



# Нейроморфное моделирование и биоробототехника

М.Г.Кузьмина

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН



# План

1. Нейроморфное моделирование.
2. Примеры биологически мотивированных нейросетевых моделей:
  - a) зрительная система
  - b) слуховая система;
  - c) обонятельная система.
3. Достижения в области биоробототехники.

# Нейроморфные системы и нейроморфное моделирование

- Под **нейроморфными системами** понимаются модели искусственных нейронных сетей, архитектура и дизайн которых основаны на особенностях структуры и принципах работы реальных нейробиологических систем. Их моделирование стимулировано желанием понять и технически воплотить такие ключевые особенности нейронных структур мозга, как **высокая чувствительность, адаптивность, обучаемость, устойчивость к повреждениям, способность иметь дело с нечеткой, избыточной, зашумленной информацией** и, наконец, **параллельный и распределенный способ обработки информации**.
- Нейроморфное моделирование и последующее использование разработанных моделей в области **биоробототехники** находится на пересечении нескольких областей исследований, в том числе **нейробиологии, теории нейронных сетей, математического моделирования, электронной техники**.
- В последнее десятилетие возрос интерес к **динамическим нейроморфным методам обработки информации**. Это связано с тем, что колебательная нейронная активность, **синхронизация и резонанс** используются как «рабочий инструмент» при функционировании многих структур мозга (зрительная система, слуховая система, обонятельная система, гиппокамп, таламо-кортикальная система, новая кора).

# Нейроморфные системы

- Модели искусственных нейронных сетей из **формальных** нейронов предназначены для изучения особенностей **параллельно** работающих **вычислительных систем** в условиях неполной, нечеткой, зашумленной информации. **Нейроморфные** системы предназначены для выяснения **principles работы нейронных структур мозга**. Поэтому при их моделировании используются более сложные модели активных элементов, такие как **импульсные** («спайковые») **нейроны, нейронные осцилляторы**.
- Нейроморфные системы так или иначе связаны с функционированием в **реальном времени**. Поэтому они приспособлены для **аналогового воплощения**.

К числу ведущих центров, занимающихся, в частности, аспектами технического воплощения нейроморфных систем, относятся

- Artificial Intelligence Laboratory, University of Zurich, Switzerland;
- Institute for Neuroinformatics, EPFL, Lausanne, Switzerland;
- Center of Visual Research, York University, Canada;
- Center for Neuromorphic Systems Engineering, CalTech, USA;
- Институт нейрокибернетики им. А.Б.Когана, РГУ. Россия.

# Осцилляторные нейросетевые модели

Уже более четверти века уделяется внимание построению осцилляторных нейросетевых моделей обонятельной, зрительной и слуховой систем мозга.

Мы остановимся на трех примерах таких моделей:

1. Осцилляторная сеть для обработки (сегментации) изображений.  
(М.Г. Кузьмина, Э.А.Манькин, И.И.Сурина).
2. Осцилляторная сеть для сегментации смешанных акустических потоков  
(D.Wang & G.J.Brown);
3. Система связанных нейронных сетей, моделирующая работу обонятельной системы мозга (Z.Li & J.Hertz);

В первых двух моделях использована гипотеза о существовании **динамического связывания** нейросетевых ансамблей посредством **синхронизации колебаний**.

В третьей – **резонансная связь** двух сетей с осцилляторной динамикой.

Каждая из моделей доставляет **динамический метод обработки информации**, которому свойственны :

- **параллельность** алгоритма обработки;
- **«автоматизм»** обработки, основанный на **самоорганизованном сетевом связывании** нейросетевых ансамблей;

## Мотивации при построении осцилляторной модели зрительной коры

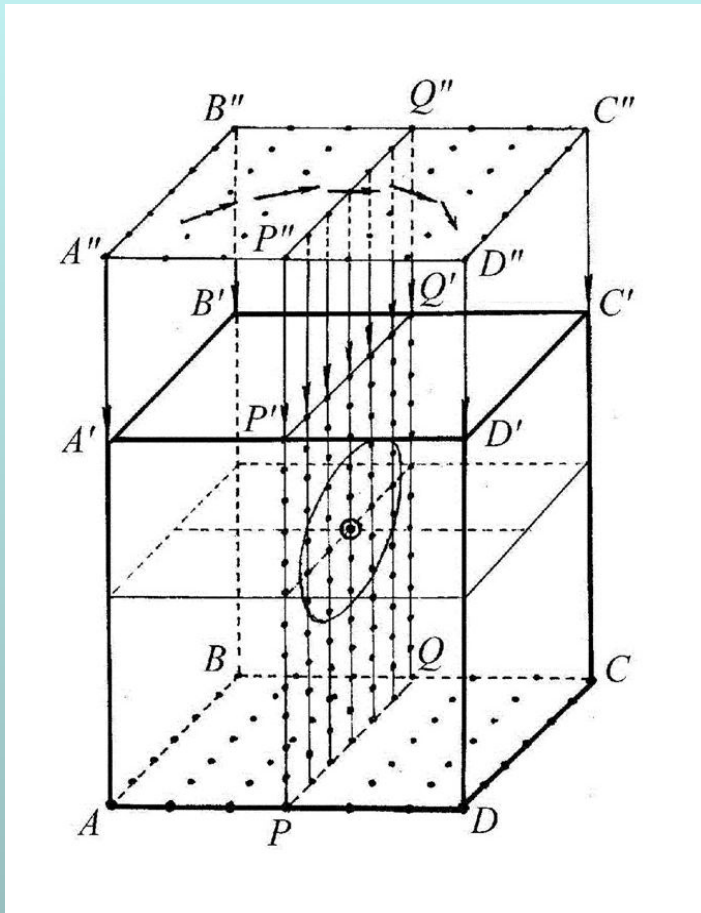
- Синхронизованные колебания нейронной активности, впервые экспериментально открытые в зрительной коре мозга кошки и обезьяны в 1988-1989г. и затем подтвержденные в последующих экспериментах;
- Свидетельства об использовании явлений синхронизации и резонанса при функционировании многих структур мозга помимо зрительной коры (обонятельной системы, слуховой системы, гиппокампа, таламо-кортикальной системы, новой коры, спинного мозга).



## Модель трехмерной осцилляторной нейросети (модель зрительной коры)

- Активный элемент сети – нейронный осциллятор;
- Пространственная архитектура  $3D$  сети имитирует колончатую структуру зрительной коры (VC);
- «срабатывание» сети состоит в синхронизации ансамблей динамически связанных осцилляторов (кластеров); оно имитирует самоорганизованное коллективное поведение ориентационно-селективных (простых) клеток зрительной коры на низшей стадии обработки зрительной информации;
- Сеть предварительно настраивается параметрами предъявляемого зрительного изображения – массивом пар  $[(I_{jm}, s_{jm})]$  (яркостей пикселей и ориентаций элементарных сегментов изображения). При этом производится настройка как внутренней динамики сетевых осцилляторов, так и динамических сетевых связей.

# Схема архитектуры 3D осцилляторной сети



- Изображение, подлежащее сегментации, задано в виде пиксельного разложения на  $A''B''C''D''$  согласованной с ним 2D решетке
- В каждом узле решетки определены две характеристики изображения – **яркость** пикселя  $I_{jm}$  и **ориентация** элементарного сегмента  $S_{jm}$
- Осцилляторы сети расположены в узлах 3D решетки внутри параллелепипеда  $ABCD A'B'C'D'$  так, что каждому **пикселю** соответствует одна **колонка** осцилляторов
- В каждом узле 3D решетки определены ориентации **рецептивных полей**  $n_{jm}^k$
- Полное число осцилляторов сети равно  $M \cdot N \cdot K$ , где  $M \cdot N$  – размер пиксельного массива, а  $K$  – число осцилляторов в колонке.



## Сетевой осциллятор

- Модель сетевого осциллятора была построена на основе биологически мотивированной модели нейронного осциллятора, образованного парой связанных нейронов зрительной коры (построена Ли (Z.Li) в 1998 г.).
- В  $3D$  модели осцилляторной сети это релаксационный осциллятор с динамикой, параметрически зависящей от яркости отвечающего ему пикселя  $I$  и взаимной ориентации  $s$  (элементарного направленного сегмента изображения) и  $n$  (ориентации направления рецептивного поля в той пространственной точке сети, где осциллятор расположен) .

Состояние осциллятора определяется парой действительных переменных  $u_1, u_2$ . Система ОДУ, управляющая динамикой, записывается для переменной  $u = u_1 + iu_2$ .

## Отклик сетевого осциллятора на изменение яркости пикселя

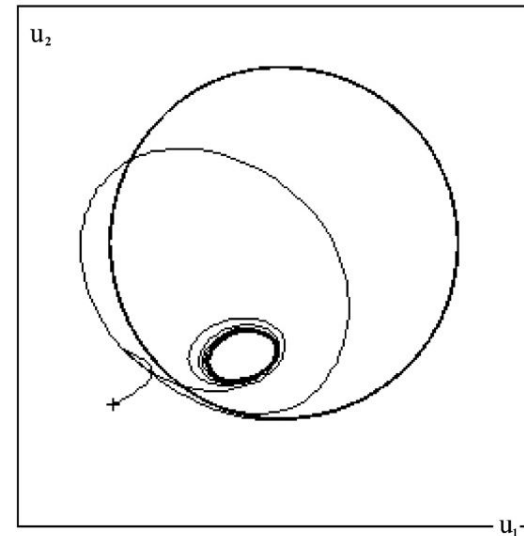
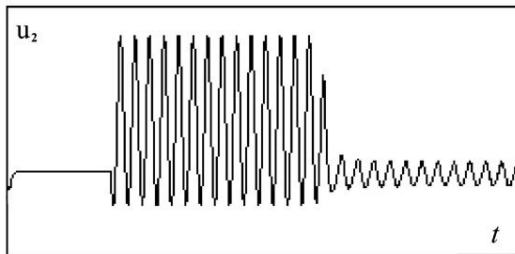
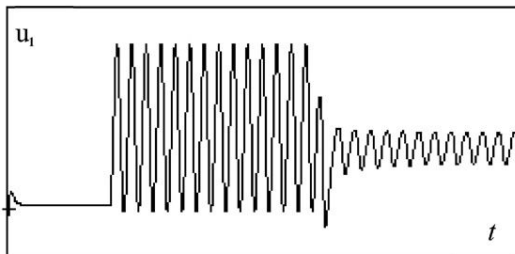
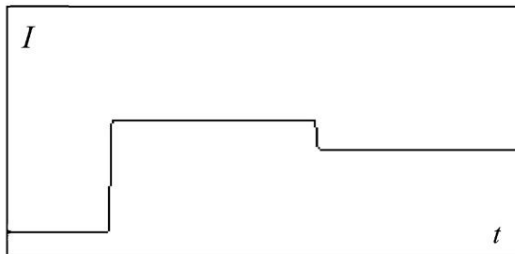


Fig. 2. The "response" of single network oscillator to time variation of pixel brightness: time-dependencies of both state variables (left) and the trajectory of dynamical system (right).

## Динамические связи в трехмерной сети

Состояние сети определяется массивом  $[u_{jm}^k]$  состояний осцилляторов. Динамика сети управляется системой ОДУ:

$$du_{jm}^k/dt = f(u_{jm}^k, \mu_{jm}^k) + S_{jm}^k; \quad 1 \leq j \leq M, \quad 1 \leq m \leq N, \quad 1 \leq k \leq K.$$

Функции

$$f(u, \mu) = (\rho_0^2 + i\omega - |u - c|^2)(u - c) + \mu, \quad \mu_{jm}^k = g(I_{jm}, s_{jm}; n_{jm}^k),$$

определяют внутреннюю динамику осцилляторов,  $S_{jm}^k$  - вклады за счет сетевого взаимодействия. В модели они построены в виде :

$$S_{jm}^k = \sum_{j', m', k'} W_{jj'mm'}^{kk'} \cdot (u_{j'm'}^{k'} - u_{jm}^k).$$

Величины  $W_{jj'mm'}^{kk'}$ , определяющие силы связей между осцилляторами, построены в форме произведения трех нелинейных функций, зависящих от **амплитуды колебаний** осцилляторов, **ориентаций рецептивных полей** и **пространственного расстояния** между осцилляторами в сети.

## Динамические связи в трехмерной сети

Правило сетевого связывания можно записать в виде

$$W_{jj'mm'}^{kk'} = P_{jj'mm'}^{kk'}(\rho, \rho') Q_{jj'mm'}^{kk'}(n, n') D_{jj'mm'}^{kk'}(|r - r'|),$$

где  $\rho$  и  $\rho'$  – размеры радиусов предельных циклов осцилляторов  $(j, m, k)$  and  $(j', m', k')$ ,  $n$  and  $n'$  – RF-ориентации для этих осцилляторов, а  $r$  и  $r'$  – радиус-векторы, определяющие их положения. Функции  $P$ ,  $Q$ ,  $D$  построены так, что любая пара осцилляторов сети оказывается связанной, если одновременно выполняются три следующих условия:

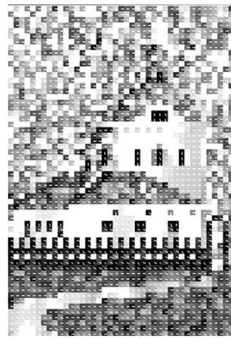
- a) оба осциллятора обладают надпороговой амплитудой колебаний;
- b) соответствующие им рецептивные поля имеют близкие ориентации;
- c) разделяющее осцилляторы расстояние не превышает заданного радиуса пространственного взаимодействия.

В противном случае связь отсутствует.

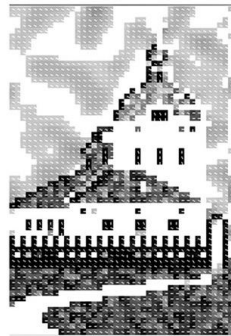
## Двумерная осцилляторная сеть для сегментации изображений

- $2D$  сеть является предельной версией исходной  $3D$  модели. Ее осцилляторы локализованы в узлах  $2D$  пространственной решетки, согласованной с пиксельным массивом изображения.
- Динамика сетевого осциллятора зависит **только от яркости** пикселя  $I$ . Сетевые связи нелинейно зависят от  $I$ ,  $s$  и заданного радиуса пространственного взаимодействия.
- Сегментация изображения состоит из двух фаз:
  - 1) **преднастройки** сети и
  - 2) процесса последовательной фрагментации изображения, которая требует  $L$  шагов, где  $L$  - число фрагментов изображения. Весь процесс сегментации требует  $L$  процессов **релаксации** осцилляторной сети **в состоянии синхронизации** при различных конфигурациях динамических связей, самоорганизованно возникающих в сети в соответствии с заданным правилом сетевого связывания. Использован метод управления силой взаимодействия в сети, обеспечивающий последовательную сегментацию.

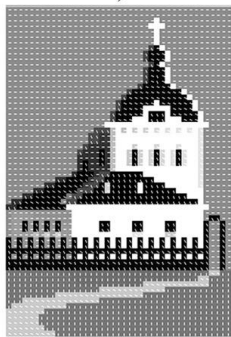
# Стадии работы двумерной осцилляторной сети



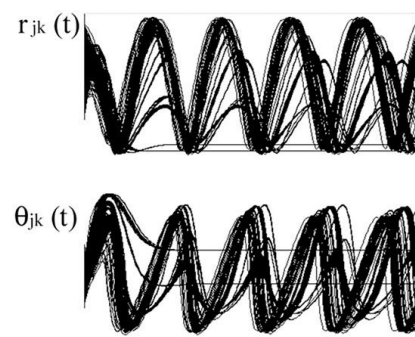
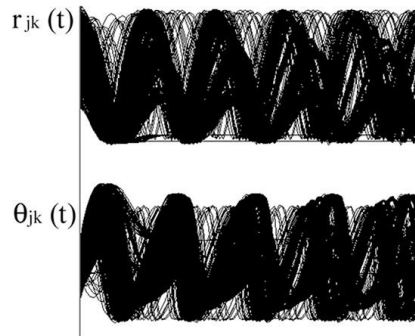
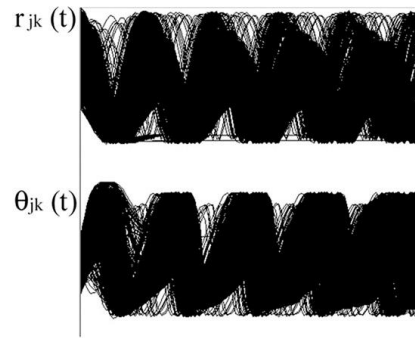
a)



b)



c)

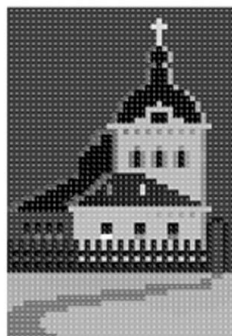




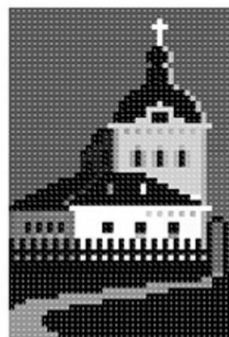
# Версии сегментированного изображения после синхронизации



0)



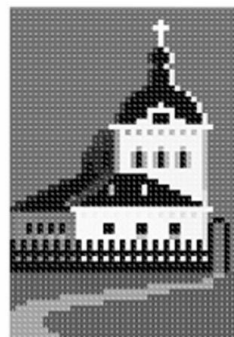
1)



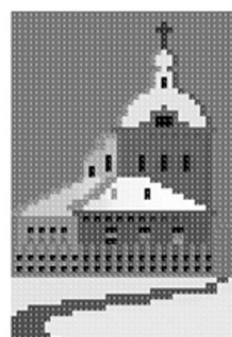
2)



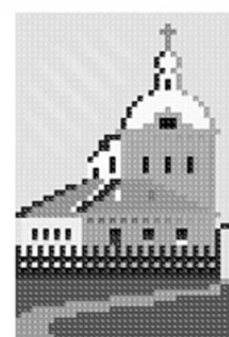
3)



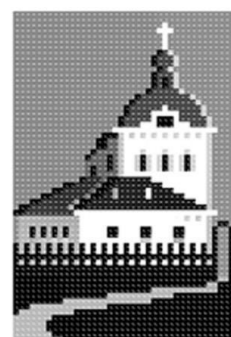
4)



5)



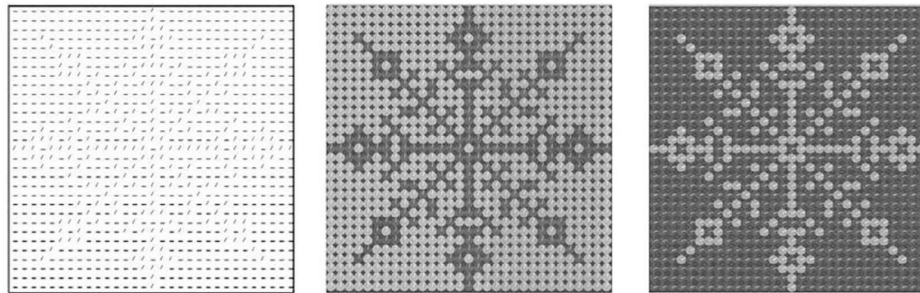
6)



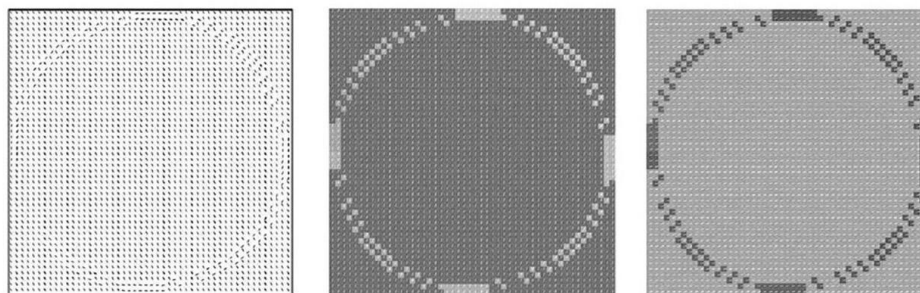
7)

A series of instantaneous versions of segmented image in the case of complete oscillatory network synchronization.

# Сегментация текстур

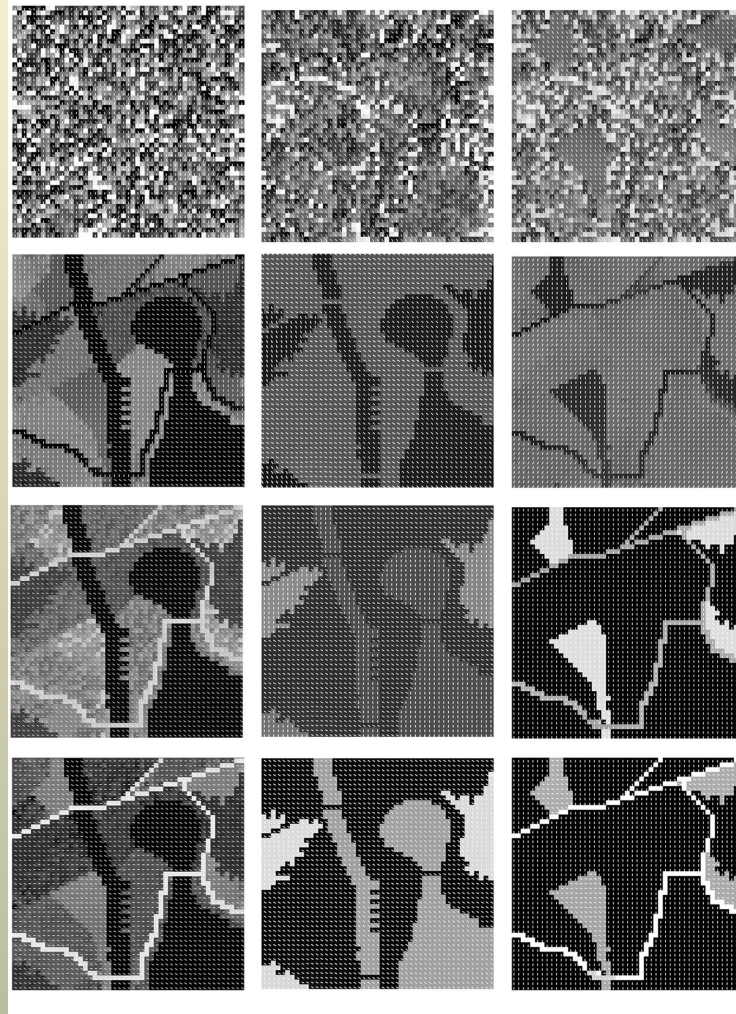


Segmentation of complicated contour selected solely by monodirected texture.



Segmentation of double closed contour selected solely by texture of continuously varied direction ("contour integration").

# К задаче зрительного поиска



a)

b)

c)

Выделение заданных фрагментов изображения: a) полное изображение; b) два наименее ярких фрагмента; c) два наиболее ярких фрагмента.

## Достоинства динамической сегментации

Нейросетевой динамический метод сегментации изображений обладает следующими достоинствами по сравнению с традиционными вычислительными:

- **параллельная и автоматическая** обработка;
- последовательное выделение всех фрагментов изображения;
- **информативная** и легко регулируемая **визуализация** результатов сегментации, доставляющая дополнительный инструмент анализа.

Метод включает в себе следующие потенциальные возможности:

- а) развитие до **аналогового метода**, допускающего обработку движущихся изображений **в реальном времени**;
- б) использование как основы для новых подходов к моделированию **активного зрения**.



# Колебания в слуховой системе мозга

- Поступающий в ухо **акустический сигнал** как правило представляет собой **смесь** многих **интерферирующих акустических потоков**. Встает непростая задача **разложения** смешанного потока на **составляющие его компоненты** ( анализ звуковой» сцены ).
- Человек и животные легко справляются с этой задачей. Поэтому интересно построить **имитацию нейробиологического процесса** разложения смешанного звукового потока.
- **Синхронизованные колебания 40 Hz** в слуховой системе мозга были экспериментально открыты, так же как в **зрительной** и **обонятельной** системах. Такие колебания наблюдались как в слуховой коре (1981 г.), так и таламусе (1991 г.) и были подтверждены в последующих экспериментах.
- Это привело к гипотезе о «динамическом» связывании посредством **синхронизации колебательной нейронной активности** в слуховой системе (C. von der Malsburg, 1981).
- Построение моделей **сетей связанных осцилляторов** для основанной на синхронизации обработке смешанных акустических потоков было естественной попыткой предоставить биологически-мотивированное решение задачи.

## Подход к обработке смешанного акустического потока

Биологически обоснованная **модель осцилляторной сети**, доставляющая метод выделения из смешанного акустического потока содержащихся в нем компонент, была построена Вангом и Брауном (D.Wang, G.J.Brown, 1999).

Обработка потока состоит из двух этапов.

1. На первом этапе находятся полный набор **частотно-временных характеристик потока** посредством пропускания его через **эталонную систему фильтров**, которая имитирует функции пропускания наружного и среднего уха. В каждом из каналов пропускания строятся а) **коррелограмма** и б) **интегральная коррелограмма**, позволяющая определить доминирующую частоту потока. Наконец, производится с) **кросс-корреляционный анализ** поступающего акустического потока.
2. На втором этапе производится основная обработка потока с помощью **двухслойной осцилляторной сети**. При этом:
  - **первый слой** производит разложение полного смешанного потока на полный набор его **элементарных частотно-временных «сегментов»**;
  - **второй слой** производит **группирование** множества элементарных сегментов в составляющие поток **компоненты**, то есть, **новый синтез** смешанного потока из его **элементарных составляющих**.



# Осцилляторно-сетевая обработка смешанного потока

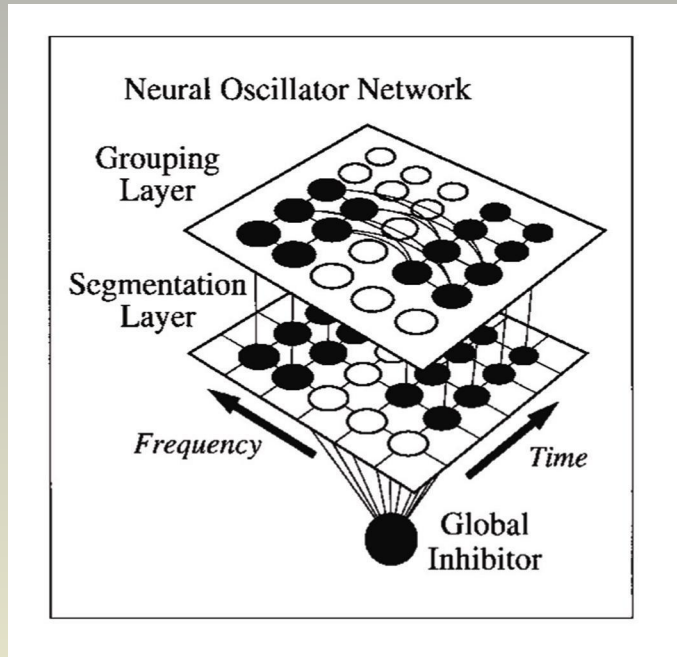


Схема осцилляторной сети

**Первый слой** сети (segmentation layer) имеет возбуждающие **связи**, построенные на основе **кросс-корреляционной информации** о потоке.

Кластеры синхронизованных осцилляторов, возникшие в этом слое, соответствуют распределению звуковой энергии потока на плоскости  $(f, t)$ .

**Второй слой** сети (grouping layer) имеет:

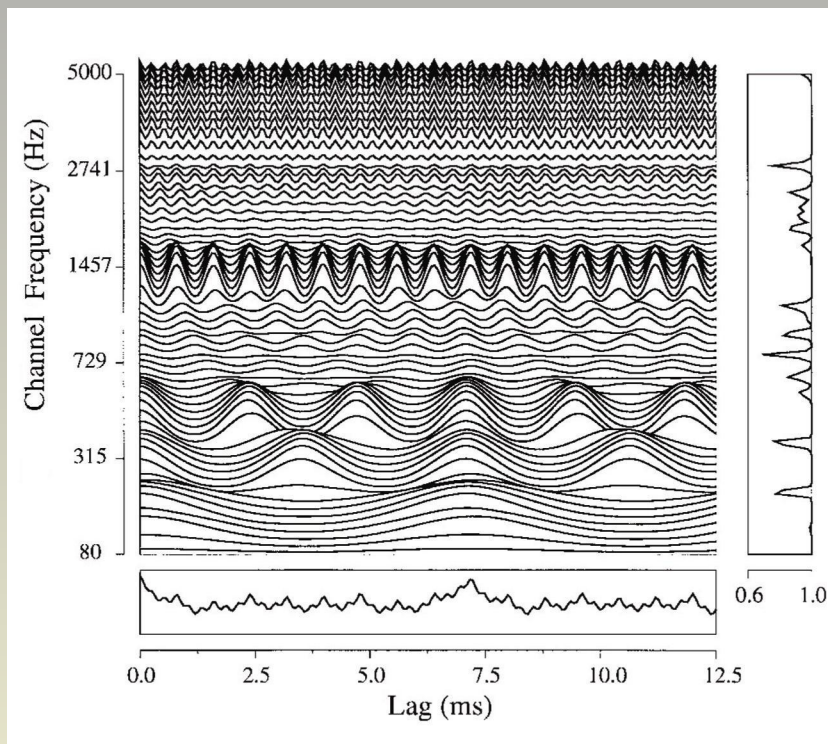
- внутренние связи**, зависящие от корреляционной информации потока и от структуры связей первого слоя;
- внешние (вертикальные) связи из первого слоя.**

Второй слой производит восстановление компонент смешанного акустического потока в следующей последовательности:

- восстановление **основной** (наиболее энергичной) компоненты потока;
- восстановление «**периферической**» части;
- восстановление «**средней**» части.

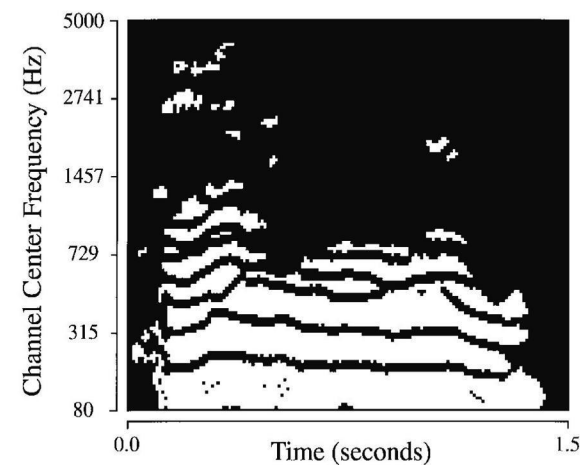
На последних двух этапах используются специальные **методы фильтрации.**

# Коррелограммы потока и результаты обработки

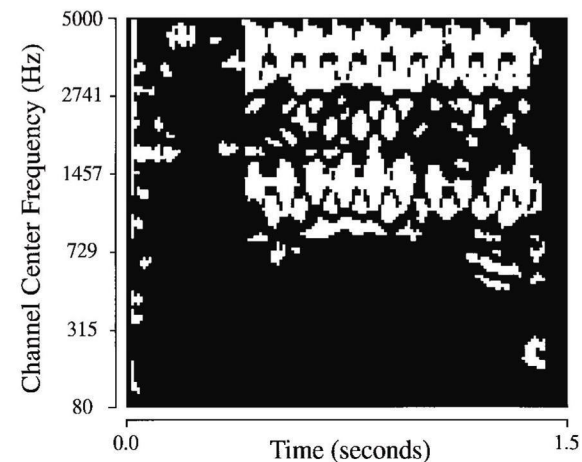


Коррелограммы смешанного потока (смесь речи и телефонного звонка):

- в квадрате – основная коррелограмма при 64-канальной системе эталонных фильтров;
- внизу – интегральная коррелограмма;
- справа – кросс-коррелограмма.



(a)



(b)

Результаты выделения потоков-компонент

# Система двух связанных осцилляторных сетей для детектирования и распознавания запахов

Особенность обонятельной системы: поступающих **запах** преобразуется обонятельной луковицей в **колебательную нейронную активность обонятельной луковицы**. Все виды обработки обонятельной информации осуществляются при совместной работе обонятельной системы мозга – **луковица – обонятельная кора**.

Ли и Герцем (Z.Li, J.Hertz, 1998) построена система двух связанных нейронных сетей, моделирующая работу обонятельной системы мозга.

## 1. Нейросетевая модель обонятельной луковицы

Структурной единицей этой сети, моделирующей **обонятельную луковицу**, является **нейронный осциллятор**, образованный парой нейронов, связанных возбуждающей и тормозной связями. Однако, модель построена на «нейронном» уровне. Первая версия модели создана Ли и Хопфилдом еще в 1989 г. Фактически модель представляет собой **открытую двуслойную нейронную сеть** с двумя входами (внешним входом и входом в виде обратной связи из сети, моделирующей обонятельную кору.) Когда интенсивность запаха, поступающего на внешний вход, превышает определенный порог, сеть демонстрирует колебательную динамику в виде «пакетов» колебаний определенной средней частоты. Существует дискретный набор **«собственных» колебаний** сети, определяемый структурой ее связей. Нелинейная обратная связь с сетью-корой позволяет плавно изменять параметры собственных колебаний и тем самым управлять «откликом» сети-луковицы на поступающие смеси запахов.

# Система связанных сетей для детектирования запахов

## 2. Модель обонятельной коры

Модель **сети-коры** структурно похожа на сеть-луковицу, но отличается архитектурой связей. В слое, образованном возбуждающими нейронами, имеются внутренние связи. Поэтому фактически сеть является **двуслойной рекуррентной сетью ассоциативной памяти**. В отличие от сети Хопфилда **эталоны памяти** сети являются не состояниями равновесия, а **устойчивые фокусы** («пакеты» затухающих колебаний определенной средней частоты). «Отклик» сети на колебательный вход из сети-луковицы является **резонансным: а)** в случае близости частоты входа к одной из собственных частот вторая сеть «выдает» соответствующее «собственное колебание»; **б)** в противном случае сеть практически «молчит». **Колебательный отклик** сети интерпретируется как **распознавание известного** запаха. Эмпирически построенная (биологически мотивированная) обратная связь на сеть-луковицу такова, что она дает ненулевую обратную связь на сеть-луковицу только в случае собственного колебательного отклика.

## 3. Работа системы при детектировании и распознавании запахов.

- 1-ый шаг.** Если первый (наиболее интенсивный) запах **распознан** сетью-корой как известный, вход обратной связи на сеть-луковицу **«блокирует»** ее последующую реакцию на этот запах (за счет сдвига пространственного положения отвечающего запаху аттрактора).
- 2-ой шаг.** При **повторной подаче** на вход сети-луковицы исследуемой **смеси запахов** луковица больше не реагирует на этот уже диагностированный запах, как будто он **исключен** из смеси, и теперь в состоянии реагировать на следующий по интенсивности запах. Таким образом, первый запах **детектирован, распознан и сегментирован** (отделен).



# Биоробототехника (biorobotics)

Биоробототехнику (biorobotics) можно рассматривать новую ветвь AI. Это высоко междисциплинарная область исследований, исходящая из понимания, что взаимосвязь между различными областями высокопродуктивна. Заведомо важен вклад из таких областей, как биология (в частности, нейробиология и этология), математика (в частности, нейроморфное моделирование), физика, механическая и электронная техника, computer science.

В настоящее время особенно энергично работа ведется в двух направлениях:

- 1) техническое воплощение отдельных автономных мобильных роботов;
- 2) эволюция коллективов автономных роботов с целенаправленным поведением.

В первом из направлений помимо изучения биологических систем методами математического моделирования изучается **поведение физически воплощенных роботов в реальных условиях**. Особое внимание уделяется возникновению **«сознательного поведения»** у автономных мобильных **роботов-аниматов** (моделей животных).

Во втором направлении (одном из разделов области «искусственная жизнь») методами математического моделирования изучаются **типы коллективного поведения популяций** обучаемых роботов с адаптивным управлением и целенаправленным поведением, подверженных моделям процесса биологической **эволюции и отбора**.

## Активное техническое зрение

Адаптивное управление автономными мобильными роботами как правило, предполагает включение **активного зрения** в их систему управления. Построение активного зрения требует развития методов обработки зрительной информации, включающих:

- обработку в **реальном времени**;
- **селективный** выбора информации в зрительной сцене;
- **целенаправленный** анализ зрительной сцены.

Кроме того, зрительная система робота должна динамически меняться в зависимости от его поведения во внешней среде. Один из путей создания адаптивного зрения – сочетание методов обработки изображений, имитирующих методы, используемые зрительными системами человека и животных (гибкая, быстро перестраиваемая **нейросетевая обработка информации**) и методов **адаптивного управления**.

Существует несколько исследовательских групп, изучающих в реальных условиях поведение технически воплощенных автономных мобильных роботов.



## Роботы, управляемые зрением

Центр по зрительным исследованиям Университета г. Йорк,  
Торонто, Канада (рук. Джон Тсотсос (J.Tsotsos) ).

В тематику исследований Центра включены разработки **активного зрения роботов-аниматов** на основе сенсорно-двигательного управления, моделирование селективного зрительного внимания, распознавания движений (на примере распознавания жестов), создание основанных на зрительном управлении роботов-помощников в играх для детей-инвалидов и многое другое.



Пример роботов-аниматов – рыбы-роботы с цветным, стереоскопическим, фовеальным зрением. Рыба-хищник способна устойчиво преследовать жертву, удерживая цель в поле зрения и используя «мышечное» управление действиями.

# Роботы, управляемые зрением

Лаборатория роботов, Институт Нейроинформатики при EPFL, Zurich. (рук. Д.Флореано (Dario Floreano) ).



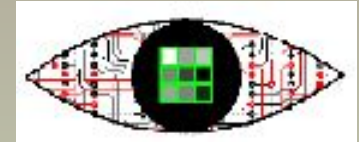
Направление исследований Лаборатории в целом можно отнести к области исследований, называемой **эволюционной робототехникой** (evolutionary robotics). Используемый здесь путь создания «разумных» роботов – сочетание искусственной **эволюции, самоорганизации и адаптации к среде**, имитирующих те, которые используют разные виды живых организмов.

В Лаборатории проводятся разработка систем адаптивного управления автономных роботов, предназначенных для решения задач **навигации** в плоских и пространственных лабиринтах, а также разработка эволюционных **нейроконтроллеров**. Изучаются типы **коллективного поведения воплощенных аниматов** (в том числе, популяций хищник-жертва). В процессе искусственной эволюции лучшие экземпляры отбирались, воспроизводились, спаривались и подвергались мутациям в нескольких поколениях. Затем полученный представитель эволюционировал сам в модельной среде, без внешнего вмешательства. В результате он был способен двигаться в лабиринте, самостоятельно нужным образом меняя скорость и направление.

В случае разработки **нейроконтроллеров** эволюции подвергались правила обучения, которые формулировались в терминах генетического кода.

## Роботы, управляемые зрением

**Эволюционная активная зрительная система**  
( Т.Kato, D. Floreano, 2002 ).



Эволюционно создана и продолжает разрабатываться активная зрительная система для мобильного робота, способная автоматически сканировать изображение, изменяя разрешающую способность и решая простейшие задачи распознавания. Система состоит из сетчатки (содержащей пока 9 зрительных нейронов), управляемой эволюционно полученной искусственной нейросетью. Текущие разработки системы касаются улучшения архитектуры сетей и включения классов более сложных задач.

### Примеры роботов, созданных в Лаборатории



Робот-муравей



Летающий робот со зрительным самоуправлением

# Роботы с комплексным нейроморфным дизайном

**Лаборатория искусственного интеллекта**, Отделение информационных технологий, Университет г. Цюрих (рук. Р.Пфайфер (Rolf Pfeifer))

В лаборатории AILab занимаются изучением и разработкой **принципов**, лежащих в основе **разумного поведения**. Это способствует пониманию естественной формы разума живых существ, а также созданию **искусственных интеллектуальных систем** (компьютерных программ и роботов).

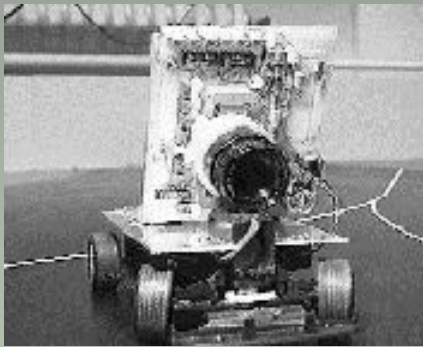
В AILab используется методология, которую можно назвать «**понимание через создание**». Она состоит из трех шагов: 1) **моделирование** аспектов поведения живых существ; 2) **изучение** и обобщение общих **принципов** интеллекта; 3) использование этих принципов при **построении роботов**.

В AILab собраны исследователи, имеющие образование в разных областях: computer science, математике, физике, биологии, этологии, нейробиологии, механике, электронной технике. Отдельными темами являются: создание **действующих моделей биороботов**, имитирующих **аспекты поведения** высших животных и насекомых; вопросы морфологии; динамики; свойств материалов. «Краеугольными темами» являются биоробототехника, теория развития и обучения, эволюция и морфогенез, коллективное сознание.

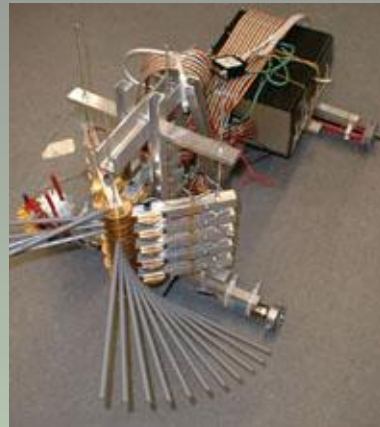
За время существования лаборатории (около 12 лет) создано более **20 типов** биороботов.



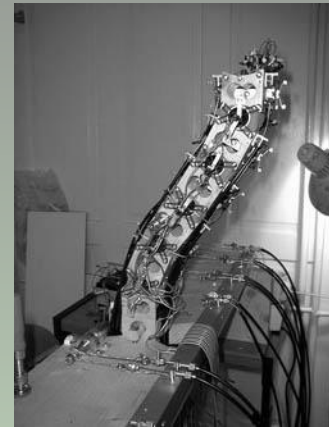
# Примеры роботов, созданных в лаборатории искусственного интеллекта AILab



Робот Morpho I с переключаемым зрительным вниманием



Подвижный сложный глаз Eyebot



Ползающий манипулятор Dextrolator



Анимат муравей Sahabot 2



Летающий робот Melissa 2



Бегающая собака Geoff 2

# Примеры роботов, созданных в AILab.

**Morpho 1.** Это робот с нейроморфным дизайном, полноценный **сенсорно-моторный чип** для управления автономными роботами. Имеет 23-пиксельную сетчатку, позволяющую переключать внимание в процессе управления движением.

**Eyebot.** Каждая из 16 трубок этого робота содержит светочувствительный сенсор, способный детектировать свет в пределах угловой апертуры около 2°. Робот способен автоматически перемещать свои сенсоры и вращать их. Используется для **подробного рассматривания сложных пространственных объектов**. Сложный глаз получен с применением **эволюционного алгоритма и нейросетевого управления**.

**Dextrolator.** Робот, состоящий из 7 сегментов, приводящихся в движение миниатюрными электромоторами. Получает обратную связь от 126 сенсоров. Основная задача, которую он должен уметь выполнять – **проползание** через трубки **без соприкосновения** со стенками для достижения заданной точки (с преодолением препятствий).

**Sahabot 2.** Этот **аналоговый робот** построен для изучения навигационных способностей насекомых. Конкретно, он имитирует **навигационные возможности муравьев *cataglyphis*** (по поляризованному свету). Успешно тестировался в Тунисской Сахаре, где одновременно собирались данные о возможностях реальных муравьев *cataglyphis*.

**Melissa 2.** Построен как первая версия в серии летающих роботов. Одна из целей – изучение способностей насекомых к **трехмерной навигации**. Летающий аэропланет (около 2м в длину), содержащий гелиевый баллон и гондолу с моторчиками для подъема и управления и зрительную систему для обзора. Управляется внутренней электронной аппаратурой на борту и внешним компьютером.

**Geoff 2.** **Аналоговый** четвероногий бегающий робот (один из серии). Цель – развить **технологии быстрого четвероногого перемещения**, выяснить ее возможности. Предварительно изучалась **морфологические свойства бега** (сбалансированность распределения веса, внутренние «пружинные» свойства тела и т.д.). Были сделаны важные находки для технической имитации мышечно-скелетной системы животных.

В AILab уделяется внимание также **нейропротезированию**. В частности, создан робот **Tripp**, пассивный робот, облегчающий восстановление динамического стереотипа движений при ходьбе, который можно использовать при двигательной терапии больных с частично парализованными ногами.

К числу важных разработок в области **зрительного нейропротезирования** можно отнести разработку **имплантанта сетчатки**, осуществляемую в нейрофизиологической лаб. Университета Филлипса, Марбург, Германия (рук. Р.Экгорн (**R.Eckhorn**)).



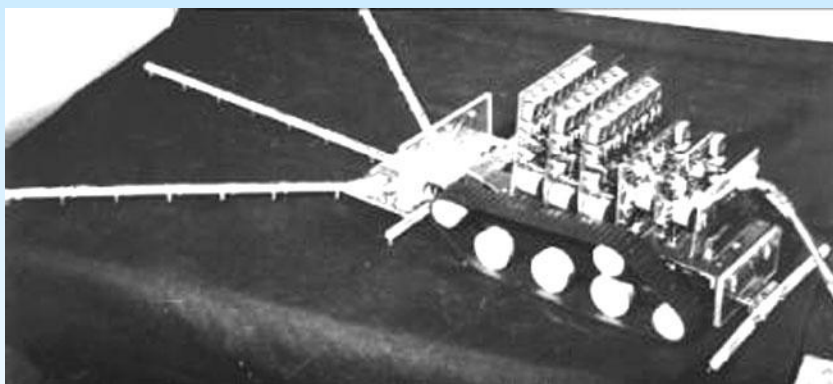
# Роботы с активным зрением и самоорганизованным адаптивным управлением

**Институт нейрокибернетики им. А.Б.Когана РГУ (рук. лаб. А.И.Самарин).**

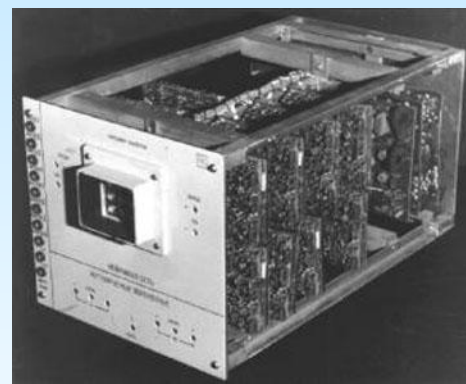
Работы в лаборатории по созданию роботов и роботов-манипуляторов с активным фовеальным зрением успешно ведутся с середины семидесятых. Примером является **автономный мобильный робот с активным зрением и самоорганизованным управлением.**

Модель управления строится по аналогии с системой управления живым организмом. Однако, в случае многопараметрических объектов (что в данном случае имеет место) алгоритмы адаптивного управления оказываются малоэффективными, и приходится обращаться к **самоорганизованным системам управления.** На примере воплощенного мобильного робота прослежено и проанализировано становление так называемого **информационного управления,** что можно связать с формированием **интеллекта робота.**

С точки зрения внешнего наблюдателя процесс самообучения робота состоит из трех этапов. На первом этапе робот учится пользоваться глазами для объезда препятствий; на втором вырабатывается **оптимальное реагирование** на зрительные сигналы; на третьем робот обучается оценивать ширину прохода относительно собственных размеров. Последнее можно рассматривать как способность отображать закономерности внешнего мира и использовать их для достижения целей, т.е. **опережающего отражения действительности.**



Модель мобильного робота-разведчика (лунохода)



Электронный «мозг» робота

# Робот-миноискатель

## Biorobotics

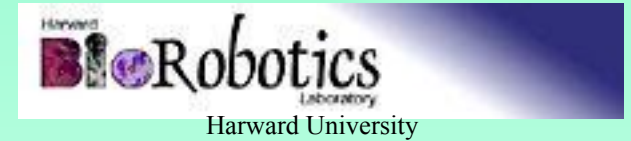
Carnegie Mellon University  
Mechanical Engineering, Pittsburgh



Этот недорогой автономный мобильный робот предназначен для разминирования как на суше, так и в море. Имеет 16 ультразвуковых сенсоров для детектирования и обхода препятствий, внутренний компьютер (Pentium), микроконтроллеры и гидролокаторы. Способен определять собственные координаты на местности. Заложено несколько алгоритмов поиска в «клеточных» областях на поверхности.

Был использован в Восточной Европе (Боснии) и Южной Азии. Только в 1993 с его помощью обнаружено и извлечено 2.5 млн. мин.

# Биоманипуляторы для роботов



a)

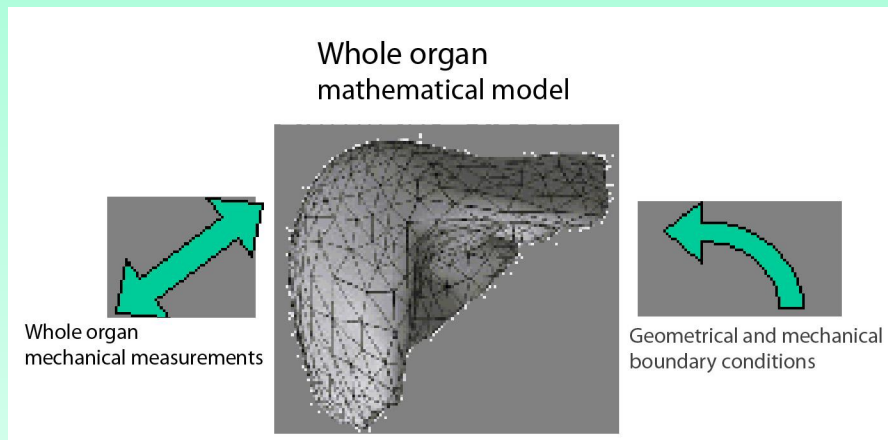
**Робот-таракан**, в котором воплощена высокая упругость и пластичность соединения ног и туловища таракана, обеспечивающая исключительно легкое и уверенное перемещение в неструктурированной среде при отсутствии сенсорной обратной связи.



b)

Зажим с гибко регулируемой жесткостью, имитирующий принцип работы **клешни рака**. При работе в неструктурированной среде оказывается значительно эффективнее обычных традиционно используемых зажимов.

# Моделирование внутренних органов



Harvard University

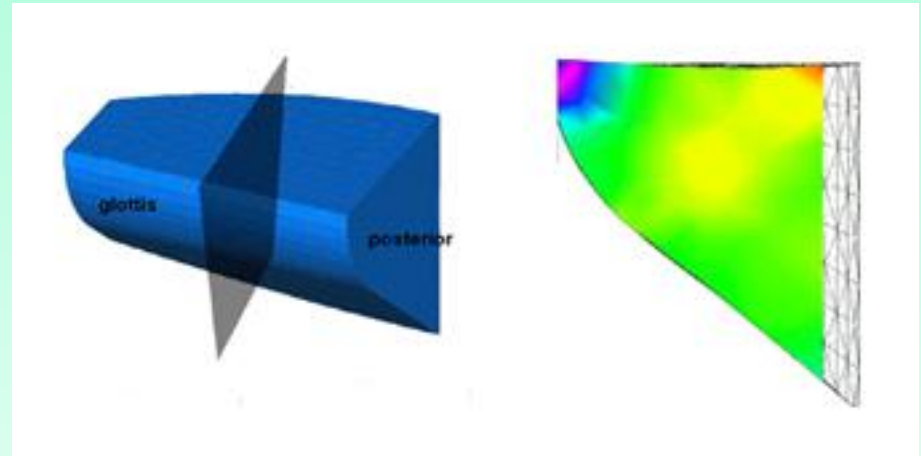
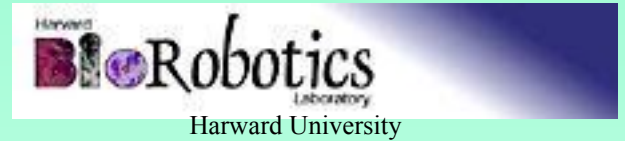
- Калифорнийский университет в Сан-Франциско
- Станфордский нац. вычислительный центр
- Станфордский центр современных хирургич. техн.
- Западно-австралийский университет
- Университет г. Тюбинген, Германия

Цель – разработать модели, позволяющие исследовать сложное поведение мягких внутренних органов (печень, почки, селезенка) под действием **хирургических вмешательств и имплантаций**.

**Математическое моделирование** используется в сочетании с **экспериментальными измерениями** и созданием **силиконовых моделей** мягких тканей.

Это позволяет получить объединенную информацию о реакциях мягких органов на медленную деформацию под действием терапии, давления и кручения, хирургические иссечения, а также поведении при имплантациях.

# Изучение биомеханики голосовых связок



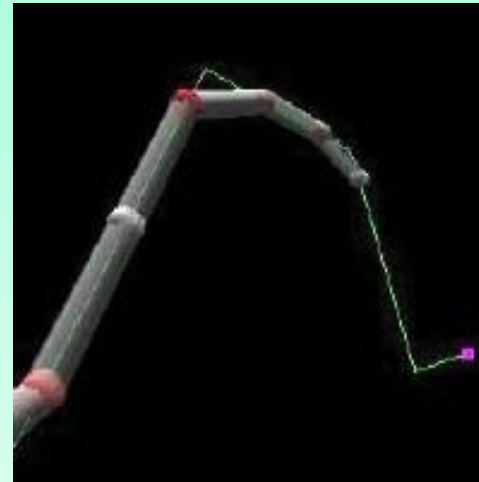
Аппарат, осуществляющий управление человеческим голосом, уникален. Его патологии помимо ухудшения воспроизведения звуков могут вызывать боли или даже исключение возможности говорить. В математических моделях голосовых связок изучается поведение мягкой ткани связок под действием потока воздуха и образование звуковых волн в результате совместной работы гортани, носовой и ротовой полостей. Проверка моделей производится в контакте с экспериментальными исследованиями звукового тракта.



# Роботы для хирургии

## Biorobotics

Carnegie Mellon University  
Mechanical Engineering, Pittsburgh



Членистый **робот-змея** разрабатывается для хирургических операций, при которых необходимо минимизировать повреждения ( в частности, для кардиохирургии). Обладая малым сечением, робот способен глубоко проникать в ткани без излишних разрезов.

Из-за трудности задачи управления движением такой системы ( конфигурационное пространство высокой размерности) пока усилия сосредоточены на решении специальных более простых задач: «проползание» через трубки разнообразных форм, «шагание» по лестницам, «карабкание» по отвесным вертикальным стенам.

Змеевидные роботы разработаны также для инспектирования мостов.

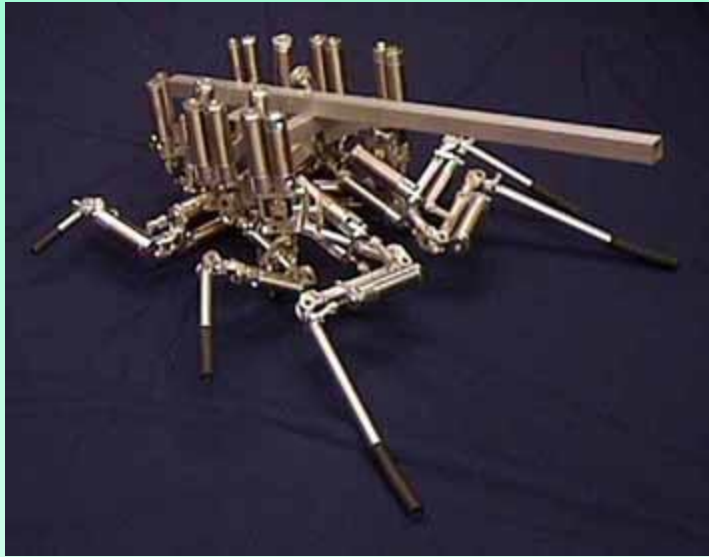
# Роботы-насекомые

## Biologically Inspired Robotics Lab.

Case Western Reserve University

Роботы-насекомые способны гибко адаптироваться при передвижении по неровным поверхностям на пересеченной местности. С другой стороны, они служат моделями для изучения биологических систем.

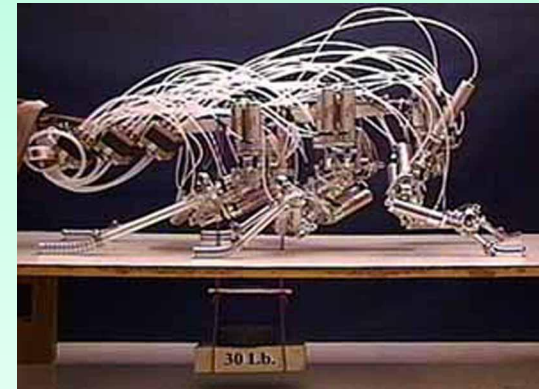
а) Автономный **робот-таракан** приводится в движение миниатюрными пневматическими цилиндрами. Имеет 24 Степени свободы. Имитирует динамические возможности таракана *Blaberus discoidalis*. Лауреат специальной премии.



а)



б) Микро-робот **сверчок** ( 5см в диаметре). Хорошо передвигается по неровным поверхностям. Способен передвигаться как шагом, так и прыжками.



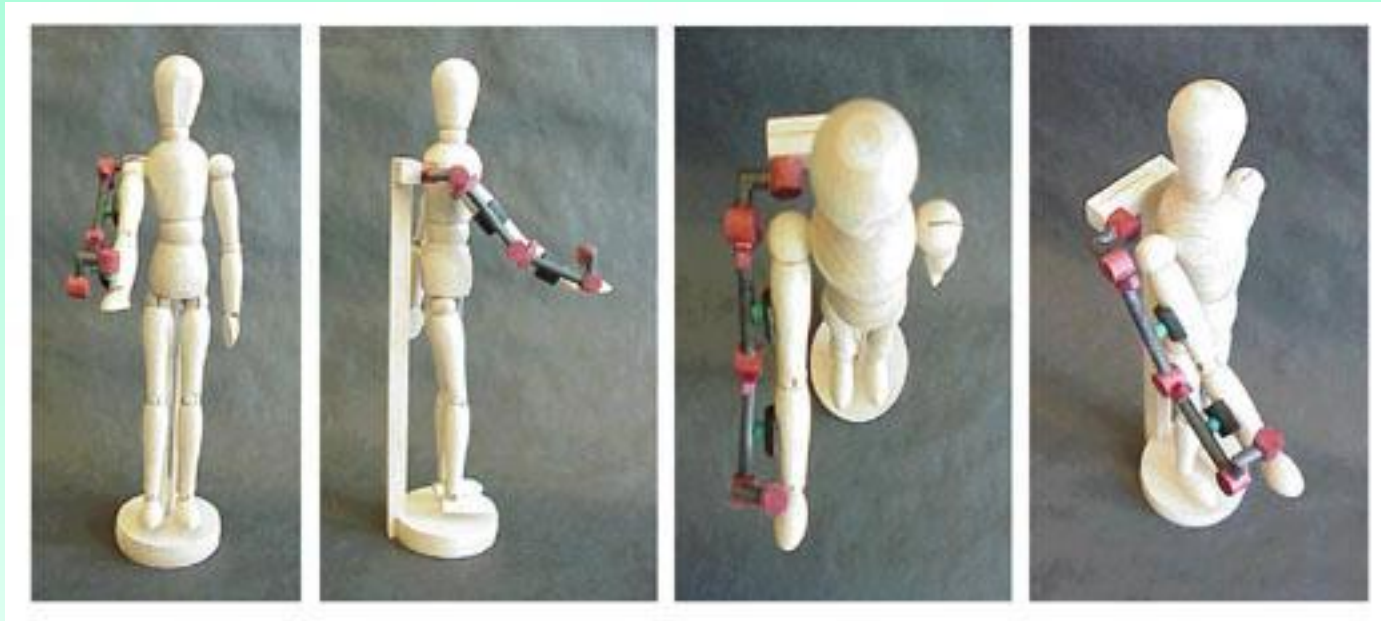
а)

Роботы-насекомые создавались междисциплинарным коллективом, включающим специалистов по механике, нейромеханике насекомых, нейронным сетям и генетическим алгоритмам, дизайну биороботов, аналоговому воплощению нейро-контроллеров.

# Нейропротезирование

**BioRobotics Laboratory**

University of Washington



В созданных нейропротезах использовано текущее понимание действия человеческих мышц и их нейросетевые математические модели. Кроме непосредственной пользы для развития технологий нейропротезирования эти разработки будут способствовать дальнейшему изучению нейрофизиологических аспектов мышечного сокращения, а также возможностей взаимодействия робота и человека на нейробиологическом уровне. Кроме того, эти направления исследований содействуют междисциплинарному сотрудничеству специалистов из областей нейробиологии, электронной техники, механики, биоинженерии, реабилитационной медицины.



# Нейропротезирование

**BioRobotics Laboratory**

University of Washington



Биоманипуляторы Exoskeleton 1 (плечо-локоть) и Exoskeleton 1 (плечо-локоть-кисть), усиливающие действия мышц руки.

# Автономный робот-вертолет

USC, Robotic Embedded Systems Laboratory





# Автономный робот-вертолет

USC, Robotic Embedded Systems Laboratory



Автономный робот-вертолет с активным зрением разрабатывается в серии проектов с 1991 г.

Настоящая модель ( третьего поколения ) обладает возможностями:

- устойчивый автономный полет
- 3D навигация, осуществляемая бортовым контроллером ( следование по заданному пути до точки приземления, разворачивание на цель )
- «зрительное» преодоление препятствий в 3D пространстве
- «зрительное» приземление

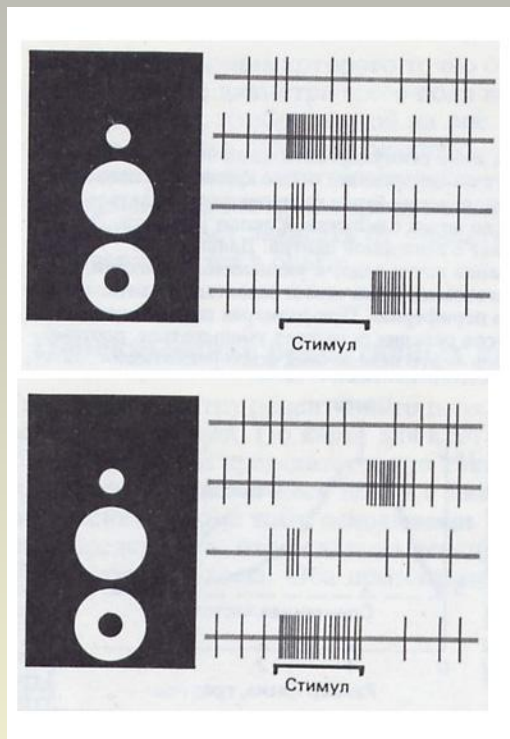
Испытания показали, что заложенные алгоритмы детектирования пространства, распознавания препятствий и управления являются точными, эффективными и надежными.

В вертолет следующего поколения – **«марсианский» исследователь** – ( до 2007 г.) будут добавлены:

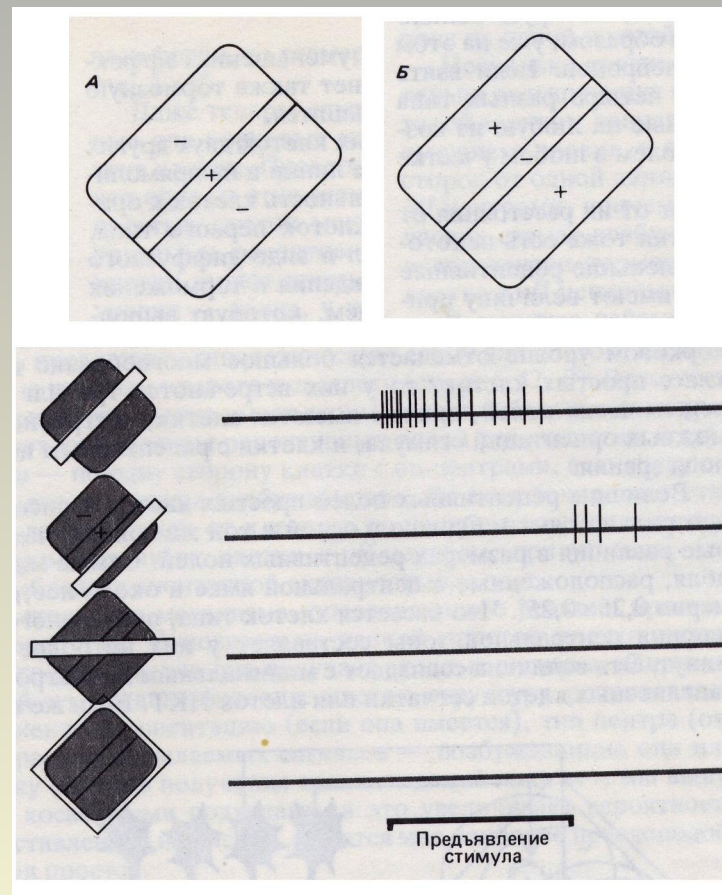
- алгоритмы мягкого приземления
- зависящее от поведения управление
- алгоритмы детектирования движущихся объектов

Новый вертолет будет испытываться в пустынях, напоминающих марсианскую поверхность.

# Типы рецептивных полей



Отклик на стимул ганглиозных клеток сетчатки с различным типом рецептивного поля: **on-центр** (верхняя часть рисунка) и **off-центр** (нижняя часть)



Структура рецептивных полей ориентационно-селективных клеток зрительной коры (вверху) и их отклик на стимул (внизу).

# Теория нейронных сетей

