artificial Life) [7], телесное познание (Embodied Cognition) [8]. В этих областях ЕО используется для анализа и синтеза связей агентов со средой обитания, моделирования вариативности и многопоколенной оптимизации. В качестве введения в эволюционную кибернетику (термин, применяемый в отечественной науке) можно, например, рекомендовать работы [1, 9]. Генетические алгоритмы [10] применяются также в задачах проектирования компьютерных программ, реальных устройств и виртуального прототипирования [11]. Существенное развитие этот подход получил в таком важном прикладном направлении, как эволюционная робототехника (Evolutionary Robotics) [12].

Основная задача эволюционной робототехники, решению которой посвящено много известных работ, — это исследование возможности синтеза системы управления (как правило, нейросетевой) робота или агента «естественным» эволюционным путем [13]. Тем не менее, именно в этой области, на наш взгляд, к настоящему времени получен ряд наиболее значимых результатов по эволюционному морфогенезу [14]. Задача эволюционного синтеза системы управления роботом определенной морфологии (строения), как и задача синтеза самой морфологии робота, приобретают актуальность в эволюционной робототехнике прежде всего в связи с развитием виртуального моделирования и, в частности, виртуальных «физически-корректных» сред (physically-correct virtual environments) [15]. Привлекательность имитационного моделирования в подобных средах связана, в первую очередь, с возможностью осуществления экспериментов на виртуальном прототипе робота с последующей адаптацией (переносом) полученных результатов для реального робота. При этом дорогостоящее оборудование не подвергается риску повреждения в серии эволюционных экспериментов (например, при столкновениях с препятствиями). К тому же такие серии эволюционных вычислений, как правило, с помощью виртуальной модели (построенной на базе полностью управляемого и настроенного для решения конкретной задачи «физического движка») могут быть осуществлены гораздо быстрее, чем в случае экспериментов с реальными роботами в реальных физических условиях [16].

В свою очередь, неизбежные ограничения на физическую корректность (состав и точность реализации эмулируемых виртуальной средой физических законов) данного «движка» и существенные вычислительные затраты приводят, с одной стороны, к трудностям переноса результатов моделирования в реальную среду, а с другой — порождают задачу эволюционного синтеза морфологий, оптимальных для данной конкретной виртуальной среды (конкретного «физического движка») по таким параметрам как сложность, функциональность, эквивалентность реальному прототипу.

К настоящему времени осуществлены достаточно многочисленные и успешные попытки синтеза систем управления для роботов различной сложности в рамках подхода эволюционной робототехники [13–15]. В работах Хорнби, Липсона и Поллака даются примеры эволюционного формирования как системы управления, так и морфологии роботов в виртуальной среде с последующей адаптацией результатов моделирования для обучения реальных роботов навигации на плоскости [17, 18]. Наиболее перспективным в настоящее время считается так называемый коэволюционный подход (co-evolution), который совмещает в едином процессе формирование морфологии роботов с помощью имитационного моделирования и синтез управляющих систем на основе эволюции популяций реальных роботов (embodied evolution) [14].

Агенты в физически-корректных средах — относительно новое направление в мультиагентных системах [6, 8, 19]. В пионерской работе Карла Симза [5], представленной на конференции Siggraph в 1994 г., рассматривались виртуальные существа (virtual creatures), которые могли перемещаться и выстраивать определенную линию поведения в имитируемом трехмерном физическом мире. Симз использовал генетические алгоритмы как для изменения морфологии агентов, так и для построения их системы управления. Агенты были способны осуществлять различные действия — от простого перемещения по миру до сложного соревновательного поведения в борьбе с другими агентами за владение предметами. Система управления виртуального агента получала сенсорную информацию из среды и генерировала соответствующий моторный выход. Требования к ресурсам были достаточно высоки, поэтому система демонстрировалась на суперкомпьютере Connection Machine.

Последовавшие за этой работой многочисленные аналогии (Gene Pool, Darwin Pond, Virtual Life, Morph Engine и др.) в целом, на наш взгляд, отличались только более или менее важными деталями реализации («физический движок», способ представления генома, конструктивные элементы, тип и состав нейронных сетей и т.д.) [20–22].

Для всех упомянутых систем эволюционного морфогенеза, на наш взгляд, характерны модульность примитивов (строительных блоков организма) и ограниченный набор возможных связей. Отметим, что наличие определенных структурных элементов с заранее определенной функциональностью приводит к тому, что геном становится фактически достаточно жесткой схемой сборки агента, затрудняя «приспосабливаемость» морфологии агента к условиям среды. Например, в работе Симза [5] в качестве генома используются ориентированные циклические графы, а Поллак и Хорнби [17, 18] применяют порождающие спецификации для иерархических модульных структур (*L*-системы).

В случае эволюционной робототехники некоторые из указанных ограничений оправданы требованиями последующей реализации виртуального прототипа в условиях реального производства. Однако в моделях искусственной жизни и искусственного интеллекта преодоление этих ограничений позволит резко повысить вариативность эволюционных вычислений и уровень приспособленности синтезированных агентов к условиям, задаваемым конкретной виртуальной средой.

В Институте информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра (КБНЦ) РАН в течение ряда лет разрабатывается система «Сосуко», которая представляет собой интерактивную виртуальную мультиагентную среду для исследования процессов формирования интеллектуального поведения телесных агентов [23, 24]. В такой системе агенты синтезируются на основе генома, в котором хранится наследственная информация. В настоящей статье рассматривается алгоритм геномного управления морфогенезом, частично реализованный в системе. Приведем некоторые отличия предлагаемого подхода от исследований, выполненных ранее.

1. Геном управляет морфогенезом организма агента на протяжении всей его жизни (от формирования зиготы до момента смерти).

2. Морфогенез (рост и развитие тела агента) осуществляется на основе наименьших (минимальных) далее неделимых конструктивных элементов, рассматриваемых в виртуальной среде (в отличие от модулей, которые по определению являются крупнее минимального элемента среды); основное содержание геномного управления состоит в определении последовательности формирования частей тела агента из этих минимальных конструкторов.

3. Основной целью работы всей системы является формирование интеллектуального («разумного») поведения, которое формируется на протяжении всей жизни агента в непрерывном взаимодействии с другими агентами и пользователями, тогда как генетическое управление используется только для формирования тела (и опосредованно — базовых функциональных возможностей). Так, в зависимости от социального окружения агенты с одинаковым генотипом могут достигать совершенно разных уровней интеллектуального развития, но при этом их морфологическое развитие будет различаться весьма незначительно.

4. Родители агента вступают в брак в результате сложного социального поведения, а не простого ранжирования по типу генетического алгоритма.

5. Родители агента продолжают жить в той среде, что и их дети, осуществляя при этом социальные родительские функции.

6. Функциональные возможности агента непосредственно зависят от свойств и пространственного взаиморасположения отдельных макроклеток, что фактически говорит о геномном управлении не только морфогенезом, но и функциональностью агента в самом широком смысле.

Эти уникальные отличия в большей степени реализуют концепцию генотипа, которая более свойственна реальным биологическим организмам, чем традиционным генетическим алгоритмам.

Серьезной предпосылкой на пути создания подобной системы мы считаем разработку модели геномного управления морфогенезом агента на протяжении его жизни. Чтобы сформулировать эту задачу, рассмотрим более подробно модели среды и агента.

1. ВИРТУАЛЬНОЕ «ФИЗИЧЕСКИ-КОРРЕКТНОЕ» ПРОСТРАНСТВО

Рассмотрим ВФКС $W = \{w_1, \dots, w_z\}$, где w_i — так называемый макроатом — минимальный дискретный элемент, моделирующий часть материи реального мира, который характеризуется вектором свойств $Q_i(qsubl^i, \dots, qsubm^i)$. Свойства, в частности, подразделяются на физические, которые участвуют в моделировании физических законов, и на сенсорные, которые могут непосредственно восприниматься пользователем и другими агентами. Макроатомы не имеют размеров, но обладают массой. Среднее расстояние между ними внутри устойчивого предмета принимается равным 1 мм.

Макроатомы взаимодействуют между собой по закону Гука. В системе также реализованы законы Ньютона и действуют силы тяжести.

Уравнения движения системы записываются в виде

$$\frac{dsup2}{dtsup2} r_i(t) = \frac{1}{m_i} \left[\sum_j \frac{\bar{F}_R(\text{Norm}(r_i - r_j), w_i, w_j)(r_i - r_j)}{\text{Norm}(r_i - r_j)} + \bar{F}_{Exi} \right],$$

$$t \geq t_0, j \in \text{Neighbour}_i = \{j \in \text{ScGr} \mid j > i, \text{Norm}(r_i - r_j) \leq d\}, d > 0, i \in \text{ScGr},$$

где m_i — масса макроатома w_i ; r_i — радиус-вектор, задающий координаты макроатома w_i ; \bar{F}_{Exi} — внешняя сила, действующая на w_i ; \bar{F}_R — сила взаимодействия между макроатомами (задается таблично для разных видов материалов); ScGr — граф сцены, в узлах которого находятся макроатомы. Модель работает в дискретном времени с шагом Δ . Общее время работы системы в момент времени t равно произведению Δt , $t = 1, 2, \dots$

Виртуальную физически-корректную среду, обладающую такими свойствами, будем называть виртуальным физически-корректным пространством (ВФКП). Таким образом, ВФКП представляет собой имитационную среду, моделирующую в псевдореальном времени пространственное распределение, некоторые свойства и элементы динамики реальных объектов с помощью дискретизации на основе системы частиц. ВФКП является средой погружения мультиагентной системы, задающей ограничения на действия агентов в виде имитируемых физических законов. Такая среда может быть эффективно реализована, например, с использованием спецификации на основе базовых протоколов, описанной в [25]. Подробная информация о ВФКП дана в [24, 26].

Среди прочих компонентов вектора Q_j , характеризующего элемент w_j , имеется компонент, представляющий собой значение энергии, которое может извлечь из элемента w_j агент, «съев» этот элемент.

Предмет $o_i = \{wsub1^i, wsub2^i, \dots, wsubj^i \mid wsubj^i \in W\}$ состоит из макроатомов, которые удерживаются вместе за счет упругих взаимодействий. При этом i — порядковый номер предмета в составе среды, а j — порядковый номер макроатома в составе предмета. В общем случае предмет o_i — это имитационная модель какого-либо предмета реального мира. Никаких дополнительных ограничений на перемещение или взаимное расположение предметов в системе нет. Таким образом, свойства и динамика предметов полностью определяются свойствами и взаимосвязями макроатомов, из которых они состоят, в соответствии с имитируемыми физическими законами.

Предмет o_i обладает биоэнергетической ценностью $esupi = \sum_{j=1}^l esubj^i$, где

$esubj^i$ — биоэнергетическая ценность j -го макроатома i -го предмета.

Первоначально ВФКП пусто — в нем нет предметов. Пользователь может загрузить предметы в ВФКП с помощью естественно-языкового ввода из специального словаря системы. Словарь постоянно пополняется новыми предметами, которые создаются пользователями. ВФКП имитирует среду обитания (мир) некоторого сообщества агентов [24].

2. СТРОЕНИЕ АГЕНТА

Макроклетка представляет собой макроатом, моделирующий фрагмент биологической ткани. Макроклетка может принимать энергию из среды, аккумулировать и расходовать ее, чтобы жить. Если в макроклетке закончилась энер-

гия, то она умирает. Иными словами, макро клетка считается живой, пока у нее есть энергия [24].

В общем случае агент $A_i = \{wsub1^i, wsub2^i, \dots, wsubh^i \mid wsubj^i \in \mathbb{W}\}$ (здесь j — порядковый номер макро клетки в составе агента) — это модель живого организма, который обладает телом, состоящим из h макро клеток $wsubj^i$. В этом смысле агент — это равноправная и неотъемлемая часть ВФКП. Можно также говорить, что макро клетки $wsubj^i$ составляют организм агента A_i . Будем считать, что агент жив до тех пор, пока жива хотя бы одна макро клетка, составляющая его тело. После того, как умирают все макро клетки, входящие на данном шаге времени в тело агента, умирает и сам агент. Задачей поддержания гомеостаза агента будем называть задачу обеспечения выживания организма в среде.

Морфологическим строением (или морфологией) агента называется уникальная совокупность макро клеток, из которых состоит агент, и система их взаимного расположения. Морфология агента меняется на протяжении его жизни. Однако она может оставаться неизменной в течение достаточно длительных периодов времени. Морфологию агента A_i в момент t его жизни (в возрасте Δt) будем обозначать $Asubi\mu^t$. В общем случае верно $|Asubi\mu^a| \neq |Asubi\mu^b|$. Учитывая, что $Asubi\mu^t = \text{const} \forall t \in T = [a, b]$, $\mu = \text{const}$, будем, опуская индекс μ , через $Asubi^t$ обозначать агента в момент времени t , а через $A_{i\mu}$, опуская индекс t , — μ -ю морфологию агента $Asubi\mu^t$, считая, что $Asubi^t = A_{i\mu} = Asubi\mu^t \forall t \in T = [a, b]$, $\mu = \text{const}$.

Будем считать, что $A_{i\mu} \in M_i = \{A_{i0}, \dots, A_{i\theta}\}$, где M_i — множество всех морфологий агента, которыми он обладает на протяжении своей жизни в среде W , а θ — общее число таких морфологий. Уточняя определение агента с учетом введенных понятий и обозначений, будем также считать, что верно $A_i = Asubi^t \forall t$ и $A_i = A_{i\mu} \forall \mu$.

Подобно предмету агент может быть загружен (размещен) в ВФКП пользователем. Если агент A_i помещен в ВФКП W и при этом жива хотя бы одна клетка, составляющая тело агента, то говорят, что он живет в этой среде. Агент может родиться в среде. В этом случае агент A_i имеет двух агентов-родителей: $m(A_i)$ — мать и $f(A_i)$ — отца, наследственные признаки которых передаются агенту. В момент t рождения агент считается новорожденным и обладает морфологией $Asubi0^t$.

Один и более агентов $Asubi^t$ образуют популяцию $P_t(Asub1^t, \dots, Asubn^t)$, где n — количество агентов в популяции.

Из определения агента следует, что они могут обладать самой разнообразной морфологией и функциональностью. Начальная популяция $P_0(Asub1^0, \dots, Asubn^0)$ состоит из агентов, которые проектируются и создаются пользователем (эталонные агенты) и обладают подсистемами, обеспечивающими некоторую базовую функциональность и выживаемость агентов в ВФКП: опорно-двигательной, пищеварительной, дыхательной, нервной, репродуктивной и кровеносной подсистемами (рис. 1).

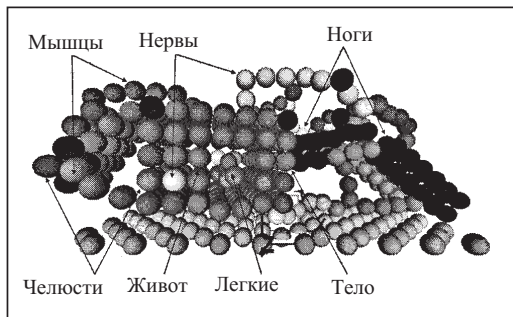


Рис. 1. Функциональные подсистемы агента

В общем случае k -я функциональная подсистема агента $Asubi^t$ имеет вид $Gsubkt^i = \{wsubx^i, wsuby^i, \dots, wsubu^i \mid wsubj^i \in ASubt^i\}$, где j — порядковый номер макроклетки в составе агента $Asubi^t$. В общем случае $|Gsubka^i| \neq |Gsubkb^i|$. При этом макроклетки, входящие в $Gsubkt^i$, связаны в единый функциональный цикл и вместе с другими функциональными подсистемами решают задачу поддержания гомеостаза. В общем случае макроклетка $wsubj^i$ может входить в состав одной и более подсистем $Gsubkt^i$.

В каждый момент времени t макроклетка $wsubj^i$ агента $Asubi^t$ расходует на поддержание собственной жизни биоэнергию \Deltaesubjt^i . Она в любой момент своей жизни t может получать биоэнергию \Deltaesubjt^{ig} либо из среды, либо от других макроклеток.

Макроклетка $wsubj^i$ агента $Asubi^t$ характеризуется переходной функцией $fsubj^i : ssubt^{ij} = fsubj^i(ssubt - 1^{ij}, t)$. Здесь $ssubt^{ij} = (qsubt1^{ij}, \dots, qsubtm^{ij})$, где $qsubtc^{ij}$ — значение c -го свойства j -й макроклетки i -го агента в состоянии $ssubt^{ij}$ (на шаге t). Каждое состояние $ssubt^{ij}$ характеризуется также и биоэнергией $esubjt^i$, которой обладает макроклетка в этом состоянии. Биоэнергия макроклетки $wsubj^i$ на шаге b определяется выражением

$$esubjb^i = esubja^i + \sum_{t=a}^b (\Deltaesubjt^{ig} - \Deltaesubjt^i),$$

где $esubja^i$ — биоэнергия макроклетки $wsubj^i$ в начальный момент a жизни агента в среде W .

Определим состояние функциональной системы $Gsubkt^i$ агента $Asubi^t$ на t -м шаге времени как $Ssubkt^i = \{ssubt^{ix}, ssubt^{iy}, \dots, ssubt^{iu}\}$, где $ssubt^{ij}$ — состояние j -й макроклетки k -й функциональной системы агента $Asubi^t$ на t -м шаге времени. Функциональная система $Gsubkt^i$ характеризуется переходной функцией $Fsubkt^i : Ssubkt^i = Fsubkt^i(Ssubkt - 1^i, t)$.

Состоянием агента $Asubi^t$ на t -м шаге времени будем называть множество $Ssubt^i = \{Ssub1t^i, Ssub2t^i, \dots, Ssubvt^i\}$, где $Ssubkt^i$ — состояние k -й функциональной системы i -го агента на t -м шаге времени, v — количество функциональных подсистем агента. Биоэнергия, которой обладает агент $Asubi^t$ в состоянии $Ssubt^i$, определяется как

$$Esubt^i = \sum_{j=1}^h esubjt^i,$$

где $esubjt^i$ — биоэнергия j -й макроклетки агента $Asubi^t$, на t -м шаге времени.

Таким образом, условие успешного поддержания гомеостаза агента A_i на отрезке времени $T = [a, b]$ имеет вид

$$Esubt^i > 0 \forall t \in T. \quad (1)$$

Изменение морфологии агента $Asubi^t$ характеризуется переходной функцией

$$Lsubt^i : Ssubt^i = Lsubt^i(Ssubt - 1^i, t). \quad (2)$$

Смена морфологий у одного агента может происходить в течение всей его жизни в результате роста в соответствии с генетической программой и условиями обитания: $A_{i0} \rightarrow A_{i2} \rightarrow \dots \rightarrow A_{i\theta}$.

3. МОРФОГЕНЕЗ АГЕНТА

Биологический возраст макроклетки $wsubj^i$ вычисляется на основе количества биоэнергии, затраченной этой макроклеткой в течение ее жизни в W на дискретном интервале времени $[a, b]$, где $t = a$ и $t = b$ — момент рождения агента и текущий момент времени соответственно:

$$agesubj^i = \sum_{t=a}^b \Delta esubjt^i.$$

Здесь $\Delta esubjt^i$ — биоэнергия, затрачиваемая j -й макроклеткой i -го агента на жизнь в момент времени t (в течение времени Δ).

Биологическим возрастом агента $Asubi^b$ в момент времени b будем считать значение $AGEsubb^i$ всей биоэнергии, затраченной всеми h макроклетками агента на протяжении его жизни в W :

$$AGEsubb^i = \sum_{t=a}^b \sum_{j=1}^h \Delta esubjt^i = \sum_{j=1}^h agesubj^i. \quad (3)$$

Морфогенез агента осуществляется с использованием операций деления и перерождения макроклеток.

Деление макроклетки — это замена ее в теле агента на две новые макроклетки с соответствующим пересчетом свойств (атрибутов) обоих новых макроклеток. Деление может произойти только при наличии у макроклетки достаточного количества биоэнергии.

Перерождение макроклетки — это изменение типа этой макроклетки с соответствующим пересчетом ее атрибутов. Перерождение может произойти только до момента достижения макроклеткой определенного биологического возраста.

Генетическая программа агента $Asubi^t$ хранится в геноме Gm_i в векторе свойств каждой макроклетки $wsubj^i$, входящей в тело агента, и представляет собой совокупность последовательностей операций деления и перерождения для каждого вида макроклеток, составляющих тело агента, синхронизированную в соответствии с биологическим возрастом агента $AGEsubt^i$.

Источником биоэнергии агента является потребление в пищу макроатомов, находящихся в среде обитания W . Таким образом, опосредованно через механизмы деления и перерождения процесс смены морфологий агента связан с биоэнергетическим состоянием макроклеток на протяжении их жизни. И, наоборот, биоэнергетическое состояние макроклеток зависит от процесса смены морфологий агента.

Одним из результатов работы переходной функции $Lsubt^i$ на каждом шаге является генерация, расходование и перераспределение биоэнергии между макроклетками агента. Следовательно, именно работа $Lsubt^i$ определяет, какие макроклетки и в какие моменты времени будут жить, делиться, перерождаться или умирать.

4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На содержательном уровне философский вопрос о целях морфогенеза, как процесса, которым надо управлять, в данной модели мы связываем с задачей поддержания гомеостаза. Для того чтобы успешно решить эту задачу, агенту необходимо в соответствии с условием (1) обеспечить свои макроклетки достаточным количеством энергии. Отсюда приходим к постановке задачи управления морфогенезом как задачи максимизации продолжительности жизни агента в среде.

Пусть имеется последовательность морфологий

$$Asubi0^a \rightarrow \dots \rightarrow Asubi\mu^c \rightarrow Asubi\mu + 1^k \rightarrow \dots \rightarrow Asubi\theta^b, \quad (4)$$

$t \in [c, d]$ — интервал времени, на котором агент обладает морфологией $A_{i\mu}$ и проживает отрезок биологического возраста (по аналогии с формулой (3)), соответствующий данной морфологии:

$$\Delta AGEsub\mu^i = \sum_{t=c}^d \sum_{j=1}^h \Delta esubjt^i.$$

С учетом (4) получаем

$$AGEsubb^i = \sum_{A_{i\mu} \in M_i} \Delta AGEsub\mu^i.$$

Отметим также, что каждой морфологии $Asubi\mu^t$ соответствует переходная функция $Lsubt^i$ вида (2) и именно эта функция описывает процессы потребления из среды, распределения и расходования биоэнергии макроклетками агента, обеспечивая тем самым изменение значения $\Delta AGEsub\mu^i$. Исходя из этого, будем считать, что функции $Lsubt^i$ задают ограничения на рост значения $AGEsubb^i$. Это значение зависит также от конкретной реализации среды W (например, от насыщенности энергией в объектах, доступных агенту) и от состава популяции (количества и морфологических особенностей) $P_i(Asub1^t, \dots, Asubn^t)$ агентов.

В данном исследовании для простоты будем считать, что W содержит неиссякаемое количество биоэнергии. При этом свойства среды таковы, что на каждом шаге времени агент получает биоэнергию E_{in} , которая передается ему из среды (за время одного шага Δ). Тогда задача максимизации значения биологического возраста агента может быть записана следующим образом.

Найти

$$\max_{W, P_0, Lsubt^i, b} AGEsubb^i,$$

где b — максимальное (конечное) число шагов работы системы.

5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Ограничения $W, P_0, Lsubt^i$, фактически задают функциональные возможности агентов в среде. Так, например, агент, строение которого изображено на рис. 1, может передвигаться в среде с помощью ног, употреблять пищу и кислород из среды с помощью челюстей и легких, вырабатывать биоэнергию с помощью желудка и т.д.

Учитывая сложность поставленной задачи, в качестве основного метода ее решения выбрано имитационное моделирование. Исходя из вышеизложенного, можно считать, что задача состоит в поиске такой последовательности морфологий агента $Asubi0^a \rightarrow \dots \rightarrow Asubi\mu^c \rightarrow Asubi\mu + 1^k \rightarrow \dots \rightarrow Asubi\theta^b$, которая максимизирует значение $AGEsubt^b$ с учетом заданных ограничений.

Поскольку прохождение морфогенеза зависит от состояния среды и от информации, хранящейся в геноме Gm_i , а состоянием среды управлять непосредственно мы не можем, то задача сводится к нахождению оптимального генома (генетической программы) $Gmsubi^{opt}$ морфогенеза агента. Поэтому в качестве удобного метода моделирования был применен также аппарат генетических алго-

ритмов. В частности, получена следующая модель: 1) Gm_i — хромосома агента A_i (совпадает с его геномом), $Gmsubi^m$ — материнская хромосома, $Gmsubi^f$ — отцовская хромосома; 2) $Gm_i = f(Gmsubi^m, Gmsubi^f)$, где $f(Gmsubi^m, Gmsubi^f)$ — механизм, обеспечивающий формирование генома агента на основе геномов родителей (кроссинговер, мутации и т. п.); 3) $\max AGEsubb^i$ — целевая функция; 4) $W, P_0, Lsubt^i, b$ — ограничения; 5) испытанием является жизнь агента и измерение значения $AGEsubt^i$, где $t \leq b$ — момент смерти агента; 6) формирование нового генома происходит только тогда, когда имеет место зарождение нового агента в результате брака его родителей. Такой подход существенно отличается от традиционных генетических алгоритмов, в которых ранжирование и выбор основы новой популяции происходят на одном шаге для всех агентов текущей популяции. Отличие состоит также и в процедуре выбора генетической основы новой популяции, так как она является не следствием объективного ранжирования в соответствии с четкими критериями, но фактически результатом труднопредсказуемого процесса формирования браков.

Алгоритм заканчивает работу по истечении времени Δb — максимального времени работы системы (рис. 2).

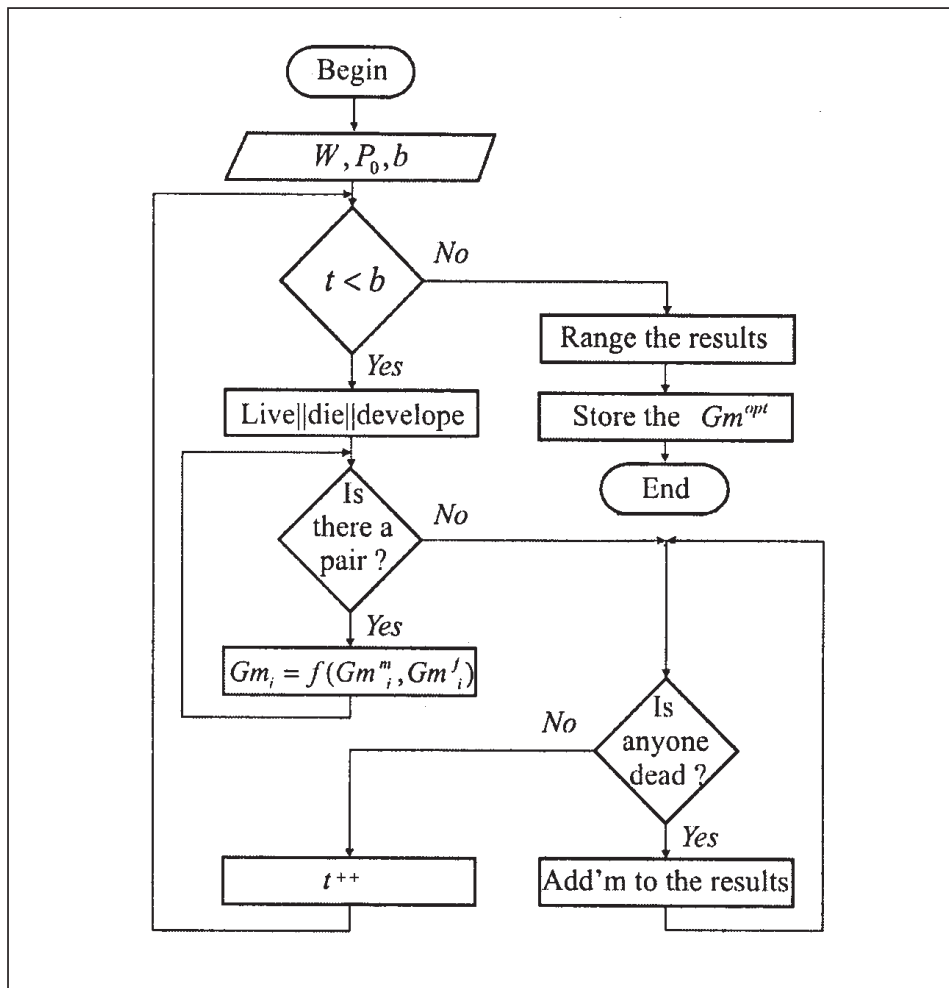


Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма максимизации биологического возраста

Рост агента (посредством смены морфологий) осуществляется в соответствии с информацией (генетической программой), хранящейся в геноме агента. Сама же генетическая программа является результатом синтеза на основе генетических программ предыдущих поколений. Таким образом, можно говорить о геномном управлении морфогенезом на уровне как одного, так и многих поколений агентов.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В настоящее время проект «Сосруко» находится в стадии разработки. Эксперименты проводились с помощью программы редактирования мультиагентного ВФКП «Сосруко», разработанной в Институте информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН. К настоящему моменту реализовано ВФКП, обладающее свойствами, описанными в данной работе, модели агентов различных морфологий, модель генома и геномного управления морфогенезом агента.

Согласно экспериментам агенты помещались в среду с различным количеством биоэнергии в макроатомах и фиксировались морфологии, биологический возраст перехода между ними и биологический возраст, в котором наступала смерть агента. На рис. 3 продемонстрировано,

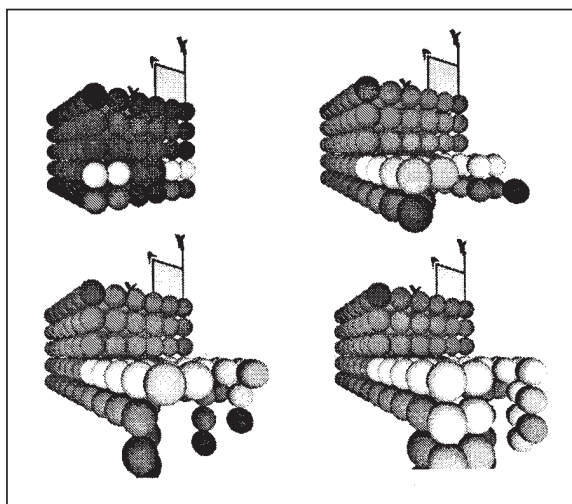


Рис. 3. Последовательные стадии роста ног агента

что при наличии достаточного количества энергии в среде (светлая макроклетка) разработанная модель геномного управления позволяет осуществлять автоматическое формирование (рост) тела агента в ВФКП. Макроклетки, закрашенные темным цветом, испытывают острую нехватку биоэнергии.

Эксперименты показали следующие результаты.

1. Увеличение продолжительности жизни агентов прямо пропорционально количеству биоэнергии в среде.

2. При недостаточном количестве биоэнергии в среде наблюдается недоразвитие агента, когда замедляется или полностью прекращается рост определенных органов агента (рис. 4, а). В этом случае агенты теряют значительную часть функциональности и быстро погибают.

3. Слишком большое количество энергии в среде вызывает, наоборот, гипертрофию или отклонения от нормального морфогенеза отдельных органов (рис. 4, б), что также приводит к потере функциональности и гибели агентов.

На рис. 5 приведен график среднеквадратичной ошибки ε значений трехмерных координат макроатомов, входящих в состав ног

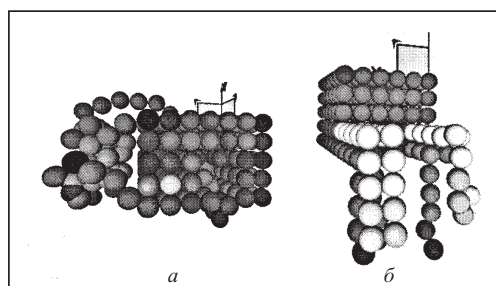


Рис. 4. Морфогенез агента в условиях дефицита (а), переизбытка биоэнергии (б) в среде

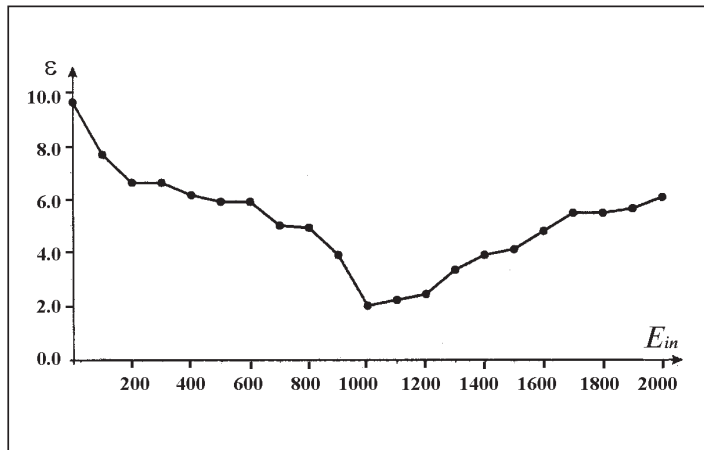


Рис. 5. График отклонения сгенерированной морфологии агента (в возрасте 60 с) от эталонной морфологии в зависимости от биоэнергетических условий среды E_{in}

агента (сформированных в ходе описанного процесса морфогенеза за время $\Delta t = 60$ с), в зависимости от соответствующих значений координат макроатомов ног эталонного агента (задаваемого пользователем). По оси x приводятся значения биоэнергии E_{in} , передаваемой (доступной) агенту из среды за время одного шага Δ .

Анализ результатов экспериментов показал, что для обеспечения большей приспособляемости агента необходим механизм «рождение-взросление». Такой механизм вместе с механизмами, обеспечивающими возможность деления макроклеток в зависимости от биоэнергетических условий жизни макроклетки, и механизмом случайных мутаций позволяет обеспечивать (посредством «направленного» роста) формирование и закрепление адаптационного аппарата агента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Морфогенез, осуществляющийся в псевдореальном времени в условиях конкретной среды, позволяет обеспечить гибкость развития вида за счет энергетически обусловленной вариативности морфологий агента по отношению к программе морфогенеза, записанной в геноме. Очевидным преимуществом подобного подхода является то, что агенты эволюционируют в направлении большей приспособленности к среде обитания. Таким образом, существует принципиальная возможность получения эффективных морфологий агентов с заданным набором свойств, локально оптимальных для выживания и развития агента в данной среде.

В настоящее время ведется разработка системы управления поведением агентов, позволяющей выполнять некоторые социальные функции в сообществе агентов. В частности, планируется установить существование и степень корреляции между продолжительностью жизни агента и его агентов-родителей, а также продолжительностью жизни самого агента. Необходимо также разработать механизм формирования новых генетических признаков в геноме агента в зависимости от условий среды.

В теоретическом плане интересно исследование возможности автоматического возникновения циклического процесса самовоспроизводства агентов с использованием механизмов смерти и рождения. Суть состоит в том, что если не учитывать, что возраст агента рассчитывается только с момента его рождения (без учета возраста одного из его родителей), то можно получить систему, обеспечивающую многопоколенную оптимизацию биологического возраста агентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Редько В.Г. Лекции по эволюционной кибернетике. <http://www.keldysh.ru/pages/BioCyber/Lectures>.
2. Редько В.Г., Сохова З.Б., Мосалов О.П., Нагоев З.В. Естественная модель искусственной жизни // Тр. XLVI науч. конф. МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Ч. I. Радиотехника и кибернетика. — Москва — Долгопрудный: МФТИ, 2003. — Т. 1. — С. 31–33.
3. *Advances in the evolutionary synthesis of intelligent agents* by Mukesh Patel / V. Honavar and K. Balakrishnan (Ed). — Cambridge, MA: MIT Press. 2001. — 504 p.
4. Holland J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. — Ann Arbor: Univ. of Michigan Press, 1975. — 228 p.
5. Sims K. *Evolving virtual creatures* // *Computer graphics (Siggraph '94) Ann. Conf. Proc.*, 1994. — P. 43–50.
6. Рассел С., Норвиг П. *Искусственный интеллект: современный подход*: Пер. с англ. — 2-е изд. — М.: Вильямс; М. — С.-Петербург — Киев, 2006. — 1408 с.
7. Yeager L. *Computational genetics, physiology, learning, vision, and behavior or polyword: life in a new context* // C. G. Langton (ed). *Artificial Life III*. — Addison-Wesley, 1994. — P. 263–298.
8. Anderson M.L. *Embodied cognition: A field guide* // *Artificial Intelligence*. — 2003. — **149**, N 1. — P. 91–130.
9. Cliff D. *Biologically-inspired computing approaches to cognitive systems: a partial tour of the literature* // HP Labs. Techn. Rep. HPL-2003-011. — 2003 (www.hpl.hp.com/techreports/2003/HPL-2003-11.pdf).
10. Koza J.R., Keane M.A., Streeter M.J. et al. *Genetic programming IV: routine human-competitive machine intelligence*. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2003. — 624 p.
11. Schaaf J.C. Jr., Thompson F.L. *System concept development with virtual prototyping* // *Winter Simulation Conf.*, 1997. — P. 941–947.
12. Nolfi S., Floreano D. *Evolutionary robotics: the biology* // *Intelligence and Technology of Self-Organizing Machines*. — Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books. — 2000. — 338 p.
13. Harvey I., Di Paolo E., Tuci E. et al. *Evolutionary robotics: a new scientific tool for studying cognition* // *Artif. Life*. — 2005. — **11**, N 1–2. — P. 79–98.
14. *Evolutionary robotics: Bibliography* / By A. Nelson, 2006 (http://www.nelsonrobotics.org/evolutionary_robotics_web/index.html).
15. Gomi T. (Editor) *Evolutionary robotics III: from intelligent robots to artificial life*. — Ontario, Canada: AAI Books, 2000. — 395 p.
16. Nolfi S., Floreano D., Miglino O., Mondada F. *How to evolve autonomous robots: different approaches in evolutionary robotics* / R.A. Brooks, P. Maes (eds.) // *Proc. IV Intern. Workshop on Artificial Life*. — Cambridge, MA, MIT Press, 1994 (<http://lis.epfl.ch/publications/nolfi.alife4.pdf>).
17. Hornby G.S., Lipson H., Pollack J.B. *Evolution of generative design systems for modular physical robots* // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'01)*. — 2001. — **4**. — P. 4146–4151 (http://demo.cs.brandeis.edu/papers/hornby_icra01.pdf).
18. Lipson H., Pollack J.B. *Automatic design and manufacture of robotic lifeforms* // *Nature*. — 2000. — **406**, N 6799. — P. 974–978 (http://www.mae.cornell.edu/ccsl/papers/Nature00_Lipson.pdf).
19. Aylett R., Luck M. *Applying artificial intelligence to virtual reality: intelligent virtual environments* // *Applied artificial intelligence*. — 2000. — **14**, N 1. — P. 3–32.
20. Fontijne D. *Rigid body simulation and evolution of virtual creatures*: Master's Thesis. — Univ. of Amsterdam, 2000. — 111 p.
21. Ruebsamen G.D. *Evolving intelligent embodied agents within a physically accurate environment*. — Long Beach: California State Univ., 2002. — 270 p.

22. Tyler T. Evolution of morphology and behaviour for physically modelled creatures. — 2007 (<http://www.tim-taylor.com/index.html>).
23. Нагоев З.В., Елекова О.А., Анчиков М.И. Интерактивная среда обучения виртуальных человекоподобных агентов интеллектуальному поведению // Изв. КБНЦ РАН. — Нальчик. — 2006. — **15**, № 1. — С 87–100.
24. Нагоев З.В., Бозиев А.И., Буздов Б.К. Человекоподобный агент в виртуальной физически корректной среде // Изв. КБНЦ РАН. — Нальчик. — 2005. — **14**, № 2. — С. 68–81.
25. Летичевский А.А., Капитонова Ю.В., Волков В.А. и др. Спецификация систем с помощью базовых протоколов // Кибернетика и системный анализ. — 2005. — № 4. — С. 3–21.
26. Нагоев З. В. Модель представления смысла текстовой информации: Дис. ... канд. техн. наук. — Нальчик, 1999. — 162 с.

Поступила 26.11.2006