



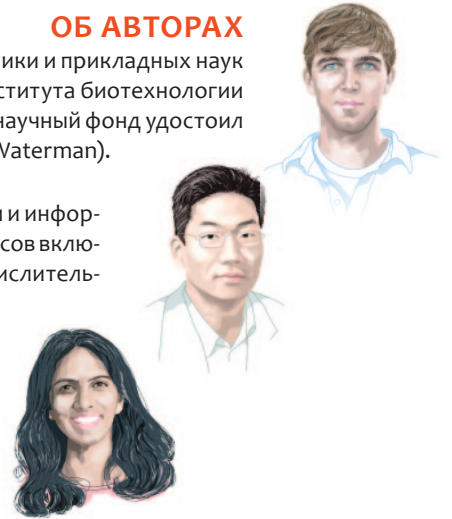
Больше, чем жизнь: это увеличенное изображение робопчелы, позволяющее рассмотреть детали; перелистните страницу, чтобы увидеть ее в натуральную величину

ОБ АВТОРАХ

Роберт Вуд (Robert Wood) — профессор техники и прикладных наук в Гарвардском университете и профессор Института биотехнологии Висса в том же университете. Национальный научный фонд удостоил его в 2012 г. премии Алана Уотермана (Alan T. Waterman).

Вэй Гу-Еон (Gu-yeon Wei) — профессор электротехники и информатики Гарвардского университета. Область его интересов включает широкий круг вопросов энергоэффективных вычислительных систем.

Радхика Нагпал (Radhika Nagpal) — профессор информатики Гарвардского университета и профессор Института Висса. Ее работы о коллективном поведении охватывают области искусственного интеллекта, робототехники и биологии.



ТЕХНИКА

Полет механических пчел

*Тысячи насекомых-роботов поднимутся в небо
для выполнения общей задачи*

Роберт Вуд, Вэй Гу-Еон и Радхика Нагпал

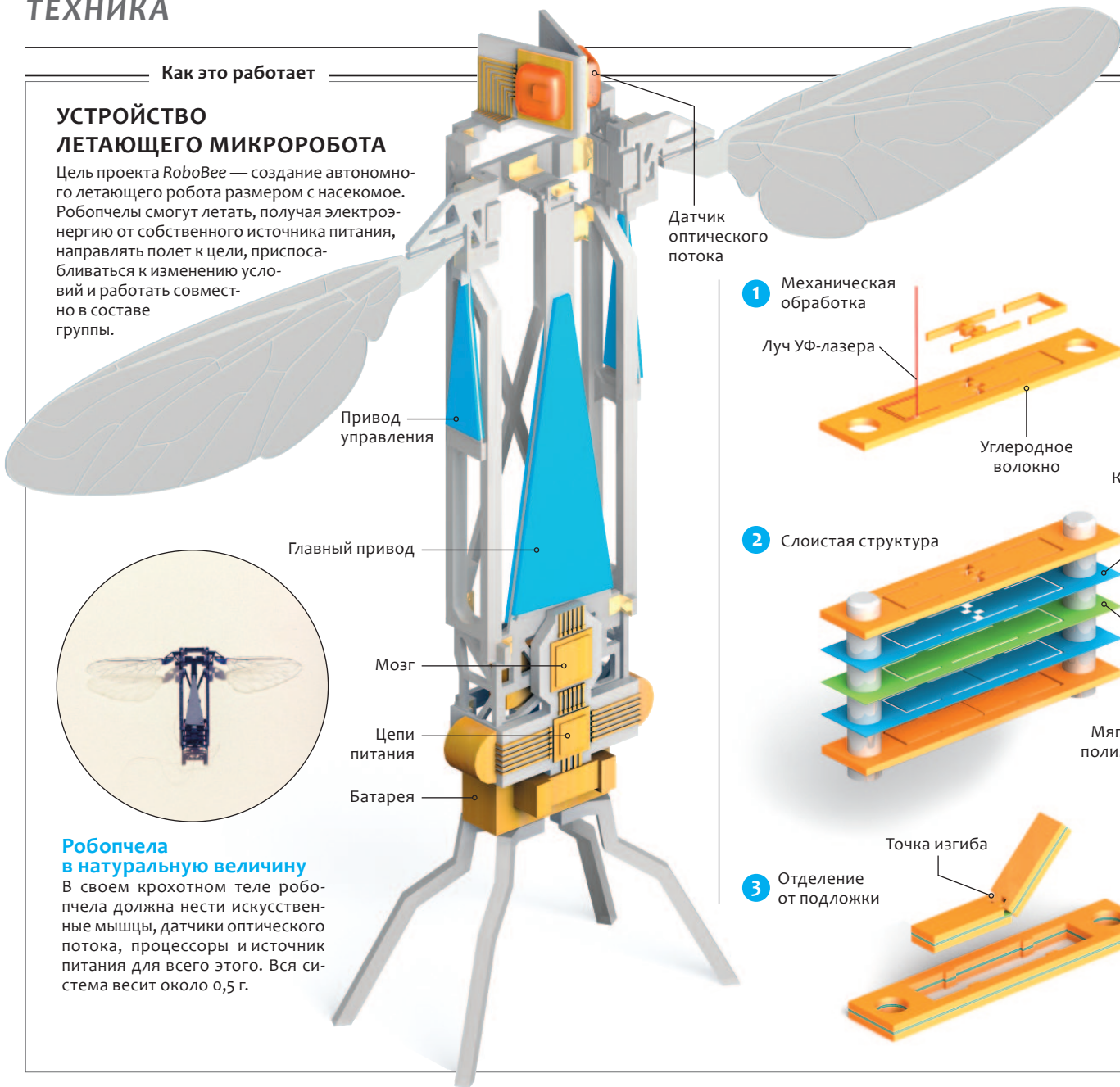
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Механические пчелы — летающие роботы размером немного больше живой пчелы. Создание столь миниатюрного робота требует решения множества механических и вычислительных задач. Имеющиеся на рынке элементы, такие как двигатели и подшипники, не годятся для подобных роботов, поэтому требуется создать специальные искусственные мышцы.
- Кроме того, искусственные пчелы должны самостоятельно «мыслить», для чего им необходимы микродатчики, воспринимающие сигналы внешней среды, и процессоры для принятия решений о предстоящих действиях.
- Как и живые пчелы, пчелы-роботы будут работать эффективно в составе роев из тысяч экземпляров, координируя свои действия без руководства какого-либо «вожака». Рой должен быть достаточно стойким, чтобы сохранять возможность выполнять свои задачи даже в случае выхода из строя большого числа своих членов.

Как это работает

УСТРОЙСТВО ЛЕТАЮЩЕГО МИКРОРОБОТА

Цель проекта RoboBee — создание автономного летающего робота размером с насекомое. Робопчелы смогут летать, получая электроэнергию от собственного источника питания, направлять полет к цели, приспосабливаться к изменению условий и работать совместно в составе группы.



Робопчела в натуральную величину

В своем крохотном теле робопчела должна нести искусственные мышцы, датчики оптического потока, процессоры и источник питания для всего этого. Вся система весит около 0,5 г.

С недавнего времени колонии пчел стало косить таинственное заболевание, названное коллапсом пчелиных семей (*colony collapse disorder, CCD*). Пчелы обеспечивают опыление растений в большинстве коммерческих хозяйств в США, и их гибель порождает страхи за будущее сельского хозяйства страны.

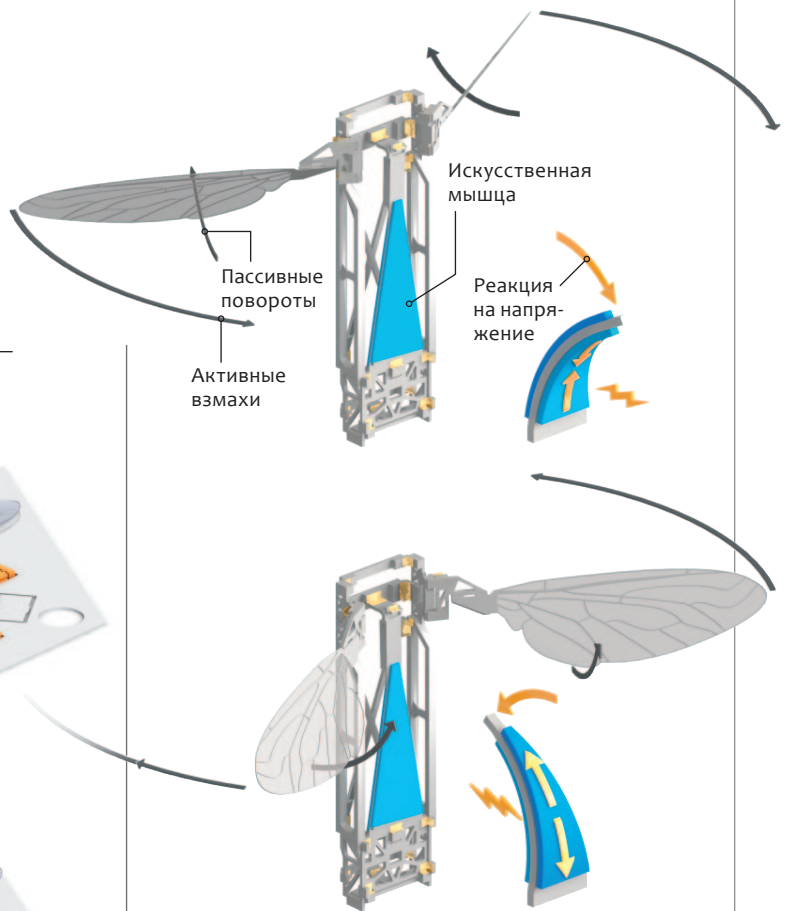
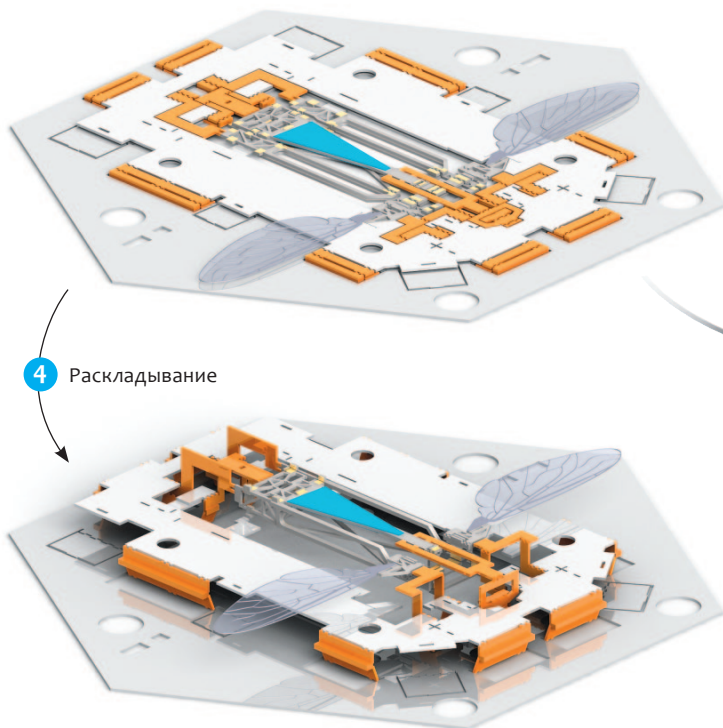
В 2009 г. мы трое совместно с коллегами из Гарвардского и Северо-Восточного университетов начали рассматривать возможности создания колоний пчел-роботов. Нас интересовало, смогут ли механические насекомые воспроизводить не только поведение отдельных особей природных медоносных пчел, но и уникальные особенности поведения, возникающие в результате взаимодействия тысяч особей. На сегодня мы создали несколько

экспериментальных робопчел (*RoboBees*) — летающих механизмов, немного превосходящих по размеру живых насекомых, — и работаем над методами, способными заставить тысячи этих роботов взаимодействовать так, как выстраивают отношения пчелы в рое.

На первый взгляд задача представляется почти невыполнимой. Пчелы формировались как невероятные летательные машины в течение миллионов

Сборка конструкции

Изготовление таких малых роботов имеет свои трудности. Наша группа строит каждую робопчелу из слоев твердого материала, например углеродного волокна, проложенных мягким полимером. Разрывы в углеродном волокне позволяют полимеру изгибаться, создавая гибкие соединения («суставы»). Изящество этого метода состоит в том, что он удобен для создания эффективной сборочной линии (слева внизу). Сначала исследователи вырезают лучом УФ-лазера контуры слоев **1**. На втором этапе они совмещают все слои и склеивают их **2**. После этого изготовленные компоненты можно отделить от подложки **3**. Последний этап — формирование трехмерной структуры из двумерной — позаимствован у детских книжек-раскладушек **4**.



Большой взмах

Полет робопчелы осуществляется с помощью искусственных мышц — пьезоэлектрического материала, сокращающегося под действием электрического напряжения. Крылья выполняют два вида движений: взмахи и повороты вокруг своей оси. Взмахи выполняются не вверх-вниз, как у птиц, а по горизонтали, подобно гребкам пловца. Взмахами управляют мышцы, а повороты осуществляются пассивно, определяясь инерцией крыла, его взаимодействием с воздушной средой и упругостью шарнира крыла.

лет эволюции. Эти крохотные существа способны летать часами, не теряя устойчивости при порывах ветра, искать цветы и уклоняться от хищников. Попробуйте-ка добиться того же от робота размером с пятицентовую монету!

Теперь рассмотрим рой. В колонии пчел нет руководителя, нет центральной власти. Однако колонии, состоящие из тысяч насекомых, разумно распределяют работы, жизненно важные для поддержания благополучия всего роя. Когда рюю нужно больше пыльцы, на ее сбор отправляется дополнительное число пчел, а когда ему нужно обслуживание, пчелы остаются в улье. А в случае несчастья, например неожиданной смерти матки, пчелы быстро приспосабливаются к изменившимся условиям. Как могут такие большие колонии принимать столь сложные решения,

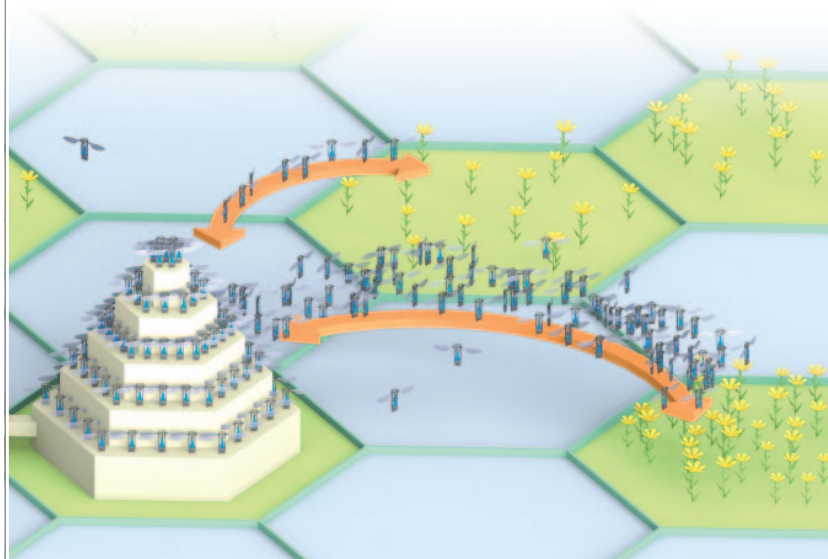
не создавая хотя бы временного хаоса из-за нарушения взаимосвязей, если нет «управляющего лица»?

Рой роботов может делать гораздо больше, чем просто опылять цветы (хотя сельское хозяйство — одна из потенциальных областей применения). Масса миниатюрных, юрких, простых и недорогих роботов может выполнять многие виды работ более эффективно, чем немногочисленные роботы с более широкими функциональными возможностями. Возьмем, например, спасательные работы. В зоне стихийного бедствия спасатель сможет выпустить из коробки, весящей менее килограмма, 1 тыс. робопчел для поиска источников тепла, звуков или выдыхаемого углекислого газа, т.е. признаков присутствия выживших людей. Если хотя бы три робота выполнят свою задачу, это будет

Искусственный интеллект

КОЛОНИЯ В РАБОТЕ

Колония из тысяч робопчел должна будет эффективно распределять задачи между отдельными пчелами даже при отсутствии полной картины обстановки. В представленном ниже сценарии рою была поставлена задача отыскать поля цветов и опылять их. Отдельные робопчелы сначала обследуют разные участки. По возвращении в улей они приносят информацию о том, где есть много цветов. Эта информация определяет, куда лететь рабочим пчелам. На участки, где цветов больше, будет направлено и большее количество пчел. Роевая стратегия позволяет пчелам проявлять коллективный разум даже при нехватке энергии для прямой связи между пчелами в полете.



исключает возможность применения большинства стандартных механических решений, включая подшипники, зубчатые передачи и электродвигатели, — элементы, широко используемые в более крупных роторах, но неэффективные для робопчел.

Вместо вращающихся электродвигателей и зубчатых передач мы спроектировали механизм, очень близкий по принципу действия к схеме полета насекомых: машущие крылья, приводимые в движение искусственными мышцами. В нашей системе для приведения робопчелы в движение и управления ее полетом используются разные мышцы. Более крупные обеспечивают колебательное движение механизма крыльев и грудного отдела, вызывая взмахи крыльев, а меньшие управляют тонкими движениями крыльев, создавая вращающий момент для управления полетом и маневрирования. Оба эти механизма воздействуют на шарниры (суставы), крепящие крылья к телу робота.

успехом всего роя. В отношении существующих сегодня роботов-спасателей стоимостью по \$100 тыс. этого сказать нельзя.

Однако на пути создания роботов-пчел лежит огромное количество технических трудностей. Главная — то, что их размер не должен превышать нескольких сантиметров, а масса — 0,5 г, т.е. быть примерно в 100 раз меньше массы самого легкого из существующих сейчас летающих роботов. В этом крохотном теле нужно разместить все элементы летательной системы пчелы: электронные мозг, органы зрения и систему управления, задающую взаимодействие робопчелы с другими членами ее роя. Недавние успехи материаловедения, технологии датчиков и архитектуры вычислительных систем позволяют достичь этих целей.

Тело и полет

Наиболее очевидной трудностью при создании миниатюрного летающего робота становится выбор способа осуществления полета. К сожалению, от устойчивых успехов в области миниатюризации роботов за последние годы проку мало, поскольку малые размеры робота меняют природу действующих сил: поверхностные силы, в частности трение, начинают играть более важную роль, чем объемные, такие как гравитация и силы инерции. Проблема уменьшения размеров

ливаются из пьезоэлектрического материала, который сокращается при создании в нем поперечного электрического поля. К числу недостатков такого материала относятся необходимость использования больших напряжений и хрупкость, однако это тот случай, когда при уменьшении размеров физика играет на нашей стороне. Чем меньше приводные устройства, тем быстрее они стремятся двигаться. А поскольку работа, затрачиваемая на каждый взмах (в расчете на единицу массы), изменяется очень мало, то чем больше частота взмахов, тем большей получается мощность. Мощность, обеспечиваемая нашими искусственными мышцами, сравнима с вырабатываемой мышцами насекомых примерно такого же размера.

Последние несколько лет мы экспериментировали с десятками различных конфигураций мышц и шарниров. В частности, нас интересовало, насколько простым будет их изготовление: ведь для создания роев из тысяч пчел потребуется массовое производство.

Оптимальные конструкции, к которым мы пришли сегодня, — это трехслойные «сэндвичи» с твердыми внешними слоями и тонким внутренним слоем из гибкого полимера. Суставы мы создаем, вырезая участки внешних слоев, так что в месте вырезов остается только гибкий внутренний слой.

В разработке механической части робота размером с пчелу мы достигли больших успехов, но лучший способ обеспечения ее энергией мы еще только ищем. Чтобы добиться требуемой для полета мощности при таких малых размерах робота, нужно отвести для источника питания (т.е. аккумуляторной батареи, хотя мы рассматриваем и возможность использования твердотельных топливных микроэлементов) и для приводного механизма крыльев достаточно большую часть массы робота. Но здесь мы сталкиваемся со своего рода заколдованным кругом: большой источник питания позволяет запастись больше энергии, но он будет тяжелее, и для создания достаточной подъемной силы потребуется большая мощность, а значит понадобится еще больший источник питания.

Хотя мы пока не сумели добиться того, чтобы робопчела летала, питаясь от собственного источника, мы убедились, что 100-миллиграммовая пчела способна создать подъемную силу, достаточную для взлета (будучи «на привязи» к внешнему источнику питания). При этом робопчела была способна стабилизироваться с помощью сочетания активных и пассивных механизмов. При достигнутом на текущий момент уровне плотности запасенной энергии в батареях и эффективности всех механизмов тела пчелы продолжительность ее полета мы оцениваем максимум в несколько десятков секунд. Для ее увеличения мы работаем над минимизацией массы и повышением эффективности всех элементов тела пчелы.

Мозг и управление движением

Мы были вынуждены проводить полеты «на привязи», но не только из-за необходимости питания робота от внешнего источника, а из-за нерешенности еще одной проблемы. В свободном полете робопчеле нужно непрерывно оценивать обстановку, выбирать оптимальный образ действий и управлять механизмами полета. При лабораторных испытаниях в качестве временной меры использовалась внешняя электроника, но рабочей робопчеле потребуется собственный мозг.

На высшем уровне этот мозг должен будет отвечать не только за управление отдельным роботом, но и за взаимодействие с другими робопчелами роя. Мы планируем построить мозг в виде системы с несколькими уровнями: датчиками для оценки параметров условий полета, электронной нервной системой для выполнения основных функций

управления и программируемой «корой головного мозга» для принятия решений высшего уровня. В качестве первого этапа мы ищем подсистему обеспечения автономного полета. Она должна иметь жесткий контур управления, в состав которого будут входить датчики, процессоры обработки их сигналов и механизмы управления движениями «частей тела».

Чтобы понять, какие нужны датчики и как построить схемы мозга, мы вновь обратились к природе. Чтобы пробить себе дорогу в жизни, мухи (и другие насекомые) используют две многофункциональные системы. Проприоцепторы дают в по-

Для пассажира, который смотрит в окно автомобиля, движение близких предметов кажется быстрым, а движение далеких — более медленным. Система зрения, использующая эту информацию, может создавать детальное трехмерное представление окружающей обстановки, даже имея простой миниатюрный датчик изображения

лете сведения о состоянии внутренних органов, например о частоте взмахов крыльев (или степени разрядки батареи), а экстерорецепторы — информацию о внешнем мире.

Современные технологии предлагают систему GPS, акселерометры и многоосные гироскопы, но для робопчелы подобные системы не годятся: они либо слишком тяжелы, либо потребляют слишком большую мощность (либо обладают обоими этими недостатками). Поэтому мы исследуем электронную систему зрения, подобную той, что имеют живые пчелы, — анализирующую «оптический поток», т.е. воспринимающую видимое движение объектов в поле зрения датчика изображения. Для пассажира, который смотрит в окно автомобиля, движение близких предметов кажется быстрым, а движение далеких — более медленным. Система зрения, использующая эту информацию, может создавать детальное трехмерное представление окружающей обстановки, даже имея простой миниатюрный датчик изображения.

Однако мозг робопчелы должен обладать достаточными возможностями для обработки потока данных от датчиков изображений и выбора правильных решений для управления органами движения. Но и здесь самые современные

серийные компоненты не годятся. Поэтому мы рассматриваем новый класс вычислительной архитектуры, сочетающий в себе вычислительные возможности общего типа и специальные схемы, называемые аппаратными акселерометрами. В отличие от применяемых в обычных домашних компьютерах универсальных процессоров, аппаратные акселерометры — это точно настроенные схемы, выполняющие единственную функцию, но зато делающие это очень хорошо. Мы используем аппаратные акселерометры для быстрого выполнения в реальном времени вычислений, требуемых контуром управления для обеспечения устойчивого полета, при жестком ограничении потребляемой мощности.

Главной трудностью был выбор оптимального компромисса. В частности, мы хотели бы использовать видеокамеру высокого разрешения. Однако

Специалисты по информатике прояснили множество эффективных алгоритмов координации, используемых общественными насекомыми, но даже располагая этими алгоритмами, управлять роем роботов так же, как единичным роботом, невозможно

большое число пикселей означает больший размер датчика изображения и требует большей вычислительной мощности для обработки получаемых изображений. Где золотая середина?

Чтобы ответить на эти вопросы, мы разработали специальную испытательную камеру. Мы закрепили тело робопчелы на неподвижном многоосном датчике сил и вращающихся моментов и заставили махать крыльями, пытаясь взлететь. На стены испытательной камеры были спроецированы изображения обстановки, в которой механическое насекомое должно было бы летать. Это позволило нам исследовать совместную работу системы зрения, мозга и тела пчелы для управления полетом в реальном мире. Разумеется, управление полетом — всего лишь начало. Параллельно мы исследуем другие типы датчиков, которые должны позволить робопчеле выполнять конкретные задачи, например поиск человека в завале, возникшем в результате землетрясения.

Возможностей прямого взаимного общения для сегодняшних робопчел мы, к сожалению, пока не предвидим: беспроводная связь потребовала бы слишком большой мощности. Однако это не значит, что пчелы будут действовать несогласованно.

Колония и обмен информацией

Отдельная робопчела слишком мала по сравнению с миром, для действий в котором она предназначена: ее возможности невелики, а вес и запас энергии резко ограничивают выбор датчиков и средств связи. Поэтому, кроме исследований тела и мозга робопчелы, мы должны понять, как сформировать колонию. Как и реальная медоносная пчела, робопчела мало что может сделать в одиночку. А рой? Групповое поведение позволит механическим пчелам обследовать большие площади, характеризовать их с помощью данных ряда простых наблюдений, осуществлять эффективное разделение труда и преуспевать даже при потере отдельных особей. Рои миниатюрных, проворных и потенциально «одноразовых» робопчел могут осуществлять, например, опыление цветов, поиск людей при стихийных бедствиях и множество других операций, неосуществимых с помощью одиночных роботов.

С начала 1990-х гг. специалисты по информатике, работающие в области «роевого интеллекта», прояснили множество эффективных алгоритмов координации, используемых общественными насекомыми, — от стратегий координированного поиска до разумного разделения труда. Но даже располагая этими алгоритмами, управлять роем роботов так же, как единичным роботом, невозможно.

В частности, методы программирования и задания логики поведения на уровне отдельного робота становятся непригодными для тысяч роботов. Это все равно что просить рядового программиста сесть и написать команды для каждой единицы памяти компьютера. Нам нужен абстрактный метод программирования высокого уровня с точно таким же принципом действия, как у компиляторов, переводящих понятные человеку команды в последовательности единиц и нулей, управляющих отдельными транзисторами микропроцессора, т.е. метод, перекодирующий общие программы для роя в алгоритмы поведения отдельных роботов. Нам нужен язык программирования для колоний.

Что такое правильный язык, собирающий данные о том, что делает колония, и что мы надеемся делать с помощью колоний робопчел? Простого ответа пока не существует, но для начала мы разработали два абстрактных языка. На языке *KarMA* можно задавать структурную схему задач, которые должна выполнять колония. Эта схема содержит связи, представляющие условия запуска выполнения новых задач. В системе *KarMA* информация, поступающая от отдельных роботов,

используется для выделения ресурсов под задачу подобно тому, как это происходит в рое живых пчел.

При другом подходе, названном *OptRAD* (*OPTimizing Reaction-Advection-Diffusion*, т.е. «оптимизация реакций, переноса и диффузии»), колония летающих роботов рассматривается как газ, диффундирующий в окружающую среду. Для того чтобы определить, нужно ли ей выполнять задачу при данной обстановке, каждая отдельная робопчела использует вероятностный алгоритм. Рассмотрение колонии как газа позволяет системе *OptRAD* определять ожидаемые результаты ее действий на высоком уровне и корректировать ее поведение применительно к новым обстоятельствам.

Много усилий мы приложили для того, чтобы понять, как строить большие колонии — не из десятков или сотен, а из тысяч автономных роботов — и как управлять колониями, число роботов в которых на порядки превосходит количество управляющих ими людей-операторов. В случае тысяч роботов управление ими на уровне отдельных единиц становится невозможным. Вообразите, что каждый робот имеет переключатель и что каждое его переключение занимает пять секунд. Тогда для переключения 1 тыс. роботов потребуется около полутора часов. Подобные ограничения применимы ко всему — от стоимости до техобслуживания: каждый робот должен быть дешевым, простым в изготовлении и доступным в эксплуатации на коллективном уровне. В идеальном случае каждая операция должна быть масштабируемой, т.е. занимать фиксированное время, которое не должно увеличиваться с увеличением размера коллектива (в крайнем случае — увеличиваться очень медленно).

Эти трудности побудили нас создать систему *Kilobot* — группу из сотен роботов размерами с 25-центовую монету, движущихся с помощью вибрации и общающихся с соседними роботами. Мы могли использовать такую группу для оценки эффективности наших языков программирования и математических моделей возникающего поведения. Ведь без работы с реальными роботами мы едва ли смогли бы понять поведение физических систем.

Совокупность робопчел можно будет использовать для испытания многих видов группового поведения, которых мы хотели бы добиться от колоний роботов. Например, мы можем задать поиск неких объектов в окружающей среде, чтобы, когда какой-то из роботов обнаружит такой объект, он сообщил о его местонахождении всей группе. Конструкцию робота системы *Kilobot* мы сделали открытой для групп, желающих построить собственные роботы. Можно также приобрести «полуфабрикаты» роботов у компании *K-Team*. Мы надеемся, что подобные стандартизированные

полуфабрикаты помогут выработать новые идеи и дадут толчок коллективным достижениям в науке, на которые не способны отдельные группы, — ведь и мы рассчитываем на коллективные возможности, чтобы стать чем-то большим, чем просто сумма частей.

Будущее

Хотя мы достигли значительных успехов, предстоит еще многое сделать. Мы ожидаем, что в ближайшие годы сможем заставить робопчел летать в строго контролируемых лабораторных условиях. Через пять-десять лет после этого мы надеемся увидеть их широкое применение.

В 1989 г. известный специалист по роботам Родни Брукс (Rodney Brooks) написал статью «Быстрые, дешевые и неуправляемые: нашествие роботов на Солнечную систему» (*Fast, Cheap and Out of Control: A Robot Invasion of the Solar System*) о преимуществах малых роботов для исследования космоса. В ее названии, разумеется, обыгрывается старая поговорка инженеров, что к потребительским продуктам обычно применимы две из трех следующих характеристик: быстрый, дешевый, надежный, но не все три сразу. Для большинства людей отсутствие одной из них не имеет существенного значения.

Брукс оказался пророком, предсказав интерпретацию этой формулы с точки зрения робототехники. Если вы можете сделать очень много простых устройств, эффективно работающих совместно, кого будет заботить, что некоторые из них порой выходят из строя? Единственный способ обеспечения успеха роботов-исследователей состоит в том, чтобы позволить им порой спускаться с небес на Землю. ■

Перевод: И.Е. Сацевич

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

■ *Kilobot*: A low Cost Scalable Robot System for Collective Behaviours. Michael Rubenstein, Christian Ahler and Radhika Nagpal in 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 3293–3298; May 14–18, 2012.

■ Progress on "Pico" Air Vehicles. R.J. Wood et al. in International Journal of Robotics Research, Vol. 31, No. 11, pages 1292–1302; September 2012.

■ Канал Гарвардской лаборатории микроробототехники на YouTube: www.youtube.com/MicroroboticsLab

■ Видео полета робопчел см. по адресу: ScientificAmerican.com/mar2013/robobees