

Кратковременная память – что и как моделировать?

к.т.н., м.н.с. лаб. Физиологии движений ИФ РАН

Ляховецкий В.А.

e-mail: v_la2002@mail.ru

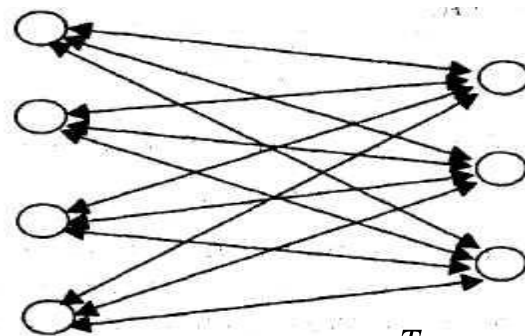
Чем моделировать?

Начальная посылка – внешний стимул S_i при запоминании переводится во внутреннее представление X_i . $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$.

- «Стековые» модели. Объекты X_1, X_2, \dots, X_n хранятся в «памяти» независимо друг от друга.
- Нейросетевые модели. Объекты хранятся распределенно. В «памяти» формируется матрица весов W .

Гетероассоциативная сеть

Сохраняет пары объектов. Может восстановить объект, когда ассоциированный с ним объект предлагается ей в качестве подсказки. В сети два слоя элементов — по одному для каждого из объектов пары. Оба слоя соединяются двунаправленными связями, т.е. активность может передаваться по связям в обоих направлениях.



$$W = X^T Y$$

(для одной пары объектов)

$$W = \sum_i X_i^T Y_i$$

(для i пар объектов)

$$W = \sum_i X_i^T X_{i+1}$$

(для последовательности)

Гетероассоциативная сеть

- 1) На первый слой подается объект X .
 - 2) Распространяется активность на второй слой.
Вход элемента второго слоя равен $net_j = \sum_i (x_i w_{ij})$
 - 3) Вычисляется новое состояние для каждого элемента второго слоя. $y_j = f(net_j)$
 - 4) Распространяется активность на первый слой.
Вход элемента первого слоя равен $net_i = \sum_j (y_j w_{ji})$
 - 5) Вычисляется новое состояние для каждого элемента первого слоя. $x_i = f(net_i)$
- Двустороннее распространение сигналов активности повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое состояние.

Что моделировать?

Емкость кратковременной памяти невелика

- «Стековые» модели. Принцип нормализации (Grossberg, 1978). За хранение X отвечает пул нейронов. Суммарная активность пула не может превышать некоторого порогового значения. С каждым X_i связана активность части пула. Чем больше объектов, тем меньше активность, связанная с каждым из них, тем больше вероятность ошибки при выборке объекта из памяти.
- Нейросетевые модели. При использовании простых алгоритмов расчета W емкость сети Коско невелика. При этом увеличение числа формальных нейронов без увеличения числа элементов внутреннего представления x_{ij} не ведет к увеличению емкости сети.

Что моделировать?

При воспроизведении запомненного допускаются ошибки

- «Стековые» модели. Вводится внешняя процедура, искажающая с некоторой вероятностью, заданной исследователем, элементы x_{ij} .
- Нейросетевые модели. Сеть допускает ошибки «самостоятельно», в зависимости от алгоритма расчета W .

Что моделировать?

Узнать запомненное проще, чем воспроизвести запомненное.

- «Стековые» и нейросетевые модели. Даже после искажения запомненный объект может быть ближе к эталону, чем к дистракторам (Ляховецкий, Потапов, Попечителей, 2006).

$$\| (X_j + \Delta X_j) - X_i \| < \| (X_i + \Delta X_i) - D \|$$

- Нейросетевые модели. W может пересчитываться на этапе узнавания (Kothari et al., 1998).

$W_{new} = W + k * X_i^T * Z$, Z – эталон или дистрактор, k – константа, зависящая от числа запоминаемых пар и количества элементов x_{ij} .

Что моделировать?

Человек помнит, что не помнит. Время ошибочных ответов достоверно больше времени правильных ответов. Субъективная уверенность в правильном ответе выше, чем в неправильном.

- «Стековые» и нейросетевые модели. Возможно хранение служебных элементов – «контрольных сумм».
- Нейросетевые модели. Сеть быстрее приходит в устойчивое состояние для правильных ответов.

Что моделировать?

При повторных заучиваниях последовательности объектов человек часто совершает одни и те же ошибки. Причем время ответа при таких ошибках не больше времени правильных ответов.

- «Стековые» модели. ???.
- Нейросетевые модели. Для каждой последовательности при заданном алгоритме расчета W последовательность воспроизводимых объектов фиксирована. Следовательно, ошибки будут повторяться. Сложнее объяснить существование не повторных ошибок.

Как моделировать???

При повторных заучиваниях (при обучении) последовательности объектов процент правильных ответов увеличивается.

- «Стековые» и нейросетевые модели. Группировка элементов последовательности в структуры более высокого уровня, «чанки».
- «Стековые» модели. Искусственно уменьшается вероятность искажения отдельных элементов???
- Нейросетевые модели. По некоторым правилам изменяется W ???. Нейросеть разбивается на подсети, каждая из которых хранит некоторую мерность объекта X [Constantini et al., 2003]???. Существуют предопределенные, различные по ресурсоемкости, алгоритмы расчета W ???

Как моделировать???

При обучении запоминанию процент правильных ответов растет нелинейно (плато и локальные минимумы на кривой обучения). Предположительно (Фресс, Пиаже, 1978; Александров, 2005) сложная форма кривой обучения говорит о смене внутреннего представления (x_1, x_2, \dots, x_k) . Следовательно, хорошая модель должна не только обосновывать выбор внутреннего представления, но и содержать схему смены внутреннего представления.

Как узнать, что хранится в моторной памяти?

Об особенностях структуры памяти позволяют судить ошибки воспроизведения движений. Представляет интерес:

- анализ ошибок при воспроизведении последовательности движений **правой** или **левой** руки, поскольку их движения различным образом обеспечиваются активностью правого и левого полушария мозга;
- сравнение ошибок воспроизведения последовательности движений человеком с ошибками модели.

Литературные данные

- Выполнение задания правой рукой вызывает активацию левого полушария, выполнение задания левой рукой вызывает активацию обоих полушарий (Grafton et al., 2002)
- Правое полушарие специализируется на позиционном кодировании цели единичного движения, а левое – на динамическом управлении траекторией движения (Naaland et al., 2004)
- Правое полушарие специализируется на координатном, а левое – на категориальном кодировании пространственных отношений (Jager, Postma, 2004).

Случайные последовательности

методика

В шести клетках листа А4, выбранных случайным образом, располагаются цифры, по которым экспериментатор последовательно перемещает правую или левую руку испытуемого. Испытуемый, находящийся с завязанными глазами, должен запомнить и немедленно воспроизвести движения руки.



| | | | | | |
|----------|--|----------|----------|----------|----------|
| | | | 3 | | 6 |
| 4 | | | | | |
| | | | | 5 | |
| | | 1 | | 2 | |

Модель

На основе гетероассоциативной нейронной сети Коско.

- **Модель 1. Векторное кодирование.**

Элементами векторов являлись α и ρ . Для хранения в бинаризованной форме требуется 3 и 5 элементов соответственно (+3 элемента на номер движения). Параметры α и ρ имеют разный физический смысл, хранятся в рамках двух подсетей, между которыми отсутствуют связи.

- **Модель 2. Позиционное кодирование.**

Элементами векторов являлись x и y . Поскольку $x \in [1,6]$ и $y \in [1,4]$, для хранения их в бинаризованной форме требуется 3 и 2 элемента соответственно (+3 элемента на номер движения).

Ошибки положения

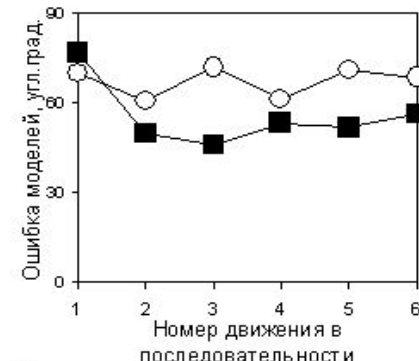
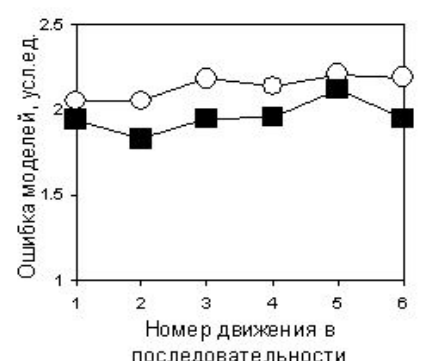
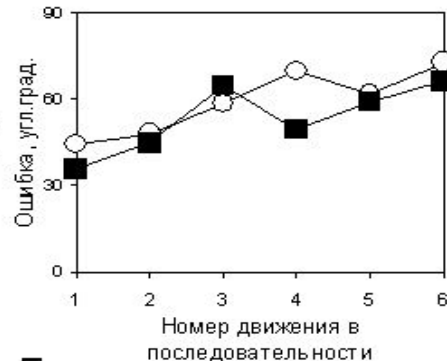
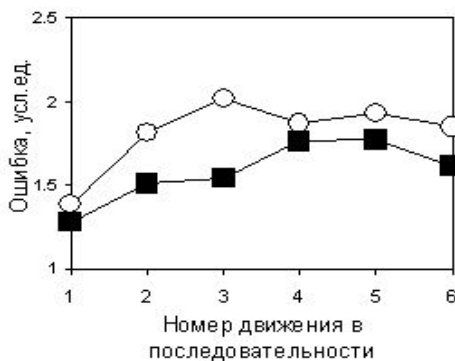
Ошибки движения

Ошибки положения

Ошибки движения

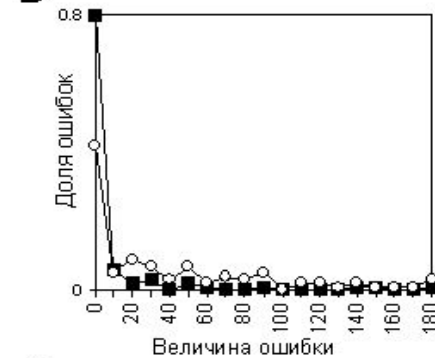
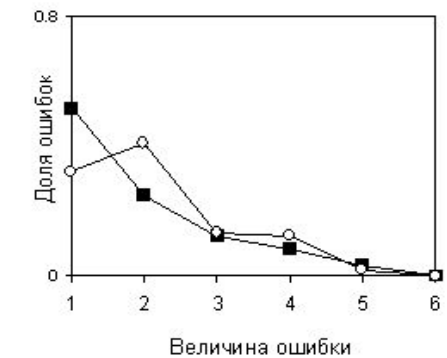
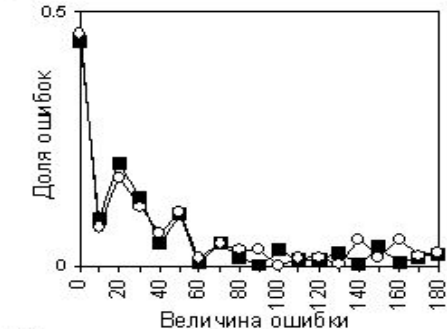
A

A



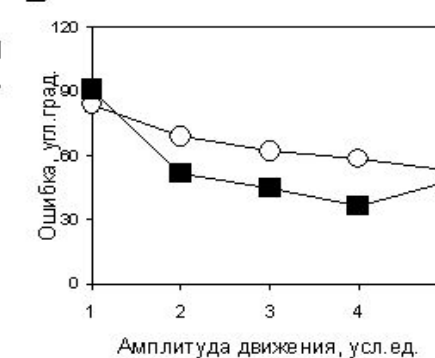
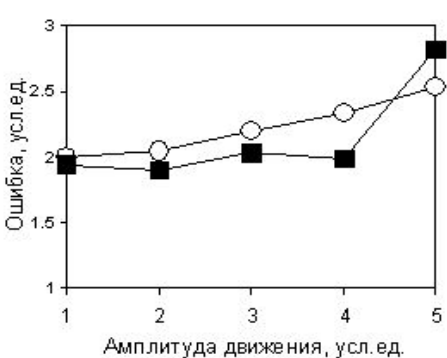
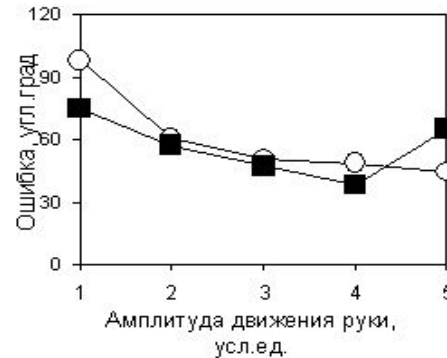
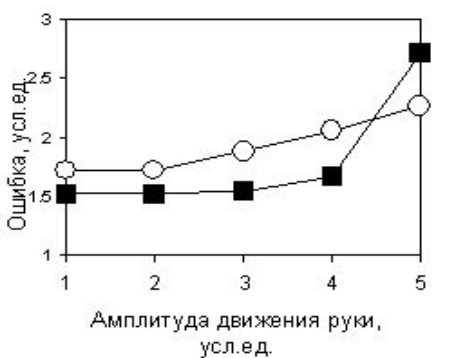
Б

Б



В

В



■ правая рука

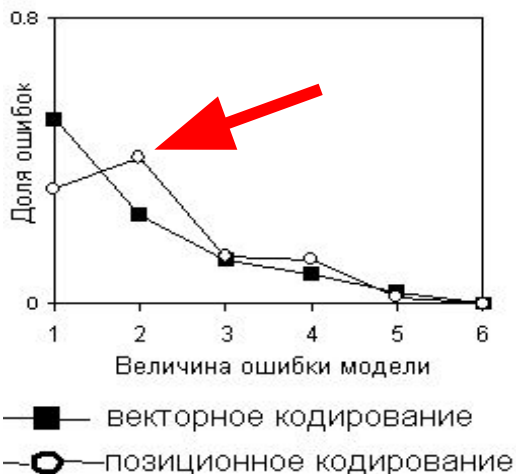
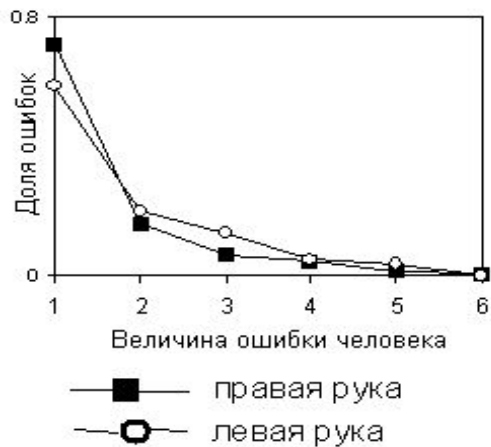
○ левая рука

■ модель 1

○ модель 2

Случайные последовательности ошибки человека и модели

Ошибки положения



Использование при запоминании лишь позиционного кодирования противоречит данным психофизиологических опытов. Функция ошибок модели при «смешанном» кодировании (позиционное + векторное) качественно подобна функции ошибок положения для **левой** руки человека.

Долговременная тренировка

методика и результаты

| Ошибки перестановок положения | | Ошибки перестановок движения | | |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| I | Левая рука 23 | Правая рука 15 | Левая рука 44 | Правая рука 39 |
| II | Правая рука 30 | Левая рука 20 | Правая рука 43 | Левая рука 15 |
| | <i>1-6 день</i> | <i>7-12 день</i> | <i>1-6 день</i> | <i>7-12 день</i> |

- **Правая** рука после **левой** -> уменьшение числа ошибок перестановок положения за счет активации правополушарной системы позиционного кодирования при тренировке движений левой руки;
- **Левая** рука после **правой** -> уменьшение числа ошибок перестановок движения за счет активации левополушарной системы векторного кодирования при тренировке движений правой руки;
- Нейросетевая модель допускает ошибки перестановок (несмотря на то, что обычно за моделями распределенного хранения отрицают эту способность).

Модель - ошибки перестановок положения

| Artificial network, Vector coding, % | | | | | | Artificial network, Position coding, % | | | | | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>i/j</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | <i>i/j</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.0 |
| 2 | | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 2 | | 0.9 | 0.1 | 0.0 | 0.5 |
| 3 | | | 0.5 | 0.2 | 0.2 | 3 | | | 0.1 | 0.2 | 0.1 |
| 4 | | | | 0.3 | 0.2 | 4 | | | | 0.5 | 0.3 |
| 5 | | | | | 0.3 | 5 | | | | | 0.6 |

Модель – ошибки перестановок направления

| Artificial network, Vector coding, % | | | | | | Artificial network, Position coding, % | | | | | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>i/j</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | <i>i/j</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 1.1 | 0.7 | 0.7 | 0.6 | 0.3 | 1 | 2.9 | 2.2 | 1.6 | 2.5 | 1.1 |
| 2 | | 1.3 | 1.1 | 0.6 | 0.7 | 2 | | 4.1 | 2.6 | 1.7 | 5.5 |
| 3 | | | 1.7 | 1.1 | 0.8 | 3 | | | 4.5 | 5.0 | 2.1 |
| 4 | | | | 2.5 | 1.3 | 4 | | | | 4.6 | 3.7 |
| 5 | | | | | 2.1 | 5 | | | | | 5.4 |

При векторном кодировании перестановки между соседними элементами более вероятны. Позиционное кодирование само по себе не может объяснить психофизические данные – система векторного кодирования должна использоваться при запоминании движений обеих рук.

Организованные последовательности

методика

Условие 1

| | | | | | |
|----------|--|----------|----------|----------|----------|
| | | | 3 | | 6 |
| 4 | | | | | |
| | | | | 5 | |
| | | 1 | | 2 | |

Условие 3

| | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | 4 | | |
| | | 3 | | 5 | |
| | 2 | | | | 6 |
| 1 | | | | | |

Условие 2

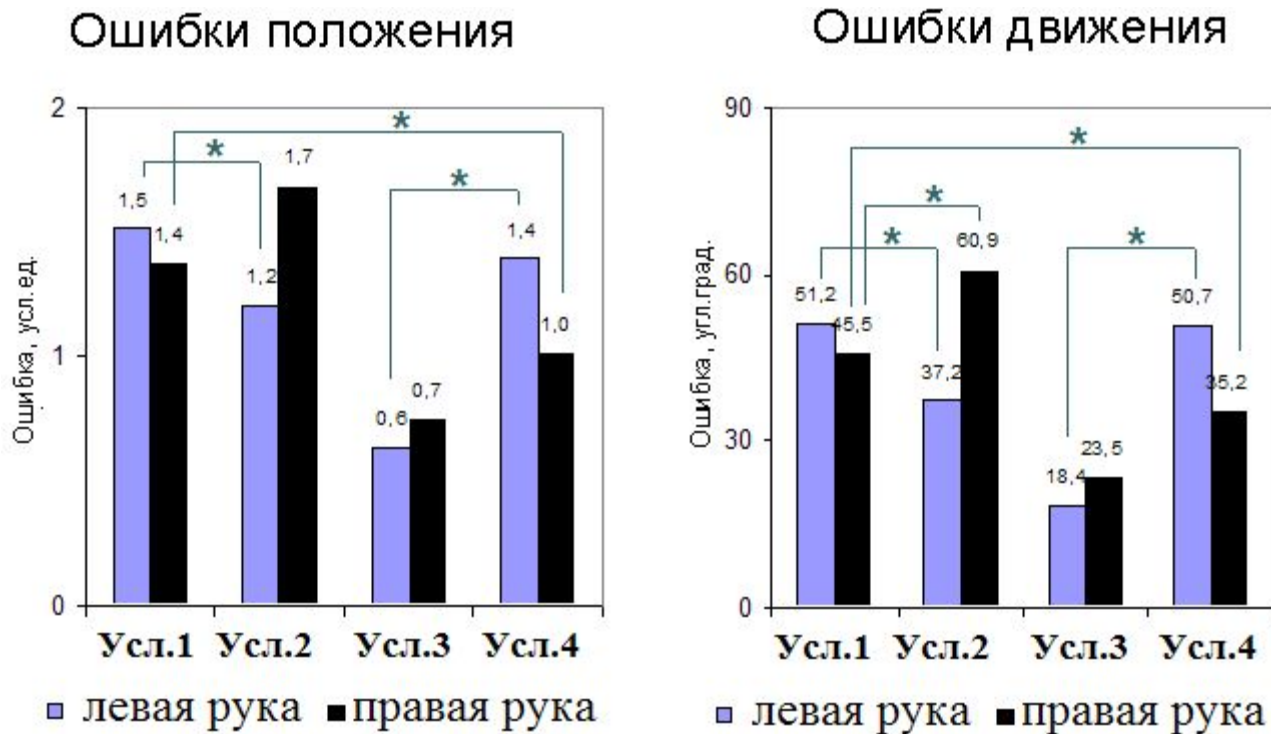
| | | | | | |
|----------|--|----------|----------|----------|----------|
| | | | 1 | | 5 |
| 2 | | | | | |
| | | | | 4 | |
| | | 3 | | 6 | |

Условие 4

| | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | 5 | | |
| | | 3 | | 2 | |
| | 1 | | | | 6 |
| 4 | | | | | |

Организованные последовательности

результаты



Усл.1-2 – информация о прежнем положении стимулов используется **левой**, но не **правой** рукой.

Усл.1-4 – информация о расположении стимулов на двух векторах используется **правой**, но не **левой** рукой.