

- [18] Carpenter G., Grossberg S. ART2: Self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns // Appl. Optics. 1987. V. 26. №. 23. P. 4919–4930.
- [19] Carpenter G., Grossberg S. ART3: Hierarchical search using chemical transmitters in self-organization pattern recognition architectures // Neural Networks. 1990. V. 3. P. 129–152.
- [20] Block H.D. The Perceptron: a model for brain function // Review of Modern Physics. 1962. 34. P. 123–135.
- [21] Kosko B. Bi-directional associative memories // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic. 1987. 18(1). P. 49–60.
- [22] German S., German D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions and Bayesian restoration of images // IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-6. 1984. P. 721–741.

Сферическая модель когнитивных и исполнительных механизмов

Е.Н. Соколов

1. Структура сферической модели

Основной проблемой психофизиологии является соотношение субъективных феноменов, поведенческих актов и процессов, протекающих в нейронных сетях. С тем, чтобы приблизиться к решению этой задачи и интегрировать нейрональную активность с её субъективными проявлениями, была предложена модель, представляющая собой гиперсферу в n -мерном пространстве. Сферические координаты (углы гиперсферы) соответствовали субъективным шкалам, тогда как декартовы координаты модели соотносились с возбуждениями нейронов, участвующих в возникновении субъективных явлений [1].

Сферическая модель описывает не только когнитивные процессы, но и реализацию поведенческих актов. В случае представления когнитивных процессов модель охватывает восприятие, память и семантику. Распространение модели на реализацию поведенческих актов основано на представлении о том, что множество субъективных интенций также образует гиперсферу. Концепция интенций была развита представителями Вюрцбургской школы психологии, рассматривавшими интенции как ключевой элемент инициации произвольных актов.

Когнитивная гиперсфера образована множеством нейронов-детекторов и гностических единиц, представляющих когнитивные события активацией локальных участков гиперсферы.

Интенции исполнительской гиперсферы представлены специфическими нейронами, которые связаны с командными нейронами, ответственными за трансформацию интенций в паттерны поведенческих реакций.

Последующие эксперименты в области психофизики, поведения и нейрофизиологии показали, что размерности когнитивной и исполнительской гиперсферы не превосходят четырёх измерений [2]. Таким образом, базис гиперсферы задается четырьмя нейронными каналами. Три угла гиперсферы (сферические координаты) образуют когнитивные шкалы.

Формальная структура гиперсферы в четырёхмерном пространстве определяется уравнениями, связывающими декартовы координаты (возбуждение нейронов) со сферическими координатами (субъективными шкалами).

Приведенные уравнения могут использоваться для имитации когнитивных процессов и поведенческих актов. Когнитивные процессы определяются возбуждениями нейронов на входе, которые образуют вектор возбуждения. Выполнение поведенческого акта начинается активацией специфического локуса на гиперсфере интенций с последующей генерацией посредством командных нейронов вектора возбуждения премоторных нейронов.

В модели стимулы кодируются входными векторами возбуждения постоянной длины, которые представлены на гиперсфере точками, характеризуемыми тремя углами как субъективными шкалами.

Гиперсфера в четырёхмерном пространстве как модель, интегрирующая нейрональные механизмы (декартовы координаты) и субъективные шкалы (сферические координаты) содержит ряд предсказаний, которые могут проверяться экспериментально. Так модель предполагает, что декартовы координаты (возбуждение нейронов) могут быть получены на основе психофизических субъективных шкал, заданных сферическими координатами. Правильность таких предсказаний может быть проверена прямой внутриклеточной регистрацией реакций нейронов, вовлеченных в кодирование соответствующих стимулов. Самое общее предсказание, вытекающее из модели, относится к сферической структуре когнитивного простран-

ства, в котором кодирование стимулов достигается векторами постоянной длины.

2. Вычисление различий

Векторный код, лежащий в основе модели, предполагает, что различия между стимулами в нейронных сетях вычисляются как абсолютные величины векторных разностей тех векторов возбуждения, которые эти стимулы представляют. Субъективные различия между стимулами основываются на нейрональных различиях. Это значит, что субъективные различия определяются геометрическими расстояниями между концами векторов возбуждения.

В частном случае обобщенной метрики Минковского расстояние между двумя точками измеряется суммой абсолютных значений разностей координат. Другими словами, измеряя расстояние, мы как бы обходим угловое здание. Это является основанием для того, почему такую метрику принято называть «сити-блок» метрикой.

3. Репрезентация стимулов на гиперсфере

Следующий шаг в рассмотрении сферической модели связан с нейронным механизмом, определяющим положение локуса возбуждения на гиперсфере. Предполагается, что гиперсфера занята нейронами-детекторами, которые настроены избирательно в отношении специфических векторов возбуждения, образованных возбуждениями нейронов предшествующего уровня обработки информации. Нейроны, «питающие» избирательные детекторы, можно назвать «преддетекторами». С тем, чтобы включить детекторы в сферическую модель, следует рассмотреть синаптический механизм их функционирования. Каждый синапс можно рассматривать как аппарат, умножающий пресинаптическое возбуждение (поток молекул медиатора) на плотность постсинаптических молекул рецептивного белка (распределение молекул-рецепторов). Поступление молекулы медиатора к определенному участку постсинаптической мембраны

является случайным событием, которое характеризуется вероятностью P_{pre} . Предполагается, что молекула рецептора постсинаптической мембраны непрерывно переключается, занимая то «спящее» состояние, то активное. Ионный канал открывается тогда, когда молекула медиатора присоединяется к активной молекуле. Вероятность того, что молекула постсинаптического рецептора будет в активном состоянии, равна P_{post} . Вероятность того, что молекула медиатора «застанет» молекулу рецептора в активном состоянии, и ионный канал откроется, равна произведению вероятностей P_{pre} и P_{post} как вероятность случайных некоррелированных событий. Таким образом, из молекулярного механизма синаптической передачи следует, что синапс умножает пресинаптический сигнал на плотность активных рецепторов постсинаптической мембраны.

Количество ионных каналов, открываемых одним потенциалом действия в отдельном синапсе, определяет элементарный постсинаптический ток (ЭПСТ), создающий элементарный постсинаптический потенциал (ЭПСП). Элементарные постсинаптические потенциалы, возникающие в отдельных синапсах, суммируются постсинаптическим нейроном, образуя постсинаптические потенциалы. Это справедливо и для нейронов-детекторов. Учитывая сферическую модель, можно сказать, что пресинаптический вход представляет собой вектор возбуждения постоянной длины. Набор синапсов, подвергаемый действию пресинаптического вектора возбуждения, можно представить вектором синаптических весов. Такие векторы синаптических весов также равны по длине. Сумма произведений, получаемых в результате умножения пресинаптических воздействий и весов синапсов, представляет собой в терминах линейной алгебры скалярное произведение двух векторов: вектора пресинаптического возбуждения и вектора синаптических весов. В случае четырёхмерного пространства реакция детектора равна скалярному произведению вектора возбуждения на вектор синаптических связей.

Возникает вопрос о том, как вычисляются евклидовы расстояния в нейронных сетях, где возведение в квадрат и извлечение квадратного корня не представлено. Ответом на этот вопрос может служить

переход от сити-блок метрики к евклидовой за счет нейрональной адаптации, редуцирующей величину максимальных реакций.

Введение нейрональной адаптации приводит зависимость различий между фиксированным популяционным вектором возбуждения детекторов и отличными от него векторами к форме, соответствующей евклидовым различиям.

Объяснение тому, что детекторы обладают специфическими векторами синаптических связей, следует искать в рамках теории естественного отбора. В процессе эволюции вектора синаптических весов постоянной длины обеспечивают такое вычисление скалярных произведений, которое зависит от ориентации векторов. Таким образом, возбуждение детектора однозначно достигает максимума при совпадении ориентации его вектора синаптических связей с ориентацией вектора возбуждения.

4. Положительное научение

Следующий этап в анализе информационных процессов, протекающих в нейронных сетях, связан с реализацией поведенческих актов. Предполагается, что каждый специфический поведенческий акт запускается соответствующим командным нейроном, имеющим пластичные и непластичные синапсы. Пластичные синапсы служат для получения пресинаптических возбуждений от потенциальных условных раздражителей. Непластичные (стабильные) синапсы используются для прихода безусловных раздражителей, служащих подкреплением. Пластичные синапсы изменяются под влиянием комбинации пресинаптических возбуждений, поступающих на пластичные синапсы, и подкрепления, воздействующего на непластичные синапсы с короткими интервалами. Если пресинаптические воздействия по величине превосходят веса синаптических связей, то последние под влиянием подкрепления возрастают, становясь равными пресинаптическим возбуждениям. Если пресинаптические возбуждения оказываются меньше весов синаптических связей, то синаптические веса убывают, становясь равными пресинаптическим входам. Таким образом, пластичный вектор синаптических связей в результате на-

учения становится равен подкрепляемому вектору возбуждения.

Процесс научения на синаптическом уровне определяется модификацией молекул рецептивного белка, который может переходить из «спящего» состояния в активное и наоборот. Молекулы рецептора, находящиеся в активном состоянии под воздействием медиатора, открывают ионный канал, и входящие ионные потоки создают ток, образующий вклад в постсинаптический потенциал. «Спящие» молекулы под воздействием медиатора не открывают ионный канал, но «предвозбуждаются» медиатором.

Подкрепление, вызывая в командном нейроне увеличение концентрации кальция, активизирует протеинкиназу, которая обеспечивает фосфорилирование предвозбужденных медиатором «спящих» молекул и переводит их в активное состояние. В то же самое время протеинфосфатаза дефосфорилирует те активные молекулы, которые не вступили во взаимодействие с медиатором и не открыли ионные каналы. При дефосфорилировании активные молекулы становятся спящими.

Баланс этих противоположных процессов достигается тогда, когда прирост числа активных молекул равен числу их переходов в спящее состояние.

Если плотность активных молекул рецептора меньше, чем пресинаптическое воздействие, то число активных молекул будет возрастать до тех пор, пока не станет равно пресинаптическому воздействию.

Если же плотность активных молекул больше пресинаптического потока молекул медиатора, то плотность активных молекул будет снижаться до тех пор, пока не сравняется с плотностью потока медиатора.

Таким образом, постсинаптические веса «подстраиваются» по отношению к пресинаптическим воздействиям. Учитывая векторный механизм представления пресинаптических воздействий и синаптических весов, можно констатировать, что в процессе научения вектор синаптических весов становится равен пресинаптическому вектору возбуждения, порождаемому подкрепляемым условным раздражителем. При этом скалярное произведение вектора возбуждения и

вектора синаптических связей, которое определяет реакцию командного нейрона, достигает максимума. Командный нейрон в ходе научения становится избирательно настроенным на условный раздражитель.

Эксперименты по научению могут начинаться после того, как синапсы командного нейрона уже были модифицированы прошлым опытом. Веса некоторых синапсов могут поэтому быть больше тех пресинаптических возбуждений, которые используются в эксперименте. Чтобы использовать экспоненциальный закон научения, в этом случае следует «сдвинуть» весь график в прошлое так, чтобы в начале обучения исходный синаптический вес был согласован с последующим обучением.

В том случае, когда изменение синаптических весов и всей кривой обучения отставлено, запаздывая по отношению к началу экспериментов, процесс научения можно характеризовать «инерцией». В этом случае всю кривую научения приходится сдвигать вперед, используя в качестве начала координат момент фактического начала обучения.

В процессе онтогенетического развития часть синапсов, не получающих сенсорного притока, подвергается депрессии или даже исчезает. В то же самое время синапсы, получающие афферентацию, сохраняются и стабилизируются. Животные, содержащиеся в «информационно-обогащенной» среде, характеризуются увеличением числа синапсов на шипиках их дендритов корковых и гиппокампальных нейронов. Предполагается, что этот процесс является результатом «синаптической конкуренции». Концепция синаптической конкуренции основывается на внутриклеточной регистрации реакций пирамидных нейронов коры. Вызов возбуждающих постсинаптических потенциалов (ВПСП) в нейронах достигается путем стимуляции одного из двух сенсорных нейронов, конвергирующих на изучаемой клетке, а положительное подкрепление достигается инъекцией в нейрон деполяризующего тока, который приводит к генерации серии потенциалов действия. Активация сенсорных нейронов достигается их электрической стимуляцией. В начале эксперимента внутриклеточная стимуляция каждого сенсорного нейрона

на вызывает в тестируемом нейроне ВПСП одинаковой амплитуды, характеризующие близость их синаптических весов. Многократная стимуляция одного сенсорного нейрона, сопровождаемая внутриклеточным подкреплением постсинаптической клетки, приводит к увеличению амплитуды ВПСП. Другой сенсорный нейрон, также имеющий синапсы на тестируемой клетке, при этом не стимулируется. Можно предположить, что вес его синаптического контакта не изменяется. Вопреки этому предположению оказывается, что ВПСП, вызываемый в тестируемом нейроне раздражением этого прежде не стимулировавшегося сенсорного нейрона уменьшается, что свидетельствует об уменьшении веса его синаптического контакта. Эту депрессию не стимулируемого синапса под влиянием подкрепления, подаваемого в связи с обучением другого синапса, принято называть синаптической конкуренцией. Высказывается мнение, что эта депрессия не стимулируемого синапса является результатом реципрокного взаимодействия синапсов. Однако механизм такой конкуренции синапсов до сих пор не выяснен. С точки зрения баланса активных и спящих рецепторов постсинаптической мембраны синаптические веса изменяются под влиянием подкрепления в соответствии с пресинаптическим притоком медиатора.

Синаптические веса подстраиваются под величины пресинаптических воздействий. Если пресинаптические возбуждения больше исходных синаптических весов, то синаптические веса растут, становясь равными пресинаптическим возбуждениям. Если пресинаптические воздействия меньше синаптических весов, то синаптические веса уменьшаются, достигая уровня пресинаптических воздействий. Отсутствие стимуляции является частным случаем, когда пресинаптическая активность меньше синаптического веса. Если отсутствует стимуляция и медиатор не выделяется, то спящие молекулы не предвозбуждаются и протеинкиназы, активированные подкреплением, не фосфорилируют спящие молекулы, которые поэтому не становятся активными. В то же время протеинфосфотаза будет дефосфорилировать активные молекулы, не подвергнутые действию медиатора при отсутствии стимуляции. Таким образом, не стимулируемый синаптический контакт под влиянием подкрепления градуально

депрессировать. Такая депрессия не стимулируемых синапсов под влиянием подкрепления выглядит так, словно возникает под влиянием активации других синапсов, давая повод использовать термин «синаптическая конкуренция». Более удачным можно считать термин «synaptic shaping». Это означает формирование матрицы синапсов под влиянием подкрепления, когда стимулируемые синапсы усиливаются, а не подвергнутые стимуляции депрессируют. Этот процесс можно распространить на формирование детекторов коры в онтогенезе под влиянием внешней среды. В этом случае в качестве подкрепления служит возбуждение ретикулярной активации. Оно адресуется ко всем синапсам: подвергнутым пресинаптическому воздействию и не получившим его. Синапсы, получившие воздействия от внешней среды, будут усиливаться и стабилизироваться. Синапсы, не подвергнутые внешнему воздействию, будут депрессировать и даже исчезать. Таким образом, матрица синапсов будет совпадать с паттерном внешней стимуляции. Аналогичный механизм можно предположить при формировании гностических единиц, избирательно настроенных на такие сложные объекты как лица. Избирательную настройку гностической единицы на специфический гештальт можно также рассматривать как результат синаптического «shaping». Сложный стимул действия на набор синапсов гностической единицы усилит их под влиянием ретикулярной активации, связанной с направленным вниманием. Синапсы на гностической единице, не вовлеченные в стимуляцию, при этом депрессируют. Таким образом, гностическая единица становится фильтром, пропускающим только зафиксированный комплекс. Синаптическая настройка под влиянием ретикулярной активации позволяет объяснить «перцептивное научение», которое не требует специфического подкрепления за исключением направленного внимания. Применение стимуляции в условиях активного направленного внимания будет вовлекать новые синапсы, расширяя сенсорный диапазон и снижая пороги различения. Участие перцептивного научения в расширении объема долговременной памяти и уточнении сенсорных функций основано на принципе противоположных изменений активированных и не активированных синапсов под влиянием ретикулярной формации в качестве когнитивного подкрепления.

5. Негативное научение

Негативное научение может встречаться в двух формах: угасания выработанного условного рефлекса и привыкания ориентировочной реакции, обладающей исходно большими весами синаптических связей. Негативное научение возникает тогда, когда пресинаптическое возбуждение не сопровождается подкреплением. На молекулярном уровне уменьшение веса синаптического контакта при отсутствии последующего подкрепления связано с переходом части активных молекул в спящее состояние. Это происходит за счет дефосфорилирования активных молекул, не подвергнутых действию медиатора. Вес синапса определяется плотностью активных молекул.

6. Сдвиг кривой научения

В том случае, когда в канале положительного обучения синаптические веса командного нейрона уже приобрели определенные значения, следует предположить обучение в прошлом. Если предположить, что и в прошлом использовался тот же условный раздражитель, то можно рассчитать то количество обучающих проб, которые были использованы ранее. Графически это выглядит как сдвиг всей кривой обучения на определенное число шагов в сторону отрицательных значений (в прошлое). Аналогичный сдвиг в прошлое кривой научения можно представить и в случае негативного научения. В этой связи следует рассмотреть другой феномен – инерцию в процессе научения. Она выражается в том, что изменение условных реакций начинается с задержкой. В этом случае всю кривую научения приходится сдвигать от начала обучения на определенное число шагов в сторону положительных значений (сдвиг в «будущее»). Величину этого сдвига можно рассчитать, исходя из последующей кривой научения. Последствие прошлого процесса научения и инерция в развитии научения особенно отчетливо проявляется при переучивании, когда стимул, служивший условным раздражителем, перестает подкрепляться и заменяется другим условным раздражителем. Влияние

прошлого обучения заключается в том, что вероятность условных реакций на новый условный раздражитель определяется сложившимися весами синаптических связей. Инерция обучения в этом случае выражается в продолжительном сохранении высокой вероятности ответов на первоначальный условный раздражитель. Перестройка синаптических весов в соответствии с новым условным раздражителем оказывается отодвинутой от начала переучивания. При негативном научении влияние прошлого опыта и инерция этого влияния выражается в сохранении тенденции редукции синаптических весов несмотря на смену стимуляции.

7. Проектор внимания

Когнитивная и исполнительная гиперсферы снабжены «проектором», который подсвечивает их определенные участки. Таким проектором является направленное внимание.

Факторами, определяющими включение проектора, являются новизна и значимость стимуляции. Подсвечивание когнитивной и исполнительной гиперсфер осуществляется восходящей активирующей ретикулярной системой. Эффект новизны достигается формированием следа повторяющегося раздражителя в виде «нервной модели стимула», которая возникает в результате депрессии синаптических контактов в ходе негативного научения, когда пресинаптические воздействия не сопровождаются подкреплением. Вектор возбуждения вызывает тем большую депрессию отдельных синапсов, чем больше поступающие на них пресинаптические воздействия. Синапсы, не получившие пресинаптических воздействий, сохраняют свою изначально высокую эффективность. При изменении стимула, когда новый вектор возбуждения будет содержать компоненты высокой амплитуды, действующие на синапсы, сохранившие высокую эффективность, возникает реакция тем большая, чем больше вектор возбуждения нового стимула отличается от сформированного при привыкании вектора синаптических связей. В ходе привыкания вектор синаптических связей становится ортогонален вектору возбуждения стандартного стимула, их скалярное произведение уменьшается,

и реакция нейрона угасает. Чем больше вектор возбуждения тест-стимула отклоняется от вектора возбуждения стандартного раздражителя, тем больше скалярное произведение вектора возбуждения тест-стимула и вектора модифицированных синаптических связей.

Таким образом, депрессия синаптических весов под влиянием повторения стандартного стимула определяет реакцию на новизну тест-стимула. Новые стимулы, отличные от стандарта, усиливаются сигналом новизны, возникающим в нейронах гиппокампа в результате развития привыкания. Поступая к активирующей ретикулярной системе, сигнал новизны широко распространяется по нейронным сетям и суммируется с ответами детекторов на новый раздражитель. Вызывая дополнительное возбуждение подвергнутых воздействию тест-стимула детекторов, сигнал новизны определяет эффект подчеркивания нового раздражителя относительно привычного фона.

Сигнальные (значимые) раздражители усиливаются двумя операциями. Прежде всего, они усиливаются в зависимости от степени новизны, как и несигнальные раздражители. Кроме того, дополнительно они усиливаются в результате ассоциативного процесса, в который вовлекается активирующая ретикулярная система. Такая условно-рефлекторная активация значимых стимулов особенно отчетливо проявляется при антиципации ожидаемого сигнала. Активация, связанная со значимостью сигнала, тем больше, чем ближе вектор возбуждения данного сигнала к вектору возбуждения подкрепляемого условного раздражителя. Усиление пропорционально скалярному произведению вектора синаптических связей и вектора возбуждения тест-стимула.

Прожектор внимания подсвечивает гиперсферу, выделяя те её участки, которые уже возбуждены действием стимула. Это обеспечивает селективность выделения новых объектов.

8. Перцептивный контраст

Векторное кодирование стимулов определяет спецификацию стимулов. Определенный стимул характеризуется специфическим вектором возбуждения. Если два стимула создают идентичные вектора

возбуждения, то они вызовут идентичное восприятие, даже если эти стимулы физически различны. Дополнительно существует нейронный механизм, предназначенный для получения данных о различиях между стимулами. Различие «вычисляется» путем определения различий в уровне возбуждения соответствующих нейронных каналов. Это вычисление вначале основано на сити-блок метрике: нахождение абсолютных значений разностей соответствующих координат двух векторов возбуждения.

Перцептивные различия, измеряемые абсолютной величиной векторной разности, следует отличать от их поведенческих различий. Последние определяются различиями реакций, вызываемых сравниваемыми стимулами, тогда как перцептивные различия от ассоциативного обучения не зависят. Так стимулы, различающиеся на перцептивном уровне, могут не различаться поведенчески, вызывая одинаковые поведенческие реакции в результате процесса генерализации условных рефлексов. После стабилизации условного рефлекса вектор синаптических связей командного нейрона равен вектору возбуждения, представляющего условный стимул.

Нейронная сеть, вычисляющая перцептивные различия между стимулами, используется не только по прямому назначению для реализации поведенческих актов, определяемых величиной различия без учета специфичности стимулов, но и для контрастного усиления когнитивных процессов. Это достигается прибавлением различий с определенным коэффициентом к исходным компонентам вектора возбуждения стимула, подвергаемого воздействию фона при одновременном контрасте.

В результате различие между стимулами увеличивается. Аналогичный эффект имеет место при последовательном контрасте. Отличие заключается в том, что прибавка со временем исчезает.

Выше был рассмотрен случай, когда индуцирующее поле оказывало одностороннее влияние на тестовое поле. При равенстве площадей двух участков возникает взаимный контраст, в результате которого различие векторов возбуждения суммируется с каждым из векторов возбуждения. В результате вектора возбуждения отдаляются друг от друга, и различие между полями увеличивается.

Схематически нейронная сеть, вычисляющая контраст двух полей, представленных соответствующими векторами возбуждения, включает исходные компоненты, их разности и суммы исходных компонентов с их взвешенной разностью.

9. Поведенческий контраст

Перцептивное различие и перцептивный контраст не зависят от обучения. Однако наличие перцептивного различия не исключает того, что разные по перцептивным характеристикам стимулы в результате генерализации не различаются поведенчески. Так, разные стимулы могут быть одинаково индифферентными или одинаково вызывать одни и те же условные реакции. Условная реакция определяется возбуждением командного нейрона, которое в свою очередь является функцией скалярного произведения вектора возбуждения и сформированного вектора синаптических связей. Два стимула, различающиеся своими векторами возбуждения, могут вызвать в командном нейроне одинаковое возбуждение, и, следовательно, с одинаковой вероятностью и условную реакцию, если скалярные произведения их векторов возбуждения на вектор синаптических связей будут равны. Такие перцептивно различные стимулы будут поведенчески одинаковы. В то же самое время два перцептивно одинаковых стимула, предъявленные при разных значениях вектора синаптических связей, создавая разные скалярные произведения, будут поведенчески различны. Таким образом, поведенческое сходство и поведенческое различие стимулов зависит от соотношения их векторов возбуждения и текущего вектора синаптических связей. Если вектор синаптических связей исходно равноудален от векторов возбуждения двух стимулов, то они будут поведенчески одинаковы. Если в ходе обучения вектор синаптических связей сближится с одним из векторов возбуждения, то скалярные произведения этих стимулов станут различаться, и стимулы станут поведенчески контрастными. Таким образом, поведенческий контраст – это подчеркивание поведенческих различий между стимулами.

10. От рецепторов к сфере

Рассмотренная выше гиперсфера как универсальная модель информационных процессов в нейронных сетях не включала рецепторное звено. Теперь модель нужно дополнить переходом от рецепторов к нейронам, образующим базис сферической поверхности. Первый вопрос, который здесь возникает, касается превращения возбуждения одного рецептора, представляющего собой скаляр, в вектор возбуждения.

В общем виде характеристику рецептора можно представить конусом реактивности в отношении определенного параметра стимула. Локальная реактивность рецептора в данной точке определяется плотностью рецепторных молекул. Локальный стимул постоянной амплитуды, изменяющий свое положение вдоль профиля рецепторов, вызывает реакцию, пропорциональную плотности рецепторных молекул в данной точке. В простейшем случае рецептор характеризуется пространственной избирательностью реакций. В случае, когда стимул постоянной интенсивности перемещается вдоль оси x , амплитуда ответа является мерой его положения относительно центра, где расположена точка максимальной чувствительности x_0 . При этом положения стимула справа и слева от центра не различаются. В более сложном случае рецептор, обладая пространственной характеристикой, избирательно реагирует и на специфический параметр стимула.

Профиль реактивности рецептора в отношении специфического параметра стимула также дается Гауссианой, но теперь x относится к специфической характеристике стимула. Но и в этом случае отдельный рецептор измеряет стимул относительно точки его максимальной чувствительности.

С увеличением интенсивности стимула ответ рецептора возрастает по экспоненте.

Реакция отдельного рецептора трансформируется в вектор возбуждения нейронов. Это достигается тем, что рецептор связан возбуждающим синапсом с фоново-молчащим нейроном и тормозным синапсом с фоново-активным нейроном.

Таким образом, рецептор воспроизводит в одном нейроне функцию Гаусса, а в другом её дополнение до единицы. Возникает вектор, имеющий два компонента, который нормирован в сити-блок метрике.

Приближение к евклидовой метрике достигается нейрональной адаптацией, ограничивающей крайние значения компонент вектора.

Стимуляция на входе трех типов рецепторов кодируется их вектором возбуждения, который в связи с перекрытием характеристик рецепторов образует неортогональную систему. Матрица коэффициентов связей рецепторов со следующим слоем нейронов обеспечивает ортогонализацию. Однако интенсивность стимула в этой ортогональной системе определяется длиной вектора возбуждения. Множество стимулов представлено точками, заполняющими трехмерное пространство. На следующем уровне, в связи с дополнением спонтанно активного нейрона, размерность пространства увеличивается до четырёх. Однако в связи с нормировкой векторов возбуждения при участии нейрональной адаптации всё множество точек, представляющих стимулы, теперь образует сферическую поверхность. При этом отдельным стимулам на входе соответствуют отдельные локальные участки сферической поверхности. Изменение стимула ведет к изменению вектора возбуждения рецепторов, вектора возбуждения нейронов и перемещенного локуса возбуждения по гиперсфере.

Новые и значимые стимулы «подсвечиваются» на гиперсфере при участии «прожектора» внимания, образованного механизмом активирующей системы. В процессе научения отдельные участки гиперсферы могут ассоциативно связываться с командными нейронами поведенческих реакций через пластичные синапсы, образуя основу поведенческих реакций.

Выводы

- 1) Стимулы, поступающие на нейронную сеть, кодируются векторами постоянной длины, компонентами которых являются возбуждения нейронов.

- 2) Сферические координаты (углы гиперсферы) соответствуют субъективным шкалам, характеризующим отображаемые стимулы.
- 3) Множество стимулов отображается на поверхности гиперсферы точками, представленными избирательно настроенными детекторами.
- 4) Нейрональное и субъективное различие между стимулами измеряется абсолютной величиной разности векторов возбуждения, кодирующих эти стимулы.
- 5) Измерение различий между стимулами производится в сити-блок метрике с последующей аппроксимацией евклидовой при участии нейрональной адаптации.
- 6) Синаптический контакт умножает пресинаптический сигнал на постсинаптический вес синапса.
- 7) Совокупность синаптических контактов нейрона образует его вектор синаптических связей.
- 8) Нейрон, суммируя попарные произведения пресинаптических сигналов и постсинаптических весов, вычисляет скалярные произведения вектора возбуждения и вектора синаптических связей.
- 9) Детектор, характеризующийся постоянным по длине вектором синаптических связей, является избирательным фильтром сигналов.
- 10) Положительное научение (выработка условного рефлекса) заключается в подстройке пластичных синаптических весов под подкрепляемые пресинаптические возбуждения.
- 11) Молекулярный механизм трансформации синапсов заключается в изменении плотности активных молекул рецепторного белка постсинаптической мембраны.
- 12) Негативное научение (привыкание и угасание условного рефлекса) заключается в уменьшении плотности активных молекул рецепторного белка постсинаптической мембраны.

- 13) Новые стимулы получают дополнительное возбуждение за счет подключения активирующей ретикулярной системы.
- 14) Переход от рецепторов на входе к нейронам с векторами возбуждения постоянной длины достигается за счет дополнительного нейронного канала, активного при отсутствии стимуляции.
- 15) Нормировка вектора возбуждения в нейронной сети происходит в сити-блок метрике с последующим переходом к евклидовой метрике за счет нейрональной адаптации.

11. Приложение

11.1. Структура сферической модели

Соотношение декартовых и сферических координат гиперсферы в четырёхмерном евклидовом пространстве определяется канонически следующими равенствами:

$$\begin{aligned}x_1 &= R \cdot \sin A \cdot \cos B \cdot \cos C, \\x_2 &= R \cdot \sin A \cdot \cos B \cdot \sin C, \\x_3 &= R \cdot \sin A \cdot \sin B, \\x_4 &= R \cdot \cos A,\end{aligned}$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – декартовы координаты, представляющие возбуждение нейронов; A, B, C – это сферические координаты (углы), определяющие субъективные шкалы; $R = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2)^{\frac{1}{2}}$ – радиус гиперсферы.

Справедливость этих соотношений между декартовыми и сферическими координатами вытекает из следующих преобразований:

$$\begin{aligned}x_1^2 + x_2^2 &= R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B \cdot \cos^2 C + R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B \cdot \sin^2 C = \\&= R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B \cdot (\sin^2 C + \cos^2 C) = R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B, \\x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 &= R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B + R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \sin^2 B = \\&= R^2 \cdot \sin^2 A \cdot (\sin^2 B + \cos^2 B) = R^2 \cdot \sin^2 A, \\x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 &= R^2 \cdot \sin^2 A + R^2 \cdot \cos^2 A = R^2.\end{aligned}$$

Если значения x_1, x_2, x_3 и x_4 как возбуждения нейронов однозначно определяются сигналами на входе, то сферические координаты

как субъективные шкалы могут быть выбраны достаточно произвольно с одним только условием, чтобы их соотношения с декартовыми координатами соответствовали уравнению гиперсферы. В частности, в качестве сферических координат можно выбрать такие углы A_1, A_2, A_3 , что:

$$\begin{aligned}A_1 &= \operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1}, \\A_2 &= \operatorname{arctg} \frac{x_3}{x_4}, \\A_3 &= \operatorname{arctg} \frac{(x_3^2 + x_4^2)^{\frac{1}{2}}}{(x_1^2 + x_2^2)^{\frac{1}{2}}}.\end{aligned}$$

В этом случае:

$$\begin{aligned}x_1 &= R \cdot \cos A_3 \cdot \cos A_1, \\x_2 &= R \cdot \cos A_3 \cdot \sin A_1, \\x_3 &= R \cdot \sin A_3 \cdot \sin A_2, \\x_4 &= R \cdot \sin A_3 \cdot \cos A_2.\end{aligned}$$

Справедливость этих соотношений следует из следующих уравнений:

$$\begin{aligned}x_1^2 + x_2^2 &= R^2 \cdot \cos^2 A_3 \cdot \cos^2 A_1 + R^2 \cdot \cos^2 A_3 \cdot \sin^2 A_1 = \\&= R^2 \cdot \cos^2 A_3 \cdot (\cos^2 A_1 + \sin^2 A_1) = R^2 \cdot \cos^2 A_3, \\x_3^2 + x_4^2 &= R^2 \cdot \sin^2 A_3 \cdot \sin^2 A_2 + R^2 \cdot \sin^2 A_3 \cdot \cos^2 A_2 = \\&= R^2 \cdot \sin^2 A_3 \cdot (\sin^2 A_2 + \cos^2 A_2) = R^2 \cdot \sin^2 A_3, \\x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 &= R^2 \cdot (\cos^2 A_3 + \sin^2 A_3) = R^2.\end{aligned}$$

Преимущество углов A_1, A_2, A_3 в качестве субъективных шкал подтверждается результатами психофизических и нейрофизиологических данных.

Приведенные уравнения могут использоваться для имитации когнитивных процессов и поведенческих актов. Когнитивные процессы определяются возбуждениями нейронов на входе, которые образуют вектор возбуждения. Выполнение поведенческого акта начинается активацией специфического локуса на гиперсфере интенций с последующей генерацией посредством командных нейронов вектора возбуждения премоторных нейронов.

Рассмотрим соотношение углов A, B, C и A_1, A_2, A_3 . В модели стимулы кодируются входными векторами возбуждения постоянной длины, которые представлены на гиперсфере точками, характеризующимися тремя углами как субъективными шкалами. С тем,

чтобы наглядно представить положение точек на гиперсфере в четырёхмерном пространстве, их можно нанести в виде проекций на три плоскости, соответствующие трем углам гиперсферы: A_1, A_2 и A_3 . На плоскости x_1x_2 , образованной осями x_1 и x_2 , субъективная шкала характеризуется углом $A_1 = \text{arctg} \frac{x_2}{x_1}$. При этом $A_1 = C$. Проекция точек на плоскость x_1x_2 представлены концентрическими кругами, зависящими от вкладов углов A и B соответственно. При $A = \pi/2$ и $B = 0$ круг на плоскости x_1x_2 характеризуется максимальным значением проекции радиуса. С уменьшением угла A или увеличением угла B проекция радиуса уменьшается и круговая проекция точек приближается к центру плоскости x_1x_2 . В случае, когда $A = 0$ или $B = \pi/2$, координаты $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$.

На плоскости x_3x_4 , образованной осями x_3 и x_4 , где $A_2 = \text{arctg} \frac{x_3}{x_4}$, проекции точек также образуют круговые траектории. Проекция радиуса на эту плоскость максимальна при условии, что $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$. Это имеет место, когда угол $B = \pi/2$. С уменьшением угла B траектории приобретают форму эллипсов, вытянутых вдоль оси x_4 . Это следует из уравнений $x_3 = R \cdot \sin A \cdot \sin B$ и $x_4 = R \cdot \cos A$, которые означают, что уменьшение угла B будет приводить к уменьшению координаты x_3 без изменения координаты x_4 . Уменьшение угла B ведет к параллельному увеличению координат x_1 и x_2 . Это следует из уравнений $x_1 = R \cdot \sin A \cdot \cos B \cdot \cos C$ и $x_2 = R \cdot \sin A \cdot \cos B \cdot \sin C$.

На плоскости, образованной осями $(x_1^2 + x_2^2)^{\frac{1}{2}}$ и $(x_3^2 + x_4^2)^{\frac{1}{2}}$, $A_3 = \text{arctg} \frac{(x_3^2 + x_4^2)^{\frac{1}{2}}}{(x_1^2 + x_2^2)^{\frac{1}{2}}}$. Проекция точек на эту плоскость представляют собой окружность постоянного радиуса R . Это вытекает из уравнения сферы: $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = R^2$.

При условии $A = \pi/2$ и $B = 0$ $x_1^2 + x_2^2 = R^2$, а $x_3^2 + x_4^2 = 0$.

При условии $A = 0$ и $B = \pi/2$ $x_1^2 + x_2^2 = 0$, а $x_3^2 + x_4^2 = R^2$.

Остальные проекции точек расположены между этими крайними значениями на окружности постоянного радиуса, равного R .

Это вытекает из уравнений, связывающих декартовы и сферические координаты:

$$x_1^2 + x_2^2 = R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B \cdot \cos^2 C + R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B \cdot \sin^2 C = R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \cos^2 B \text{ и}$$

$$x_3^2 + x_4^2 = R^2 \cdot \sin^2 A \cdot \sin^2 B + R^2 \cdot \cos^2 A.$$

11.2. Вычисление различий

Различия измеряются абсолютной величиной разности векторов возбуждения, кодирующих стимулы.

Различия d_{ij} между стимулами, представленными в четырёхмерном пространстве векторами \vec{x} и \vec{y} , определяются выражением:

$$d_{ij} = [(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2 + (x_4 - y_4)^2]^{\frac{1}{2}},$$

где x_i и y_i являются координатами векторов \vec{x} и \vec{y} , которые кодируют стимулы S_i и S_j , соответственно.

Другой мерой различия стимулов может служить угол, разделяющий вектор \vec{x} и вектор \vec{y} . Угол между векторами возбуждения вычисляется с использованием скалярного произведения векторов и их длин (модулей).

$$|\vec{x}| = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2)^{\frac{1}{2}}, |\vec{y}| = (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$(\vec{x}, \vec{y}) = x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 + x_4y_4 = |\vec{x}| \cdot |\vec{y}| \cdot A_{ij},$$

где $|\vec{x}|$ и $|\vec{y}|$ – модули векторов \vec{x} и \vec{y} , (\vec{x}, \vec{y}) – скалярное произведение векторов \vec{x} и \vec{y} ;

$$A_{ij} = \arccos \frac{x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 + x_4y_4}{(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2)^{\frac{1}{2}}},$$

где A_{ij} – угол между векторами \vec{x} и \vec{y} .

Косинус угла A_{ij} является мерой субъективного сходства стимулов S_i и S_j ; $\text{SIM}_{ij} = \cos A_{ij}$, где SIM_{ij} – сходство стимулов S_i и S_j .

Рассмотренные нейрональные и субъективные различия между стимулами предполагали евклидову метрику, которая является частным случаем более общей метрики Минковского. В случае m -мерного пространства различия выражаются следующим образом:

$$d_{ij} = \left[\sum_{k=1}^m |x_k - y_k|^n \right]^{\frac{1}{n}},$$

где $k = 1, 2, \dots, m$ – индекс координат m -мерного пространства, m – размерность пространства; $n = 1, 2, \dots, \infty$ – индекс метрики. $|x_k - y_k|$ – абсолютная величина разности координат векторов \vec{x} и \vec{y} . d_{ij} – различие векторов возбуждения \vec{x} и \vec{y} .

Абсолютные значения различий координат находятся в нейронной сети, вычитающей координаты f_i и g_i в двух формальных нейронах. Один нейрон (N_{1i}) находит разность $f_i - g_i$, когда $f_i > g_i$. Другой нейрон (N_{2i}) находит разность $g_i - f_i$, когда $g_i > f_i$. Нейрон N_{1i} генерирует спайки, когда $f_i > g_i$. Нейрон N_{2i} создает спайковый ряд, когда $g_i > f_i$. Другие нейроны N_{1j} и N_{2j} аналогичным образом вычисляют различия между f_j и g_j . В каждом случае на выходе возникают абсолютные значения разностей координат. Эти различия, данные в сити-блок метрике, затем трансформируются при участии нейрональной адаптации в $\text{Dif}_{city} \sum_i |f_i - g_i|$ различия, представленные евклидовой метрикой:

$$\begin{aligned} D_{1i} &= |f_i - g_i| \Leftrightarrow f_i > g_i, \\ D_{2i} &= |f_i - g_i| \Leftrightarrow f_i < g_i, \\ D_{1i}^* &= D_{1i} \cdot \exp(-kD_{1i}), \\ D_{2i}^* &= D_{2i} \cdot \exp(-kD_{2i}), \end{aligned}$$

где D_{1i} и D_{2i} – различие координат в сити-блок метрике, D_{1i}^* и D_{2i}^* – различие координат в евклидовой метрике.

Выбирая вектор возбуждения \vec{F} , нормированный в сити-блок метрике, и последовательно выбирая компоненты вектора \vec{G}_i от 0 до 1, можно получить график зависимости различий фиксированного вектора \vec{F} и переменного вектора \vec{G}_i . Эти различия векторов даны в сити-блок метрике. Используя нейрональную адаптацию, эти различия можно превратить в евклидовы. Для этого нужно подобрать соответствующее значение экспоненты. В реальных нейронных сетях такой подбор коэффициента адаптации является результатом естественного отбора. Чтобы проверить эффективность такой аппроксимации различий, исходно данных в сити-блок метрике, евклидовым различием, следует рассчитать различие векторов \vec{F} и \vec{G}_i , используя евклидову метрику.

Перцептивное различие между стимулом для четырехмерной сферической модели равно абсолютной величине разности векторов возбуждения, представляющих эти стимулы:

$$\text{Dif}_{Euclidean} = [(f_1 - g_1)^2 + (f_2 - g_2)^2 + (f_3 - g_3)^2 + (f_4 - g_4)^2]^{\frac{1}{2}},$$

где f_1, f_2, f_3, f_4 – компоненты вектора возбуждения \vec{F} , а g_1, g_2, g_3, g_4 – компоненты вектора \vec{G}_i .

11.3. Репрезентация стимулов на гиперсфере

А) Детекторы как избирательный фильтр.

Реакция детектора равна скалярному произведению $(\vec{F}, \vec{W}) = |\vec{F}| \cdot |\vec{W}| \cdot \cos A$, где $\vec{F} = (f_1, f_2, f_3, f_4)$ представляет собой вектор возбуждения на входе, $\vec{W} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ – вектор синаптических весов, (\vec{F}, \vec{W}) – скалярное произведение векторов \vec{F} и \vec{W} :

$$(\vec{F}, \vec{W}) = f_1 w_1 + f_2 w_2 + f_3 w_3 + f_4 w_4,$$

$|\vec{F}| = (f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + f_4^2)^{\frac{1}{2}}$ – длина вектора \vec{F} ; $|\vec{W}| = (w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2)^{\frac{1}{2}}$ – длина вектора синаптических весов, A – угол между векторами. Поскольку вектора \vec{F} и \vec{W} по длине равны, то их скалярное произведение определяется углом между ними.

Б) Популяционный вектор возбуждения детекторов.

Когда набор детекторов, каждый из которых характеризуется своим вектором синаптических связей, подвергается действию определенного вектора возбуждения \vec{F} , то ответы отдельных детекторов будут зависеть от ориентации их векторов синаптических связей \vec{W} по отношению к вектору возбуждения \vec{F} . Такое параллельное действие вектора возбуждения на популяцию детекторов создает на детекторах «популяционный» вектор возбуждения детекторов \vec{D} с компонентами, равными скалярным произведениям вектора возбуждения \vec{F} и соответствующих синаптических весов \vec{W}_i , где \vec{W}_i – вектор синаптических связей i -го детектора.

Популяционный вектор возбуждения детекторов \vec{D} можно представить на плоскости в виде диаграммы направленности. Соответствующие реакции детекторов, равные скалярным произведениям векторов синаптических связей на вектор возбуждения, откладываются вдоль направлений, соответствующих углам ориентации векторов синаптических связей.

Компоненты популяционного вектора возбуждения детекторов равны скалярным произведениям вектора возбуждения \vec{F} на веса синаптических связей детекторов \vec{W}_i :

$$d_i = |\vec{F}| \cdot |\vec{W}_i| \cdot \cos A,$$

где d_i – возбуждение детектора с индексом i , A – угол между вектором \vec{F} и вектором \vec{W}_i .

Различие между стимулами S_i и S_j можно измерять разностью их популяционных векторов возбуждения детекторов:

$$\text{Dif}_{ij} = [(d_{1i} - d_{1j})^2 + \dots + (d_{ki} - d_{kj})^2 + \dots + (d_{ni} - d_{nj})^2]^{\frac{1}{2}}.$$

11.4. Положительное научение

А) Подстройка веса синапса под его пресинаптическое возбуждение.

Постсинаптический участок синапса представлен молекулами рецепторного белка, которые могут быть в двух состояниях: активном и пассивном («спящем»). Общее число молекул равно сумме активных и спящих. В относительных единицах $L = S + A = 1$ ($S = 1 - A$), где S – плотность спящих молекул, A – плотность активных молекул, L – общая плотность молекул.

Возрастание числа активных молекул за счет фосфорилирования спящих равно

$$\text{Inc} = (1 - A) \cdot f \cdot k,$$

где $(1 - A)$ – плотность спящих молекул, f – плотность потока медиатора, k – эффективность фосфорилирования, Inc – прирост числа активных молекул.

Уменьшение плотности активных молекул определяется дефосфорилированием активных молекул, не вступивших во взаимодействие с медиатором:

$$\text{Dec} = (A - A \cdot f) \cdot k,$$

где A – общее число активных молекул; $A \cdot f$ – активные молекулы, подвергнутые действию медиатора; $A - A \cdot f$ – активные молекулы, не подвергнутые воздействию медиатора; k – коэффициент эффективности дефосфорилирования; Dec – уменьшение числа активных молекул.

Баланс достигается, когда $\text{Inc} = \text{Dec}$:

$$k \cdot f \cdot (1 - A) = k \cdot (A - A \cdot f) \text{ или } f - A \cdot f = A - A \cdot f \text{ или } A = f.$$

Это означает, что баланс устанавливается, когда плотность потока медиатора в синапсе равна плотности активных молекул. Поскольку синаптический вес определяется плотностью активных молекул, то модификация синаптического веса прекратится, когда вес синапса станет равен пресинаптическому воздействию.

Б) Процесс положительного научения.

Исходя из изменений соотношения активных и спящих молекул рецепторного белка на постсинаптической мембране командного нейрона, процесс научения в отдельном синапсе можно представить дифференциальным уравнением

$$\frac{dw_i}{dI} = -k(w_i - f_i),$$

откуда $w_i - f_i = e^C \cdot \exp(-kI)$. Если $I = 0$ и $w = 0$, то $e^C = -f_i$, $w_i = f_i \cdot (1 - \exp(-kI))$.

В процессе научения (когда $I \rightarrow \infty$) $w_i \rightarrow f_i$. Это справедливо для всех синапсов, так что вектор синаптических связей \vec{W} приближается к вектору возбуждения \vec{F} : ($\vec{W} \rightarrow \vec{F}$). В этом случае скалярное произведение этих векторов достигает максимума и командный нейрон дает максимальный ответ. Вероятности поведенческих реакций определяются флуктуациями порога генерации спайков. При

снижении порога генерации спайков часть ВПСП низкой амплитуды смогут вызвать реакцию. В общем виде вероятность реакций определяется амплитудой ВПСП.

Процесс научения можно представить в векторной форме:

$$\frac{d\vec{W}}{dI} = -k(\vec{W} - \vec{F}),$$

откуда $\vec{W} - \vec{F} = e^{\vec{C}} \cdot \exp(-k \cdot I)$. Если $I = 0$ и $\vec{W} = 0$, то $e^{\vec{C}} = -\vec{F}$, $\vec{W} = \vec{F} \cdot (1 - \exp(-k \cdot I))$.

В процессе научения, когда $I \rightarrow \infty$, $\vec{W} \rightarrow \vec{F}$ и командный нейрон «настраивается» на условный раздражитель, представленный вектором \vec{F} , процесс научения можно представить векторной диаграммой. Траектория процесса научения стартует из определенной точки векторного пространства, заданной координатами исходного вектора синаптических связей \vec{W} (его синаптическими весами), и направляется к точке, представленной в векторном пространстве вектором возбуждения.

В случае двумерного векторного пространства траекторию научения можно представить на плоскости.

11.5. Негативное научение

Процесс синаптической депрессии в случае отсутствия подкрепления определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{dw_i}{dI} = -k(w_i \cdot f_i),$$

откуда $w_i = e^{\vec{C}} \cdot \exp(-k \cdot f_i \cdot I)$. При $I = 0$ $e^{\vec{C}} = w_0$, $w_i = w_0 \cdot (\exp(-k \cdot f_i \cdot I))$, где w_0 — исходный вес синапса, f_i — пресинаптическое возбуждение, w_i — текущее значение веса синапса.

Уравнение показывает, что в случае отсутствия пресинаптического воздействия ($f_i = 0$) синаптический вес w_i остается неизменным ($w_i = w_0$). Чем сильнее пресинаптическое возбуждение, тем больше редукция синаптического веса. Тот же подход можно распространить на все синапсы.

Активные молекулы дефосфорилируются фосфатазой и становятся спящими. Этому процессу не противостоит переход спящих молекул в активное в связи с тем, что отсутствует подкрепление. Негативное научение можно представить в векторной форме:

$$\frac{d\vec{W}}{dI} = -k(\vec{W} \cdot \vec{F}),$$

откуда $\vec{W} = e^{\vec{C}} \cdot \exp(-k \cdot \vec{F} \cdot I)$. При $I = 0$ $e^{\vec{C}} = \vec{w}_0$, $\vec{W} = \vec{w}_0 \cdot \exp(-k \cdot \vec{F} \cdot I)$.

Процесс негативного научения можно представить в векторном пространстве. Траектория научения стартует из точки векторного пространства, заданной исходными весами синаптических связей, и направляется к нулевой точке. Форма траектории зависит от вектора возбуждения \vec{F} . Если вектор \vec{W} параллелен вектору \vec{F} , то траектория представлена прямой. Если вектор \vec{W} не параллелен вектору \vec{F} , то траектория ортогональна вектору \vec{F} .

11.6. Сдвиг кривой научения

В случае, когда вес синапса исходно не равен нулю, то это предполагает положительное научение в прошлом. Кривая научения сдвигается по оси абсцисс, представляющей обучающие пробы.

Для отдельного синапса:

$$w_i = f_i \cdot (1 - \exp(-k \cdot (I + B))),$$

где B — число обучающих серий в прошлом.

При $I = 0$ имеем $B = -\ln(1 - w_i/f_i)/k$.

Вычисленное значение B подставляется в уравнение синаптического научения. Аналогичные расчеты могут быть получены для других синапсов, а также всей кривой научения, определяемой скалярным произведением, равным $S_p = (\vec{W}, \vec{F})$, где вектор синаптических связей изменяется в ходе научения.

В случае, если $f_i < w_i$, $B = -\ln(1 - f_i/w_i)/k$. Если положительное научение развивается с задержкой, то $B = \ln(1 - f_i/w_i)/k$.

Негативное научение может начинаться тогда, когда синаптические веса уже были изменены предварительным опытом. В этом случае нужно найти то число проб, которое было в предшествующем негативном научении. В этом случае $w_0 = 1$ и уравнение принимает вид

$$w_i = \exp(-k \cdot f_i \cdot (I + B)),$$

где B – число проб в прошлом.

$$\ln w_i = -k \cdot f_i \cdot (I + B), \text{ при } I = 0 \quad B = (-\ln w_i)/(k \cdot f_i).$$

Если негативное научение развивается с задержкой (эффект инерции научения), то $B = (\ln w_i)/(k \cdot f_i)$.

11.7. Проектор внимания

Нейроны, кодирующие новизну стимула, обладают исходно высокими синаптическими весами. При повторении стандартного стимула в результате развития депрессии синаптические веса убывают согласно выражению: $W_i = W_0 \cdot \exp(-k \cdot f_i \cdot I)$, где W_i – текущее значение синаптического веса, W_0 – исходное значение синаптического веса, f_i – пресинаптическое воздействие, I – число нанесений стандартного стимула.

В ходе многократных применений стандартного стимула S_{st} , который кодируется вектором \vec{F}_{st} , синаптические веса снижаются в зависимости от пресинаптических воздействий и вектор синаптических связей \vec{W}_{st} , модифицированных стандартным стимулом, уменьшается, становясь одновременно ортогональным вектору возбуждения \vec{F}_{st} стандартного стимула. При нанесении нового тестирующего стимула S_{test} , вектор возбуждения которого \vec{F}_{test} не совпадает с вектором возбуждения \vec{F}_{st} стандартного стимула, возникает реакция, равная скалярному произведению нового вектора возбуждения \vec{F}_{test} и сформированного стандартным стимулом вектора связей \vec{W}_{st} :

$$SP = (\vec{F}_{test}, \vec{W}_{st}),$$

где SP – скалярное произведение в случае действия тест-стимула после выработки привыкания к стандартному раздражителю.

11.8. Перцептивный контраст

Контраст заключается в усилении действия одних стимулов под влиянием предшествующего действия других (последовательный контраст) или под влиянием других стимулов, образующих окружение. Контраст включает два основных этапа: 1) вычисление различий между компонентами векторов, представляющих контрастирующие стимулы, и 2) алгебраическое суммирование полученных разностей с исходными векторами возбуждения. Пусть стимул ST представляет тестовое поле, и его вектор возбуждения равен \vec{F} . Под влиянием индуцирующего поля SI с вектором возбуждения \vec{G} , вектор возбуждения тестового стимула меняется, увеличиваясь пропорционально разности векторов \vec{F} и \vec{G} :

$$\vec{F}^* = \vec{F} + k \cdot (\vec{F} - \vec{G}),$$

где \vec{F} – вектор возбуждения теста, \vec{G} – вектор возбуждения индуцирующего поля, k – коэффициент контраста.

Новый вектор возбуждения теста \vec{F}^* с учетом коэффициента k будет изменен тем больше, чем больше вектор \vec{G} отличается от вектора \vec{F} .

Сферическая модель предполагает, что вектор \vec{F}^* , оставаясь постоянным по длине, отклоняется от исходного положения вектора \vec{F} в сторону, противоположную положению вектора \vec{G} .

Таким образом, индуцирующее поле перемещает вектор возбуждения тестового поля \vec{F} в направлении, противоположном вектору \vec{G} .

11.9. Поведенческий контраст

Перцептивное различие, равное абсолютной величине разности векторов возбуждения, не зависит от процедуры обучения. Поведенческое различие между стимулами определяется тем, какой вклад они вносят в условный рефлекс. Реакция на условный стимул равна скалярному произведению его вектора возбуждения на вектор связей, выработанный под влиянием этого вектора возбуждения:

$$Sp_i = (\vec{F}_i, \vec{W}_i),$$

где Sp_i – скалярное произведение, \vec{F}_i – вектор возбуждения условного стимула, \vec{W}_i – вектор синаптических связей, создаваемый вектором возбуждения условного стимула;

$$Sp_j = (\vec{G}_j, \vec{W}_i),$$

где Sp_j – скалярное произведение, \vec{G}_j – вектор возбуждения дифференцированного стимула.

Различие между стимулами измеряется разностью реакций, ими вызываемых:

$$D_{ij} = |Sp_i - Sp_j| = |(\vec{W}_i \vec{F}_i) - (\vec{W}_i \vec{G}_j)| = |\vec{W}_i (\vec{F}_i - \vec{G}_j)|,$$

где D_{ij} – различие между стимулами, f_1, f_2, f_3, f_4 – компоненты вектора \vec{F} , g_1, g_2, g_3, g_4 – компоненты вектора \vec{G} .

Таким образом, поведенческое различие между стимулами равно абсолютному значению их векторной разности, взвешенной по вектору синаптических связей. В процессе ассоциативного научения $\vec{W}_i = \vec{F}_i \cdot (1 - \exp(-k \cdot I))$. При этом поведенческое различие между условным и дифференцированным стимулами вырастает.

Аналогичное явление имеет место при негативном научении, которое характеризуется уменьшением компонент вектора связей при повторении раздражителя: $\vec{W} = \exp(-k \cdot \vec{F} \cdot I)$. Исходно $\vec{W} = \text{const}$.

Различие между стимулами равно

$$D_{ij} = |Sp_i - Sp_j| = |(\vec{W}_i \vec{F}_i) - (\vec{W}_i \vec{G}_j)|.$$

С развитием негативного научения $\vec{W}_i \perp \vec{F}_i$, и поведенческое различие между стимулами возрастает.

11.10. От рецепторов к сфере

Абстрактный рецептор можно представить Гауссианой:

$$G = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)S}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_0}{S}\right)^2\right),$$

где x – параметр, представляющий стимул вдоль профиля реактивности рецептора; x_0 – точка максимальной реактивности рецептора; S – дисперсия, характеризующая распределение реактивности рецептора вдоль оси x .

Ответ рецептора характеризуется постепенным ослаблением реакции при усилении стимула. Это следует из дифференциального уравнения адаптации рецептора:

$$\frac{dG}{dI} = -k \cdot (G - F),$$

где G – ответ рецептора, F – общее число рецепторных молекул, k – коэффициент адаптации, I – интенсивность стимула.

Решение этого уравнения $G = f \cdot (1 - \exp(-k \cdot I))$ определяет кривую адаптации, которая достигает плато ($G = F$) при $I \rightarrow \infty$.

Переход от одного рецептора к двухкомпонентному вектору возбуждения достигается введением дополнительного фоновой активной нейрона, из реакции которого вычитается возбуждение рецептора. Другой нейрон воспроизводит характеристику рецептора. Если реакция рецептора равна G , то ответ одного нейрона равен G , а другого – $(1 - G)$. Такой вектор возбуждения нормирован в сити-блок метрике: $G + (1 - G) = 1$. Переход к евклидовой метрике достигается при участии нейрональной адаптации:

$$G^* = G \cdot \exp(-k \cdot G),$$

$$(1 - G)^* = (1 - G) \cdot \exp(-k \cdot (1 - G)),$$

где k – коэффициент нейрональной адаптации.

При соответствующем выборе коэффициента нейрональной адаптации k значения G^* и $(1 - G)^*$ приближаются к евклидовой метрике:

$$(G^*)^2 + ((1 - G)^*)^2 = R^2,$$

где R – радиус окружности.

При наличии трех типов рецепторов аналогичным образом можно сформировать четырёхкомпонентный вектор фиксированной дли-

ны. На первом этапе формируются три канала с характеристиками:

$$\begin{aligned} H_1 &= C_{11}G_1 - C_{12}G_2 + C_{13}G_3, \\ H_2 &= C_{21}G_1 + C_{22}G_2 - C_{23}G_3, \\ H_3 &= C_{31}G_1 + C_{32}G_2 + C_{33}G_3, \end{aligned}$$

где H_1, H_2, H_3 – нейроны, образующие ортогональный базис, C_{ij} – коэффициенты связи рецепторов с нейронами, знак и величина которых определяется ортогональностью H_1, H_2, H_3 :

$$(H_1, H_2) = 0, (H_2, H_3) = 0, (H_1, H_3) = 0.$$

На этом уровне стимул кодируется трехкомпонентным вектором, длина которого зависит от интенсивности стимула. На следующем этапе к трем нейронам добавляется четвертый, фоновый-активный нейрон, так что сумма возбуждений всех четырех нейронов равна единице (в сити-блок метрике):

$$\begin{aligned} X_1 &= H_1, \\ X_2 &= H_2, \\ X_3 &= H_3 - |X_1| - |X_2|, \\ X_4 &= 1 - |X_3| - |X_1| - |X_2|. \end{aligned}$$

Переход к евклидовой метрике, где $X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 = R^2$, достигается за счет нейрональной адаптации, в результате чего возникает гиперсфера в четырехмерном евклидовом пространстве.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Грант №99-06-80061.

Список литературы

- [1] Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. Искусственные органы чувств. М.: Наука, 1979.
- [2] Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. Нейроинтеллект. М.: Наука, 1989.

Об интеллектуализации интерфейса обучающих программ

А.С. Строгалов, Е.В. Тимофеев

В статье обсуждаются возможности повышения качества работы компьютерных обучающих программ. Рассматривается проблема учета времени в таких системах, а также вопросы интеграции мимической системы в обучающие программы как элемента интеллектуального интерфейса.

1. Компьютерные технологии в обучении

Автоматизация процесса обучения с использованием компьютеров прошла в своем развитии несколько этапов, каждый из которых был связан как с очередным периодом развития элементной базы компьютеров (особенно с удешевлением элементов различных видов памяти и повышением скорости работы), так и со следующим за этим процессом расширением возможностей программирования на компьютерах очередного поколения. С широким внедрением в жизнь современного общества мощных и сравнительно недорогих персональных компьютеров автоматизация процесса обучения обрела принципиально новые возможности для создания и распространения обучающих систем. Одна из распространенных моделей автоматизации процесса обучения (в период до создания мощных персональных компьютеров) состояла в организации процесса обмена информацией (как правило текстовой) между обучаемым и информационной системой: со стороны последней следовали порции учебной информации, формулировки, задачи и вопросы (выбираемые в определенном порядке или случайным образом из заданного автором