

Системы активного зрения в живой природе: моделирование процесса анализа трехмерных текстурных сцен шмелями в движении

О.В.Левашов, П.М.Филимонов

Московский государственный университет, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 16.01.2002

Аннотация—В работе рассматривается задача анализа сложных зрительных движущихся сцен в живых системах с простым зрением (по сравнению со зрением человека) и простыми нейронными сетями на примере наблюдений за летающими шмелями.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача анализа сложных зрительных сцен (ЗС) в движении чрезвычайно сложна с вычислительной точки зрения и далека от решения не только в техническом, но и в компьютерном зрении (т.е. на стадии исследования алгоритмов в виртуальном пространстве).

В то же время в живых системах с не очень развитым зрением (по сравнению со зрением человека) и простыми нейронными сетями такие задачи решаются элементарно. Например, наблюдения за летающими шмелями показали, что после фуражирования (т.е. после собирания пищи для семьи) на отдаленном расстоянии от гнезда шмели легко находят замаскированный вход в свое гнездо и влетают в него, не выходя из режима плавного снижения.

В данной работе проведен анализ экспериментальных данных по влету в свое гнездо шмелей (Ш) при наличии различных преград и препятствий и сформулирована концепция активного распознавания знакомых ЗС в движении по изменениям оптического потока (ОП). Описана нейроподобная многослойная структура, с помощью которой возможно запоминание и распознавание ЗС в процессе движения с минимальной обработкой и минимальной зрительной обратной связью. Предварительные результаты компьютерного моделирования подтверждают перспективность такого подхода к моделированию управления в сложных движущихся системах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ (ФЕНОМЕНОЛОГИЯ АКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ШМЕЛЕЙ)

Шмели-фуражиры как правило собирают пищу далеко от своего гнезда, которое обычно располагается в земле и вход в который скрыт из виду. Несмотря на возможные изменения визуальной обстановки вокруг гнезда (ветер колышет траву над гнездом, появляются посторонние предметы, меняется цвет травы и т.д.) шмели безошибочно и без остановок влетают в него.

Мы создавали различные помехи для влета Ш в гнездо и фиксировали изменение их поведения с помощью телекамеры. Перечислим лишь основные варианты изменения визуальной среды около гнезда, которые, как мы полагали, могли изменить траектории влета Ш в гнездо или вообще помешать таковому: перенос гнезда в сторону, закрывание гнезда ящиком с отверстием сбоку, помещение над гнездом фигурной сетки с крупными ячейками, добавление в сцену объемных объектов из природных материалов (в этом случае они были замаскированы на окружающем фоне, но могли быть замечены при движении за счет двигательного параллакса) (см. [1],[3],[4]). Полученные данные могут быть суммированы следующим образом:

1. Ш практически всегда находят вход в свое гнездо, меняя при этом траектории полета, делая характерные поисковые галсы, вплоть до перехода на режим хаотического зигзагообразного полета над самой поверхностью земли.
2. Первый вылет из гнезда после изменения обстановки в окружающем пространстве всегда сопровождается характерным изменением траекторий вылета: при вылете Ш поворачиваются назад, головой в направлении гнезда, и совершают короткие смещения из стороны в сторону.
3. Добавление на сцену новых трехмерных объектов вблизи входа в гнездо всегда вызывает вышеописанный паттерн поисковой активности, тогда как удаление явных препятствий может остаться без внимания и Ш продолжают влетать по измененной траектории, как бы огибая “виртуальное препятствие”.

Анализ полученных данных позволил нам выдвинуть следующую гипотезу: *Ш представляют собой объекты с активным зрением, позволяющим анализировать трехмерные ЗС в движении за счет вычисления двигательного параллакса (ДП) и градиентов оптического потока (ОП).*

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕМА В ДВИЖЕНИИ ПО ДП И ОП

Определим, что понимается под ДП и ОП. ДП — это различие в скоростях смещения по сетчатке изображений более близких и более далеких предметов. Под ОП понимается векторное поле скоростей точек, различимых глазом в поле зрения. При подлете к вертикальной текстурной плоскости или при полете строго над такой плоскостью ОП имеет характерный вид, который можно с некоторой натяжкой назвать “ламинарный ОП”, т.е. ОП без сильных локальных градиентов скоростей. При полете над текстурной плоскостью по сложным криволинейным траекториям, равно как и при простом пролете над сложным естественным рельефом с текстурами возникают локальные градиенты скоростей и такое ОП можно условно назвать ОП “турбулентного типа”. Показано, что любое сложное движение в пространстве, ограниченном текстурными поверхностями, приводит к сложному ОП, в котором можно всегда выделить 3 компоненты — смещение, вращение и приближение (или удаление) ([1]). Показано, что путем выделения и анализа этих компонент ОП можно решить обратную задачу — реконструировать характер движения системы с активным зрением в пространстве (однако только при условии движения в пространстве с простой геометрией, например при наличии одной опорной плоской поверхности) ([1]).

4. АНАЛИЗ “РЕПЕРТУАРА” ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ Ш ПРИ ВЛЕТЕ И ВЫЛЕТЕ

Траектории (Т) вылета. Как было сказано выше, поисковый вид активности Ш включает боковые смещения с достаточной амплитудой и с поворотом в сторону гнезда. В обычном случае вылет осуществляется по простым гладким восходящим Т, но в некотором угловом секторе, соответствующем направлению полета при фуражировании. У пчел в аналогичных условиях отмечена еще одна характерная Т — восходящая спираль с расширяющимся радиусом (если взлет пчелы не сопровождался таким паттерном, то обнаруженный источник пищи не мог быть найден повторно).

Траектории влета. Общей их чертой является то, что это гладкие Т, “вписанные” в окружающий гнездо 3-мерный рельеф. Несмотря на их кажущееся многообразие, все Т влета можно отнести к нескольким формам: пикирование, спуск по глиссаде (как при посадке самолетов), петли, крюки и полукрюки.

Такой ограниченный набор траекторий и факт их “гладкости” позволяет нам предположить следующее. Гладкость Т полета Ш объясняется не столько энергетическими соображениями (затраты энергии в полете по траекториям с минимальным управлением меньше, чем при “фигурном пилотировании”), сколько необходимостью решать сложную задачу анализа и распознавания ЗС в движении путем вычисления ДП и градиентов ОП.

Теперь мы можем сформулировать основную гипотезу этой работы следующим образом. *Активные зрительные системы объектов живой природы при полете по особым гладким траекториям могут решать одновременно 2 задачи: оценку характера собственного движения (своего рода обратная связь) и определение характера трехмерного рельефа в ограниченном пространстве вблизи значимого объекта (обычно гнезда). При этом вычисляется ДП и градиенты ОП.*

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОГО МЕХАНИЗМА АНАЛИЗА ЗС В ДВИЖЕНИИ НА НЕЙРОННЫХ СТРУКТУРАХ

В данной работе описана многослойная структура из нейроподобных элементов, предположительно имеющаяся в нервной системе шмеля, которая служит для реализации следующего алгоритма анализа, запоминания и распознавания знакомой зрительной сцены в районе входа в гнездо Ш.

1. Формирование упрощенной 3-мерной ментальной схемы прилегающей к гнезду ЗС, основанное на вычислении ДП при скачкоподобных поперечных смещениях Ш в процессе вылета и отлета от гнезда.
2. Использование данной схемы для “прокладки” гладкой траектории, огибающей основные препятствия и ведущей к входу по кратчайшему пути (отбор оптимальной Т выполняется за несколько возвратов после фуражирования).
3. Вычисление и запись в динамическую память наиболее меняющихся в тангенциальном направлении компонентов ОП в выделенных особых точках Т вблизи основных “вех” (наиболее выраженных трехмерных объектов на пути в гнездо).
4. После многих успешных влетов при условии сохранения геометрии ЗС около гнезда осуществляется переход на полет под управлением “зрительной кинестезии” (автоматический влет по выбранной Т с минимальной обратной связью в нескольких особых точках вблизи основных вех.

В данном алгоритме тангенциальные компоненты ОП вычисляются с помощью детекторов движения, расположенных в виде двумерного слоя с ретинотопическим представлением видимой ЗС (т.е. видимая сцена отображается на данный нейронный “экран” топологически, с сохранением основных пространственных соотношений. Основной экранный слой нейронов соседствует с двух сторон (наподобие многослойного сэндвича) со слоями запоминающих и сравнивающих нейронов. Имеется также механизм нейронного “тайминга”, запускающего запомненную последовательность зрительных следов (компонентов ОП) для сравнения с временными паттернами сигналов, поступающими в процессе полета. Чем реже запускаются следы памяти, тем больше степень “зрительной кинестезии” при влете.

Данный механизм объясняет феноменологию активного поведения Ш при отлете и влете в гнездо.

6. МАШИННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АНАЛИЗА СЦЕН В ДВИЖЕНИИ В ВИДЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ “СМАЗАННЫХ” СЦЕН.

Проблема поиска корреспондирующих точек (КТ) на изображениях (ИЗ). Для того, чтобы анализировать видимое движение в компьютерном зрении, необходимо сравнивать ряд последовательных кадров с целью поиска КТ, т.е. идентичных точек, соответствующих проекциям одной и той же реальной точки ЗС ([?]). Тогда по смещению проекций можно определить и скорость и направление движения. Для того, чтобы оценить как и с какой скоростью движется активная зрительная система над поверхностью сложной трехмерной формы, на которой нанесена текстура, т.е. более или менее регулярная структура точек, пятен и т.п., необходимо выполнить колоссальный объем вычислений. Пока что в машинном зрении эта проблема далека от разрешения. Тем более она трудна для обработки Из реальных сцен, которые в основном выглядят как трехмерные текстурные рельефы.

Тот факт, что живые зрительные системы, в частности у Ш, легко решают эту задачу в реальном масштабе времени, наводит на мысль, что они используют совершенно иные алгоритмы обработки Из в движении.

“Смазанные” при движении изображения и их обработка. Проблему поиска КТ на последовательных кадрах можно обойти, если допустить, что эти кадры накладываются друг на друга, в результате чего получается суммарное “смазанное” Из (СМИЗ). В машинном зрении накоплен опыт борьбы с СМИЗ, поскольку считается, что они некачественны и нужно восстановить исходное Из. Если известен характер движения камеры или быстродвижущегося объекта, снимаемого камерой, то реконструкция исходного Из оказывается возможной. Нас же интересует обратная задача — как по характеру СМИЗ установить характер движения и еще, быть может, примерную 3-мерную форму объекта на Из (в нашем случае это — характер рельефа поверхности с текстурой, над которой пролетает изучаемый объект — Ш). Решить эту задачу, очевидно, можно не для всех видов поверхностей. Если поверхность гладкая, однородная или зеркальная, то по СМИЗ уже ничего нельзя восстановить, информация о поверхности теряется. Однако в случае текстурных поверхностей, которые широко распространены в реальных сценах, по характерным паттернам, возникающим в СМИЗ, как оказалось можно установить и характер движения и примерную форму наблюдаемой в движении поверхности.

В предварительном вычислительном эксперименте мы анализировали плоские поверхности со случайными и регулярными текстурами из точек, относительно которых активная зрительная система (в данном случае — виртуальная телекамера в программе 3D Studio) двигалась по самым простым траекториям — со смещением строго вбок, с вращением и с приближением к поверхности (чистое пикирование). В полученных СМИЗ хорошо просматриваются регулярные точечные структуры — параллельные линии, кольцевые системы линий и радиальные линии, соответственно. Обработка таких СМИЗ с помощью локальных цифровых операторов описана в литературе и не представляет сложности ([3]). В результате по наличию в СМИЗ указанных выше регулярных структур можно восстановить характер траектории движения зрительной системы (или виртуальной телекамеры).

Вторая из поставленных нами задач — определение формы рельефа, дающего СМИЗ при пролете над ним. Пока она может быть решена при строго заданных простых траекториях полета над рассматриваемой поверхностью. Мы использовали пока только горизонтальный полет на одной высоте с неизменным курсом. В этом случае движение над плоской текстурной поверхностью дает СМИЗ с ориентированными в направлении полета линейными структурами. Однако при пролете над выпуклым фрагментом возникают тангенциальные линейные составляющие по центру СМИЗ. Наличие таких составляющих на последовательности СМИЗ, получаемой при всем пролете над рельефом позволяет определить примерный вид этого рельефа, по крайней мере в одном сечении, совпадающем с направлением полета.

Основная проблема в этой задаче связана с различием впадин и выпуклостей, поскольку по СМИЗ невозможно восстановить направление смещения точек в процессе полета, эта информация теряется. Выход состоит в использовании специальной поисковой стратегии полета — многократном полете с подъемами и спусками, чтобы “огнать” данный рельеф. В этом случае тангенциальные составляющие на СМИЗ будут отсутствовать. По нашим наблюдениям именно так поступают и Ш — летая над неровной поверхностью они как бы повторяют ее рельеф.

Таким образом, путем сочетания обработки СМИЗ и использования специальных стратегий полета, можно достаточно точно (для задачи влета в гнездо, по крайней мере) распознавать и запоминать любой рельеф вблизи цели (в данном случае — гнезда).

7. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена концепция обработки смазанных при движении текстурных изображений, позволяющая обойти трудную задачу поиска корреспондирующих точек на последовательных кадрах.

2. Описан алгоритм обработки смазанных текстурных изображений, позволяющий реконструировать характер рельефа поверхности в одном сечении, совпадающем с направлением полета.
3. Обоснована концепция активного полета по специальным гладким траекториям, которая в сочетании с алгоритмом обработки смазанных изображений объясняет способность активных систем в живой природе точно отслеживать и запоминать рельеф в окрестности цели (гнезда).
4. Таким образом, изучение процессов обработки и передачи информации в живых системах еще раз позволяет сделать определенный шаг в направлении развития компьютерных и технических систем зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибсон Дж. *Экологический подход к зрительному восприятию*. М.: Прогресс, 1988, 462 с.
2. Ульман Ш. *Принципы восприятия подвижных объектов*. М.: Радио и связь, 1983, 168 с.
3. Левашов О.В. *Вычислительные модели сенсорных систем*. М.: ВИНТИ, 1989, 151 с.
4. Levashoff O. A Possible Insect Neural Mechanism for Visual Depth Estimation. *Proc. of 3rd Intern. Congr. of Neuroethology*, 1992, Montreal, McGill Univ., p. 176.
5. Levashova H., Levashoff O. Computer Simulation of Insect Visual World in a Flight over 3D Texture Surface. *Nervous System and Behavior, Proc. of 4th Intern. Congr. of Neuroeth.*, Cambridge, 1996, p. 269.
6. Levashoff O.V., Philimonov P.M. Visual Mechanisms of Bumble-Bee Nest Aiming: Evidence of 3D Form Reconstruction from Texture in Motion. *ibid.*, p. 270.
7. Philimonov P.M., Levashoff O.V. Videoecology of Attention of the Bee: Switching to a New Strategy of Targetting After a Change in the Relief of the Surroundings. *Proc. of 5th Intern. Congr. of Neuroeth.*, San-Diego, 1998, p. 255.
8. Levashov O.V., Philimonov P.M., Neuronal Computation in the Bumble-Bee Aiming at the Nest: Optic Flow Processing or Image Matching? *ibid.*, p. 256.

Статью представил к публикации член редколлегии В.А. Любецкий