

А. Д. Московский, инженер-исследователь, moscowskyad@gmail.com,
Е. В. Бургов, инженер-исследователь, burgov.ev@yandex.ru,
Е. Е. Овсянникова, инженер-исследователь, eeovsyana@gmail.com,
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

Зрительный анализатор анимата как основа семантики сенсорной системы робота¹

Предлагается структура так называемого зрительного анализатора анимата, имитирующего работу системы восприятия муравья. Описывается метод распознавания объектов путем их декомпозиции на признаки, приводится алгоритм распознавания сложных объектов и сцен, основанный на поиске изоморфных подграфов. Показана принципиальная возможность использования подобной системы технического зрения для распознавания поз аниматов, сцен с их участием, простых кинооптических реакций. Представлена архитектура системы распознавания с интерфейсом уровня семантической сети.

Ключевые слова: зрительный анализатор, анимат, групповая робототехника, социум роботов, моделирование, распознавание объектов, система технического зрения

Введение

Одним из перспективных направлений групповой робототехники являются исследования в области создания моделей социального поведения применительно к группам роботов. Конечной целью этих исследований является реализация сообществ роботов, организованных как социум, что должно создать условия более высокого уровня решения групповых задач. Подобный социум в конечном итоге предназначен для решения практических задач, например, патрулирования и охраны обширных территорий [1], поддержания энергетической автономности и т. д., однако в основе построения как самих механизмов построения социума, так и архитектур роботов, способных к социальному взаимодействию, лежат заимствованные из биологии (прежде всего этологии) принципы.

Заимствование конструкций и технологий из природы (моделей поведения, особенностей анатомии, зрения животных) давно является неотъемлемой частью робототехники. При этом, однако, биологически инспирированная робототехника в основном использует не столько модели поведения, сколько особенности строения живых организмов — морфологию, элементы сенсорной системы и т. д.

В групповой робототехнике для обозначения объекта исследования обычно используются термины "робот" или "агент". При моделировании

социальных сообществ, где основной акцент делается именно на поведение, применение этих слов не совсем удобно. Термин "робот" обычно подразумевает некий технический характер объекта моделирования. В то же время под "агентом" понимается в основном некая сугубо абстрактная, программная сущность. В этом смысле более удобным является использование термина **анимат**. Под аниматом может пониматься как модель, так и техническое устройство [2, 3], однако этот термин подчеркивает свою биоинспирированность, ориентацию на поведенческие аспекты. Аниматы — это искусственные животные, которые в процессе выживания должны приспосабливаться к сложным и враждебным средам. Поведение анимата нацелено на достижение полезных результатов. Считается, что у анимата есть потребности, например, в питании и безопасности. С этими потребностями связано поведение, количественно характеризующееся мотивациями [4].

Создание искусственных социумов роботов (аниматов) может и должно быть основано на исследованиях организации сообществ животных. Одни из самых совершенных сообществ в мире животных и наиболее сложные сообщества среди насекомых формируют муравьи [5]. Поэтому для отработки принципов социальных взаимодействий в группах роботов представляется оправданным взять за основу принципы организации социума и модели поведения, присущие муравьям. Важнейшую роль в восприятии мира муравьем и, как следствие, в его социальном поведении играет зрительная система. Именно она обеспечивает распознавание "своих" и "чужих", определение ситуаций и анализ сцен, наблюдаемых аниматом, ориентацию в пространстве и т. д.

¹ Работа поддержана грантом РНФ № 16-11-00018 (введение, описание архитектуры зрительного анализатора, моделирование зрительных систем, вопросы проектирования системы технического зрения) и грантом РФФИ офи_м № 16-29-04412 (аппаратная реализация, эксперименты, вопросы поведения анимата на основе сигналов анализатора).

Настоящая работа посвящена вопросу возможного устройства зрительной системы анимата. При этом речь не идет о вопросах создания того, что называется обычно системой технического зрения. Здесь нас интересует некая комплексная система восприятия зрительной информации, решающая в конечном итоге задачу распознавания и классификации сцен. Такая система называется зрительным анализатором.

В работе сначала обсуждаются вопросы, касающиеся самого понятия анализатора. Далее рассмотрены биологические аспекты зрительного восприятия аниматов, важные с точки зрения решаемых аниматом-муравьем задач. После этого определены требования для проектируемого анализатора и изложен подход к системе распознавания. В заключение представлены программная и аппаратная реализации и результаты проведенных экспериментов.

1. Зрительный анализатор и сенсорная система

Сенсорная система (анализатор по И. П. Павлову) **в физиологии человека и животных** — функциональная единица нервной системы, включающая рецепторную, проводящую и центральную (обрабатывающую информацию) части [6, 7]. В данной статье **анализатором** называется комплекс аппаратных и программных средств, выполняющих функции зрительных сенсоров, обработки видеопотока, распознавания объектов и сцен. Результатом работы анализатора является комплекс сигналов, направленный на формирование социального поведения анимата. Известен обширный ряд методов, позволяющих распознавать и выделять элементы пространства. В работе [8] приводится описание основных подходов к решению задачи создания системы технического зрения (СТЗ): стереозрение, SfM (Structure-from-Motion), детектирование объектов и др. Однако для создания зрительной системы анимата-муравья методов, описанных в данном источнике, недостаточно. Прежде чем выделять объекты, необходимо провести обработку изображения в реальном времени. Для того чтобы на основе ситуации выбрать тип поведения, необходимо распознать сцену для дальнейшей классификации. Поэтому методы обработки зрительной информации для проектируемого анализатора должны включать: обработку поступающего изображения в реальном времени; выделение объектов на изображении; целенаправленный анализ зрительной сцены.

Анализатор должен быть выполнен в общей парадигме с системами управления поведением аниматов. Он должен иметь интерфейс, позволяющий изменять описание объектов на уровне семантических сетей. Это требование сформули-

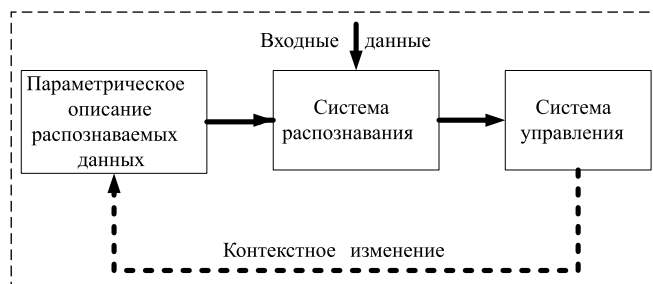


Рис. 1. Схема взаимодействия анализатора и модуля управления анимата

ровано из тех соображений, что объект управления воспринимает распознанные им объекты и ситуации в зависимости от дополнительного контекста. Примером такой ситуации, когда важен контекст, может быть текущее положение анимата — одна и та же визуальная ситуация может восприниматься по-разному в зависимости от того, на какой территории происходит действие: на своей, на нейтральной или на вражеской. Требуется задавать распознаваемые объекты таким образом, чтобы управляющий модуль имел возможность вносить изменения в их описание в процессе работы (рис. 1).

Суть работы заключается в проектировании зрительного анализатора, способного обеспечивать распознавание аниматов-муравьев, определение их поз и киноптических реакций в группах искусственных агентов. Далее рассмотрены параметры различных зрительных сенсорных систем животных и особенности поведения, связанные со зрением. На основе этого описания определена концепция и параметры анализатора, признаки, объекты и сцены, которые необходимо распознавать. Как результат, описано унифицированное программное обеспечение, применимое для различных аппаратных средств.

Биологические основы моделирования зрительного анализатора. Одной из систем коммуникационных навыков общественных насекомых, в том числе муравьев, является **кинопсис** (язык поз) [9]. Это комплекс реакций, основанных на зрительном восприятии характерных поз и движений. С помощью кинопсиса регулируются различные социальные взаимодействия индивидов в малых (от двух особей) и больших группах. Для моделирования киноптических реакций требуется создание аналога зрительной сенсорной системы муравьев, который имел бы возможность распознавать индивидов и воспринимать визуальные сигналы от них.

В животном мире существует огромное разнообразие органов зрения. Они могут быть представлены отдельными светочувствительными клетками, их группами, простыми и сложными органами зрения — глазами [10]. Для создания искусственного анализатора, способного собирать

визуальную информацию для формирования социального поведения, целесообразно рассматривать органы зрения, наиболее приспособленные для этого. Это фасеточные глаза насекомых и камерные глаза млекопитающих и птиц. Первые можно рассматривать и использовать их аналоги при моделировании компактных роботов, вторые — при создании/модификации крупных агентов. Выполняя сходные функции, камерные и фасеточные глаза отличаются по морфо-физиологическим характеристикам [11, 12].

Моделируемые формы поведения муравьев. При ориентации, коммуникации, поиске пищи и т. д. муравьи используют различные сенсорные системы. Зрительные органы у разных видов муравьев имеют свои структурные и функциональные особенности. Для многих видов глаза являются доминирующим органом чувств, по крайней мере, во внегнездовой деятельности рабочих. Примером могут служить виды родов *Gigantiops* (Roger, 1863), *Harpegnatos* (Jerdon, 1851) и другие активные охотники. Рабочие особи других видов, например обитающих в почве и древесине *Lasius flavus* (Fabricius, 1782) и *Lasius umbratus* (Nylander, 1846), имеют слабое зрение. Для таких видов возрастает роль тактильных и обонятельных сенсорных систем.

Основным модельным объектом для создания аниматов в настоящей работе являются муравьи рода *Formica* (Linnaeus, 1758). Выбор модельного объекта связан с доступностью (виды *Formica* широко распространены в средней полосе России [13]), развитостью социальных структур [5] и разнообразием индивидуального и группового поведения особей [14, 15]. Они отличаются относительно хорошим зрением, реализуют многочисленные киноптические реакции.

Агрессивная поза. Муравей *Formica*, находящийся на куполе гнезда и обнаруживший опасность, может принимать агрессивную позу (рис. 2, а). Увидевшие это рабочие делают то же самое, в случае необходимости разворачиваясь в направлении угрозы.

Транспортировка, "пассивная поза". По различным причинам у муравьев может появляться необходимость транспортировать друг друга. У видов *Formica* возможна транспортировка рабочих (рис. 2, б), при этом переносимый рабочий

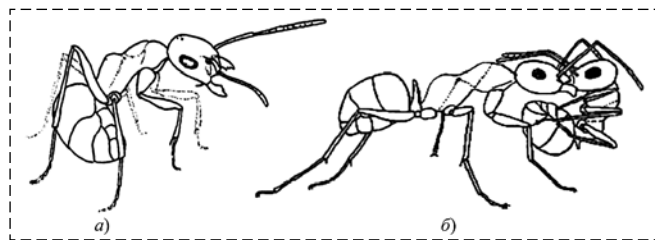


Рис. 2. Агрессивная поза (а) и транспортировка (б) у рыжих лесных муравьев (группа *Formica rufa*) (по работе [13] с изменениями)

подгибает брюшко к груди и складывает ноги (компактно "упаковывает" себя). Это положение тела условно назовем пассивной позой.

2. Практика моделирования биологически инспирированных зрительных систем

Существует ряд исследовательских групп, изучающих поведение автономных мобильных роботов, зрение которых разработано по аналогии со зрением насекомых и млекопитающих, в реальных условиях. Одним из примеров может служить так называемая эволюционная активная зрительная система мобильного робота [16], которая позволяет автоматически сканировать изображение, изменяя разрешающую способность и решая простейшие задачи распознавания. Система состоит из сетчатки (содержащей девять зрительных нейронов), управляемой полученной нейросетью. В рамках этого подхода также реализованы робот-муравей и летающий робот со зрительным самоуправлением.

Известен анимат iRat, несущий видеокамеру на борту и использующий видеоданные для решения задачи навигации построения карты местности [17]. В работе [18] модель анимата использует систему, основанную на нейросети для задачи избегания столкновения с препятствиями во время движения. Исследователи из AILab Университета Цюриха создали робота-муравья Sahabot (Sahabot2), который умеет определять поляризацию света, и ориентироваться по ней на местности [19].

Интересна работа [20], в которой описывается создание искусственных аналогов глаз членистоногих с помощью почти полных полусферических камер (около 160°). Оптическая подсистема реализована путем объединения эластомерных составных оптических элементов и деформируемых массивов тонких кремниевых фотодетекторов в интегрированные листы, которые могут быть трансформированы в полусферические формы для встраивания в камеры. В статье [21] описывается метод проектирования сложных глаз с панорамным, неискаженным полем зрения. Представленный прототип представляет собой одну из многих возможных реализаций принципа проектирования CurvACE [22]. Авторы создали компактный, легкий, энергоэффективный миниатюрный датчик зрения, который подходит для применения в широком спектре задач, требующих быстрого обнаружения движения на панорамном поле зрения.

3. Параметры моделируемого анализатора

Для моделирования зрительного анализатора анимата-муравья накладываются следующие требования:

1) зрительный модуль должен уметь распознавать рабочих особей муравьев. Желательно отличать особей своего и чужого видов. Также анализатор должен определять расплод: яйца, личинок и куколок;

2) необходимо различать позы рабочих муравьев. Минимальный набор для распознавания: "обычное" положение тела, агрессивная поза, поза для транспортировки ("пассивная");

3) анализатор должен уметь определять число указанных выше объектов в поле обзора, выдавать информацию об изменении их числа;

4) на основании данных о числе, состоянии и взаимном расположении распознанных объектов необходимо классифицировать модельные ситуации:

- "сигнал тревоги" — "свой(и)" муравей(ьи) принял(и) агрессивную позу;
- "транспортировка" — муравей(ьи) переносит(ят) другого (их);
- "опасность для расплода" — вражеская(ие) особь(и) рядом с расплодом;
- "конфликт" — обнаружены "свои" и "чужие" рабочие особи.

4. Подход к проектированию системы распознавания

Для решения поставленных задач был выбран атрибутный подход к распознаванию и описанию объектов. Согласно ему каждый объект пространства реального мира содержит ряд характерных атрибутов или признаков. В качестве таких признаков может выступать как цвет или узор покрытия данного объекта, так и его форма, динамика, размеры и прочие особые характеристики. Атрибутное представление удобно и с точки зрения описания, ведь для задания объекта достаточно перечислить все (или основные) его признаки, и с точки зрения реализации системы. Последний пункт продиктован текущим развитием данной области и наличием ряда методов и алгоритмов обработки и фильтрации изображений, позволяющих выделить тот или иной признак. Это могут быть, например, детекторы цвета/узора и детекторы контуров/формы наблюдаемого объекта, нейросетевые детекторы определенных признаков и т. п. Также удобство данного подхода заключается в расширяемости системы, так как реализация новых детекторов, в дополнение к хорошо известным и используемым, не требует изменения системы в целом. Данный подход к распознаванию можно считать статистическим. В работе [23] упоминается, что при использовании такого подхода использование контекстной информации трудоемко, однако дальнейшее предложенное расширение подхода призвано устранить эту проблему.

Описание объектов. Базовой единицей вышеописанного подхода является атрибут (a). Каждый атрибут (a) принадлежит своему классу (A). Простейшими примерами классов атрибутов могут выступать классы цвета, формы и т. д. Объект (o) образуется набором атрибутов (a_i), которые принадлежат соответствующим классам:

$$o = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, a_i \in A_i, A_i \neq A_j, i \neq j.$$

Каждое значение зависит непосредственно от программной реализации и настроек детектора соответствующего класса. Для того чтобы система зарегистрировала искомый объект на представляемом ей изображении, требуется, чтобы все программные детекторы, отвечающие за свои атрибуты, выдавали список областей изображения, где эти атрибуты были зафиксированы. Если в определенной области был зарегистрирован весь список атрибутов, следовательно, в ней распознан искомый объект.

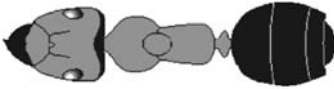
Сложные объекты. Система в данной реализации не справится с распознаванием объектов, имеющих слишком широкий набор признаков. Примером могут служить любые объекты с большим спектром разнообразных цветов. В этот список можно добавить объекты, способные изменять форму в течение малого промежутка времени. Для решения этой задачи введено понятие **сложного объекта** (co), который характеризуется множеством простых объектов $\{o_i\}$ и набором отношений $\{r_j\}$ между ними. Отношение является предикатом на множестве пар объектов, т. е. для каждой пары объектов возвращает или "ложь", или "истину". Таким образом, сложный объект может задаваться набором троек, где тройка — это два объекта и отношение между ними:

$$co = \{\{o_1, o_2, r_1\}, \dots, \{o_i, o_j, r_k\}\}.$$

Отношения в данном случае подразумеваются, в основном, пространственные и сравнительные. В роли пространственных отношений выступают следующие: "располагаться над другим объектом", "располагаться рядом с другим объектом", "лежать под углом к другому объекту" и т. д. Сравнительные обычно подразумевают отношение размеров: "быть больше, чем другой объект", "быть шире, чем другой объект" и т. п. Это позволит описать сложный объект в виде композиции простых объектов с указанием их отношений [24].

Данный подход укладывается в парадигму, обозначенную во введении. Путем описания объектов в таком виде образуется интерфейс на уровне семантической сети. Семантические сети — хорошо известная форма представления знаний, использующая графовое представление [25]. В это представление входит способ распознавания сложных объектов, описанных выше, где

**Описание муравья *Formica*
с использованием выбранных атрибутов**

Класс	Атрибут	 По: [26] с изменениями
Объект 1: голова		
Цвет	Оранжевый	
Форма	Трапеция	
Объект 2: грудь		
Цвет	Оранжевый	
Форма	Прямоугольник	
Объект 3: брюшко		
Цвет	Коричневый	
Форма	Овал	

в роли вершин выступают простые объекты, а в роли ребер — отношения. Таким образом, система управления имеет возможность при необходимости изменять параметры распознаваемых объектов, меняя их отношения или составные части. Такой подход не реализуем, если объекты распознаются монолитно, как, например, с использованием нейросетевых алгоритмов.

Опишем представление муравья *Formica* (вид сверху), используя следующие атрибуты: форма тагм (головы, груди или брюшка), их цвет, относительные размеры (см. таблицу).

В данном примере муравей представлен в несколько упрощенной форме. На практике все тагмы тела (голова, грудь и брюшко) муравьев имеют более сложную форму, и необходима возможность распознавать их. Возможно распознавание пигментных пятен и специфических узоров на различных сегментах, определение наличия/отсутствия волосков на них, положения сложных глаз и глазков на голове. В перспективе необходимо распознавать и определять положение придатков головы и груди: антенн, элементов ротового аппарата, ног, крыльев.

После того как создано описание сложного объекта и система распознала отдельные его части, требуется определить, образуют ли отдельные фрагменты общую картину. Данная проверка выполняется с помощью графового анализа. Для этого сложный объект, заданный в системе распознавания, представляется в виде графа, где в качестве вершин выступают объекты, а в качестве ребер — отношения (данный граф назовем эталонным (рис. 3)). Такое представление объек-

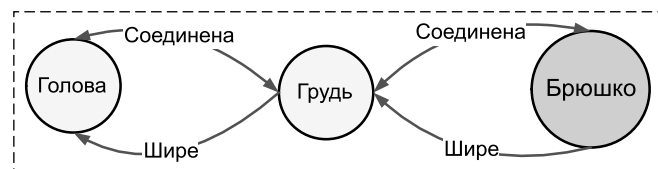


Рис. 3. Эталонный граф сложного объекта "муравей"

тов позволяет перейти к семантическому описанию [27].

Распознанные объекты, принадлежащие сложному объекту, формируют граф, который назовем *графом текущего наблюдения*. На нем к вершинам объектов (которые могут быть представимы в нескольких экземплярах) добавляются распознанные отношения. Программный модуль проверки попарно проверяет отношения между соответствующими объектами и добавляет ребро в граф, если отношение было распознано. После формирования графа текущего наблюдения запускается алгоритм поиска под-изоморфизмов в графах. В этом случае подграфом выступает эталонный граф, а его поиск происходит в графе текущей сцены. Граф текущего наблюдения для положительного результата должен содержать не меньше объектов, чем эталонный граф. Процесс поиска под-изоморфизмов возвращает подграф графа текущего наблюдения, который изоморфен эталонному графу. В данном случае наличие изоморфности означает, что интересующий объект найден.

Распознавание поз. Подобный подход позволяет вносить дополнительные отношения в описание объекта, для того чтобы учесть возможность его изменения. В соответствии с поставленными задачами необходимо не только иметь возможность отмечать наличие аниматов в поле зрения анализатора, но и распознавать позы, в которых они находятся. Для распознавания *агрессивной позы* (см. рис. 2, а) добавим к предыдущему описанию анимата дополнительное отношение между объектами "грудь" и "брюшко": "располагаются под углом около 90° друг к другу".

Также необходима возможность распознавания аниматов-муравьев, находящихся в "пассивной позе". В этом случае в сложный объект (рис. 3) добавляется отношение между объектами "брюшко" и "грудь" — "соприкасаются по длинной стороне". Обе позы упрощены. Стоит отметить, что распознавание является дополнительной опцией, общее описание сложного объекта позволяет распознать анимата в любой позе.

Сцены. Так как речь идет о системе технического зрения, использующейся в задачах управления, следует рассматривать не только распознавание объектов как отдельных элементов среды, но и анализ общей наблюдаемой картины. Будем называть общую картину наблюдения *сценой* (*S*) [28]. Описание сцены аналогично описанию сложного объекта. Однако сцена содержит и простые, и сложные объекты, соединенные некоторыми отношениями:

$$S = \{\{\bar{o}_i, \bar{o}_j, r_k\}, \dots\}, \bar{o} = \begin{cases} o; \\ co. \end{cases}$$

Отношения в анализе сцен имеют сравнительный и пространственный характер. Для каждой

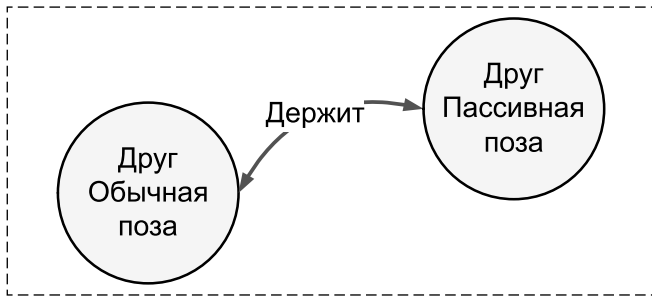


Рис. 4. Пример графа, описывающего сцену "транспортировка"

из ситуаций, перечисленных в требованиях к возможностям анализатора, в системе создается своя сцена, описывающая данную ситуацию. Во время работы анализатора происходит распознавание сцены методом, аналогичным методу поиска сложных объектов (рис. 4). Когда сцена распознана, она передается на выход анализатора.

До этого момента имелись в виду статические сцены. Также сцены могут быть динамическими, т. е. сами объекты или отношения могут иметь динамический характер. Например, существует разница, отдаляется враг от наблюдающего за ним анимата или приближается к нему. Для перехода от статических объектов и сцен к динамическим был реализован механизм слежения за объектами, позволяющий соотнести объекты на разных шагах распознавания.

Система распознавания. Система распознавания была реализована на языке C++ с использованием библиотек компьютерного зрения OpenCV и графового анализа iGraph. В системе можно выделить три этапа обработки (рис. 5). Первый этап представляет собой запуск программных модулей, выделяющих атрибуты. На втором этапе происходит выделение простых и сложных объектов по найденным атрибутам. Третий этап реализует выделение сцен.

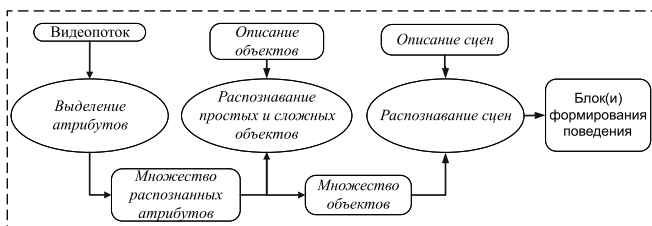


Рис. 5. Этапы обработки

5. Аппаратная реализация

Была разработана бортовая система технического зрения мобильного робота. Анализатор представляет собой автономный модуль, включающий собственный вычислитель на базе микрокомпьютера Raspberry PI, так как вычислительные мощности роботов, которые планируют

использовать в дальнейших исследованиях, недостаточны. Система оснащена ультразвуковым дальномером, вместе с камерой закрепленным на подвижном кронштейне. Он позволяет вращать связку "камера—дальномер" вокруг горизонтальной и вертикальной осей. Таким образом, используя показания видеокамеры, анализатор может наводиться на интересующий объект и измерять расстояние до него с помощью дальномера (рис. 6). Интерфейс между системой и роботом обеспечивается сервисным микроконтроллером, который также управляет сервоприводами и считывает данные с дальномера. Разработан протокол команд, позволяющий роботу настраивать систему.

С системой, реализующей механизмы распознавания, был поставлен ряд экспериментов — для простоты и проверки общей работоспособности были изображены некоторые абстракции, описывающие перечисленные выше понятия.

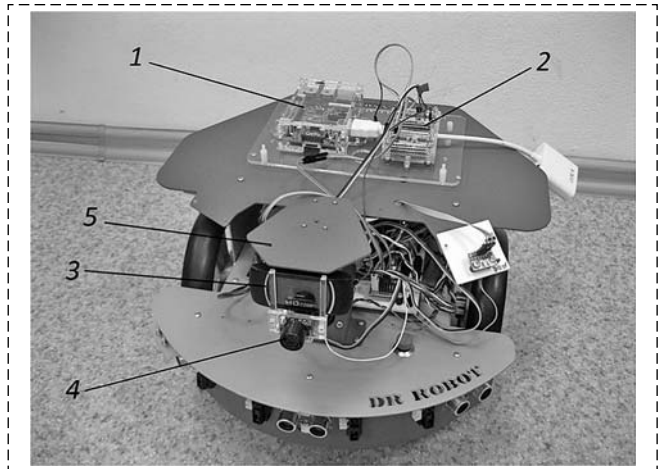


Рис. 6. Программно-аппаратная реализация системы технического зрения:

1 — микрокомпьютер Raspberry PI; 2 — сервисный микроконтроллер; 3 — камера; 4 — УЗ дальномер; 5 — подвижный кронштейн

6. Эксперименты

Эксперимент 1. Простые и сложные объекты. Модели аниматов-муравьев были сильно упрощены по сравнению с описанным выше. На данном этапе моделирования требовалась проверка принципиальной применимости подхода, распознавание сложных моделей не было необходимым. Грудь и голова анимата-муравья обозначались одним оранжевым прямоугольником, а брюшко — коричневым прямоугольником (рис. 7).

Если два прямоугольника находились на заданном расстоянии друг от друга, то анализатор распознавал их как объект "муравей". Это отношение не зависело от взаимного расположения

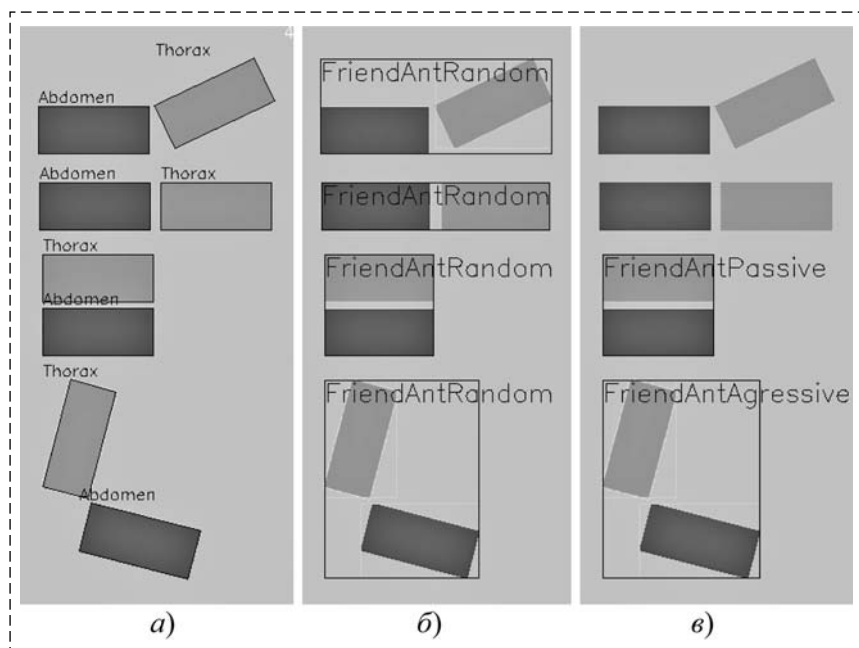


Рис. 7. Распознавание:

a — простых объектов; *б* — сложных объектов; *в* — поз

брюшка и груди. Все конфигурации моделей аниматов распознаны как "муравей" (рис. 7, *a*, *б*).

Эксперимент 2. Добавление поз. Далее в систему были добавлены три вида поз: нейтральная, пассивная и агрессивная. Анализатор распознавал пассивную позу, если блоки "голова" + "грудь" и "брюшко" располагались друг над другом. Сочетание последних объектов, располагавшихся под углом 90° друг к другу, распознавалось как агрессивная поза (рис. 7, *в*).

После тестирования на нарисованных абстракциях была проведена проверка работоспособности системы на реальных изображениях, полученных с камеры. Подобное распознавание связано с комплексом проблем, сопряженных с

работой видеокамер: низкая четкость, недостаток освещенности, искажение цветов объектов и т. д. Были собраны макеты нарисованных ранее абстракций. При моделировании вместо прямоугольников использованы цилиндры. Результаты распознавания представлены на рис. 8.

Если добавить отношения, задающие пассивную и агрессивную позы, как было описано выше, то также можно выделить их и отличить от обычной позы.

Эксперимент 3. Распознавание сцены. Следующим этапом является распознавание сцены в целом. Для этого вводится объект "враг". Сложный объект "враг" состоит из двух простых объектов черного цвета. Отношения, соединяющие объекты, аналогичны отношениям внутри сложного объекта "друг". Смоделирована следующая сцена.

На рис. 8, *a*, *б* все объекты идентифицированы как "друг" или "враг". Позы этих объектов являются дополнительной информацией.

На следующей стадии выделенные объекты заносятся в граф текущего наблюдения и сравниваются с эталонным графом, как было описано выше. Для полного описания сцены "конфликт" анализатор подсчитывает число сложных объектов: "друг", "враг", определяет позы, в которых находятся аниматы, и направляет эти данные вместе с определением сцены на модуль управления. Аналогично программа может определять и подсчитывать число транспортируемых и транспортирующих особей, формируя сигнал сцены "транспортировка".

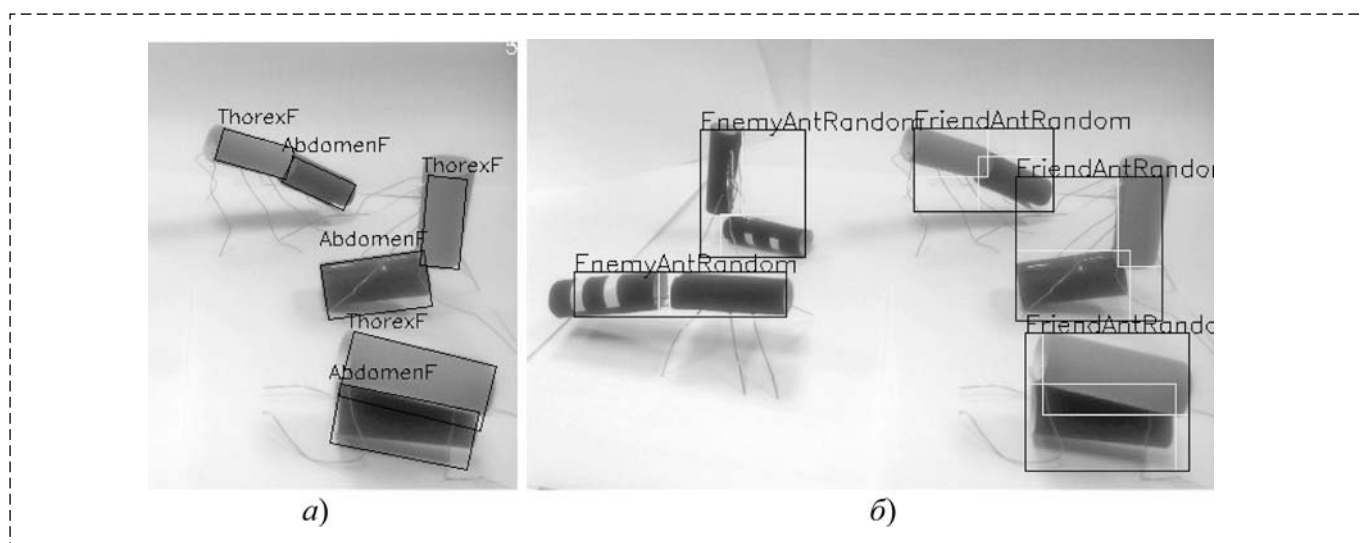


Рис. 8. Сцена "конфликт" — распознанные простые (*a*) и сложные (*б*) объекты

7. Формирование поведения анимата на основе сигналов анализатора

Поведение анимата должны формировать другие аппаратные и/или программные модули с использованием сигналов анализатора. Рассмотрим варианты использования информации, поступающей от зрительного модуля.

Распознавание дружеских и вражеских особей, их подсчет позволят анимату анализировать тактическую ситуацию вокруг себя. На основании данных анализатора он может принимать решение о вступлении в схватку и выходе из нее.

Данные о позе аниматов-муравьев составляют основу для кинооптических реакций в группах агентов. Например, возможность распознавания агрессивной позы позволит проводить локальные мобилизационные мероприятия. Аниматы-муравьи смогут передавать информацию о нападении без дополнительных сигнальных систем, просто переходя в боевой режим и готовясь к атаке.

Кроме того, система позволяет предложить вариант альтернативного (не обоснованного биологически) использования рассматриваемых условных сигналов. При критически малом заряде аккумулятора анимат должен принять пассивную позу, обозначая этим необходимость транспортировки. Такое техническое решение может быть полезно и эффективно и при моделировании социумов аниматов, и в организации сообществ роботов, автономно решающих задачи в течение длительного времени.

Если рассматривать архитектуру подробнее, то можно представить ее в качестве двух фрагментов одной семантической сети (рис. 9). Одна часть реализована на уровне анализатора, и сигналы этой сети, которые отвечают распознанным ситуациям, возбуждают вершины второго фрагмента сети, описывающего модуль управления. В свою очередь, семантическая сеть модуля управления может возбуждать вершины сети анализатора, отвечающие за параметры объектов и сцен, изменяя выход. Таким образом, модуль управления может

влиять на особенности распознавания объектов в соответствии с контекстом.

Заключение

Основным результатом работы является создание прототипа зрительного анализатора, реализованного на основе метода распознавания объектов путем декомпозиции их признаков. В ходе тестирования аппаратно-программного комплекса была показана принципиальная возможность формирования кинооптических реакций у аниматов-муравьев.

Работа выявила возможность применения предложенного подхода для подготовки визуальных данных и формирования поведения анимата. Можно обозначить два возможных направления дальнейшего развития системы.

Первое направление — использование системы в робототехнике, в том числе при создании аниматов. Анализатор может использоваться как источник информации для систем, формирующих поведение агентов.

Вторым направлением является использование предложенных методов в качестве основы для системы определения реальных муравьев на изображениях и описания их поведения на основе видеозаписей. Для решения подобной задачи требуется использование более сложных (чем в приведенных примерах) и разнообразных методов распознавания атрибутов, а также расширение описаний объектов.

Список литературы

1. Карпов В. Э. Модели социального поведения // Управление большими системами. 2016. Т. 59. С. 165—232.
2. Meyer J. A., Wilson S. Simulation of Adaptive Behavior: from Animals to Animats. Cambridge: MA: MIT Press, 1991.
3. Тарасов В. Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 5—63.
4. Anohin K. V., Burcev M. S., Zarajskaja I. Ju., Lukashev A. O., Red'ko V. G. Проект "Мозг Анимата": разработка модели адаптивного поведения на основе теории функциональных систем // Восьмая нац. конф. по искусственному интеллекту с международным участием. М.: Физматлит, 2002. С. 781—789.
5. Захаров А. А. Организация сообществ у муравьев. М.: Наука, 1991. 278 с.
6. Павлов И. П. Полное собрание сочинений. 1951. 452 с.
7. Смирнов В. М. Физиология сенсорных систем и высшая нервная деятельность. М.: Академа, 2003. 303 с.
8. Московский А. Д. Об одном методе распознавания объектов с не полно-

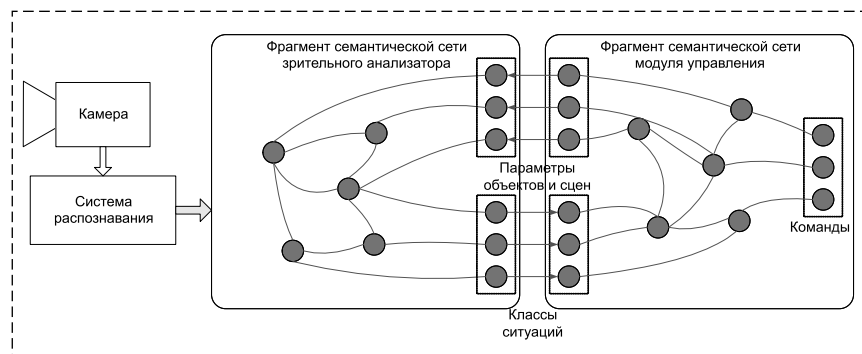


Рис. 9. Взаимодействие модулей распознавания и управления на уровне семантических сетей

стью определенными признаками // Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта" (БТС-ИИ-2016), Казань, 2016. С. 137–146.

9. **Stager R.** Beobachtungen an amaisen // Mitt. schweiz. entomol. 1926. Vol. 13. P. 476–477.

10. **Беклемишев В. Н.** Основы сравнительной анатомии беспозвоночных. Т. 2. М.: Наука, 1964. 446 с.

11. **Шванвич Б. Н.** Курс общей энтомологии. Москва–Ленинград: Сов. наука, 1949. 901 с.

12. **Дзержинский Ф. Я.** Сравнительная анатомия позвоночных животных. М.: Аспект-Пресс, 2005. 304 с.

13. **Длусский Г. М.** Муравьи рода Формика. М.: Наука, 1967. 236 с.

14. **Богатырева О. А., Шиллеров А.** Синергетика социальности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 292 с.

15. **Бургов Е. В.** Пространственно-функциональные структуры у муравьев Serviformica (Hymenoptera: Formicidae) // Вестник МГПУ. Серия "Естественные науки." 2016. Т. 4, № 24. С. 19–27.

16. **Nolfi S., Floreano D.** Synthesis of autonomous robots through evolution // Trends Cogn. Sci. 2002. Vol. 6, N. 1. P. 31–37.

17. **Ball D., Heath S., Wyeth G., Wiles J.** iRat : Intelligent Rat Animat Technology // Proc. 2010 Australas. Conf. Robot. Autom. 2010. P. 1–3.

18. **Aitkenhead M. J., McDonald A. J. S.** A neural network based obstacle-navigation animat in a virtual environment // Eng. Appl. Artif. Intell. 2002. Vol. 15, N. 3–4. P. 229–239.

19. **Moller R., Lambrinos D., Pfeifer R., Labhart T., Wehner R.** Modeling Ant Navigation with an Autonomous Agent // From Anim. to Animat. 2001. Vol. 5. P. 185–194.

20. **Song Y. M., Xie Y., Malyarchuk V, Xiao J., Jung I., Choi K.-J., Liu Z., Park H., Lu C., Kim R.-H., Li R., Crozier K. B., Huang Y., Rogers J. A.** Digital cameras with designs inspired

by the arthropod eye // Nature. Nature Publishing Group, 2013. Vol. 497, N. 7447. P. 95–99.

21. **Floreano D., Pericet-Camara R., Viollet S., Ruffier F., Brückner A., Leitel R., Buss W., Menouni M., Expert F., Juston R., Dobrzynski M. K., L'Eplattenier G., Recktenwald F., Mallot H. A., Franceschini N.** CURVACE — CURVed Artificial Compound Eyes // Procedia Comput. Sci. 2011. Vol. 7. P. 308–309.

22. **Floreano D., Camara R. P., Bruschini C.** Curvace. Curved artificial compound eyes. 2017.

23. **Курбатов С. С., Лобзин А. П., Найденова К. А., Хахалин Г. К.** Гибридная схема анализа изображений // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semant. Technol. Intell. Syst. материалы II Международной научно-технической конференции (Минск, 16–18 февраля 2012). 2012. С. 327–334.

24. **Кандрашина Е. Ю., Литвинцева Л. В., Поспелов Д. А.** Представление знаний о пространстве и времени в системах искусственного интеллекта. М.: Наука, 1988.

25. **Minsky M.** Semantic Information Processing. Cambridge: MIT Press, 1968.

26. **Длусский Г. М., Зрянин В. А.** Таблицы для определения видов Formica // Мониторинг муравьев Формика. М.: КМК, 2013. С. 52–60.

27. **Ким Н. В., Бодунков Н. Е.** Формирование семантических описаний для решения целевых задач автономными беспилотными летательными аппаратами // Сб. тр. семинара "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта. 2017. С. 158–164.

28. **Карпов В. Э.** Об одном механизме реконструкции сцен // VI Междунар. науч.-прак. конф. "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте", Сб. науч. трудов. Т. 1. М.: Физматлит, 2011. С. 407–415.

Visual Analyzer of the Animat as a Semantic Basis of Robot Sensoric System

A. D. Moskovsky, moscowskyad@gmail.com, **E. V. Byrgov**, burgov.ev@yandex.ru,

E. E. Ovsyannikova, eeovsyannikova@gmail.com,

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation

Corresponding author: **Moskovsky Anton D.**, Engineer-Researcher,
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation,
e-mail: moscowskyad@gmail.com

Accepted on December 29, 2017

In the framework of study the implementation of social behavior models in group robotics systems, the question of the arrangement of animat visual system is of high importance. In this paper we propose the structure of the so-called visual analyzer, simulating the work of the perception system of the animat. The direction of modeling animated ants (artificial animals) has been chosen in the robot society design. The system requirements have been developed: the ability to recognize individuals, determine their number in the field of view, give information about the change of its quantity, and distinguish its poses. The system was implemented in C++ using technical vision and graph analysis libraries. The video stream passes through three consistent processing stages: selecting attributes, recognizing simple and complex objects, recognizing scenes. The method of recognizing objects is realized by decomposing their features, the algorithm for recognizing complex objects and scenes is based on the search for isomorphic subgraphs in the system of technical vision. The principal possibility of using such a system for recognizing models of animats of different kinds, scenes with participation, formation of simple kinoptical reactions is shown. A software and hardware complex designed for installation on a mobile robot is described. Models of animated ants were simplified for the experiments. This was done to test the applicability of the approach. After testing the system on the drawn abstractions, the system was tested on real images received from the camera. Further development options for the system are indicated.

Keywords: visual analyzer, animat, group robotics, robot society, modeling, object recognition, technical vision system, ant

Acknowledgements: This work was supported, in part, by the Russian Science Foundation, grant 16-11-00018 (which funded the sections that contains the review (Introduction), 2 (Animal vision. The visual organs, their artificial analogs), 3 (Approach to the technical vision system design) of this paper) and by the Russian Foundation for Basic Research, grant of-m 16-29-04412 (which funded sections 4 (Experiments) and 5 (The formation of animat's behavior on the basis of analyzer signals)).

For citation:

Moskovsky A. D., Byrgov E. V., Ovsyannikova E. E. Visual Analyzer of the Animat as a Semantic Basis of Robot Sensoric System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 336–345.

DOI: 10.17587/mau.19.336-345

References

1. **Karpov V. E.** *Modeli sotsial'nogo povedeniya* (Model of Social Behavior), *Upravlenie Bolshimi Sistemami*, 2016, vol. 59, pp. 165–232 (in Russian).
2. **Meyer J. A., Wilson S.** *Simulation of Adaptive Behavior: from Animals to Animats*, Cambridge, MA, MIT Press, 1991.
3. **Tarasov V. B.** *Agenty, mnogoagentnye sistemy, virtual'nye soobshhestva: strategicheskoe napravlenie v informatike i iskusstvennom intellekte* (Agents, multi-agent systems, virtual communities: a strategic direction in computer science and artificial intelligence), *Novosti Iskusstvennogo Intellekta*, 1998, no. 2, pp. 5–63 (in Russian).
4. **Anohin K. V., Burcev M. S., Zarajskaja I. Ju., Lukashev A. O., Red'ko V. G.** *Proekt "Mozg Animata": razrabotka modeli adaptivnogo povedeniya na osnove teorii funkcional'nyh sistem* (Project "Animat's brain": the development of the adaptive behavior model on the basis of the functional systems theory), Moscow, Fizmatlit, 2002, pp. 781–789 (in Russian).
5. **Zaharov A. A.** *Organizacija soobshhestv u murav'ev* (Organization of communities in ants), Moscow, Nauka, 1991, 278 p. (in Russian).
6. **Pavlov I. P.** *Polnoe sobranie sochinenij* (Full composition of writings), vol. IV, 1951, 452 p. (in Russian).
7. **Smirnov V. M.** *Fiziologija sensoryh sistem i vysshaja nervnaja dejatel'nost'* (Physiology of sensory systems and higher nervous activity), Moscow, Akadema, 2003, 303 p. (in Russian).
8. **Moskovskij A. D.** *Ob odnom metode raspoznavaniya ob'ektov s ne polnost'ju opredelennymi priznakami* (About one method of recognition of objects with incompletely determined signs), *Vserossijskij nauchno-prakticheskij seminar "Bespilotnye transportnye sredstva s jelementami iskusstvennogo intellekta" (BTS-II-2016)*, Kazan', 2016, pp. 137–146 (in Russian).
9. **Stager R.** Beobachtungen an amaisien, *Mitt. Schweiz. entomol.*, 1926, vol. 13, pp. 476–477.
10. **Beklemishev V. N.** *Osnovy sravnitel'noj anatomii bespozvonochnyh* (Basics of comparative invertebrates anatomy), vol. 2, Moscow, Nauka, 1964, 446 p. (in Russian).
11. **Shvanvich B. N.** *Kurs obshhej jentomologii. Vvedenie v izuchenie stroenija i funkcij tela nasekomyh. Uchebnik dlja gosudarstvennyh universitetov* (The course of general entomology. Introduction to the study of the structure and functions of insects body. Textbook for state universities), Moscow-Leningrad, Soviet Science, 1949, 901 p. (in Russian).
12. **Dzerzhinskij F. Ja.** *Sravnitel'naja anatomija pozvonochnyh* (Comparative anatomy of vertebrates), Moscow, Aspekt-Press, 2005, 304 p. (in Russian).
13. **Dlusskij G. M.** *Murav'i roda Formika* (Ants of the genus Formica), Moscow, Nauka, 1967, 236 p. (in Russian).
14. **Bogatyrev O. A., Shillerov A.** *Sinergetika social'nosti* (Synergetics of sociality), Novosibirsk, SO RAN, 1998, 292 p. (in Russian).
15. **Burgov E. V.** *Prostranstvenno-funkcional'nye struktury u murav'ev Serviformica (Hymenoptera: Formicidae)* (Spatial-functional structures in ants Serviformica (Hymenoptera: Formicidae)), *Vestnik MGPU. Serija "Estestvennye nauki"*, 2016, vol. 4, no. 24, pp. 19–27 (in Russian).
16. **Nolfi S., Floreano D.** Synthesis of autonomous robots through evolution, *Trends in Cognitive Sciences*, 2002, vol. 6, no. 1, pp. 31–37.
17. **Ball D., Heath S., Wyeth G., Wiles J.** iRat : Intelligent Rat Animat Technology, *Proceedings of the 2010 Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 1–3.
18. **Aitkenhead M. J., McDonald A. J.S.** A neural network based obstacle-navigation animat in a virtual environment, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2002, vol. 15, no. 3–4, pp. 229–239.
19. **Moller R., Lambrinos D., Pfeifer R., Labhart T., Wehner R.** Modeling Ant Navigation with an Autonomous Agent, *From animals to animats*, 2001, vol. 5, pp. 185–194.
20. **Song Y. M., Xie Y., Malyarchuk V., Xiao J., Jung I., Choi K.-J., Liu Z., Park H., Lu C., Kim R.-H., Li R., Crozier K. B., Huang Y., Rogers J. A.** Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye, *Nature*, 2013, no. 7447, vol. 497, pp. 95–99.
21. **Floreano D., Pericet-Camara R., Viollet S., Ruffier F., Brückner A., Leitel R., Buss W., Menouni M., Expert F., Juston R., Dobrzynski M. K., L'Eplattenier G., Recktenwald F., Mallot H. A., Franceschini N.** CURVACE — CURVED Artificial Compound Eyes, *Procedia Computer Science*, 2011, vol. 7, pp. 308–309.
22. **Floreano D., Camara R. P., Bruschini C.** Curvace. Curved artificial compound eyes, available at: <http://www.curvace.org/> (date of access: 04.12.2017).
23. **Kurbatov S. S., Lobzin A. P., Najdenova K. A., Hahalin G. K.** *Gibridnaja shema analiza izobrazhenij* (Hybrid image analysis scheme), Open semantic technologies for the intelligent systems = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2012): materials of the II International Scientific and Technical Conference (Minsk, 16–18 February 2012), 2012, pp. 327–334 (in Russian).
24. **Kandrashina E. Ju., Litvinceva L. V., Pospelov D. A.** *Predstavlenie znanij o prostranstve i vremeni v sistemah iskusstvennogo intellekta* (Representation of knowledge about space and time in artificial intelligence systems), Moscow, Nauka, 1988 (in Russian).
25. **Minsky M.** *Semantic Information Processing*, Cambridge, MIT Press, 1969, 448 p.
26. **Dlusskij G. M., Zrjanin V. A.** *Tablicy dlja opredelenija vidov Formica* (Tables for species identification Formica) Moscow, KMK, 2013, 52–60 pp. (in Russian).
27. **Kim N. V., Bodunkov N. E.** *Formirovanie semanticheskikh opisaniy dlja reshenija celevyh zadach avtonomnymi bespilotnymi letatel'nymi apparatami* (Formation of semantic descriptions for the solution of target tasks by autonomous unmanned aerial vehicles), *Proc. of Seminar "Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence"*, 2017, pp. 158–164 (in Russian).
28. **Karpov V. Je.** *Ob odnom mehanizme rekonstrukcii scen* (On One Mechanism for Reconstruction of Scenes), *Proc. of VI International Scientific and Practical Conference "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence"*, vol. 1, Moscow, Fizmatlit, 2011, pp. 407–415 (in Russian).