

Нейросеть помогла понять, как насекомые управляют своим полётом.

(Фото: Macroscopic Solutions / Flickr.com) Открыть в полном размере < >

Что за вопрос – «как летает муха»? Машет крыльями и летает – как птица или летучая мышь. Но крыло насекомого устроено совсем не так, как у птицы или летучей мыши. Крыло позвоночных – изменённая передняя конечность. У него есть свои кости с суставами; скелет крыла через плечевой сустав соединён со скелетом туловища. У птичьего и летучемышиного крыла есть свои мышцы, управляющие полётом. Несмотря на все изменения, в целом оно устроено так же, как наша рука или кошачья лапа.

Крыло насекомых – это вырост экзоскелета. Оно укреплено более или менее толстыми жилками, которые заполнены гемолимфой и в которых проходят нервы и ветви трахеи, но никаких костей и мышц в нём нет. (Собственно, у насекомых костей в нашем обычном понимании нет вообще.) С туловищем крыло соединяется тоже иначе, с помощью системы склеритов. Так называются плотные кусочки кутикулы, подвижные друг относительно друга. Склериты работают как передаточный механизм: когда один склерит меняет положение, это чувствуют его соседи, и, в конечном счёте, само крыло.

Чтобы двигать крыльями, нужны мышцы. Летательные мышцы у насекомых прячутся в туловище, в головогруди. У стрекоз и у подёнок эти мышцы соединены с основанием крыльев и непосредственно ими управляют, то есть сокращения мышц передаются сразу на крыло. У остальных насекомых всё сложнее: у них работа мышц передаётся крыльям через посредников, то есть через элементы экзоскелета головогруди. Сокращаясь, разные группы летательных мышц деформируют экзоскелет, сжимая и растягивая его в разных направлениях, и эти микродеформации передаются крыльям, которые движутся вверх и вниз. Насекомые машут крыльям очень часто, соответственно их мышцы тоже должны сокращаться и расслабляться с высокой частотой. Есть насекомые, у которых каждому мышечному сокращению соответствует нейронный импульс – они не могут махать крыльями чаще, чем сто раз в секунду. И есть другие насекомые, с большей частотой взмахов – их мышцы сокращаются чаще, чем к ним прибегают импульсы из мозга. Их мышцы так организованы, что благодаря определённым биомеханическим законам они могут сокращаться и расслабляться много раз, получив всего один нейронный сигнал.

Это всё касается «моторных», силовых мышц, благодаря которым крыло движется вверх-вниз. Но в полёте нужно ещё рулить, нужно выбирать направление, менять курс, и т. д. Насекомые способны выделывать в воздухе невероятные кульбиты, и рулевая система у них должны быть устроена весьма сложно. Всё действительно так: если взять

дрозофилу, у неё есть двенадцать рулевых мышц, которые крепятся к тем самым склеритам, которые соединяют крыло с туловищем. Остаётся только понять, какие мышцы и склериты отвечают за те или иные изменения в положении крыльев, за те или иные воздушные манёвры.

Схема крепления крыла мухи к туловищу. Серым окрашен фрагмент крыла, прямоугольником выделен комплекс склеритов и крепящихся к ним мышц (окрашены разными цветами). (Иллюстрация: Johan M. Melis et al., Nature, 2024)

Этой задачей уже несколько лет занимаются сотрудники Калифорнийского технологического института, и об их результатах мы уже как-то писали. Проблема в том, что нейроанатомические исследования позволяют описать мушиный полёт только в общих чертах. Можно, условно говоря, подёргать за одну мышцу, или за две, или за три, и посмотреть, что происходит со склеритами и крылом; можно даже записать активность мышц у живой мухи и с помощью математических и механических моделей представить, как мышечная активность влияет на полёт. Но это всё равно будет лишь приблизительное описание механики управления. Чтобы избавиться от приблизительности, нужно наблюдать за живой мухой в полёте, сопоставляя естественные движения крыльев с работой мышц.

Активность мышц можно увидеть живьём благодаря генетической инженерии. В работающих мышцах резко перегруппировываются ионы кальция между клетками и межклеточной средой. Потоки кальция можно зарегистрировать с помощью флуоресцентного белка, который начинает светиться в ответ на кальциевые изменения. Исследователи ввели в геном дрозофил ген этого белка, который у модифицированных мух синтезировался во всех рулевых мышцах. Затем мухам устраивали что-то вроде виртуальной реальности: они были неподвижно закреплены на весу в специальной камере и могли свободно махать крыльями, а вокруг них был экран со светодиодами. Светодиоды, которые загорались то так, то этак, заставляли муху думать, что она летит то туда, то сюда; соответственно, её можно было заставить двигать рулевыми мышцами, чтобы сменить направление полёта.

Дрозофил снимали высокоскоростной камерой, чтобы зафиксировать движения крыльев. Кадров с разным положением крыла набралось около 70 тыс. Одновременно исследователи записывали, что происходит у мух с рулевыми мышцами, где флуоресцентный белок светится, а где нет. Дальше оставалось сопоставить активность мышц (по светимости белка) и движения крыльев. Для этого использовали

обучающейся нейросеть, архитектура которой имитировала механику соединения крыла и туловища: у нейросети было четыре узла, которые соответствовали четырём склеритам; каждый склерит получал сигналы, соответствующие тем мышцам, которые с ним соединены. Ещё один узел нейросети обрабатывал данные, касающиеся частоты взмахов крыла.

В итоге работу рулевых мышц удалось описать в таких деталях, о которых раньше и подумать не могли. Полученные данные проверили на роботе, который имитировал движения крыла мухи. Робот получал команды повернуть крыло так, как если бы у него были мышцы и склериты, которые сработали тем или иным образом. На механическом «крыле» были аэродинамические датчики, регистрировавшие скорость и давление воздуха эти датчики показывали, как изменится полёт, подчиняясь рулевым мышцам и склеритам. Робот, если бы он летал, действительно должен был бы двигаться так, как двигалась бы муха. Все результаты описаны в *Nature*.

В то же время многое здесь осталось за кадром. Например, поверхность крыла у мух в полёте выгибается аркой, что должно влиять на аэродинамику крыла и, следовательно, на работу мышц. Сейчас исследователи затрагивали эту тему, но внимания на ней не акцентировали. Кроме того, насекомые нередко используют крылья совсем не для полёта – например, самцы тех же дрозофил, ухаживая за самкой, вытягивают одно крыло и выбирают им в своеобразной брачной песне. И в таких манипуляциях с крыльями рулевые мышцы и склериты должны, вероятно, работать как-то по-особенному. Наконец, есть и другие насекомые: пусть крылья у них устроены по одному плану, свои особенности у разных групп наверняка имеют место. Так или иначе, оригинальное использование нейросетей для анализа рулевых движений крыльев в очередной раз продемонстрировало, насколько искусственный интеллект способен облегчить работу, если знаешь, какие вопросы ему задавать. Подобные исследования не только помогают лучше понять мир насекомых, но и, возможно, пригодятся в практической инженерии: вряд ли нас ждут летательные аппараты с крыльями, но сама механика управления с помощью склеритов может оказаться где-нибудь полезной.

Автор: Кирилл Стасевич

Статьи по теме:

#биомеханика #полет #насекомые

Одни из самых мелких насекомых в мире изобрели собственный стиль полёта.

Орхидейные богомолы планируют на ногах

Дрозофилы маневрируют в полете с помощью двенадцати рулевых мышц, каждая из которых управляет только одной нервной клеткой.

Если колибри видят, что отверстие перед ними меньше, чем размах их крыльев, они пролетают сквозь него одним крылом вперёд, а другим назад — или же просто летят на инерции, подобно пуле.