

МОДЕЛЬ ПОИСКОВОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛИЧИНОК РУЧЕЙНИКОВ

*Непомнящих Валентин Анатольевич, к.б.н.*¹,

*Попов Евгений Евгеньевич*²,

*Редько Владимир Георгиевич, д.ф.-м.н.*³,

¹ *Институт биологии внутренних вод РАН,*

nepom@ibiw.yaroslavl.ru

² *МФТИ, 8-916-4796894, cha1n@inbox.ru*

³ *НИИ системных исследований РАН, (495)1356331,*

vgredko@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Построена и исследована компьютерная модель поискового поведения личинок ручейников, строящих чехол-домик из частиц разного размера и ведущих поиск скоплений подходящих частиц. Показана адекватность модели биологическим экспериментальным данным. Модель характеризуется как своей спецификой, обусловленной памятью о размерах последних обработанных частиц, так и общими свойствами инерционного переключения, позволяющими животным выявлять и использовать при адаптивном поведении наиболее общие закономерности взаимодействия с внешней средой.

1. ВВЕДЕНИЕ

С начала 1990-х годов за рубежом активно развивается направление исследований "Адаптивное поведение" [1,2]. Основной подход этого направления – конструирование и исследование искусственных (в виде компьютерной программы или робота) "организмов", способных приспособиваться к внешней среде. Эти организмы называются аниматами (от англ. animal + robot = animat). Данное направление исследований рассматривается как бионический подход к разработке систем искусственного интеллекта.

Одно из актуальных направлений исследований в рамках анимат-подхода – имитация поискового поведения животных. В настоящей работе излагаются результаты моделирования поискового поведения на примере личинок ручейников *Chaetopteryx villosa* – насекомых, обитающих на дне водоемов [3]. Личинки носят на себе «домик» –

трубку из песка и других частиц, которые они собирают на дне водоемов. Частицы скрепляются между собой по краям с помощью клейкой белковой нити. Строительство требует меньше времени, усилий и белка, если личинки используют относительно крупные и плоские частицы. Однако поиск крупных частиц на дне водоема требует затрат времени и энергии, не известных ручейнику заранее. Задача осложняется еще и тем, что личинки при поиске частиц не пользуются зрением и могут обнаружить частицу и определить её размер только наощупь, что требует дополнительных затрат времени.

В разделе 2 описывается конкретный биологический эксперимент и соответствующая компьютерная модель. Раздел 3 содержит результаты моделирования, раздел 4 – краткое заключение.

2. БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Биологический эксперимент. Рассматривается следующий эксперимент [4]. Личинок ручейников помещали в кольцевой коридор с водой, дно которого было покрыто сплошным слоем песка. На большей части коридора (участок 1) на дне были только песчинки (мелкие частицы). На небольшом участке коридора (участок 2), кроме песка, были еще предпочитаемые личинками крупные плоские частицы (специально изготовленные фрагменты яичной скорлупы приблизительно квадратной формы). Диаметр кольца составлял 87 мм, ширина кольца – 16 мм. Площадь участка 2 была равна 1/6 площади кольца. Характерные линейные размеры песчинок составляли 0,5-1 мм, размер стороны скорлупки составлял 1,5-2 мм. Характерный размер самих личинок составлял 12 мм. Вероятность того, что ручейник встретит на участке 2 крупную, а не мелкую частицу, составляла примерно 0,2. Эксперимент проводили с 40 личинками ручейников. Личинкам разрушали переднюю и заднюю треть уже построенного домика. Ручейников по одному помещали в центр участка 1 и наблюдали их поведение до прикрепления первой частицы, а затем ещё в течение 1 часа после этого первого прикрепления.

Поведение личинок было следующим. Прежде чем начать строительство, ручейники передвигались по коридору, поднимали со дна и обследовали значительное число частиц. Все особи посещали участок 2 во время передвижения и поднимали как песок, так и

скорлупу. Четыре личинки начали строительство на участке 1 и не возвращались на участок 2 до конца эксперимента. Все остальные особи начинали строительство с прикрепления скорлупы на участке 2, причем 17 из них уже не уходили с этого участка, хотя и перемещались внутри его. Оставшиеся 19 особей провели на этом участке больше половины времени эксперимента. Личинки, оставшиеся на участке 1, прикрепили в среднем по 7 песчинок. Среднее число прикрепленных частиц как для 17 особей, оставшихся на участке 2, так и для 19 особей, покидавших и возвращавшихся на участок 2, составило 5 скорлупок и 2 песчинки. Эксперимент показывает, что личинки ручейников предпочитают находиться на участке 2, где они строят домик в основном из крупных частиц – скорлупок.

Компьютерная модель. Модель поискового поведения личинок ручейников строилась на основе следующих предположений.

- 1) Время считаем дискретным, шаг по времени Δt считаем равным минимальному характерному времени в поведении личинки, что составляет порядка 1 с.
- 2) Движение личинки вдоль кольца считаем одномерным, т.е. пренебрегаем шириной кольца по сравнению с его диаметром d .
- 3) Личинка имеет две тактики поведения: А) искать и прикреплять к домику частицы в своей локальной окрестности, Б) перемещаться на новое место.
- 4) При тактике А возможны две операции: *тестирование* частицы, при котором тестируемая частица может быть отброшена, и *прикрепление* протестированной частицы к домику.
- 5) Тенденцию к прикреплению частиц характеризуем переменной $M(t)$, которую можно рассматривать как мотивацию к прикреплению. Динамика $M(t)$ определяется приведенными ниже формулами.

При *тестировании* мотивация изменяется в соответствии с выражением:

$$M(t) = k_1 M(t-\Delta t) + \xi(t) + I(t), \quad (1)$$

где

$$I(t) = k_2 (S_{curr} - S_{last}) / S_{last}, \quad (2)$$

k_1 – параметр, характеризующий медленную релаксацию мотивации ($0 < k_1 < 1$, $1 - k_1 \ll 1$); $\xi(t)$ – нормально распределенная случайная величина со средним равным 0 и средним квадратическим σ ; k_2 – положительный параметр; S_{curr} – площадь тестируемой в данный момент частицы; S_{last} – площадь последней протестированной частицы.

При *прикреплении* и *перемещении* мотивация изменяется в соответствии с выражением

$$M(t) = k_1 M(t-\Delta t) + \xi(t). \quad (3)$$

Выражения (1), (3) учитывают релаксацию и случайные возмущения мотивации (первое и второе слагаемые справа в этих формулах). Переменная $I(t)$ в (1), (2) учитывает сравнение площадей тестируемой и последней протестированной частиц, что соответствует опыту работы [3].

- 6) Считаем, что тестирование и прикрепление происходит при превышении мотивацией $M(t)$ определенного порога, причем порог для тестирования и для прикрепления различен. Порог для тестирования H_{test} пропорционален площади последней протестированной частицы S_{last} : $H_{test} = k_3 S_{last}$. Порог для прикрепления H_{att} пропорционален площади последней прикрепленной частицы S_{att} : $H_{att} = k_4 S_{att}$. k_3 , k_4 – положительные параметры.
- 7) Схема выполнения операций состоит в следующем. Если мотивация оказалась больше порога тестирования H_{test} и при этом не происходит прикрепления, то личинка начинает тестировать ближайшую к ней частицу. Если при тестировании мотивация $M(t)$ стала меньше порога H_{test} , то тестируемая частица отбрасывается. Если при тестировании частица не отбрасывается, то тестирование продолжается в течение определенного времени T_{test} , после чего мотивация $M(t)$ сравнивается с порогом прикрепления H_{att} . Если при этом $M(t) < H_{att}$, то прикрепления не происходит; если $M(t) > H_{att}$, то частица прикрепляется в течение времени T_{att} (в процессе прикрепления мотивация с порогом уже не сравнивается). Времена тестирования T_{test} и прикрепления T_{att} зависят от размера частицы. Если личинка не тестирует и не прикрепляет частицу, то она перемещается.

- 8) В начале перемещения личинка выбирает случайное направление движения, и некоторое время перемещается в этом направлении (с вероятностью 0,5 для каждого из двух возможных). Эпизодически, с интервалом в T_{change} личинка выбирает новое случайное направление движения вдоль кольца.
- 9) Величина перемещения личинки за один такт времени (длительностью Δt) равна L .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ модели проводился путем компьютерного моделирования. При моделировании, так же как в биологическом эксперименте [4], предполагалось, что личинки помещены в кольцевой коридор, диаметр коридора d равен 90 мм. Полагалось, что сектор размером 1/6 части периметра (участок 2) имеет частицы двух размеров: мелкие (песчинки) и крупные (скорлупки), на остальной части коридора (участок 1) есть только песчинки. Линейные размеры песчинки и скорлупки составляли 0,5 мм и 1,5 мм, соответственно. Площадь частицы считалась равной квадрату ее размера. Вероятность того, что ручейник встретит на участке 2 крупную, а не мелкую частицу, была равна 0,2. Шаг по времени Δt полагался равным 1 с. Исходно модельная личинка помещалась в центр участка 1. Исходная мотивация к прикреплению была равна нулю. Исходный порог прикреплению был равен $H_{att}(0) = k_4 S_L$, где S_L – площадь крупной частицы, затем этот порог постепенно уменьшался по экспоненте с характерным временем 3000 тактов времени, до тех пор пока не прикреплялась первая частица, далее порог H_{att} определялся размерами прикрепляемых частиц. Исходный порог тестирования был равен $H_{test}(0) = k_3 S_S$, где S_S – площадь мелкой частицы; порог H_{test} не менялся до тех пор, пока не начиналось тестирование. В соответствии с экспериментальными данными полагалось, что величина перемещения личинки за один такт времени равна $L = 2$ мм. Полагалось, что время тестирования T_{test} мелкой и крупной частицы составляет 5 с и 10 с, соответственно; время прикреплению T_{att} мелкой и крупной частицы составляет 60 с и 120 с, соответственно; время изменения направления движения T_{change} составляет 30 с.

Остальные параметры модели (k_1 - k_4 , σ) были выбраны следующим образом. Так как характерное время прикреплению частиц порядка 100 с, то полагалось, что характерное время релаксации мотивации должно

быть того же порядка: $k_1 = 0,99$. Параметры k_3 , k_4 были выбраны из соображений простоты: $k_3 = 0,01$, $k_4 = 1$. Параметры k_2 и σ грубо варьировались в диапазоне от 0,001 до 0,1 и были подобраны так, чтобы при моделировании получалось поведение, примерно подобное наблюдавшемуся в биологическом эксперименте: $k_2 = 0,007$, $\sigma = 0,05$.

Расчет проводился в течение 7200 тактов времени, что соответствует 2 часам для моделируемых процессов (далее временные характеристики приводятся именно для модельных личинок). Как и в биологическом эксперименте анализировалось поведение 40 «личинок» в течение 1 часа после прикрепления первой частицы.

Поведение модельных личинок ручейников имело следующие свойства:

- в начале расчета модельные личинки перемещались по кольцевому коридору, в большинстве случаев (в 27 случаях из 40) посещая и покидая участок 2 еще до момента прикрепления первой частицы, в 13 расчетах «личинки» начинали процесс прикрепления на участке 2 при первом его посещении;
- среднее время от начала расчета до момента прикрепления первой частицы составило 1815 с (стандартное отклонение 872 с);
- почти во всех расчетах (в 39 расчетах из 40) первой прикреплялась крупная частица;
- количество прикрепляемых частиц в течение часа после начала прикрепления первой частицы в среднем по 40 расчетам составило: 4,2 крупные частицы (стандартное отклонение 1,68) и 0,6 мелких частиц (стандартное отклонение 1,53).
- в 14 расчетах «личинка» не покидала участок 2 после начала прикрепления частиц, в 10 расчетах «личинка» находилась вне участка 2 в конце наблюдения, в остальных 16 расчетах «личинка» уходила с участка 2 и вновь возвращалась на него.

На рис. 1 приведены зависимости изменения суммарной площади домика личинки от времени $S(t)$ для трех типичных расчетов. Видно, что 1) число прикрепляемых частиц невелико и по порядку величины близко к среднему значению, наблюдавшемуся в биологическом эксперименте, 2) имеется сильный разброс в числе прикрепляемых частиц и во времени начала прикрепления первой частицы, 3) преимущественно прикрепляются крупные частицы (площадью $2,25 \text{ мм}^2$), но эпизодически прикрепляются и мелкие частицы (площадью $0,25 \text{ мм}^2$).

Отметим, что в построенной модели процессы переключения между тактиками поведения основаны на запоминании размеров последних прикрепленных частиц (см. пп. 6,7 подраздела «Компьютерная модель»). Тем не менее, анализ динамики мотивации и операций показывает, что при положительной мотивации $M(t)$ модельная личинка преимущественно придерживается тактики А: «тестировать и прикреплять частицы», а при отрицательных $M(t)$ – тактики Б: «перемещаться на новое место». При этом процессы переключения между этими тактиками имеют инерционный характер, типичный для поисковых стратегий многих биологических организмов [3].

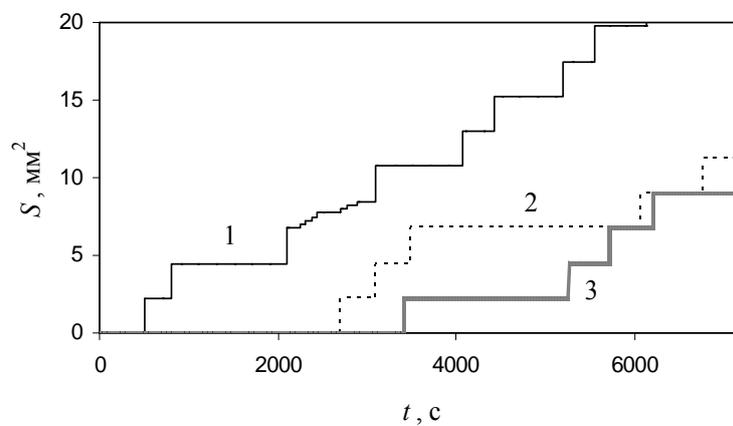


Рис. 1. Зависимость суммарной площади прикрепленных частиц S от времени t для трех различных расчетов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, построена компьютерная модель поискового поведения личинок ручейников, строящих домики из крупных и мелких частиц. Проведен цикл расчетов и сделан подбор параметров, при которых модель соответствует биологическим данным. Поведение модельных личинок в проведенных расчетах было подобно поведению реальных, не наблюдалось только редких для биологического эксперимента (10% случаев) ситуаций, когда личинки начинали строительство на участке 1 и не возвращались на участок 2.

Хотя в построенной модели процессы переключения между тактиками поведения основаны на запоминании размеров последних прикрепленных частиц, эти процессы имеют инерционный характер. Инерционность в переключении между тактиками поведения, позволяющая использовать наиболее общие закономерности в изменениях ситуаций, должна быть полезна и для искусственных автономных адаптивных систем. Например, инерционность вполне естественна при переходе от одной цели поведения к другой, что соответствует хорошо известному принципу доминанты [5]. Поэтому представленные схемы поискового адаптивного поведения и результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке искусственных автономных адаптивных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meyer J.-A., Wilson S. W. (Eds.) From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England. 1990.
2. От моделей поведения к искусственному интеллекту (под ред. Редько В.Г.). М.: УРСС, серия "Науки об искусственном", 2006.
3. Непомнящих В.А. Модели автономного поискового поведения // В книге [2]. С. 200-242.
4. Непомнящих В.А. Противоречие между оптимизацией и упорядоченностью в строительном поведении личинок ручейников *Chaetopteryx villosa* Fabr. (Limnephilidae, Trichoptera) // Журнал общей биологии. 2002. Т.63. №3. С.473-482.
5. Ухтомский А.А. Доминанта. М.-Л.: Наука, 1966. 273 с.