

Н.А. Жильцов, А.В. Корчагина, Е.Е. Овсянникова*
**СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРИЗНАКОВ
ФАСЕТОЧНОГО ЗРЕНИЯ†**

Аннотация. Одной из тенденций развития СТЗ мобильного робота являются природоподобные технологии. В данной работе особенности зрения и поведения муравьев рассмотрены с технической стороны. На основе этих данных разработан прототип биоинспирированной системы технического зрения. Прототип состоит из трех модулей: первичной обработки изображения, выделения объектов и распознавания сцен. В качестве апробации были проведены эксперименты на сценариях, заимствованных из работ мирмекологов.

Ключевые слова: биоинспирированные системы, техническое зрение, зрение насекомых, биоробототехника.

1. Введение. В настоящее время заимствование конструкций и технологий из природы (моделей поведения, особенностей анатомии, зрения насекомых и млекопитающих) становится неотъемлемой частью робототехники. Биоробототехника не только использует модели поведенческого плана, она берёт и особенности строения живых организмов, в частности, особое место занимает зрение.

Известен обширный ряд методов, позволяющих распознать и выделить элементы пространства. В статье [6] приводится описание основных подходов к решению задачи создания системы технического зрения (СТЗ): стерео-зрение, SfM (Structure-from-Motion), детектирование объектов и другие. Однако для системы зрения, в основе которой заложено зрение насекомого (например, муравья), методов из [6] недостаточно. Прежде чем выделять объекты, необходимо провести обработку изображения в реальном времени, а для того, чтобы на основе ситуации выбрать тип поведения, необходимо распознать сцену для дальнейшей классификации. Поэтому методы обработки зрительной информации для биоинспирированной системы включают:

- обработку поступающего изображения в реальном времени;

* Жильцов Николай Александрович — магистр, nitronike@mail.ru; Московский государственных физико-технический институт, Москва
Корчагина Александра Вячеславовна — магистр, a.v.korchagina@yandex.ru; Московский государственных физико-технический институт, Москва
Овсянникова Елена Евгеньевна — инженер-исследователь, eovsyann@yandex.ru; Научно-исследовательский центр Курчатовский институт, Москва

†Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 15-01-07900, РФФИ 16-29-04412 офи_м.

- выделение объектов на изображении;
- целенаправленный анализ зрительной сцены.

Кроме того, зрительная система робота должна адаптироваться к изменениям внешней среды. Один из путей создания систем технического зрения – использование методов обработки изображений, имитирующих методы, используемые зрительными системами человека и животных (гибкая, быстро перестраиваемая нейросетевая обработка информации). Существует ряд исследовательских групп, изучающих поведение автономных мобильных роботов, зрение которых основано на зрении насекомых и млекопитающих, в реальных условиях. Примером таких работ является робот-рыба, который создан в центре по зрительным исследованиям Университета г. Йорка, Торонто, Канада. Такие роботы-рыбы с цветным, стереоскопическим, фовеальным зрением способны устойчиво преследовать жертву, удерживая цель в поле зрения и используя «мышечное» управление действиями [4].

В данной работе особое внимание уделяется зрению насекомых, в особенности – муравьёв. Именно муравьи являются наиболее интересными объектами для подражания и проведения аналогий в групповой робототехнике как пример даже не социального общества, а эусоциального (в высшей форме социального) поведения: разделение труда, репродуктивная дифференциация, совместная организация труда и прочее [3]. Другим примером является т.н. эволюционная активная зрительная система мобильного робота [10], которая позволяет автоматически сканировать изображение, изменяя разрешающую способность и решая простейшие задачи распознавания. Система состоит из сетчатки (содержащей 9 зрительных нейронов), управляемой эволюционно полученной нейросетью. В рамках этого подхода также реализованы робот-муравей и летающий робот со зрительным самоуправлением.

Не все муравьи ориентируются по большей части на обоняние, есть, например, два вида австралийских муравьёв, которые при плохом (с плохим разрешением) зрении опираются на цветовое восприятие [11]. Исследователи из AILab Университета Цюриха создали робота-муравья Sahabot (Sahabot2), который умеет определять поляризованность света, как это делают насекомые, и ориентироваться на местности [9].

Далее рассмотрим биологические особенности зрения и поведения муравьёв и на основе полученной информации опишем концепцию структуры СТЗ мобильного робота. Также будут

приведены модели и алгоритмы выделения признаков, определения объектов и распознавание сцен, аналогичные тем, которые видит муравей.

2. Особенности зрения и поведения муравьев. Муравьи – самое эволюционно продвинутое семейство насекомых с точки зрения поведения, экологии и физиологии [8]. Их колонии представляют собой сложные социальные образования с разделением труда и системами коммуникаций, которые позволяют членам муравейника координировать свои действия при выполнении задач, которые не могут быть выполнены одним индивидом.

Фасеты. Для ориентации на местности муравьи используют фасеточное зрение. Принцип фасеточного зрения позволяет при сохранении небольших размеров глаза достичь необходимой разрешающей способности, избегая негативного влияния дифракции света [1]. Устройство фасеточного глаза позволяет значительно увеличить угол обзора за счёт размещения омматидиев (структурных элементов глаза) на выпуклой поверхности, например, полусфере. Отмечается также однородность чувствительности, большая глубина изображаемого пространства и стереоскопичность зрения. Фасеточный глаз устроен так, что у соседних омматидиев зрительные оси сильно сближены между собой, что дает насекомым способность лучше различать точки, находящиеся близко друг к другу. В результате, острота их зрения примерно в 3 раза выше, чем у человека. Однако при удалении объекта от глаза начинает проявляться своеобразная “близорукость”: объект начинает попадать в поле обзора меньшего числа омматидиев.

В фасеточном глазе дискретизация пространства осуществляется в пространстве объектов – каждая фасетка, или микрообъектив, видит только “свою” область пространства [7]. Из этого следует, что глазу насекомого не требуется фокусировка на объекте.

Сложная структура фасеточного глаза не позволяет сделать его подвижным. С другой стороны, строгая фиксация глаза чётко привязывает поле обзора к положению насекомого в пространстве, что позволяет быстрее определять собственное положение без дополнительных поправок на поворот глаза. Еще одно преимущество фасеточных глаз состоит в том, что множество омматидиев позволяет лучше следить за мелькающими и быстро перемещающимися объектами.

Насекомые могут воспринимать поляризацию света. Они не только видят все объекты объемными, но и различают тонкие оттенки

и переливы цветов, недоступные человеческому глазу. Так, зрение муравья трихроматическое, при этом детектируемый спектр смещён к более коротким волнам. Они хорошо различают ультрафиолетовый свет, а также длины волн, соответствующие синему цвету и широкому диапазону жёлто-зелёного цвета.

Несмотря на многочисленные данные о зрительных рецепторах муравьев, понять, как происходит построение образа в нервной системе насекомого, достаточно сложно. Для того чтобы формирование образа было полным, необходимо изучить поведение муравьев и определить, на что они реагируют и что воспринимают. Для этого следует обратиться к трудам таких исследователей насекомых, как Ж.А. Фабр, Г.М. Длусский, А.А. Захаров, П.И. Мариковский.

На основе трудов ряда мирмекологов можно выделить некоторые базовые примеры поведения муравьев: нападение, поведение при опасности, пищевое поведение и забота о потомстве. А.А. Захаров характеризует муравьёв следующим образом: «контакты, обмен тактильными сигналами, обмен пищей, групповые охота и транспортировка добычи в любой части охраняемой территории - вот что характеризует в этом отношении рыжих лесных муравьёв» [2].

Муравьи поочередно нападают на добычу и одновременно бегают вокруг в расчете привлечь еще охотников. Если это происходит вблизи муравейника, шансов на помощь больше. Иногда муравей быстро обегает вокруг свою добычу в надежде встретиться с другим охотником и привлечь его на помощь [5]. На основе этой информации происходит построение моделей дальнейшего поведения муравья в модуле распознавания сцен.

3. Концепция биоинспирированной СТЗ на основе зрения муравьев. Рассмотрим далее структуру биоинспирированной СТЗ. На рисунке 1 изображена схема прототипа СТЗ. Прототип состоит из трех модулей:

1. рецепторный;
2. слой выделения объектов;
3. распознавания сцен.

Модули обмениваются информацией между собой. На вход в первый модуль поступает видеопоток данных, на выходе первого и второго модулей – множество первичных признаков и объектов соответственно. Результатом работы СТЗ должен стать распознанный класс ситуации. Итак, целью работы системы является умение робота

классифицировать наблюдаемую ситуацию и принять решение, то есть выполнить соответствующую поведенческую программу.

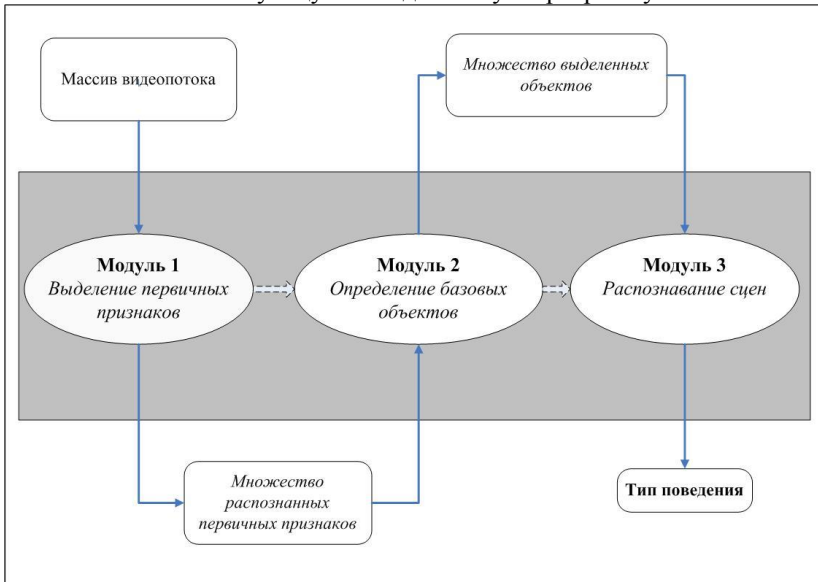


Рис. 1. Архитектура системы технического зрения

СТЗ решает следующие задачи:

1. Выделение первичных признаков.
2. Определение базовых объектов.
3. Распознавание сцен.
4. Создание моделей и алгоритмов.

В системе определялись классы ситуации, инициирующие несколько видов поведения: пищевое, опасность и угроза.

4. Реализация СТЗ

Модуль распознавания первичных признаков. Данный блок отвечает за первичную обработку зрительной информации и работает непосредственно над изображением. Его задача – выделить основные составляющие объектов и с помощью формального языка передать их описание следующему модулю. Входными данными для этого модуля является изображение – непрерывная последовательность кадров – трёхканальный двумерный массив видеопотока, формируемого веб-камерой, имитирующей омматидий муравья. Первичными признаками являются: форма/контур; цвет; движение/неподвижность; размер;

сложность объекта (количество фигур, из которых состоит объект); расстояние; освещенность.

На выходе формируется множество распознанных первичных признаков:

- Id – идентификатор группы признаков;
- Shape –предположительная форма контура;
- Direction – расположение в кадре (x,y);
- Distance – расстояние до контура;
- Color – преобладающий цвет в области, ограниченной данным контуром;
- Brightness – освещённость объекта;
- Direction – направление на объект (расположение в кадре);
- Motion – характер движения;
- Motion direction – направление движения.

Модуль определения объектов из множества признаков. На вход в данный модуль подается множество первичных признаков, сформированное уровнем ниже. Данное множество проходит обработку и на выходе формируется множество объектов для следующего уровня, информацию об их количестве и расположении в поле зрения муравья и информацию об окружающем мире – уровень освещенности.

Выделяются следующие объекты:

- «Друг» (тип «муравей»);
- «Враг» (тип «муравей»);
- Тля – еда живая;
- Еда неживая;
- Личинка – потомство;
- Дерево.

Описание каждого объекта включает в себя его номер, тип, расстояние до него, характер его движения (если оно присутствует), направление движения.

В наших экспериментах будем полагать, что самым важным для муравья является умение выделять других муравьев, чтобы выстраивать соответствующую линию поведения, поэтому в качестве примера рассмотрим определение объекта типа муравей. Также является немаловажным определять, друг или враг находится перед муравьем, поэтому введем понятия «свой» и «чужой». Объекты «свой» и «чужой» будут одинаковой формы, но разных цветов, поэтому необходимо выяснить, как определять объект «муравей».

Муравей будет обозначаться двумя прямоугольниками, стоящими друг на друге. "Свой" муравей будет оранжевого цвета, все остальные цвета будут означать "чужих" муравьев.

Набор правил, позволяющий определить объект "муравей", состоящий из одного или двух блоков (индексы относятся к первичным признакам соответствующих блоков):

```
if (Shape1 = Shape2 and Shape1 = 'rect') and (Color1 = Color2) and ((|y1 - y2| - (High1 + High2)) / 2 | < eps) and (|x1 - x2| < eps) then
  if (Color1 = 'orange') then return 'ant-friend'
  else return 'enemy'
else
  if (Shape1 = 'rect') then
    if (Color1 = 'orange') then return 'ant-friend'
    else return 'enemy'
  else return NULL -- анализ объекта для другой категории
```

Модуль распознавания сцен на основе данных об объектах.

Этот блок получает на вход множество объектов и их количество. На основе полученной информации происходит анализ сцены по определенным правилам. Существуют разные механизмы распознавания сценариев, например, графовый механизм, в котором реализуется поиск подграфа в графе, продукционная система на основе правил и другие. Для решения поставленной задачи выбрана продукционная система как наиболее простая.

Всего возможно три варианта поведения муравья: пищевое, угрожающее и поведение при опасности. Для распознавания сцены используется классификатор в виде набора продукций.

Правила, на основе которых формируются поведение муравья:

1. Если вижу «еда» (любая), то идти к ней.
2. Если вижу «еда» (любая) и 1 муравья-врага, то нападение.
3. Если вижу муравья-врага, муравьев-друзей и «еда», то нападение.
4. Если вижу много личинок и муравья-врага, то нападение.
5. Если вижу муравья-врага, то убегание.
6. Если вижу «еда» и много муравьев-друзей, то идти к еде.
7. В любой другой ситуации ничего не делаем.

5. Результаты экспериментов. Для проверки работоспособности системы были созданы сцены, характер которых основывался на примерах, приведенных в [8] и [5].

Сценарий 1. Реализован аналог групповой работы муравьев – сбор пищи. На Рис. 2 изображены два дружественных муравья рядом с неживой едой.

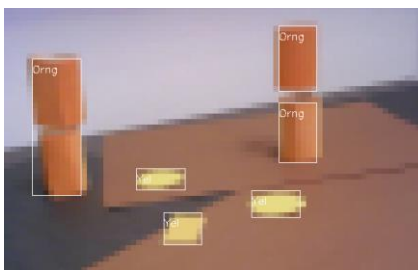


Рис. 2. Сценарий 1

Два рыжих вертикальных цилиндра, расположенных один на другом, обозначают двух дружественных муравьев. Желтые овалы обозначают неживую еду. В данном сценарии робот-муравей распознает муравьев-друзей и неживую еду и принимает решение о пищевом поведении – идет к еде, чтобы помочь дружественным муравьям перенести ее в муравейник.

Сценарий 2. Реализован аналог встречи муравьев двух видов на территории одного из видов. Рассмотрена ситуация с двумя дружественными и тремя вражескими муравьями.

Конструкция из двух вертикальных цилиндров синего цвета обозначает муравьев-врагов, рыжего цвета – муравьев-друзей. Горизонтально расположенный цилиндр – это вражеский муравей, находящийся под другим углом (Рис. 3). Робот-муравей анализирует сценарий и распознает трех муравьев-врагов на своей территории, вместе с этим он также распознает муравьев-друзей и принимает решение о нападении.

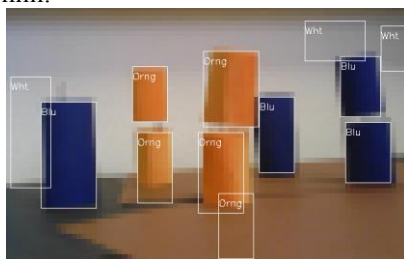


Рис.3. Сценарий 2

Сценарий 3. Неживая еда и тля (источник «живой» еды) – пример из сценария распознавания муравьем еды. Два больших зеленых овала – тля (источник «живой» еды муравья), четыре маленьких овала – «неживая» еда (Рис. 4). В данном сценарии робот-муравей распознает еду и принимает решение о пищевом поведении – идет к еде.

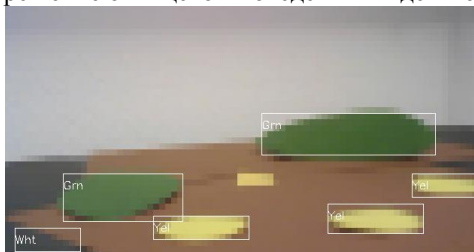


Рис.4. Сценарий 3

Сценарий 4. На Рис. 5 типичный сценарий угрозы жизни муравья – вокруг множество вражеских муравьев (синие прямоугольники). В этой ситуации муравей должен убежать.

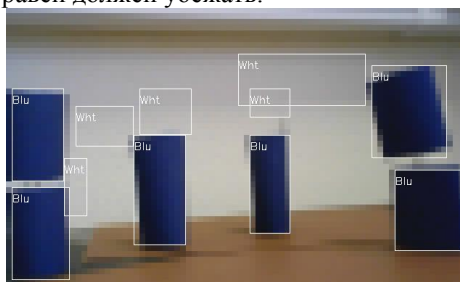


Рис.5. Сценарий 4

Выводы. Особенностью предложенного подхода является создание отдельных модулей для распознавания признаков, анализа сцен и принятия решений на основе анализа. Эксперименты подтверждают корректность разработанных моделей и алгоритмов, что можно увидеть на рис. 2-4. На данном этапе решалась задача управления верхнего уровня, т.е. муравей-робот анализировал ситуацию, основываясь на полученном изображении, и принимал решение о выборе типа поведения: пищевое, нападение или реакция на опасность – убежание. Дальнейшим шагом является доработка механизмов для решения задач оперативного управления (слежение, захват, приближение и проч.).

Литература

1. Глупов В.В. С точки зрения насекомого [Электронный ресурс]. URL: http://eco.nsc.ru/lectures/SFH_Glupov_Insect_vision_RUS.pdf.
2. Захаров А.А. Муравей, семья, колония, Москва: Наука, 1978.
3. Карпов В.Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике // Управление большими системами № 59, 2016, с. 165–232.
4. Кузьмина М.Г. Нейроморфное моделирование и биоробототехника, 2004.
5. Мариковский П.И. Муравьи. Кто они, 2007.
6. Московский А.Д. Об одном методе распознавания объектов с неполностью определенными признаками. Казань, 2016, с. 137–146.
7. Соломатин В.А. Фасеточное зрение: перспективы в оптико-электронных системах, 2009, с. 22–26.
8. Фабр Ж.А. Жизнь насекомых, Эксмо, 1963.
9. Moller R., D. Lambrinos, R. Pfeifer, T. Labhart, and R. Wehner. Modeling Ant Navigation with an Autonomous Agent, 1994.
10. Nolfi S., Floreano D. Synthesis of autonomous robots through evolution // Trends in Cognitive Sciences, 2002, № 1 (6), p. 31–37.
11. Ogawa Y., Falkowski M., Narendra A, Zeil J, Hemmi JM. Three spectrally distinct photoreceptors in diurnal and nocturnal Australian ants, 2015.

N.A. Zhiltsov, A.V. Korchagina, E.E. Ovsyannikova

THE SYSTEM OF TECHNICAL VISION BASED ON THE RESULTS OF FACET VISION PRIMARY FEATURE SELECTION

Abstract. One of the trends in the development of mobile robot's vision systems is nature-like technologies. In this paper, the features of the vision and behavior of ants are considered from a technical point of view. On the basis of these data, a prototype of a bioinspired vision system was developed. The prototype consists of three modules: primary image processing, object selection and scene recognition. As an approbation, experiments were performed on scenarios borrowed from descriptions of ant's life by well-known authors.

Keywords: bioinspired systems, computer vision, insect vision, biorobotics.

Zhiltsov Nikolai A. — master of science, nitronike@mail.ru; Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow

Korchagina Alekhandra V. — master of science, a.v.korchagina@yandex.ru; Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow

Ovsyannikova Elena E. — engineer-investigator, eeovsyan@gmail.com; National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow