



# Приложения нейроморфных моделей

*Николай Ильич Базенков, к.т.н.*

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

*Летняя школа РАИИ, 5-18 июля 2021 г.*

# Содержание

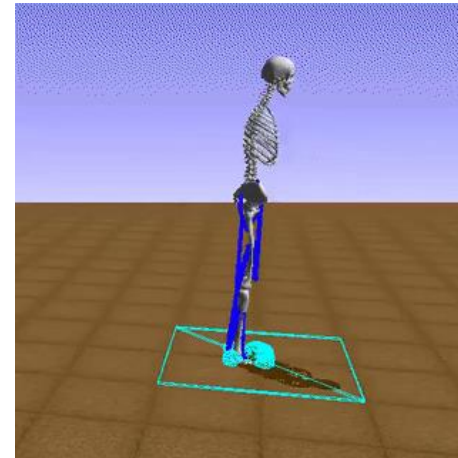
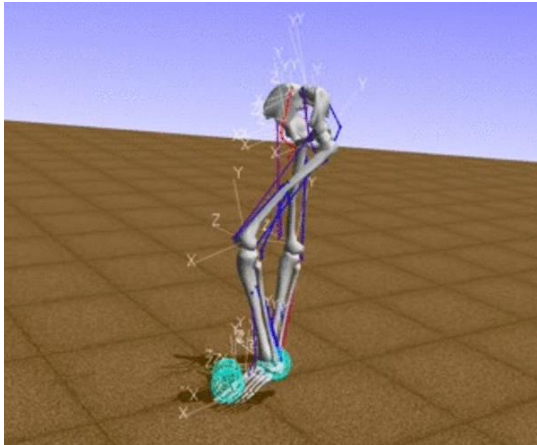
1. Управление движениями
2. Протезирование мозга

# Управление движениями как полигон для ИИ

NIPS 2017: Learning to Run

NeurIPS 2018: AI for Prosthetics Challenge

NeurIPS 2019: Learn to Move - Walk Around



**OpenSim** – открытая среда для мышечно-скелетных моделей

<https://opensim.stanford.edu>

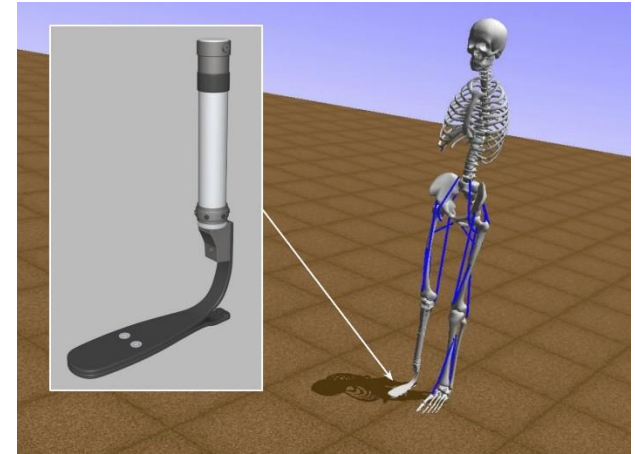
# NeurIPS 2018: AI for Prosthetics Challenge

**Агент** – мышечно-скелетная модель человека с протезом ноги.

**Наблюдения** - 406 параметров: силы реакции опоры, мышечная активность, натяжение связок, угловые скорости в суставах, и др.

**Вознаграждение** – бежать/идти с заданной скоростью и направлением

**Управление** – возбуждение 11 мышц на каждой ноге:



Name	Side	Description	Primary function(s)
abd	both	Hip abductors	Hip abduction (away from body's vertical midline)
add	both	Hip adductors	Hip adduction (toward body's vertical midline)
bifemsh	both	Short head of the biceps femoris	Knee flexion
gastroc	left	Gastrocnemius	Knee flexion and ankle extension (plantarflexion)
glut_max	both	Gluteus maximus	Hip extension
hamstrings	both	Biarticular hamstrings	Hip extension and knee flexion
iliopsoas	both	Iliopsoas	Hip flexion
rect_fem	both	Rectus femoris	Hip flexion and knee extension
soleus	left	Soleus	Ankle extension (plantarflexion)
tib_ant	left	Tibialis anterior	Ankle flexion (dorsiflexion)
vasti	both	Vasti	Knee extension

# Результаты

	Team	Score	# entries	Base algorithm	
1	Firework	9981	10	DDPG	Baidu (USA)
2	NNAISENSE	9950	10	PPO	NNAISense (Switzerland)
3	Jolly Roger	9947	10	DDPG	DBrain, GiantAI, SkolTech (Russia)
4	Mattias	9939	10	DDPG	
5	ItsHighNoonBangBangBang	9901	3	DDPG	
6	jbr	9865	9	DDPG	
7	Lance	9853	4	PPO	JetBrains, HSE (Russia)
8	AdityaBee	9852	10	DDPG	
9	wangzhengfei	9813	10	PPO	
10	Rukia	9809	10	PPO	

# Решение - победитель

## Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)

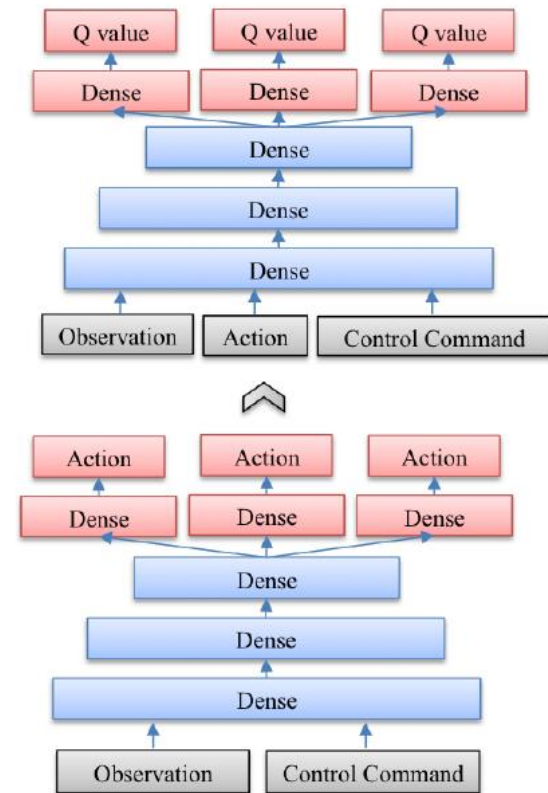
### Ускорение обучения

1. Transfer learning. Обучить бежать как можно быстрее, затем дообучить на медленную ходьбу
2. Curriculum Learning. Постепенно снижать скорость от 4 м/с до 1.25 м/с
3. Fine-tuning.

### Вычислительные ресурсы

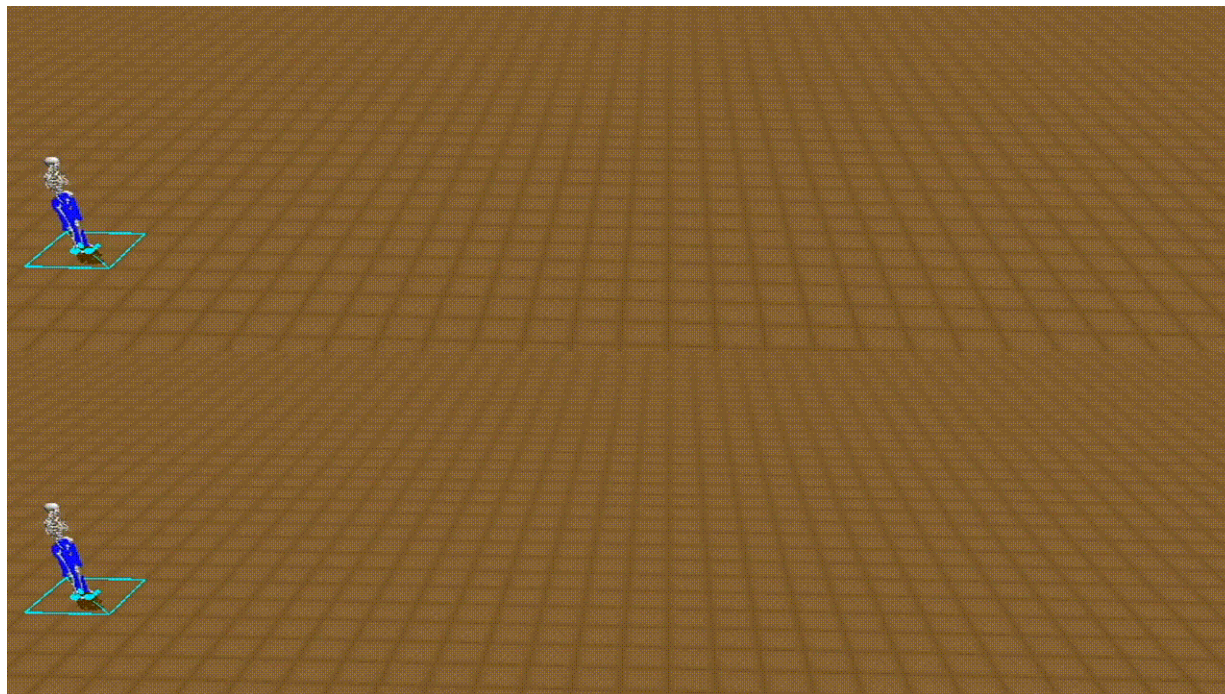
2 дня на 128 CPU

Симуляции на CPU, обучение на одном GPU



<https://github.com/PaddlePaddle/PARL>

# Решение - победитель

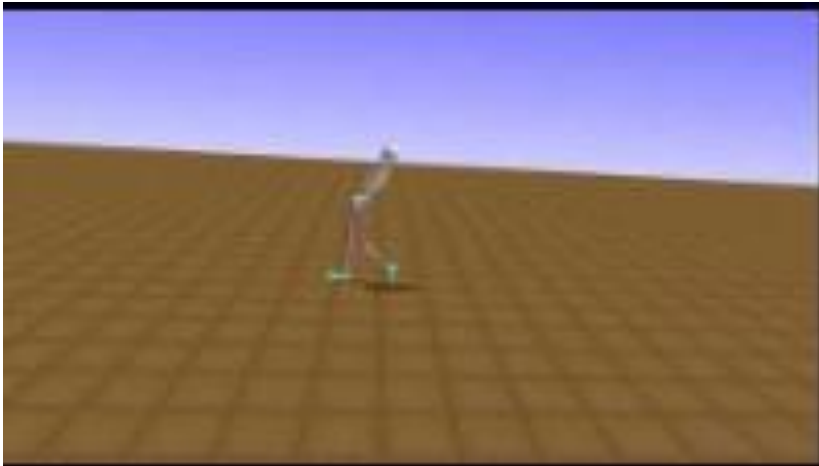


<https://github.com/PaddlePaddle/PARL>

## 2-е место. «Танцор» и «Прыгун»

**Proximal Policy Optimization (PPO)**, 130 000 часов на CPU

Найдены 2 одинаково успешные стратегии, «Dancer» и «Jumper»





# Что если у нас нет >100 CPU ? 8-е место

## PPO + Imitation Learning

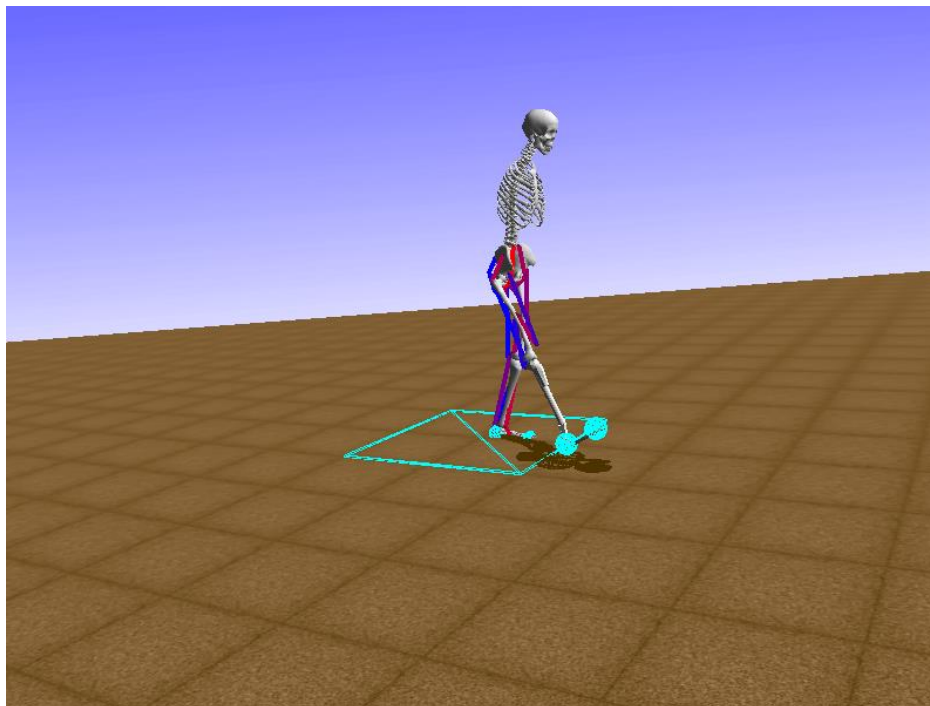
1. Открытые данные о походке человека
2. Из данных получены траектории движения характерных точек скелета
3. Решением задачи обратной кинематики получены мышечные активации для траекторий
4. Траектории + активации использованы при обучении

*Вознаграждение =  $w_1 * \text{Сходство} + w_2 * \text{Цель}$*

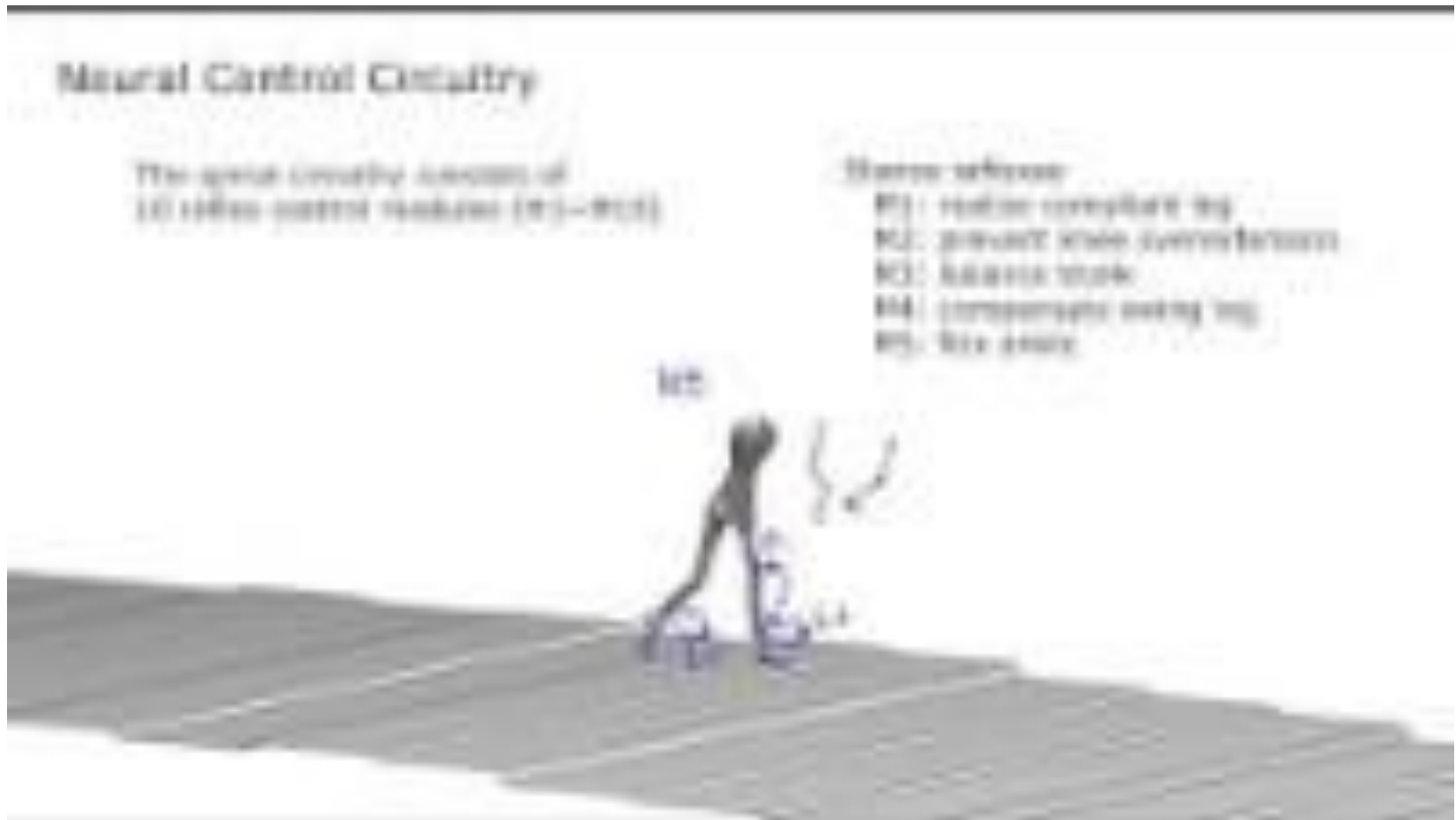
<https://github.com/lancerane/NIPS-2018-AI-for-Prosthetics>

# 8-е место. Результат

Обучение на Intel Core-i7 6700 с 4 CPU >10 часов

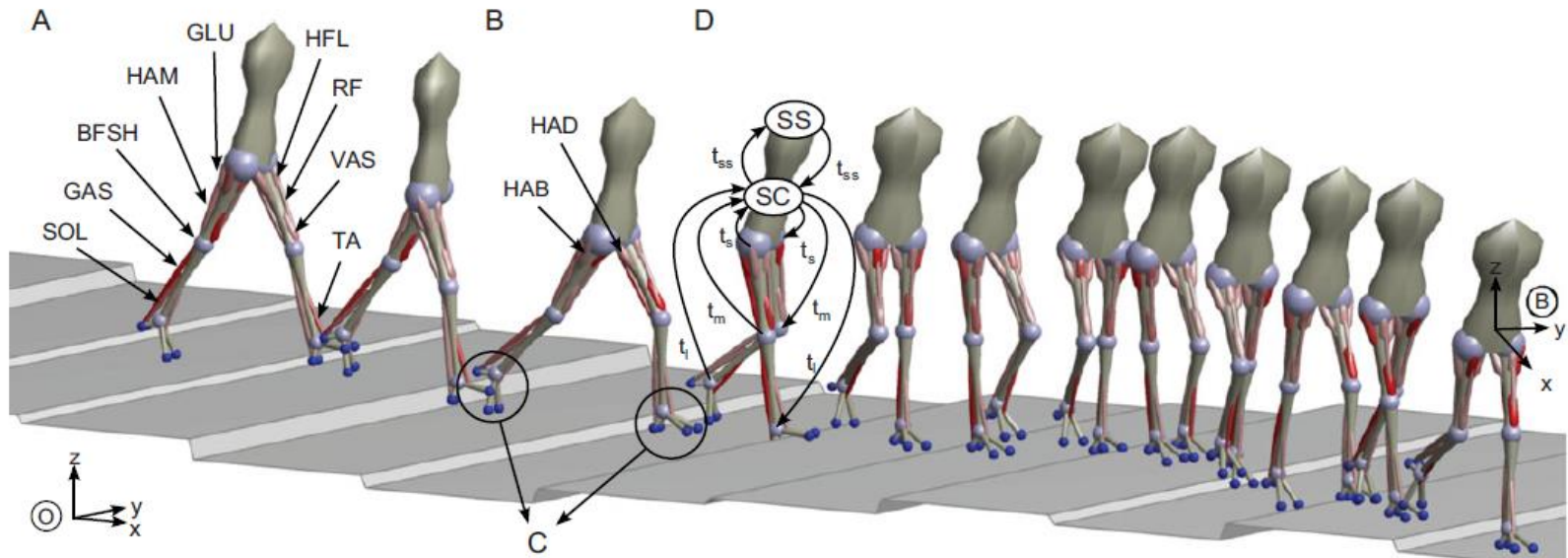


# Биологические модели



Song, S., & Geyer, H. (2015). A neural circuitry that emphasizes spinal feedback generates diverse behaviours of human locomotion. *The Journal of physiology*, 593(16), 3493-3511.

# Биологические модели



Song, S., & Geyer, H. (2015). A neural circuitry that emphasizes spinal feedback generates diverse behaviours of human locomotion. *The Journal of physiology*, 593(16), 3493-3511.

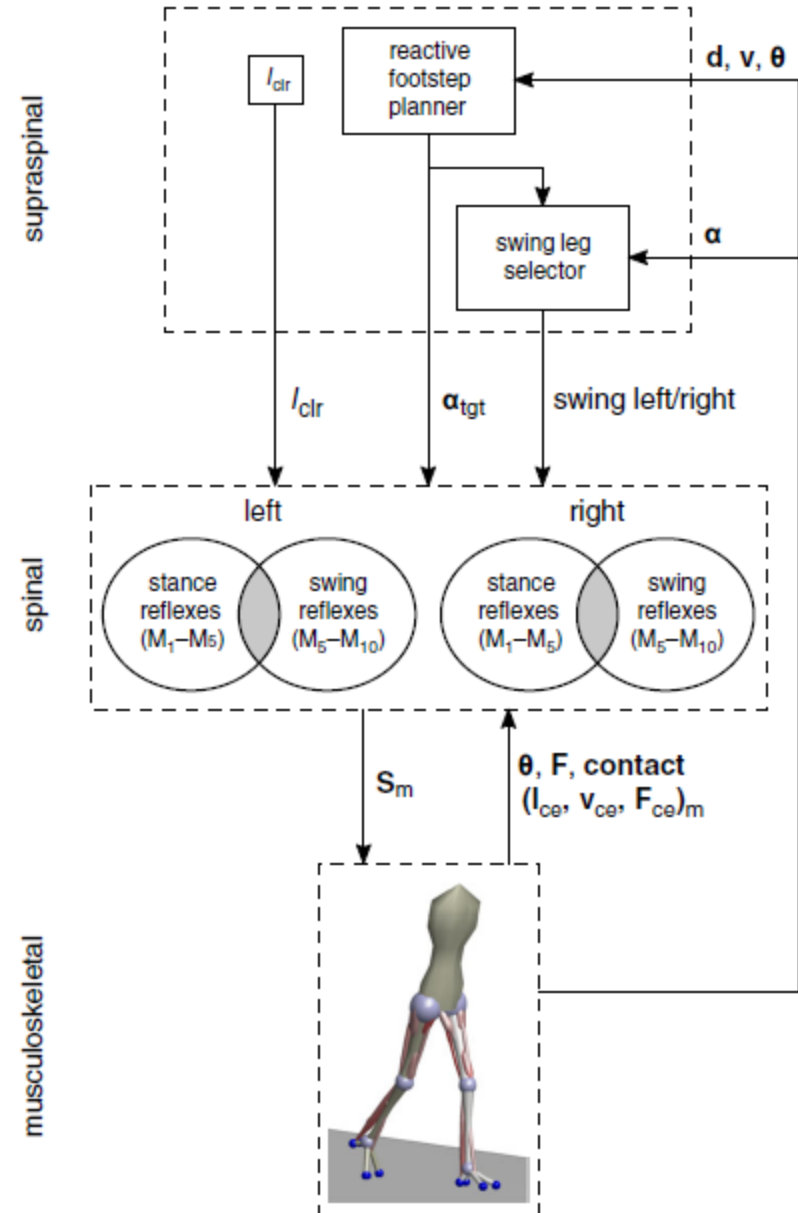
# Система управления

**Супраспинальный уровень** –  
выбор ноги и желаемого  
положения

**Спинальный уровень** – 10  
«рефлексных модулей».

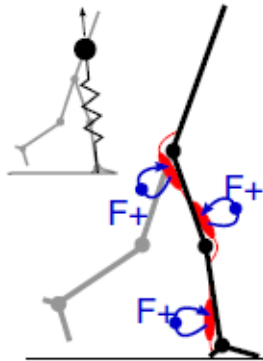
Каждый модуль – простой ПИД  
регулятор с несколькими  
логическими переключателями.

Отвечает за отдельную фазу  
движения, получая информацию  
о параметрах мышц

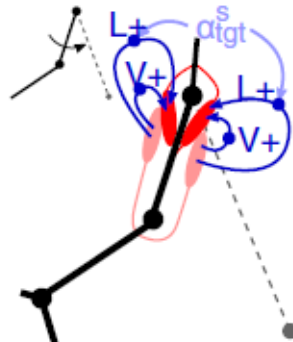


# Работа рефлексных модулей

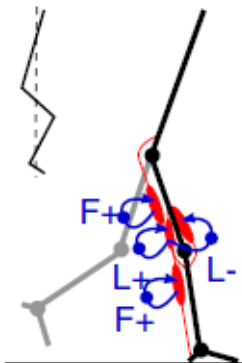
M<sub>1</sub> realize compliant leg



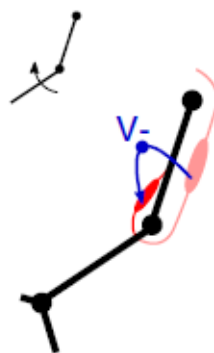
M<sub>6</sub> swing hip



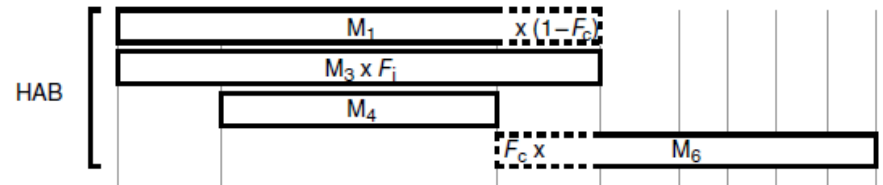
M<sub>2</sub> prevent knee overextension



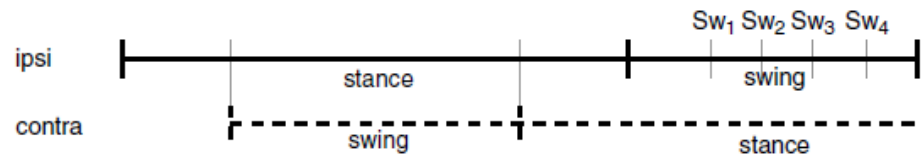
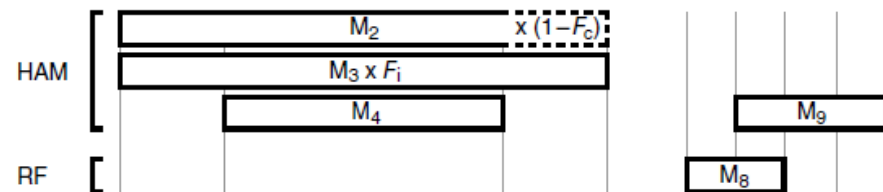
M<sub>7</sub> flex knee



hip



hip and knee

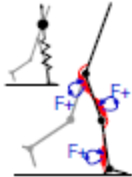


Song, S., & Geyer, H. (2015). A neural circuitry that emphasizes spinal feedback generates diverse behaviours of human locomotion. *The Journal of physiology*, 593(16), 3493-3511.

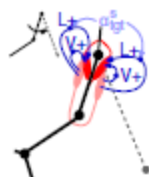
# Все стадии походки

## A Control modules

M<sub>1</sub> realize compliant leg



M<sub>6</sub> swing hip



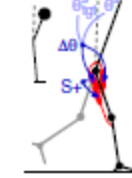
M<sub>2</sub> prevent knee overextension



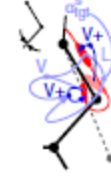
M<sub>7</sub> flex knee



M<sub>3</sub> balance trunk



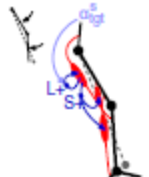
M<sub>8</sub> hold knee



M<sub>4</sub> compensate swing leg



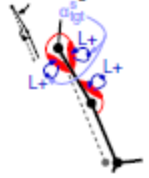
M<sub>9</sub> stop leg



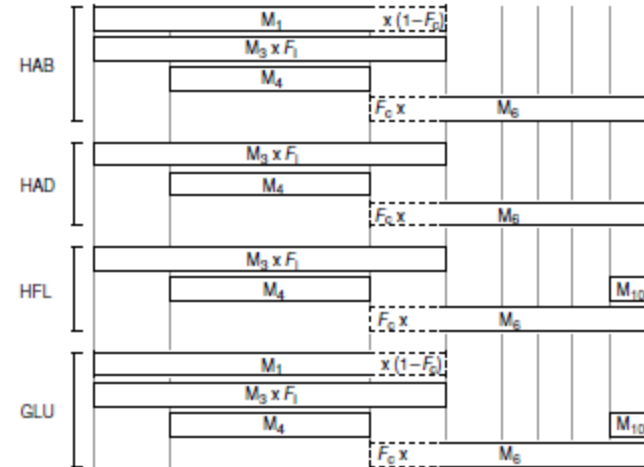
M<sub>5</sub> flex ankle



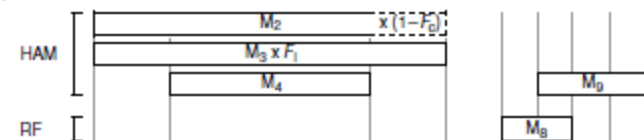
M<sub>10</sub> hold leg



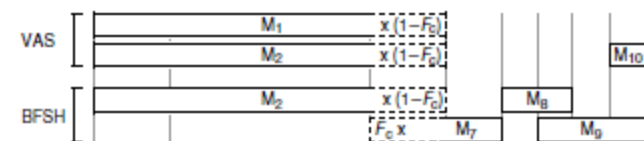
hip



hip and knee



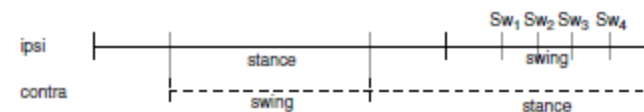
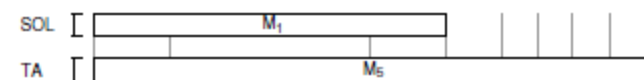
knee



knee and ankle



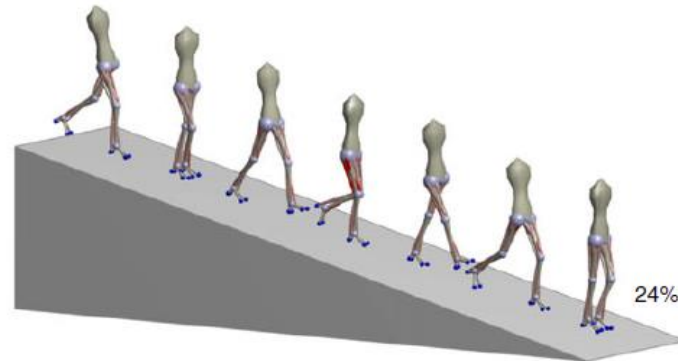
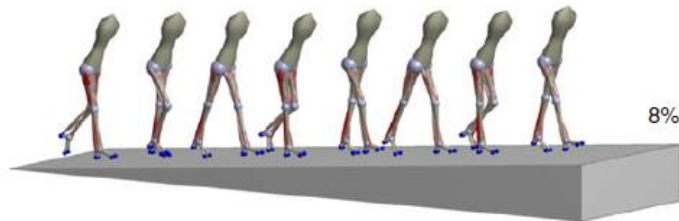
ankle



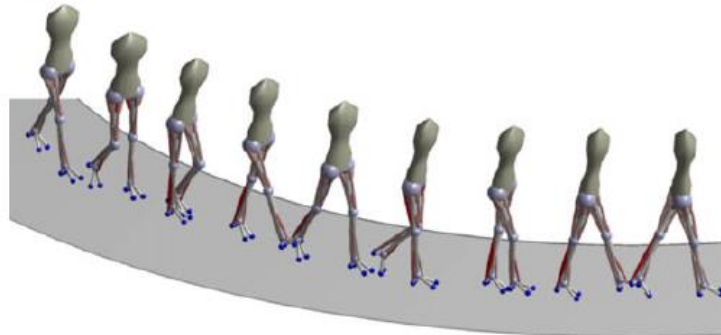
# Разнообразие поведения

Оптимизация параметров ~ 1 неделя на «современном ПК»

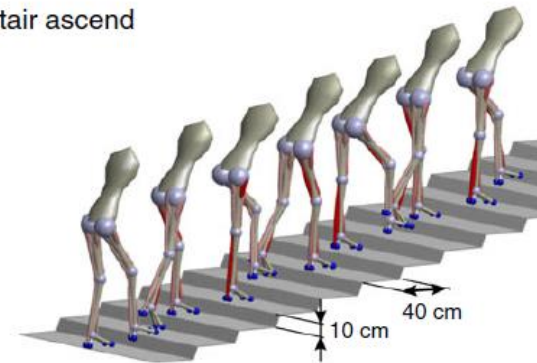
slope ascend and descend



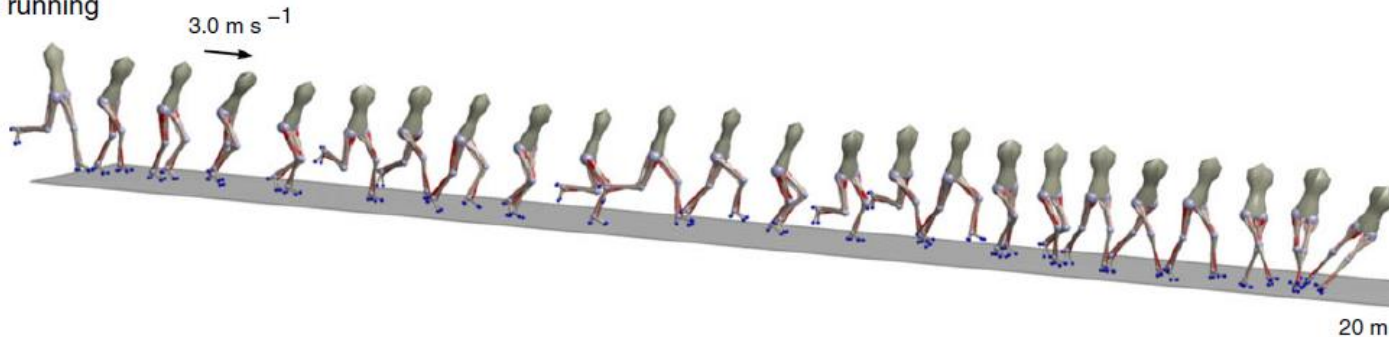
turning



stair ascend

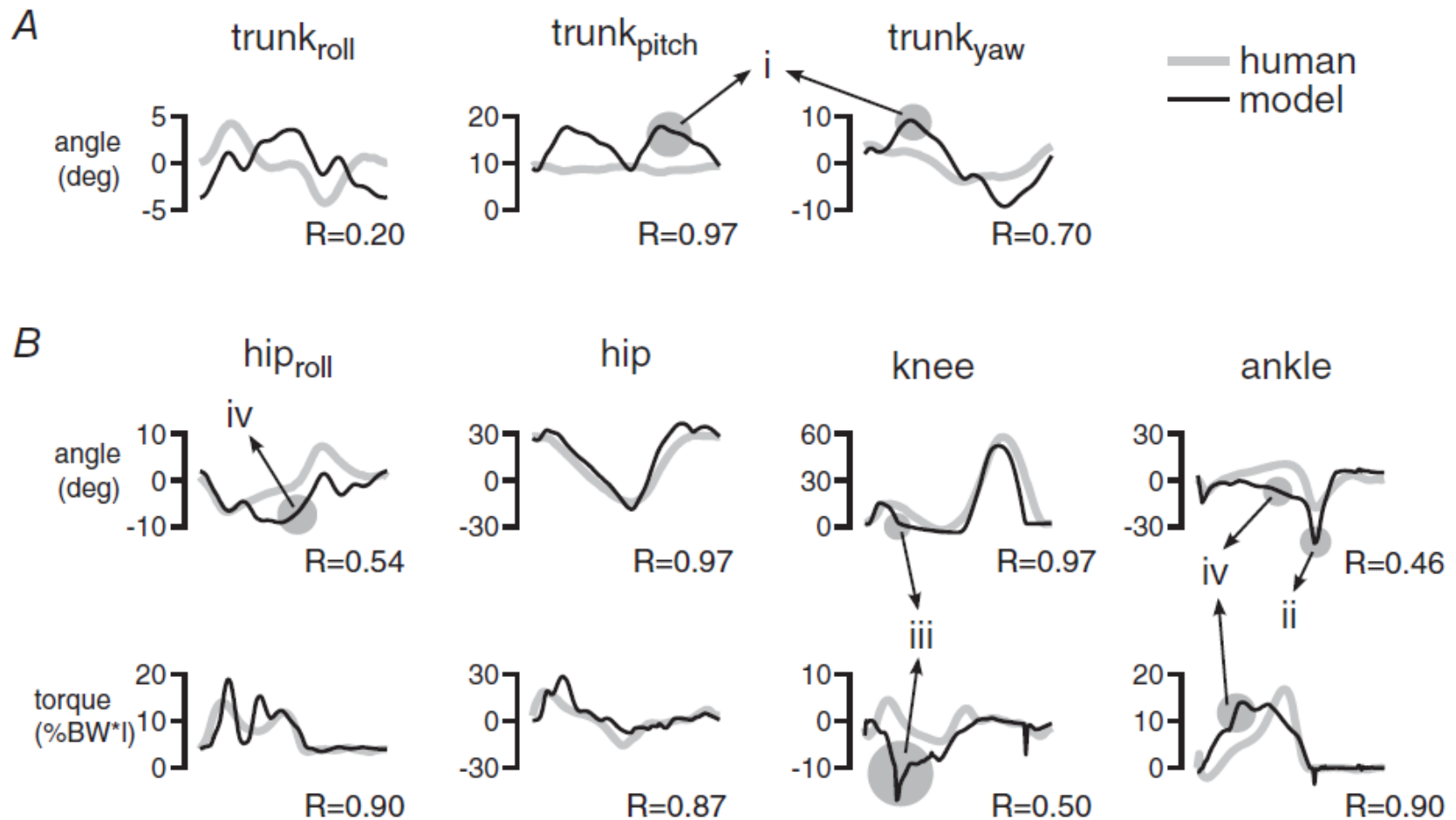


running



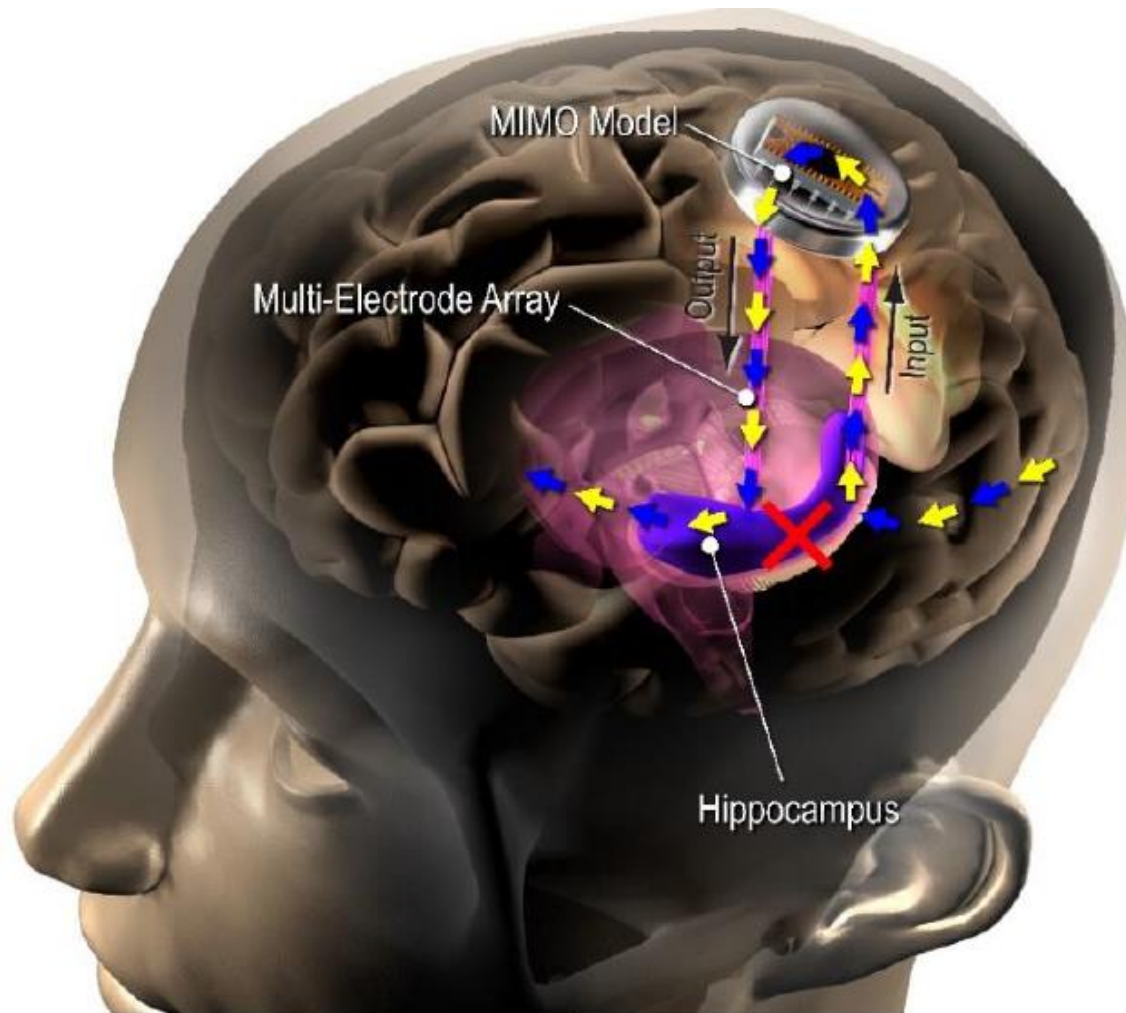


# Сравнение с человеком



**Будущее за нейроморфным управлением!**

# Протезирование мозга



<https://bmsr.usc.edu/core-research/core-project-4/>

# Протезирование мозга



**Theodore Berger, PhD**

Biomedical Simulations Resource (BMSR),  
University of Southern California

[\[HTML\] A computational model of the cholinergic modulation of CA1 pyramidal cell activity](#)

..., [JMC Bouteiller](#), GJ Yu, TW **Berger** - Frontiers in ..., 2020 - frontiersin.org

Dysfunction in cholinergic modulation has been linked to a variety of cognitive disorders including Alzheimer's disease. The important role of this neurotransmitter has been explored in a variety of experiments, yet many questions remain unanswered about the contribution of ...

☆ 77 Cited by 2 Related articles All 6 versions 77

[\[HTML\] Admittance method for estimating local field potentials generated in a multi-scale neuron model of the hippocampus](#)

..., [JMC Bouteiller](#), D Song, G Lazzi, TW **Berger** - Frontiers in ..., 2020 - frontiersin.org

Significant progress has been made toward model-based prediction of neural tissue activation in response to extracellular electrical stimulation, but challenges remain in the accurate and efficient estimation of distributed local field potentials (LFP). Analytical ...

☆ 77 Cited by 2 Related articles All 7 versions 77

[\[HTML\] ROOTS: an algorithm to generate biologically realistic cortical axons and an application to electroceutical modeling](#)

..., [JMC Bouteiller](#), D Song, G Lazzi, TW **Berger** - Frontiers in ..., 2020 - frontiersin.org

Advances in computation and neuronal modeling have enabled the study of entire neural tissue systems with an impressive degree of biological realism. These efforts have focused largely on modeling dendrites and somas while largely neglecting axons. The need for ...

☆ 77 Cited by 3 Related articles All 6 versions 77

[Validation of a Convolutional Neural Network Model for Spike Transformation Using a Generalized Linear Model](#)

[BJ Moore](#), T **Berger**, D Song - 2020 42nd Annual International ..., 2020 - ieeexplore.ieee.org

Identification of causal relationships of neural activity is one of the most important problems in neuroscience and neural engineering. We show that a novel deep learning approach using a convolutional neural network to model output neural spike activity from input neural ...

☆ 77 Cited by 3 Related articles All 4 versions 77

[A sparse multiscale nonlinear autoregressive model for seizure prediction](#)

P Yu, CY Liu, CN Heck, TW **Berger**... - Journal of Neural ..., 2021 - iopscience.iop.org

Objectives. Accurate seizure prediction is highly desirable for medical interventions such as responsive electrical stimulation. We aim to develop a classification model that can predict seizures by identifying preictal states, ie the precursor of a seizure, based on multi-channel ...

☆ 77 Related articles All 4 versions 77

<http://ibt.usc.edu/research-faculty/theodore-w-berger-phd/>

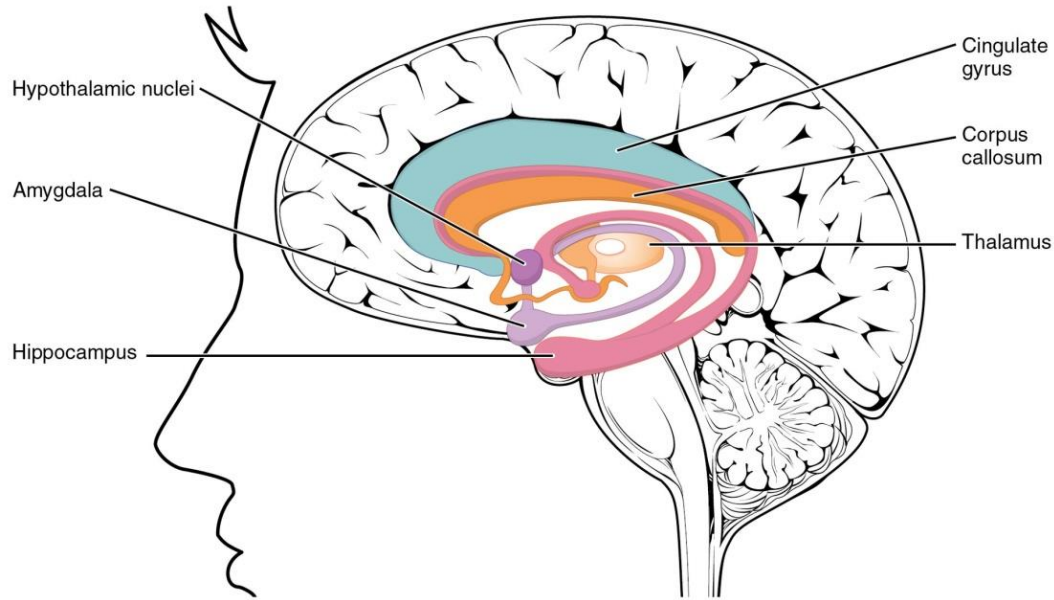
# Гиппокамп

**Гиппокамп** – область мозга, отвечающая за формирование долговременной эпизодической памяти.

Если гиппокамп поврежден, невозможно формирование новых долговременных эпизодических воспоминаний, хотя кратковременная память остается

**Протезирование гиппокампа** – система с обратной связью, шунтирующая (bypass) поврежденные участки гиппокампа с целью восстановить или улучшить функционирование памяти.

# Анатомия гиппокампа



The dentate gyrus (DG)

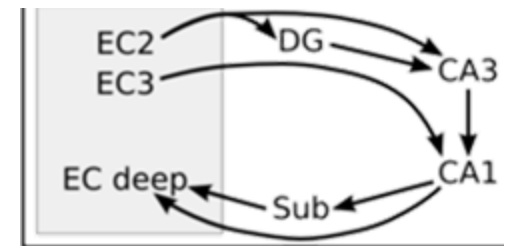
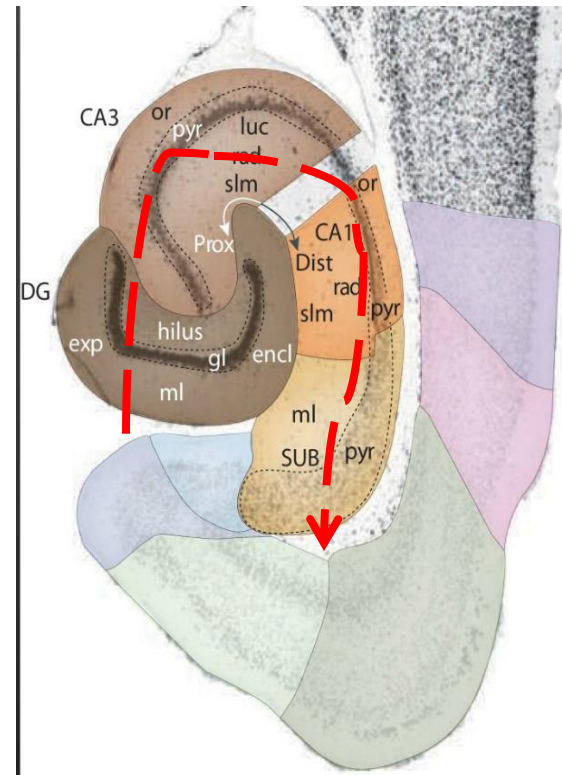
The Cornu Ammonis fields:

CA1

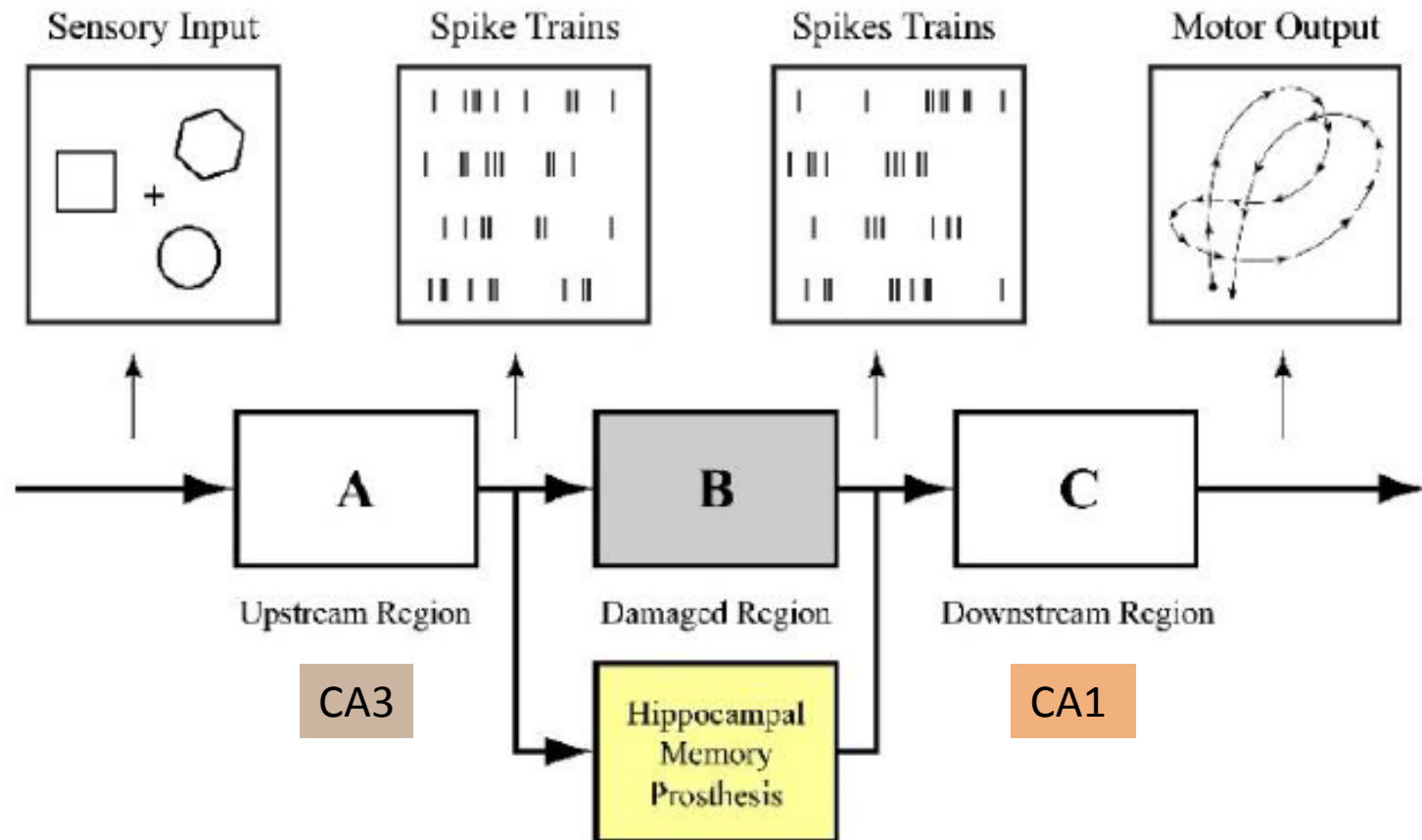
CA3

The subiculum (Sub).

DG, CA3, CA1 образуют «трисинаптическую петлю» (trisynaptic circuit), связанную со многими областями мозга через subiculum и entorhinal cortex (EC)

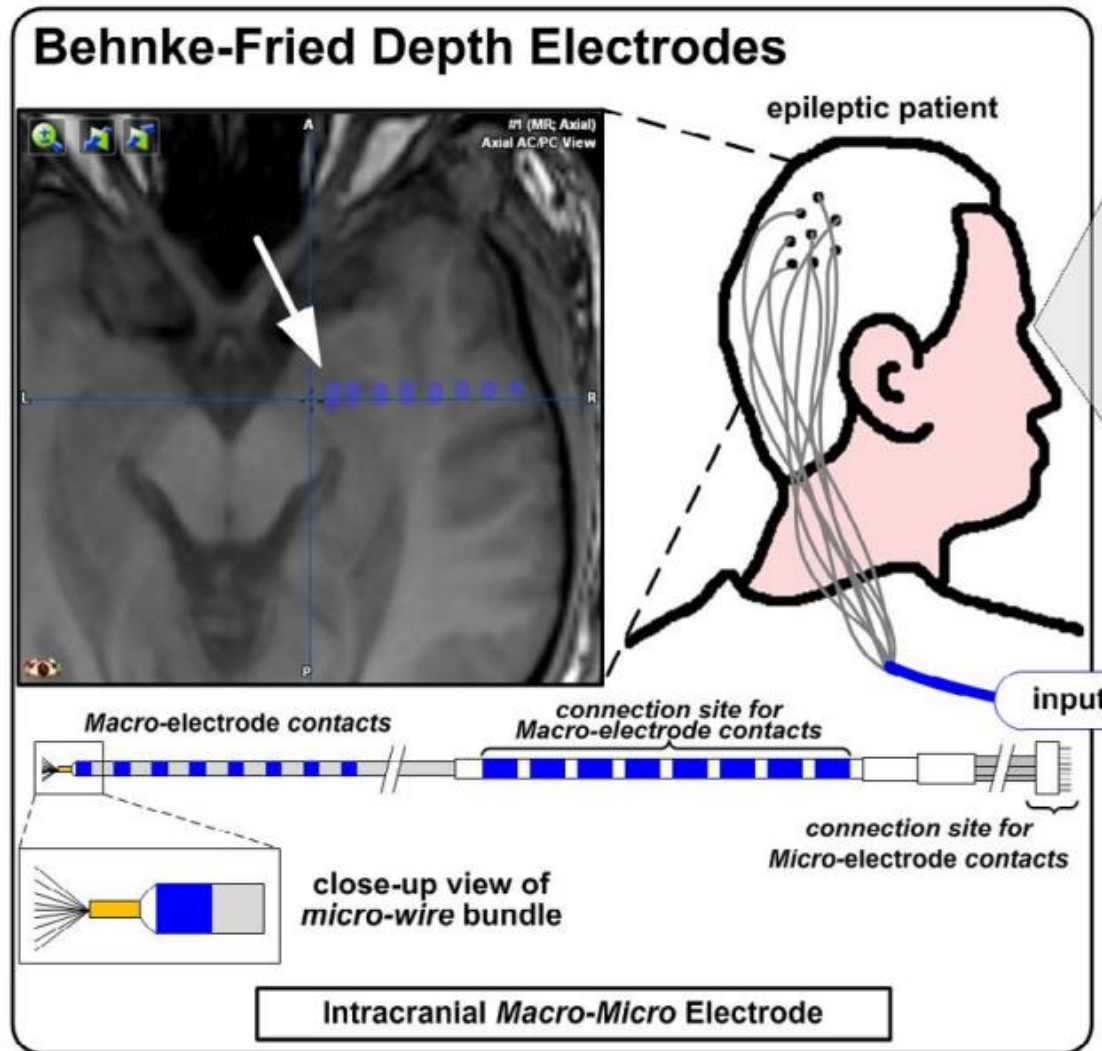


# Описание экспериментов



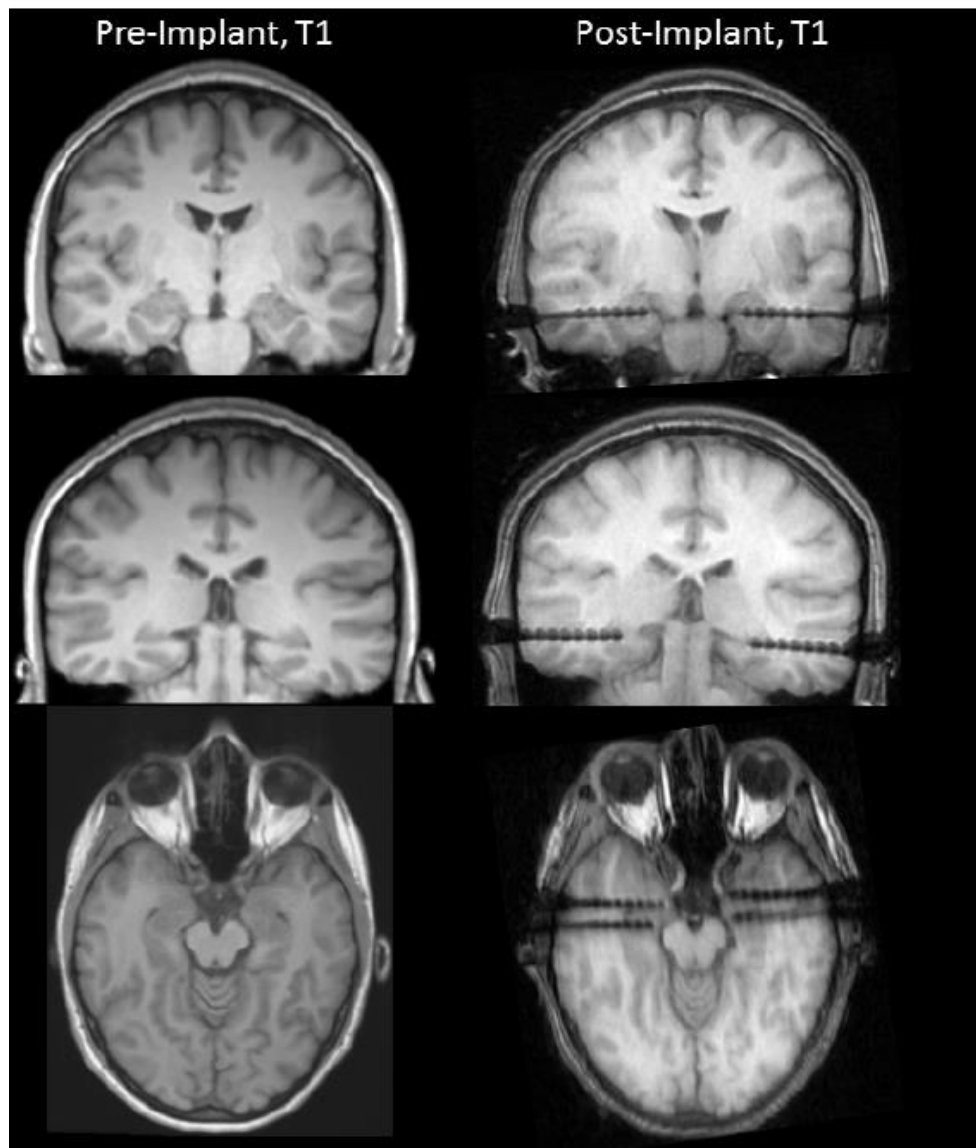


# Сбор данных

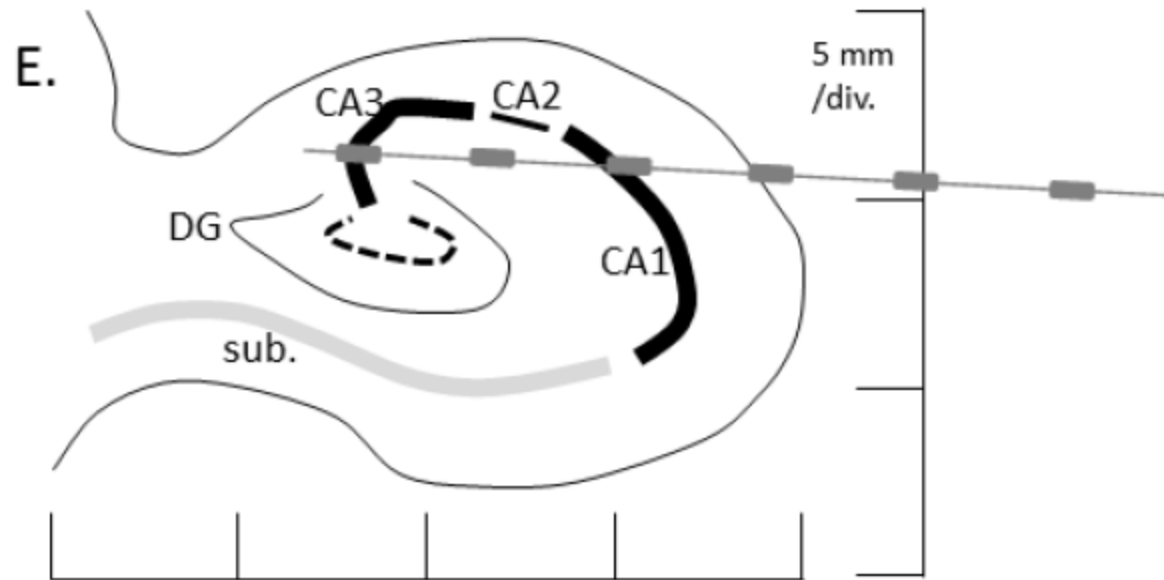




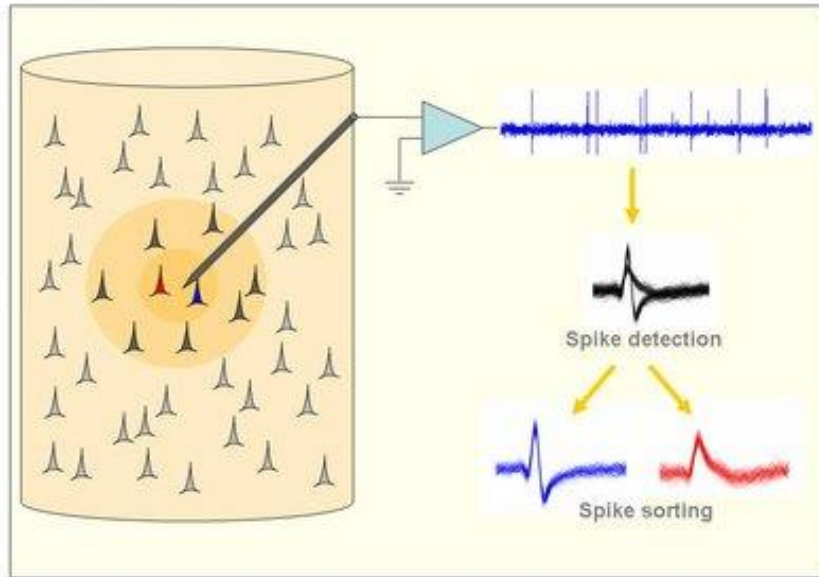
# Установка электродов



# Установка электродов



# Внеклеточная регистрация



[http://scholarpedia.org/article/Spike\\_sorting](http://scholarpedia.org/article/Spike_sorting)

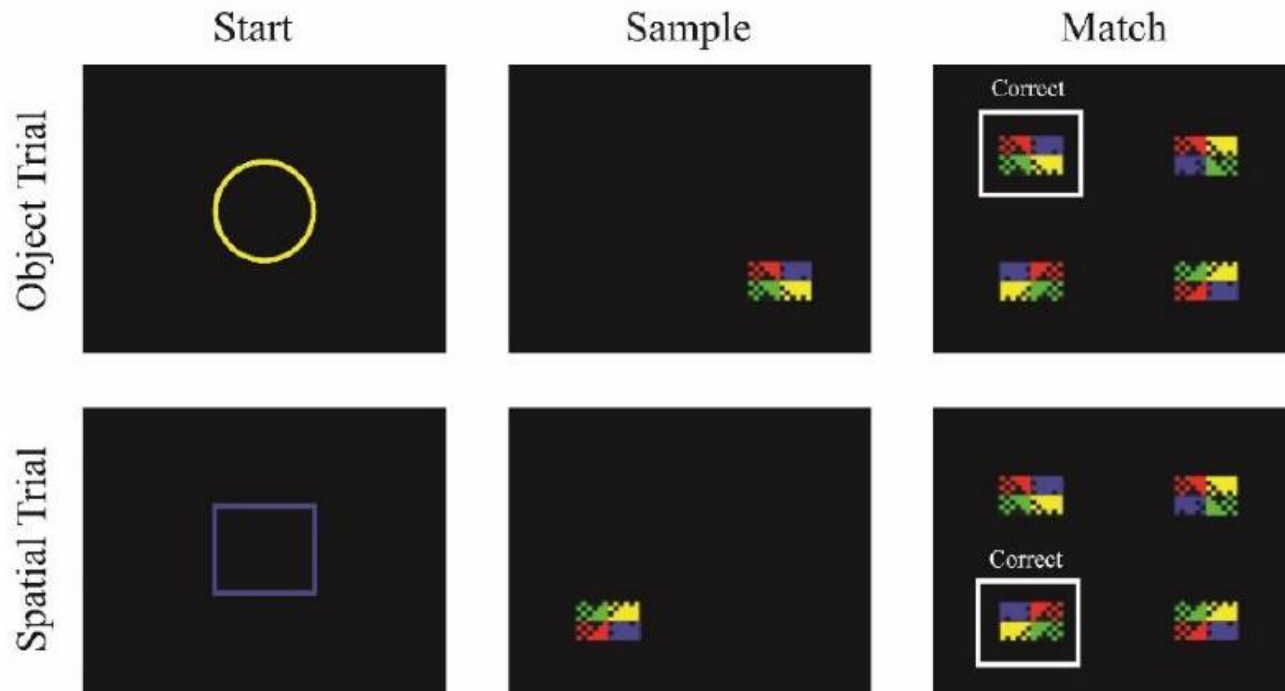
**The Cervello Elite system**

[https://glo-bio.com/index.php?route=product/product&product\\_id=19](https://glo-bio.com/index.php?route=product/product&product_id=19)

# Тест на отсроченное распознавание

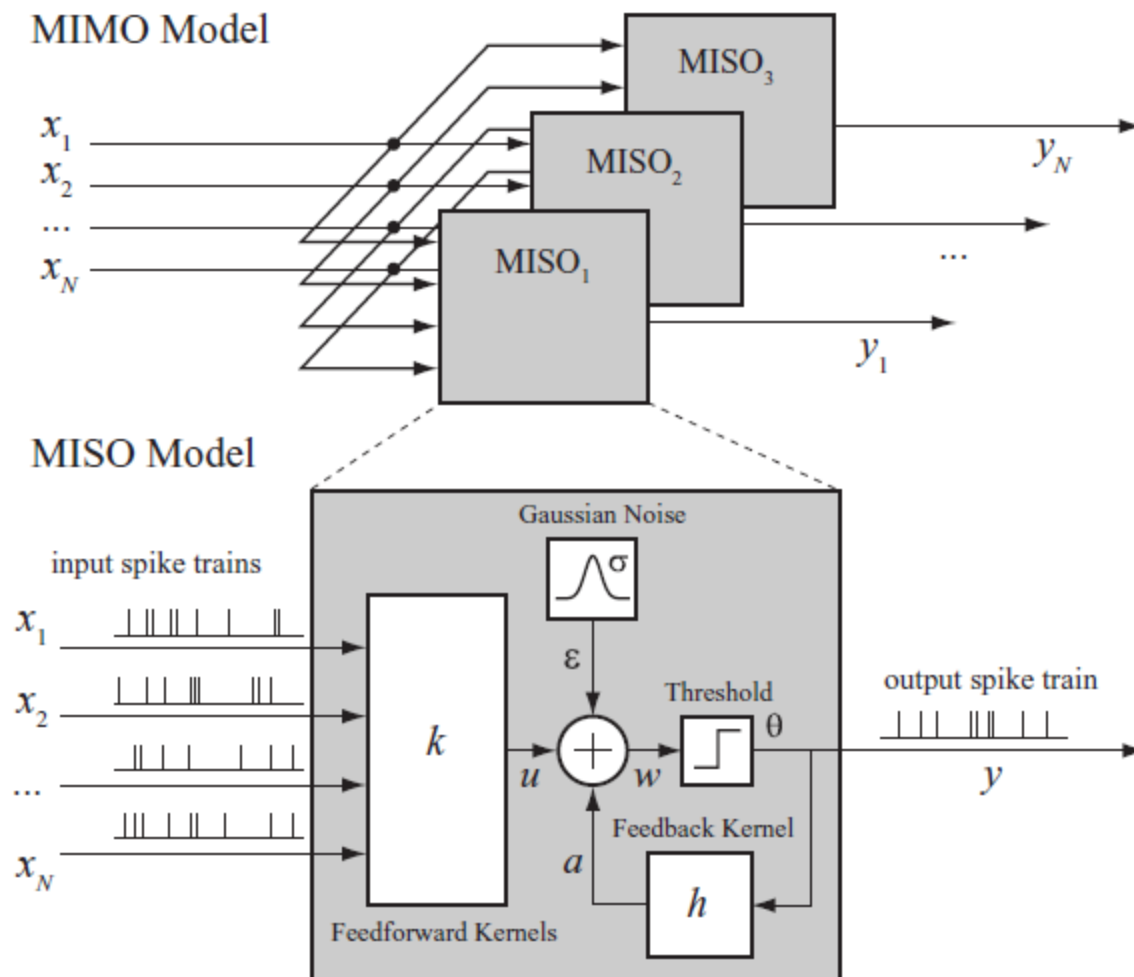
1. Испытуемому показывают картинку
2. После задержки показывают еще несколько картинок
3. Просят выбрать:
  - а) Такую же картинку, или
  - б) Картинку в том же углу экрана

## CANTAB Task



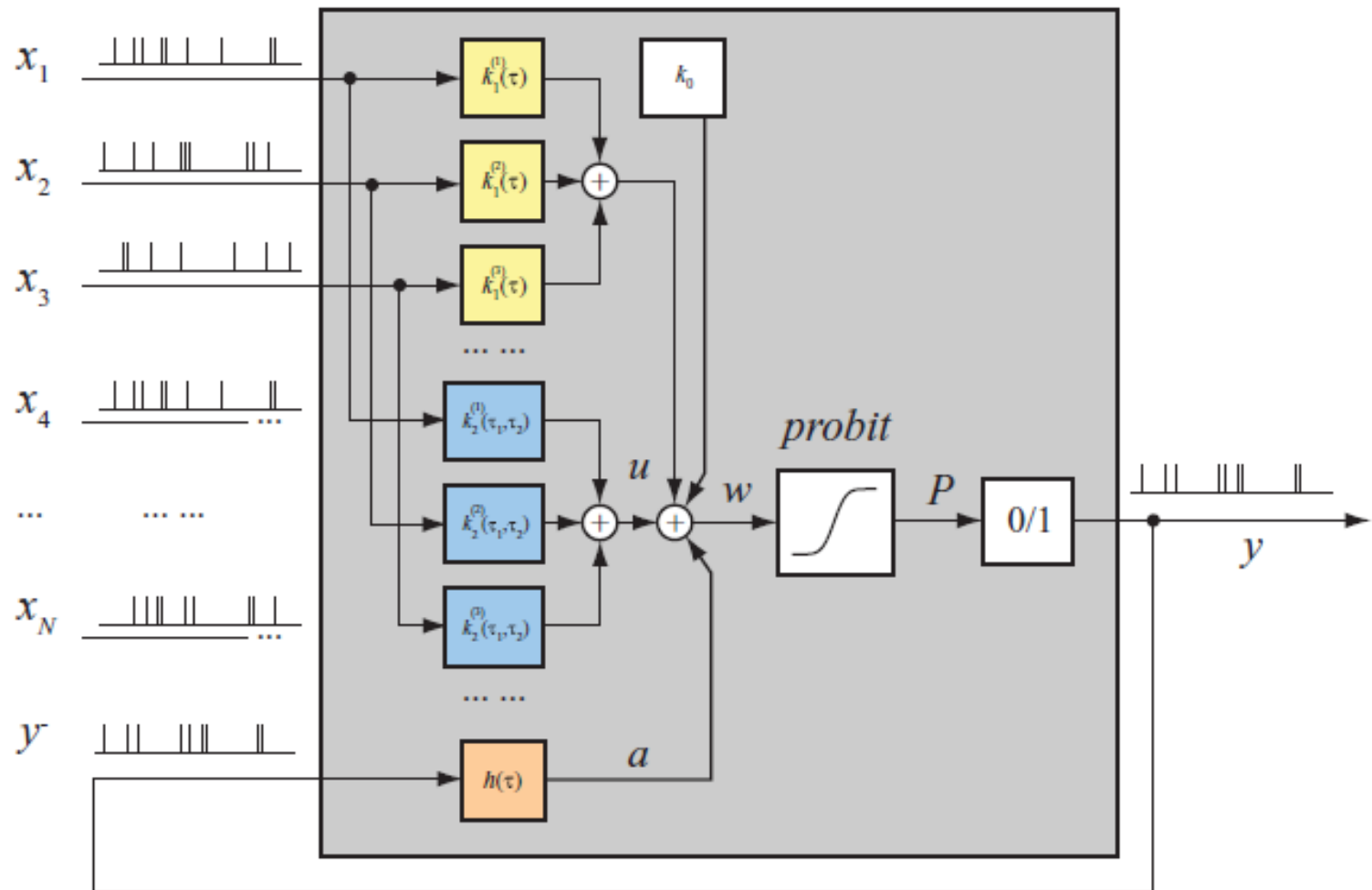
# Предсказание спайков

## MIMO – Multiple Input Multiple Output



# Модель нейрона

## MISO – Multiple Input Single Output



## Целевая функция

$$S(c) = -l(c) + \text{регуляризация}$$

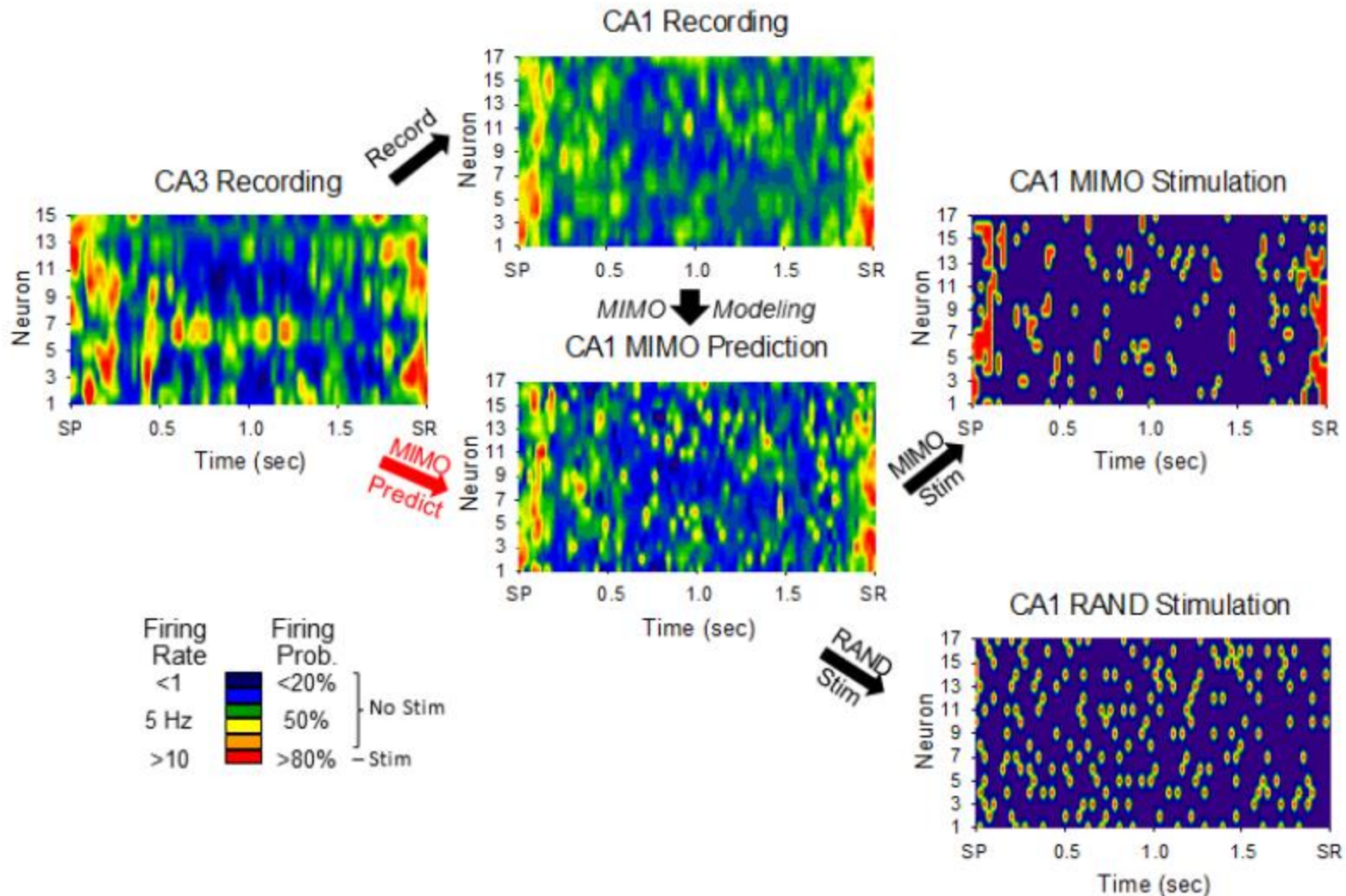
Функция правдоподобия (качество предсказания спайков)

$$l(c) = \sum_{t=1}^T [y(t) \log P(t) + (1 - y(t)) \log(1 - P(t))]$$

На каждом из 15 пациентов модель обучалась отдельно ☹

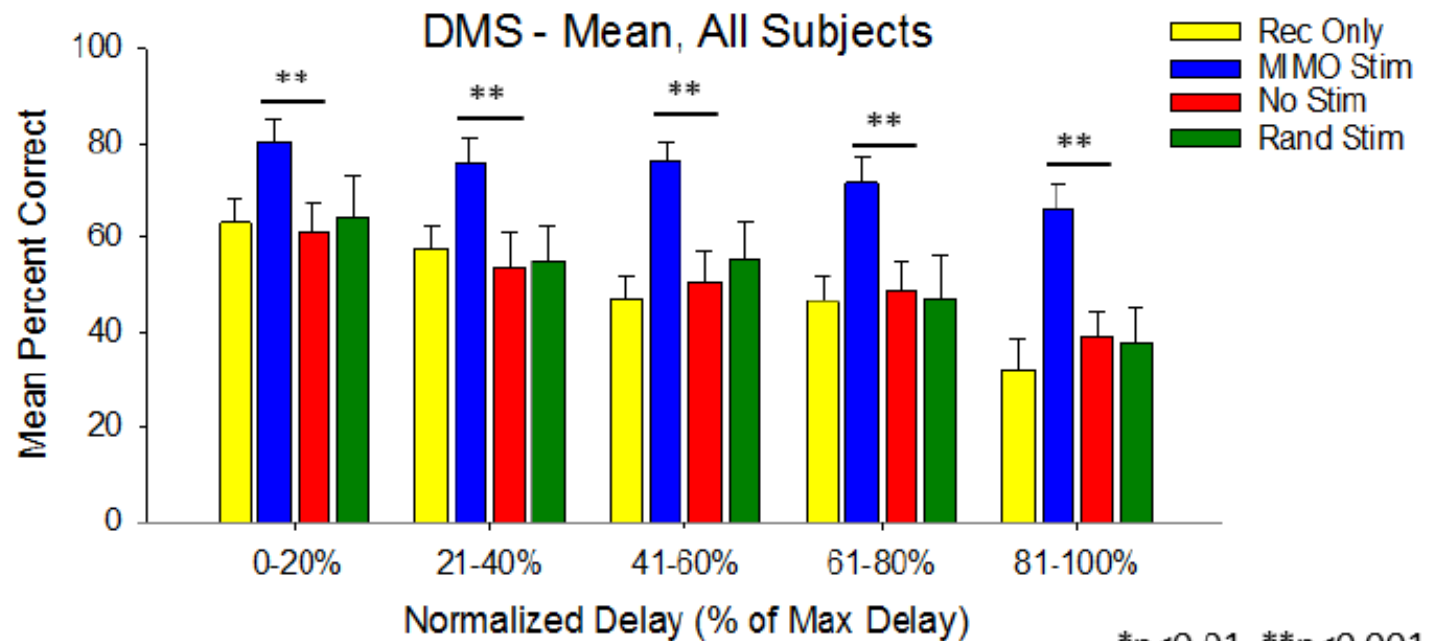
# Стимулирование MIMO моделью

## Application of MIMO-Based Closed Loop





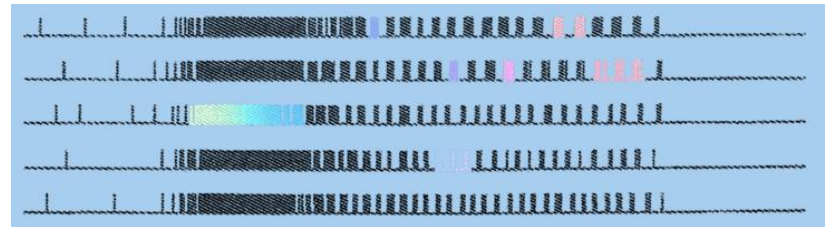
# Улучшение памяти



NT = No Trials Presented

# Выводы

1. Протезирование мозга принципиально возможно, но пока находится в зачаточном состоянии
2. Возможно, эта область испытает взрывной рост с появлением новых имплантируемых устройств
3. Работа таких устройств будет опираться на модели биологических нейронов
4. Принципиально важно понимать кодирование информации в мозге



<https://neuralink.com/approach/>