

УДК 004.8

doi: 10.15622/rcai.2025.045

НЕКОТОРЫЕ БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ АГЕНТНЫЕ МОДЕЛИ СТРОИТЕЛЬСТВА ГНЕЗД¹

В.Э. Карпов (*karpov.ve@gmail.com*)

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва

Рассматриваются две агентные модели строительной деятельности. На примере строительства аналога гнезда муравьев показано, что агенты способны возводить купол и имитировать прокладывание тоннелей, используя базовый закон группового движения без необходимости активного межагентного взаимодействия и без применения процедуры планирования. В основе базового механизма управления движением лежит обобщенный метод потенциалов, когда для различных классов объектов формируются положительные и отрицательные потенциалы. Их суммирование с учетом значений вектора коэффициентов факторов позволяет реализовывать различные эффекты движения: стремление держаться вместе, отталкивание, движение по пеленгу или к выбранной точке и т.п. Переключение между формами движения осуществляется конечным автоматом. Строительство купола основано на возможности агентов взбираться друг на друга, а областью интереса согласованного движения группы является множество агентов, находящихся в терминальных состояниях. Строительство тоннелей является более сложной задачей, для которой следует определять как генеральное направление (пеленг) движения, так и задавать условия его начала/завершения.

Ключевые слова: агент, модели поведения, метод потенциалов, строительство гнезд, автоматное управление.

Введение

подавляющее большинство работ в области групповой робототехники посвящено согласованному движению – основе основ деятельности роботов. Задачи, в которых группы роботов занимаются преобразующей, на-

¹ Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

пример, строительной, деятельностью менее исследованы. Причиной является масса сложностей технического характера: распознавание, манипуляции объектами, планирование, согласование деятельности и т.п. Тем не менее, попытки реализации «строительной» деятельности на группах реальных роботах имеют давнюю историю. См. например, работу [Parker et al., 2003], в которой роботы расчищали поверхность (т.н. "слепое бульдозерирование" – blind bulldozing), или работу [Werfel, 2012], в которой описываются роботы, не только реализующие манипуляционные функции, но и способные взбираться на уложенные ими же блоки. А в работе [Huang et al., 2022] представлен весьма функциональный роботизированный механизм, выполняющий множество строительных действий в сухом гранулированном материале и способный работать в группе. При этом чаще всего групповая строительная деятельность сводится к моделям, основу которых составляет групповое движение, как, например, коллективное перемещение грузов ([Faria Dias et al., 2021]). Важно, что в основном используемые модели управления являются формальными, допускающими решение оптимизационных задач. Так, в работе [Czyzowicz et al., 2021] описывается система управления роботом на основе конечного автомата, задача которого построить максимально компактную возможную структуру – гнездо, при этом оптимизируется время этого строительства.

Здесь представлен иной – биоинспирированный – подход к решению задачи строительства гнезда. При этом модельным объектом будут общественные насекомые – муравьи. Строго говоря, этот подход биоинспирирован частично, т.к. достоверные данные о принципах, которыми руководствуются муравьи при строительстве, отсутствуют, и во многом механизмы строительства основаны на гипотезах и предположениях. Интерес именно к биоинспирированному подходу вызван тем, что, работая в реальных сложных, недетерминированных и слабоформализуемых средах, целесообразно иметь реализацию небольшого набора базовых механизмов управления и межагентного взаимодействия, адаптированных под конкретные условия, так, как это осуществляется в природе.

В этой работе будут рассмотрены два феномена строительной деятельности – строительство купола гнезда и создание тоннелей под ним. Литературы, посвященной гнездам муравьев, достаточно много. Так, структуры гнезд описываются в работе [Захаров и др., 2015] или в [Длусский, 1967], а в работе [Длусский, 1981], детально описываются действия муравьев при постройке гнезд. Здесь нам важно, что строительное поведение рабочих особей при этом состоит из серии стереотипных действий или блоков поведенческих актов, при этом сами эти акты (рытье, отгребание, формовка и т.п.), точнее, их реализация, нас не интересуют.

Интересно, что в той же работе [Длусский, 1981] отмечается, что не вся гнездостроительная деятельность муравьев может быть сведена к набору стереотипных блоков. Более того, там же говорится о программе 1975 г, моделирующей постройку гнезда муравьями. Характерно, что полученные результаты хорошо описывали прокладку хода, но не предсказывали ни ветвления ходов, ни постройки камер. Этот аспект будет обсужден в работе позже.

Итак, будем полагать, что нас интересует поведение агентов (строго говоря – аниматов как агентов, имитирующих поведение животных), направленные на а) создание купола, а также тоннелей, см. рис. 1,а, при этом «семантика» тоннелей и их структура нас не интересует (см. рис. 1,б).

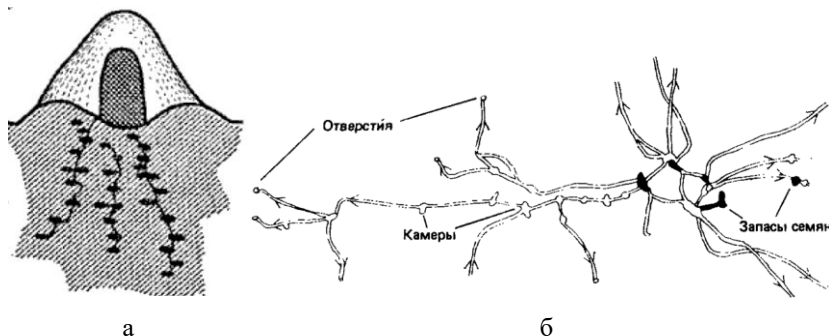


Рис. 1. а – гнездо с наземным куполом, [Захаров, 2018],
б – план гнезда, [Брайен, 1986]

2. Модель агента

Агент представляет собой объект, оснащенный сенсорами и способный к перемещению в трехмерном пространстве. Агент A задается пятеркой

(2.1)

где $name$ – имя агента, C – множество характеристик агента, R – его пространственное положение, S – состояние сенсорной системы, F – функция управления.

Функция управления F определяет пространственное положение агента:

(2.2)

Базовыми характеристиками агента для нашей задачи является тройка

где t – тип агента, r – размер (геометрические характеристики,) агента, ω – вес агента (), а q – состояние агента (элемент конечного множества,).

Пространственное положение R задается тройкой $(\alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll})$, где X – координаты агента, v – скорость движения ($v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$); A – тройка углов Эйлера, $\alpha_{yaw}, \alpha_{pitch}, \alpha_{roll}$ – углы рыскания, тангажа и крена соответственно.

Сенсорная система агента позволяет получить информацию о состоянии, координатах, скоростях и углах ориентации некоторого множества агентов, попавших в его зону видимости – некоторую область пространства вблизи агента, например, его переднюю полусферу.

Движение агента. Пусть направление и скорость движения агента определяется методом потенциальных полей. Это значит, что каждый агент из области видимости рассматривается как источник потенциала (положительного или отрицательного), и сумма этих потенциалов определяет значение функции управления

Обозначим через $\bar{x}, \bar{v}, \bar{A}$ средние значения координат, скорости и ориентации наблюдаемых в R агентов. Компоненты координат центра масс наблюдаемых агентов вычисляются как

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad \bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i, \quad \bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i. \quad (2.3)$$

Здесь x_i, v_i, A_i – компоненты вектора координат наблюдаемого агента, w_i – его вес. Аналогично определяются средние скорости и вектор ориентации.

Эти характеристики области позволяют задавать гибкие законы движения: не только двигаться по направлению, определяемому центром масс, но и согласовывать с другими агентами направление движения и скорость, решать задачу преследования и т.п.

Итак, на входе имеются состояние агента (x, v, A) и наблюдаемые величины $(\bar{x}, \bar{v}, \bar{A})$, задан закон взаимодействия в виде функции $U(x, v, A, \bar{x}, \bar{v}, \bar{A})$, а искомым выходом является управление u , возвращающее компоненты вектора управления (u_x, u_y, u_z) , причем

Например, для закона когезии (стремления держаться поближе к «своим») итоговая скорость в общем случае может определяться собственной скоростью агента и расстоянием до центра масс группы r_s , определяемым по X и X_s :

$$v = v_{max} \frac{r_s}{r_s + r_0}, \quad (2.4)$$

Здесь v_{max} – предельная скорость движения, k_v – некоторый коэффициент. А направление движения может быть определено из списка всех наблюдаемых "своих".

Если нас интересует простое движение агента по заданному пеленгу, заданному парой углов α и β , то $\alpha, \beta, h, 0$.

Общий закон управления движением. Пусть область D позволяет выделять классы объектов O_i , по отношению к которым реализуются разные законы движения F_i , как зависящие от области видимости (приближение, отталкивание), не связанные с ней (свободное блуждание, движение по пеленгу и т.д.).

Управление в общем случае будет определяться как

(2.5)

Здесь $\vec{F} = \sum \vec{F}_i$ – сумма векторов сил, определяемых положением объектов из области D по отношению к агенту (либо вектор силы между агентом и центром тяжести объектов из O_i), $\vec{r} = (x, y)$ –

(x, y) – координаты агента и объекта p , m – вес объекта p , r – расстояние от агента до объекта; $\vec{c} = (c_1, c_2, c_3)$ – вектор коэффициентов, значения которых определяют характер поведения агента (как и на что он реагирует). В простейшем случае подбор этих коэффициентов позволяет, например, реализовать классическую модель движения группы агентов К. Рейнольдса [Reynolds, 1987].

Перейдем далее к описанию более сложных форм поведения агента. При этом будем полагать, что все веса агентов постоянны и равны 1, а их линейная скорость v либо равна 0 (агент неподвижен), либо постоянна. Т.е. управление сводится к определению направления движения.

Отметим, что предлагаемые модели строительного поведения не сводятся исключительно к движению. Просто в цепочке триад "определение состояния" → "перемещение в целевую точку" → "выполнение операции" в данной работе рассматриваются первые два компонента в силу того, что "выполнение операции" – это уже частная задача, зависящая от конкретики операций и конструкции агента (робота).

3. Формирование купола

Пусть купол строится из "тел" самих агентов. Это допущение введено из соображений простоты, т.к. суть такой деятельности не будет отличаться от той, когда агенты будут нести строительный материал. Само строительство заключается в том, что агенты пытаются взобраться друг на друга, если позволяет высота, т.е. агент может взобраться на другого, если последний свободен. Это означает, что можно взобраться на высоту, оп-

ределяемую линейным размером агента. Условно такой процесс изображен на рис. 2,а. Агент может находиться в одном из трех состояний: *F* (свободен), *A* (активен) и *T* (заключительное неподвижное состояние). В состоянии *F* агент реализует процедуру поиска агентов, находящихся в состоянии *T* (агент ищет место строительства). Когда агент оказывается в непосредственной близости к агенту в состоянии *T*, он переходит в состояние *A*. В случае если агент в состоянии *A* может взобраться на соседа, он это делает и продолжает пребывать в этом активном состоянии. Если взобраться нельзя (не на кого или не позволяет высота), то агент переходит в состояние *T*. Такое поведение иллюстрируется на рис. 2,б.

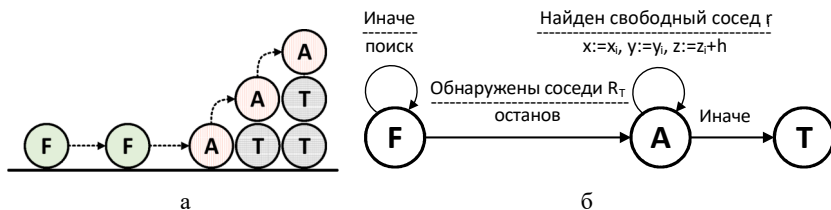


Рис. 2. а – стадии строительства, б – диаграмма состояний агента

Алгоритм работы агента *a* приведен ниже.

```

1: function Think(a)
2:   if      then return endif
3:   та      -- Неподвижные соседи аген-
4:   if qa=F then -- Агент свободен
5:     if      then -- Соседей нет
6:       -- Закон группового движения к агентам T
7:     Else
8:       qa←A
9:     Endif
10:    Return
11:  Endif
12:  -- Агент активен
13:  if      then -- Соседей нет
14:    qa ← T
15:    Return
16:  Endif
17:  for      do
18:    if can_climb(a, e) then -- Определение занятости соседа
19:      za←ze
20:      Return
21:    Endif
22:  Enddo
23:  qa←T

```

Временная сложность процедуры построения гнезда для N агентов, в силу ее линейности, оценивается как $O(N)$. На рис. 3 показаны результаты имитационного моделирования. Зеленым цветом обозначены агенты в свободном состоянии F , красным – в активном A , а черным – агенты в заключительном состоянии T .

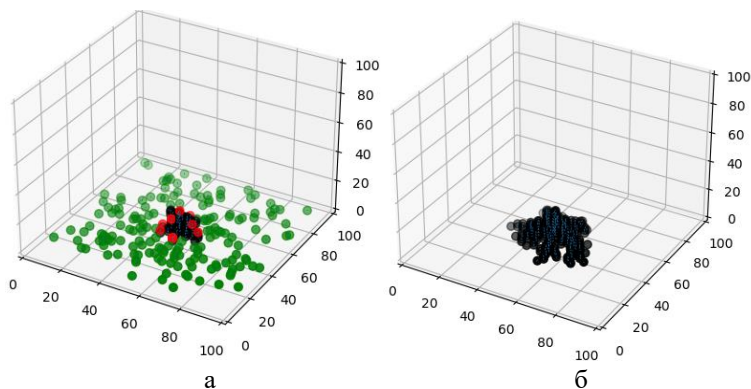


Рис. 3. а – начальный этап строительства, б – заключительный этап. Количество агентов – 200

Отметим, что здесь и ниже вычислительные эксперименты носили сугубо качественный, иллюстративный характер. Их цель – лишь продемонстрировать возможность формирования тех или иных структур.

4. Формирование тоннелей

Следующей задачей является прокладывание путей (тоннелей) в некоторой неоднородной области, которая содержит множество препятствий, мешающих движению робота. Для решения этой задачи следует определить условия окончания работы агентов, а также направление их движения. Далее будут рассмотрены два варианта расположения этих областей. Важно, что во всех случаях агенту достаточно иметь два состояния: активное A и терминальное T . Алгоритм работы агентов тоже будет одинаков за исключением условия окончания и значений параметров K закона движения (2.5).

Горизонтальные тоннели. Рассмотрим ситуацию, когда эта область находится на плоскости, а положение препятствий, размещаемых случайным образом, ограничено кругом. Принцип работы системы заключается в том, что в центр области помещается агент в состоянии T . Этот агент задает направление движения остальных. Обобщенный закон (2.5) определяется вектором K , задающим движение по направлению к области интереса, например:

= .

Здесь коэффициенты определяют значимость броуновского движения (k_{brown}), движения к области интереса ($k_{interest}$) и движения в определенном направлении, по пеленгу (k_{bear}).

Область интереса определяется множеством наблюдаемых агентов, находящихся в состоянии T . Алгоритм поведения агента a приведен ниже.

```
1: function ThinkTunnel(a)
2:   if      then return endif
3:   if eoj(a) then -- Условие завершения работы
4:      $q_a \leftarrow T$ 
5:   else
6:     -- Закон группового движения
7:   endif
```

Условие завершения работы агента заключается в обнаружении соседей в состоянии T :

```
1: function eoj(a)
2:
3:   return
```

На рис. 4 изображены начальная и конечная фазы прокладывания тоннелей.

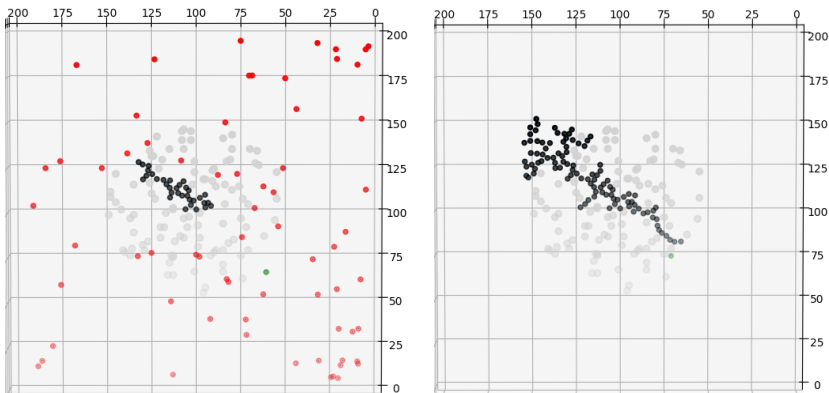


Рис. 4. Этапы прокладывания тоннелей по направлению к центру области. Красные точки – агенты в активном состоянии A , черные – в состоянии T , светло-серые точки – «грунт» (препятствие). Количество агентов – 100

Вертикальные тоннели. Здесь область представлена полуплоскостью. "Рытье" вглубь заключается в том, что характер движения определяется пеленгом, направленным, условно, вглубь. Условие завершения заключается в наличии соседей в состоянии T или достижении "максимальной глубины" h :

```
1: function eoj(a)
2:
3:   return
```

Направление движения вглубь определяется неким пеленгом, все остальные факторы не учитываются (только >0):

= .

Алгоритм такого поведения по-прежнему описывается процедурой *ThinkTonnel*.

Это означает, что все агенты независимо начинают рытье в глубину. Количество возможных ходов и их вид определяется насыщенностью препятствиями и характером их расположения. В том случае, когда агент не может продолжить движение и находится на одном месте некоторое продолжительное время, он заново начинает процедуру поиска возможного хода. На рис. 5,а представлены результаты такой работы агентов, причем некоторые тоннели не достроены.

Можно ввести некий иницирующий фактор начала строительства, и тогда мы будем иметь дело с агентами, имеющими три состояния: F – свободное, A – активное и T – терминальное. Все агенты находятся изначально в состоянии F , а в состояние A переходят тогда, когда вокруг есть соседи (в природе одним из иницирующих факторов начала работы является скученность, нехватка пространства). Результаты работы будут теми же, что и для агентов с двумя состояниями, см. рис. 5,б.

Временная сложность процедур построения тоннелей обоих видов для N агентов может быть оценена как , где L – насыщенность препятствиями области строительства.

Выше упоминалось, что реальные тоннели могут обладать весьма разветвленной структурой, содержать камеры, отводы и т.д. Как эти камеры и отводы появляются, на основании чего насекомые принимают решение рыть именно туда и именно так, биологов не интересует, равно как и ответ на вопрос, когда и на какой глубине останавливается процесс копания. На самом деле, есть основания полагать, что структура тоннелей определяется свойствами грунта (копаем туда, куда копаемся), а момент останова определяется тем, что объема внутреннего пространства тоннелей доста-

точно для того, чтобы «выключить» строительную программу. Если структура, форма тоннелей подтверждается результатами имитационного моделирования, то условия начала и окончания работы в рассматриваемой модели, конечно, весьма искусственны.

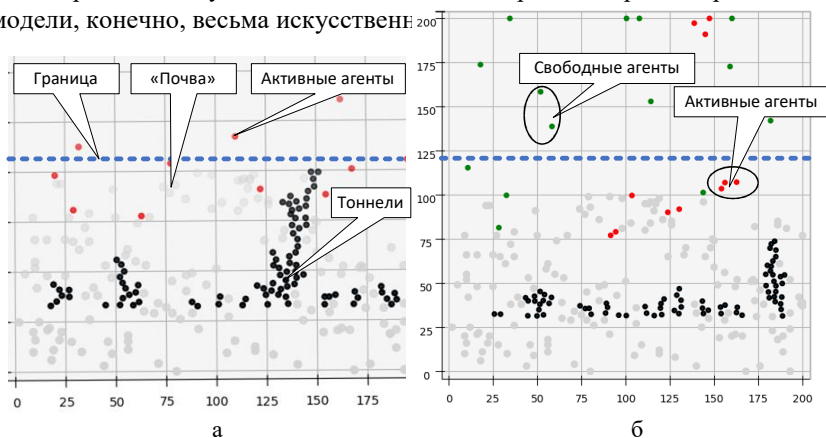


Рис. 5. Рытье тоннелей в глубину: а – агенты с двумя состояниями, б – с тремя состояниями. Количество агентов – 100

Заключение

В этой работе не рассматривались вопросы реализации собственно строительных операций, которые, безусловно, и важны, и интересны. Задача заключалась в ином: определить стратегию строительной деятельности, позволяющей агентам выполнять массовые операции, приводящие к созданию сложных структур. И при этом, подобно общественным насекомым, обходиться без плана, централизованного управления и используя косвенное межагентное взаимодействие.

Ключевыми факторами этой деятельности является определение условий ее начала и окончания. Относительная "простота" поведения при возведении купола объясняется тем, что имеется единственный центр строительства – агент, по каким-то причинам положивший туда строительный материал. Остальные просто подражают ему, переходя в активное состояние. Так же естественно определяется и окончание строительства (хотя в природе купол строится постоянно, а его рост ограничен только имеющимися ресурсами).

Со строительством тоннелей получается гораздо сложнее. Здесь факторы начала/окончания работ не столь очевидны. Кроме того, рытье тоннелей подразумевает "параллельную" работу многих временных "бригад". Особенно остро этот вопрос касается прокладки вертикальных тоннелей.

Повторим, что рассмотренные модели можно назвать частично биоинспирированными, т.к. представления о характере деятельности объектов для подражания – насекомых, муравьев – носят зачастую весьма фрагментарный характер. Это вполне естественно: вряд ли биологи изучают поведение насекомых с целью описания алгоритма поведения для робота. Но это же заставляет упрощать модели поведения, привносить в них дополнительные факторы-гипотезы, т.е. делать все то, за что критикуют биоинспирированные подходы.

Список литературы

- [Брайен, 1986] Брайен М. Общественные насекомые. Экология и поведение. – М.: Мир, 1986. – 396 с.
- [Длусский, 1967] Длусский Г.М. Муравьи рода Формика. – М.: Наука, 1967. – 233 с.
- [Длусский, 1981] Длусский Г.М. Муравьи пустынь. – М.: Наука, 1981. – 230 с.
- [Захаров, 2018] Захаров А.А. Муравей. Семья. Колония. – М.: Фитон XXI, 2018. – 192 с.
- [Захаров и др., 2015] Захаров А.А., Захаров Р.А., Федосеева Е.Б. Использование параметров гнезда рыжих лесных муравьев в мониторинге муравейников // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2015. – Т. 26, № 1. – С. 68-90.
- [Czyzowicz et al., 2021] Czyzowicz J., Dereniowski D., Pelc A. Building a Nest by an Automaton. // Algorithmica. – 2021. – Vol. 83, No. 1. – P. 144-176.
- [Faria Dias et al, 2021] Faria Dias P.G. и et al. Swarm Robotics: A Perspective on the Latest Reviewed Concepts and Applications // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 6. – P. 1-30.
- [Huang et al, 2022] Huang L.R. et al. Construction and Excavation by Collaborative Double-Tailed SAW Robots // IEEE Robot. Autom. Lett. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – P. 3742-3748.
- [Parker et al., 2003] Parker C.A.C., Zhang H., Kube C.R. Blind bulldozing: Multiple robot nest construction. – 2003. – Vol. 2. – P. 2010-2015.
- [Reynolds, 1987] Reynolds C.W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model // Proc. 14th Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech. SIGGRAPH 1987. – 1987. – Vol. 21, No. 4. – P. 25-34.
- [Werfel, 2012] Werfel J. Collective Construction with Robot Swarms // Morphogenetic Engineering, Toward Programmable Complex Systems. – Springer, 2012. – P. 115-140.