



OSTIS-2013

(Open Semantic Technologies for Intelligent Systems)

УДК 519.711.74

ПОСТРОЕНИЕ АССОЦИАТИВНОЙ МОДЕЛИ ПАМЯТИ. КОГНИТИВНЫЙ ПОДХОД

Жилякова Л.Ю.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, Россия*

zhilyakova.ludmila@gmail.com

В работе излагаются принципы построения модели ассоциативной памяти, основанной на динамической ресурсной сети. Вершины сети соответствуют понятиям предметной области, ребра – ассоциативным связям между ними. Топология сети динамически изменяется в процессе ее наполнения. Задан алгоритм структурирования сети и изменения ее топологии, с помощью которого сущности, соответствующие базовым когнитивным категориям, в процессе самоорганизации становятся центрами соответствующих образов.

Ключевые слова: ассоциативная память, ресурсная сеть, категоризация, когнитивная категоризация.

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена описанию структуры модели ассоциативной памяти и принципов ее построения. Основной особенностью модели является непрерывное изменение топологии, которое состоит в создании новых связей и изменении весов ребер, что влечет за собой усиление одних ассоциаций и ослабление других. Эти изменения происходят как в процессе функционирования сети, так и в процессе ее построения.

Математический аппарат, используемый при моделировании, – динамическая потоковая модель, функционирующая в дискретном времени, названная ресурсной сетью [Кузнецов, 2009]. Вершины сети могут содержать произвольное количество ресурса; веса ребер соответствуют их пропускным способностям. Модель нелинейна: в каждый момент времени вершина отдает ресурс во все смежные с ней вершины в соответствии с одним из двух правил, в зависимости от количества ресурса, которым она обладает.

Существующие графовые модели со сходными принципами функционирования можно условно разделить на два больших класса. Первый из них – модели рассеяния на графах, описываемые конечными однородными цепями Маркова [Blanchard et al., 2011], [Lovasz et al., 1995]. Второй – пороговые целочисленные модели, такие, например, как chip-firing games [Bjorner et al., 1991, 1992]. Ресурсная сеть обладает пороговым значением ресурса, зависящим только от пропускных способностей всех ребер: при

суммарном ресурсе, меньшем порогового значения, она ведет себя как марковская модель, при ресурсе, превосходящем пороговое значение, в сети появляются вершины, функционирующие по правилам, задающимся в целочисленных пороговых моделях. Эта особенность, с одной стороны, влечет за собой большое разнообразие переходных процессов, с другой же, – бесконечная делимость ресурса обеспечивает сходимость в тех случаях, когда целочисленные модели не сходятся.

В данной работе при построении ассоциативной модели используются принципы когнитивной категоризации, придающие модели дополнительное сходство с человеческой памятью. Эти особенности могут в дальнейшем стать основой для построения «быстрых рассуждений», присущих человеческому мышлению.

1. НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Понятие ассоциативности применяется в равной степени к человеческой и к компьютерной памяти. Ассоциативность человеческой памяти означает, что мысль о некотором предмете способна породить последовательность образов, связанных с начальным предметом не только семантически, но некоторыми ассоциациями. О том, что память человека ассоциативна, писал еще Аристотель. Его интерпретация перехода по ассоциативным связям такова: поиск воспоминания возможен только по некоторой цепочке, начало которой доступно нам в настоящий момент времени, а в конце ее находится

нужное воспоминание [Аристотель]. Эти же идеи высказываются и современными авторами: «Вспоминать – значит иметь воспоминание или приступать к поиску воспоминания» [Рикёр, 2004]. Таким образом, чтобы вспомнить нечто, необходимо иметь либо непосредственный доступ к нужной информации, либо доступ к месту в памяти, из которого эта информация достижима.

Понятие компьютерной ассоциативной памяти связано с рядом серьезных упрощений. Память в компьютере является локально адресуемой, поэтому моделирование ассоциативной памяти связано, в первую очередь, с преодолением необходимости обращения к данным по их физическому адресу. Чаще всего под компьютерной ассоциативной памятью в широком смысле понимается память, в которой поиск информации производится по ее содержанию.

Математические модели долговременной памяти имитируют некоторые процессы, происходящие в естественной памяти. В модели долговременной памяти (модель памяти со случайной выборкой) предложенной В.Л. Стефанюком [Стефанюк, 2004], [Стефанюк, 2011], повышение скорости поиска по образцу происходит за счет дублирования информации и оптимизации количества копий, созданных для каждой сущности. Тем самым, повышается вероятность извлечь из памяти сущности, поиск которых происходит чаще.

Идея дублирования информации в ином контексте была предложена автором в работе [Жилиякова, 2008]. В этой модели использовался теоретико-множественный подход. Ассоциативные связи между сущностями определяются через наличие у них общих свойств. Число копий новой сущности, добавляемой в память, равно числу свойств, которыми она обладает. Каждому свойству соответствует множество копий сущностей, обладающих этим свойством. Например, чтобы выделить все зеленые или круглые предметы, достаточно найти множество с соответствующим именем. Предметы, обладающие некоторым набором свойств, ищутся как пересечения соответствующих множеств. Поскольку копируются не сами сущности, а ссылки на них, увеличение объема памяти незначительно.

В настоящей работе предложена сетевая модель, позволяющая структурировать память таким образом, что поиск информации можно осуществлять, следуя по ассоциативным цепочкам, создающимся и изменяющимся автоматически на уровне топологии сети – в процессе поступления и обработки запросов. Причем, часто используемая информация оказывается более доступной, и сила ассоциативных связей тем больше, чем чаще сущности упоминаются вместе. Такое хранение и поиск информации в памяти отчасти имитирует клеточные ансамбли Хебба [Hebb, 1959].

Ассоциативная связь между сущностями в этой модели тем сильнее, чем чаще они попадают вместе

во входное или выходное множество вершин запроса. Под «выполнением запроса» здесь понимается процесс, который описан у Аристотеля и Рикёра – движение по цепочкам ассоциаций от некоторого начального набора сущностей к сущностям, ассоциированным с ними. Он осуществляется с помощью перераспределения ресурса, соответствующего «яркости образа» в памяти. После выполнения каждого запроса происходит изменение топологии сети – образуются новые ребра между вершинами, принадлежащими одному входному или выходному множеству (если таковых не было); каждое ребро, по которому проходил ресурс, увеличивает свою пропускную способность.

Добавление новой информации в модель предполагает, что каждая новая сущность будет связана хотя бы с одной уже имеющейся в модели. При этом у вершины, уже существующей в сети, увеличивается пропускная способность петли, отвечающая за автоассоциацию [Кохонен, 1980].

2. АССОЦИАТИВНАЯ РЕСУРСНАЯ СЕТЬ

В работе [Жилиякова, 2009] описана модель памяти, названная *ассоциативной ресурсной сетью*. В ее основе лежит неоднородная ресурсная сеть.

Ресурсная сеть – динамическая потоковая модель, предложенная в [Кузнецов, 2009]. Она представляет собой ориентированный граф с множеством вершин $V = \{v_i\}$, $|V| = n$. Каждая вершина v_i в момент t содержит ресурс $q_i(t) \geq 0$. Емкости вершин не ограничены. Вершины в каждый такт дискретного времени t обмениваются ресурсами, следуя заданным правилам. В сети выполняется закон сохранения: при ее функционировании ресурс не поступает извне и не расходуется. Ребра (v_i, v_j) имеют ограниченные пропускные способности r_{ij} . Вершины могут иметь петли (v_i, v_i) с пропускной способностью, равной r_{ii} . Ресурс, попавший в петлю на такте t , вернется в вершину на следующем такте.

Ресурсная сеть является пороговой моделью: в каждый момент каждая вершина отдает ресурс во все исходящие ребра по одному из двух правил: если величина ресурса в ней больше суммарной выходной пропускной способности r_i^{out} , она отдает по полной пропускной способности в каждое ребро, оставляя себе излишки; если ресурс в вершине меньше r_i^{out} , он распределяется пропорционально пропускным способностям во все исходящие ребра. Формально правила описаны в ряде работ, например, [Кузнецов и др., 2010].

Ассоциативная ресурсная сеть отличается от обычной ресурсной сети, в первую очередь, тем, что имеет переменную топологию. Вершины в ней соответствуют сущностям предметной области, ребра – ассоциативным связям между ними.

Количество ресурса в вершине в данной модели

соответствует яркости вершины при поиске. Ребра обозначают ассоциативные связи. Чем больше пропускная способность ребра между двумя вершинами, тем больше сила ассоциации между соответствующими сущностями. Пропускная способность петли соответствует силе автоассоциации. Отношение ассоциации всегда обоюдно, и поэтому каждая пара смежных вершин связана двумя противоположно ориентированными ребрами.

В ассоциативной сети существует быстрое и медленное время. Одному такту медленного времени соответствует исполнение одного запроса. Каждый запрос выполняется в быстром времени, которое соответствует времени *ресурсной сети*.

Запрос – это помещение ресурса в одну или несколько вершин сети. Ответ на запрос – распределение ресурса после его стабилизации. После выполнения запроса пропускные способности всех ребер, по которым тек ресурс, увеличиваются пропорционально суммарному пропущенному ресурсу. Если в начальном множестве запроса существуют несвязанные вершины, в сети создаются новые двусторонние пары, задающие новую ассоциацию.

Для того чтобы ресурс не растекался из начального множества вершин одинаково по всем направлениям, используются рекурсивные запросы.

Под рекурсивным запросом будем понимать многократный запрос в один такт медленного времени, входное множество вершин которого изменяется в зависимости от выходного множества на предыдущем шаге по одному из наперед заданных правил.

Для предотвращения неограниченного роста суммарной пропускной способности сети, вводится процедура нормировки. Указывается диапазон, в котором может варьироваться суммарная пропускная способность; когда достигается верхняя граница, вся сеть нормируется к нижней границе диапазона. Эта процедура реализует естественное забывание: петли редко используемых в запросах вершин и редко проявляемые ассоциации «истончаются». Если вычислительные ресурсы позволяют, перенормировку сети желательно делать после каждого нового запроса.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ КОГНИТИВНОЙ КАТЕГОРИЗАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ АССОЦИАТИВНОЙ СЕТИ

Для того чтобы все ребра сети имели веса, адекватно описывающие силы ассоциативных связей, необходимо изменять пропускные способности не только на этапе обращения к сети с запросами, но и на этапе построения сети, т.е. на этапе *создания* памяти. Здесь большую роль играет последовательность наполнения сети. Наибольшую яркость при поиске всегда должны иметь сущности, принадлежащие *базовому уровню категоризации*, –

они являются центрами соответствующих им образов [Голицын, 1997]. Поэтому именно эти сущности должны быть помещены в сеть первыми.

В когнитивной категоризации центральным является понятие базового уровня. Для членов категорий базового уровня характерно следующее [Lakoff, 1987] [Кузнецов, 2012]):

- они имеют единый, целостно воспринимаемый ментальный образ (гештальт);
- они быстро узнаются;
- в качестве их имен используются наиболее короткие и общеупотребительные слова, первичные с точки зрения вхождения в словарный запас языка;
- большинство признаков членов категории хранится на этом уровне;
- формирование категорий у детей начинается с категорий базового уровня.

«Базовое» не значит «элементарное», поскольку концепты базового уровня не являются атомарными блоками, лишенными внутренней структуры. Базовые категории с когнитивной точки зрения находятся «в середине» иерархии общего-конкретного. Обобщение происходит вверх от базового уровня, специализация – вниз. Например: *собака* – базовая категория, *хищник* – обобщение, *овчарка* – специализация.

Из сказанного следует, что при любом запросе к ассоциативной памяти в выходное множество уже при малом числе шагов быстрого времени должны попасть соответствующие вершины базового уровня, определяющие гештальты. К ним должны вести ребра с наибольшей пропускной способностью. Поэтому наполнение сети информацией должно происходить по правилам, учитывающим эти свойства. Для реализации наполнения сети, начиная с категорий базового уровня, не нужны специальные дополнительные построения. При заданном алгоритме наполнения сети это происходит автоматически. Алгоритм занесения новой вершины:

1. Если новая сущность принадлежит базовой категории, создается соответствующая ей вершина и ребра, связывающие ее с другими вершинами (в зависимости от контекста). Выход.
2. Если новая сущность принадлежит конкретизации/обобщению базовой категории, то
 - а. если вершина, соответствующая базовой категории, уже есть в сети, с ней создается связь, независимо от остальных связей новой вершины; пропускная способность ее петли увеличивается,
 - б. если вершины, соответствующей базовой категории нет, сначала создается эта вершина, и затем вершина, соответствующая вносимой сущности.

Сеть, построенная по такому алгоритму, и изменяющая топологию после каждого запроса, будет иметь вершины базового уровня в качестве самых доступных при поиске. Таким образом, описанные алгоритмы в некотором смысле можно рассматривать как алгоритмы создания гештальтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны основные правила построения ассоциативной ресурсной сети, правила изменения ее топологии, основные виды рекурсивных запросов и алгоритмы их реализации. Основное внимание уделено формированию базовых категорий, каждая из которых является центром соответствующего образа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-01-00771).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [Аристотель] Аристотель. О памяти и припоминании. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ec-dejavu.net/m/Memory_Greek.html#aristotle
- [Голицын, 1997] Голицын Г.А. Образ как концентратор информации. // Математика и искусство. Труды международной конференции. Москва, 1997, с.96-99.
- [Жилякова, 2008] Жилякова Л.Ю. Структурирование знаний в ассоциативной модели // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ' 2008. Труды конференции, том 1, М., URSS, 2008. с. 104-111.
- [Жилякова, 2009] Жилякова Л.Ю. Поиск в ассоциативной модели памяти. // IX международная конференция имени Т.А. Таран ИАИ-2009. Киев, «Просвіта», 2009. с. 124-130.
- [Кохонен, 1980] Кохонен Т. Ассоциативная память. – М.: Мир, 1980.
- [Кузнецов, 2009] Кузнецов О.П. Однородные ресурсные сети. I. Полные графы. // Автоматика и телемеханика, 2009, № 11, с.136-147.
- [Кузнецов и др., 2010] Кузнецов О.П., Жилякова Л.Ю. Двусторонние ресурсные сети – новая потоковая модель // Доклады АН, 2010, том 433, №5, с.609-612.
- [Кузнецов, 2012] Кузнецов О.П. Когнитивная семантика и искусственный интеллект // Искусственный интеллект и принятие решений, 2012, №4, с.32-42.
- [Рикёр, 2004] Рикёр П. Память, история, забвение. М., 2004.
- [Стефанюк, 2004] Стефанюк В.Л. Локальная организация интеллектуальных систем: модели и приложения. – М. Физматлит, 2004.
- [Стефанюк, 2011] Стефанюк В.Л. Феноменологические модели биологической памяти. // Сборник научных трудов VI-й Международной научно-технической конференции Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Т.1. – М. Физматлит, 2011. с. 89-100.
- [Bjorner et al., 1991] A. Bjorner, L. Lovasz and P. Shor, Chip-firing games on graphs, *Europ. J. Comb.* 12 (1991), 283–291.
- [Bjorner et al., 1992] A. Bjorner and L. Lovasz, Chip-firing games on directed graphs, *J. Algebraic Combinatorics* 1 (1992), 305–328.
- [Blanchard et al., 2011] Blanchard, Ph., Volchenkov, D. *Random Walks and Diffusions on Graphs and Databases: An Introduction* (Springer Series in Synergetics). Springer-Verlag – Berlin–Heidelberg, 2011.
- [Hebb, 1959] Hebb D., *Intelligence, brain and the theory of mind* // *Brain*. 1959, v. 82.
- [Lakoff, 1987] Lakoff J. 1987. *Women, Fire, and Dangerous Things: What Categories Reveal About the Mind*. University of Chicago Press. (Русский перевод: Лакофф Д. Женщины, огонь и опасные вещи: Что категории языка говорят нам о мышлении, М. 2004).
- [Lovasz et al., 1995] L. Lovasz and P. Winkler. *Mixing of Random Walks and Other Diffusions on a Graph* // *Surveys in*

Combinatorics, 1995 (ed. P. Rowlinson), London Math. Soc. Lecture Notes Series 218, Cambridge Univ. Press, 119–154.

MODELLING OF THE ASSOCIATIVE MEMORY. COGNITIVE APPROACH

Zhilyakova L. Yu.

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

zhilyakova.ludmila@gmail.com

olkuznes@ipu.rssi.ru

In the paper the principles of the modelling of associative memory based on a dynamic resource network are outlined. The vertices of a network correspond to the concepts (entities) of domain; the edges denote associations between the two entities. The network topology changes dynamically in the process of filling the network and execution of queries. An algorithm for structuring the network and changing its topology is specified. According to it, the entities that meet the basic cognitive categories, become in the process of self-organization the centers of the corresponding images.

INTRODUCTION

This paper describes the structure of an associative memory model and the principles of its construction. The main feature of the model is a continuous change in the topology, such as creation of new connections and changing the weights of edges, resulting in a strengthening of some associations and weakening others. These changes occur both in the operation of the network, and in the process of its construction.

MAIN PART

The associative model is based on the non-homogeneous resource network with a variable topology. The resource network is a dynamical flow model: resource is contained at vertices which exchange it at every step of discrete time. Vertices are able to store unlimited amount of resource.

The *associativity* of a network lies in the property that the most frequently used information is the most accessible when searching from any place of memory. Moreover, the entities of a base cognitive level are always the most accessible by construction.

CONCLUSION

The construction of an associative model uses the principles of cognitive categorization, giving to the model an additional similarity to the human memory. These features could then be the basis for the construction of the "fast reasoning" inherent in human thinking.