Семиотический способ представления знаний: операции в знаковой картине мира

Осипов Г. С., Панов А. И.

ФИЦ ИУ РАН, пр. 60-летия Октября, 9, gos@isa.ru

5 августа 2016 г.

В работе представлен новый способ представления знаний как на уровне сенсорных данных так и на уровне концептуальной информации, - знаковая картина мира. Базовым элементом картины мира является четырехкомпонентная структура - знак, строение которого подтверждается как психологическими теориями, так и нейрофизиологическими данными. В работе представлены принципы работы математической структуры - каузальной матрицы, которая описывает строение компонент знака. Предложены алгоритмы пополнения отношений на множестве знаков, определены операции в знако-

вой картине мира, который моделируют важные психологические особенности поведения человека.

Ключевые слова: знаковая картина мира, образ, значение, личностный смысл, каузальная матрица, семиотическая сеть.

Введение

Про постановку задачи [2; 3].

Психологические и нейрофизиологические основания трехкомпонентной структуры знака (Станович, Гроссберг и др. более новые).

1. Картина мира

Про компоненты знака, функции связывания и три типа картин мира.

Введем два знака, которые мы будем рассматривать на протяжении всей статьи в качестве примеров, иллюстрирующих положения, которые приводятся в настоящей работе (квадрат, выстрел).

2. Строение компонент знака

Далее рассмотрим структуру компонент знака на примере образной компоненты, которая участвует в актуализации знака, выделении представления об опосредуемом объекте или процессе на основе поступающей из внешней среды сенсорной информации и регистрируемой внутренними сенсорами моторной информации. До именования знак будем называть протознаком или признаком.

Предположим, что во входном потоке данных выделена последовательность $(x_1, x_2, \dots, x_h)$ длины h векторов действительных чисел от 0 до 1, которые будем называться *событиями*. Каждое событие x_t длины q представляет собой запись выходов от q сенсоров, а каждый элемент события означает уверенность в срабатывании данного сенсора. Например, событие $(0.1, 0.9, 0.9)$ поступает с трех сенсоров - датчиков красного, синего и зеленого света - и означает, что уверенность в срабатывании датчика красного света составляет 10%, а синего и зеленого - по 90%.

Образная компонента знака должна по входной последовательности данных определить, присутствует ли (закодирован ли) опосредуемый объект или процесс в этой последовательности. Для этого мы будем кодировать характерные признаки объекта или процесса в специальной структуре - каузальной матрице $z = (e_1, e_2, \dots, e_h)$ размерности q на h, где q - размерность входных событий, а h - длина последовательности входных событий. При этом каждый столбец e_t каузальной матрицы является битовым вектором длины q и кодирует те признаки (которым соответствуют 1), которые необходимо должны присутствовать во входном событии в момент времени t, чтобы опосредуемый объект или процесс мог быть распознан во входном потоке данных, т.е. задают множество одновременных характерных признаков. Например, образу знака s, опосредующему объект «квадрат», может соответствовать каузальная матрица

$$z = ((1, 0, 1, 1, 0), (1, 1, 0, 1, 0), (1, 1, 0, 0, 1), (1, 0, 1, 0, 1)),$$

где первая строчка является характеристическим вектором информации с датчика углов

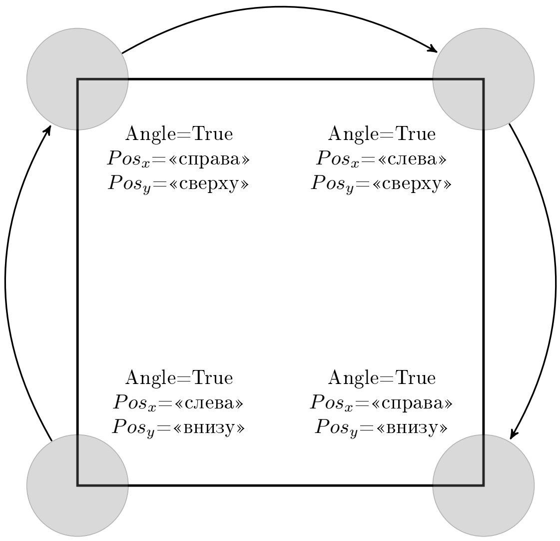

Рис. 1: Визуальная интерпретация каузальной матрицы

на изображении, вторая - с датчика положения визуального сенсора (верхнее положение), третья - нижнее положение сенсора, четвертая - левое положение сенсора, пятая - правое положение (см. рис.2).

Образу каждого знака может соответствовать несколько каузальных матриц, которые задают различные проявления опосредуемого объекта или процесса. Весь кортеж каузальных матриц образа знака s будем обозначать как $Z^p(s)$.

Случай, когда характерными признаками образа данного знака выступают данные с сенсоров, является частным. В более общей постановке, признаками для образа знака служат другие знаки, которые опосредуют эти характерные признаки. Таким образом, мы можем сопоставить образу знака s множество $S_p(s)$ мощности q, каждому элементу которого соответствует номер строчки каузальной матрицы z размера q на h, т.е. каждому признаку $s_i \in S_p(s)$ соответствует характеристический битовый вектор, задающий на

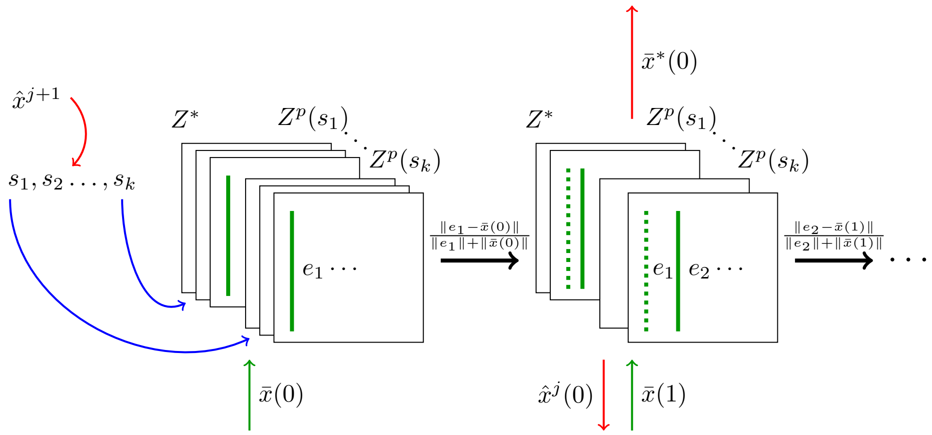

Рис. 2: Схема алгоритма актуализации знака

местах 1 те моменты времени, когда данный признак должен присутствовать во входных данных, чтобы успешно актуализировать знак (распознать образ знака) s.

Для уточнения определения множества $S_p(s)$ введем семейство бинарных отношений $\{\sqsubset_p, \sqsubset_p^1, \sqsubset_p^2, \ldots\}$, определённых на декартовом произведении $S \times S$. Будем считать, что знак s_i *поглощается* знаком s по образу, $(s_i, s) \in \sqsubset_p$ или $s_i \sqsubset_p s$, в том случае, если $s_i \in S_p(s)$. Если известно, что знаку s_i соответствует 1 в t-м столбце некоторой каузальной матрицы $z \in Z^p(s)$ знака s, то мы будем использовать уточненное отношение $\sqsubset_p^t \subset \sqsubset_p$.

2.1. Актуализация образной компоненты знака

Кратко опишем работу алгоритма актуализации знака (распознавания образа знака) по рис. 2. Будем считать, что образы знаков сгруппированы по схожести множеств $S_p(s)$ в узлы, которые организованы в иерархические структуры (подробнее см. [4]).

Вычислительный цикл распознавания в узле уровня j начинается с определения начального состояния узла при помощи предсказывающего воздействия с верхнего уровня иерархии - вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаги 3–14) в момент времени τ_s. Начальное состояние определяется как подмножество таких знаков, образы которых предсказываются на основе состояния узла верхнего уровня. Первая константа c_1 определяет порог предсказываемого веса распознаваемых образов, выше которого соответствующие каузальные матрицы попадают во множество активных матриц Z^* (шаг 4). Далее производится отбор тех каузальных матриц из множества активных, для которых обычное расстояние по норме $\|x\| = \sum_i |x_i|$ первого столбца $\bar{z}_1^r$ от входного вектора $\bar{x}_i^j$ в начальный момент времени не превышает второй константы c_2 (шаг 9). Обновленное множество полученных таким образом активных каузальных матриц является текущим состоянием узла (шаг 11). На основе активных каузальных матриц методом голосования вычисляется выходной вектор узла в начальный момент времени $\bar{x}_i^{j*}(\tau_s)$ (шаги 12 – 13).

Require: $\tau_s, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s), \omega_i^j$.
Ensure: $\varphi_{i\Delta t}^j, \vec{\eta}_{i\Delta t}^j$.
1: $\hat{F}^* = \varnothing, Z^* = \varnothing, t = 0$;
2: $c_1 \in (0,1), c_2 \in (0,1)$;
▷ определение начального состояния
3: **for all** компонент $\hat{x}_{ik}^{j+1}$ вектора $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s) = (\hat{x}_{i1}^{j+1}, \hat{x}_{i2}^{j+1}, \ldots, \hat{x}_{il}^{j+1})$ **do**
4: **if** $\hat{x}_{ik}^{j+1} \geq c_1$ **then**
5: $\hat{F}^* := \hat{F}^* \cup \{\hat{f}_k\}$;
6: $\bar{x}_i^j := \omega_i^j(\tau_s)$;
7: **for all** функций распознавания $\hat{f}_k \in \hat{F}^*$ **do**
8: **for all** $Z_r^k \in Z_k$, соответствующих функции распознавания $\hat{f}_k$, **do**
9: **if** $\frac{\|\bar{z}_1^r - \bar{x}_i^j\|}{\|\bar{z}_1^r\| + \|\bar{x}_i^j\|} < c_2$ **then**
10: $Z^* := Z^* \cup \{Z_r^k\}$;
11: $\varphi_i^j(\bar{x}_i^j, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)) := Z^*$;
12: $\bar{N} := (|\{Z_r^1 | Z_r^1 \in Z^*\}|, \ldots, |\{Z_r^{l_i^j} | Z_r^{l_i^j} \in Z^*\}|)$;
13: $\eta(Z^*) = \bar{x}_i^{*j} := W(\bar{N})$;
14: $\hat{x}_i^j = W(\sum_{\hat{f}_k \in \hat{F}^*} \hat{x}_{ik}^{j+1} \sum_{Z_r^k \in Z^*} \bar{z}_2^r)$;

Вектор ожиданий $\hat{x}_i^j(\tau_s + 1)$ определяется как нормированный вектор, s-ый компонент которого равен сумме всех s-ых элементов вторых колонок активных каузальных матриц с весами, соответствующими элементам вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаг 14). Т.к. используется представление о будущем входном сигнале (вторая колонка матриц предсказания), то $\hat{x}_i^j(\tau_s+1)$ играет роль предсказывающего вектора для нижнего уровня иерархии.

$\triangleright$ основной цикл

15: $t = 1$;
16: **while** $t \leqslant h_i^j - 1$ **do**
17: $\quad \bar{x}_i^j := \omega(\tau_s + t)$;
18: $\quad$ **for all** матриц предсказания Z_r^k из множества Z^* **do**
19: $\quad\quad$ **if** $\frac{\|\bar{z}_{t+1}^r - \bar{x}_i^j\|}{\|\bar{z}_{t+1}^r\| + \|\bar{x}_i^j\|} \geqslant c_2$ **then**
20: $\quad\quad\quad Z^* := Z^* \setminus \{Z_r^k\}$;
21: $\quad \varphi_i^j(\bar{x}_i^j, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)) := Z^*$;
22: $\quad \bar{N} = (|\{Z_r^1 | Z_r^1 \in Z^*\}|, \ldots, |\{Z_r^{l_i^j} | Z_r^{l_i^j} \in Z^*\}|)$;
23: $\quad \eta(Z^*) = \bar{x}_i^{*j} := W(\bar{N})$;
24: $\quad t = t + 1$;
25: $\quad$ **if** $t \leqslant h_i^j - 2$ **then**
26: $\quad\quad \hat{x}_i^j := W(\sum_{\hat{f}_k \in \hat{F}^*} \hat{x}_{ik}^{j+1} \sum_{Z_r^k \in Z^*} \bar{z}_t^r)$;
$\quad$ **return** $\varphi_{i\Delta t}^j, \vec{\eta}_{i\Delta t}^j$.

После определения начального состояния начинает выполняться тело основного цикла, в котором до тех пор, пока время не превысит характерное время узла h_i^j (размер каузальных матриц, входящих в него образов знаков) повторяется вычисление выходного вектора и состояния в следующий момент времени (шаги 16–26). В начале обновляется состояние, т.е. множество активных каузальных матриц Z^*, за счёт удаления тех матриц, соответствующие столбцы которых достаточно сильно отличаются от текущего входного вектора $\bar{x}_i^j$ (шаг 19). Далее методом голосования по количеству матриц в множестве активных каузальных матриц, отвечающих за соответствующий образ, вычисляется выходной вектор $\bar{x}_i^{j*}$ (шаги 22–23).

В завершение тела основного цикла вычисляется выходной вектор ожиданий в следующий момент времени $\hat{x}_i^j(\tau_s + t + 1)$. Вектор ожиданий равен нормированному вектору, элементы которого равны сумме элементов столбцов всех активных кауазальных матриц, соответствующих текущему моменту времени с учётом весов начального вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаг 26).

2.2. Каузальная сеть

Введем специальную процедуру $\Lambda_p : 2^Z \to 2^{\mathbb{N}} \times 2^{\mathbb{N}}$, которая каждому кортежу каузальных матриц $Z^p(s) \subset Z$ образа знака s ставит в соответствие два не пересекающихся подмножества индексов собственных столбцов $I^c \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^c \; i \leq h$ (индексы столбцов условий) и $I^e \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^e \; i \leq h$ (индексы столбцов эффектов): $\Lambda_p(Z^p(s)) = (I^c, I^e), I^c \cap I^e = \varnothing$. Например, если для множества матриц $Z = \{((1,0),(0,1))\}$ процедура Λ_p выдает два множества $\{1\}$ и $\{2\}$, то это означает, что появление признака, соответствующего первой строчке матрицы, вызывает появление признака, соответствующего второй строчке. Процедура Λ_p по сути является функцией установления причинно-следственного отношения на множестве входных событий и может реализовываться различными способами, в т.ч. на основе алгоритмов Норриса, FCO и др. (см. [1])

В том случае, когда для матриц $Z^p(s)$ образа знака s множество столбцов эффектов пусто $I^e = \varnothing$, т.е. когда по данному множеству каузальных матриц не возможно однозначно определить, какие события всегда предшествуют другим, мы будем считать, что причинно-следственная связь не установлена и знак опосредует некоторый объект или ситуацию. В противном случае будем считать, что знак опосредует некоторое действие или процесс, результат которого кодируется в столбцах эффектов, а условие - в столбцах условий.

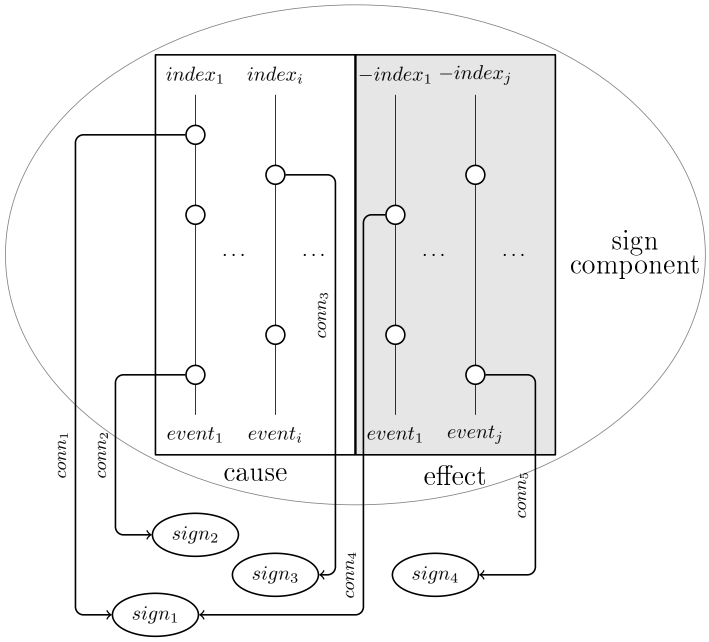

Рис. 3: Схема каузальной матрицы

Справедливы следующие утверждения относительно свойств процедуры Λ_p:

- $I^c \cap I^e = \varnothing$ — столбец матрицы предсказания не может быть одновременно и условием и эффектом,
- $|I^c \cup I^e| = h$ — столбец матрицы предсказания является либо условием либо эффектом,
- $I^c \neq \varnothing$ — среди столбцов матрицы предсказания должен быть хотя бы один стол-

бец условий, в то время как эффектов может и не быть (в случае объектных признаков),

- $\forall i \in I^e, j \in I^c \; i > j$ — все условия предшествуют эффектам по времени.

Схема каузальной матрицы, с учетом выше сказанного, приведена на рис. 3.

Теперь введем понятие каузальной сети, которая будет определять гетерархию на множестве образов. Каузальная сеть $W_p = \langle V_p, E_p \rangle$ - является помеченным ориентированным графом, в котором

- каждому узлу $v \in V_p$ ставится в соответствие кортеж казуальных матриц $Z^p(s)$ образа некоторого знака s, что будем обозначать как $v \to Z^p(s)$;
- ребро $e = (v_1, v_2)$ принадлежит множеству ребер графа E, если $v_1 \to Z^p(s_1), v_2 \to Z^p(s_2)$ и $s_1 \in S_p(s_2)$, т.е. если знак s_1 поглощается знаком s_2;
- каждому ребру графа $e = (v_1, v_2), v_1 \to Z^p(s_1), v_2 \to Z^p(s_2)$ ставится в соответствие метка $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ - кортеж трех натуральных чисел:
  - ϵ_1 - индекс исходной матрицы в кортеже $Z^p(s_1)$, может принимать специальное значение 0, если исходными могут служить любые матрицы из кортежа;
  - ϵ_2 - индекс целевой матрицы в кортеже $Z^p(s_2)$, строка которой ставится в соответствие признаку s_1;
  - ϵ_2 - индекс столбца в целевой матрице, в которой в соответствующей признаку s_1 строке стоит 1, может принимать положительные значения (столбцы условий) и отрицательные (столбцы эффектов).

Пример такой сети изображен на рис. 4.

Аналогичным образом определяются каузальные сети для остальных компонент знака - для значения и личностного смысла. Для каждого знака s задаются множества $S_m(s)$ и $S_a(s)$, т.е. определяются семейства отношений $\{\sqsubset_m, \sqsubset_m^1, \sqsubset_m^2, \dots\}$ и $\{\sqsubset_a, \sqsubset_a^1, \sqsubset_a^2, \dots\}$. Множество $S_m(s)$ интерпретируется как ролевой состав знака s, например, элементы подкласса или роль действия. Множество $S_a(s)$ интерпретируется как мгновенный компонентный состав некоторой ситуации, наблюдаемой и переживаемой субъектом, носителем картины мира, в настоящее время. Аналогично определяются множества $Z^m(s)$, $Z^a(s)$, процедуры Λ_m и Λ_a.

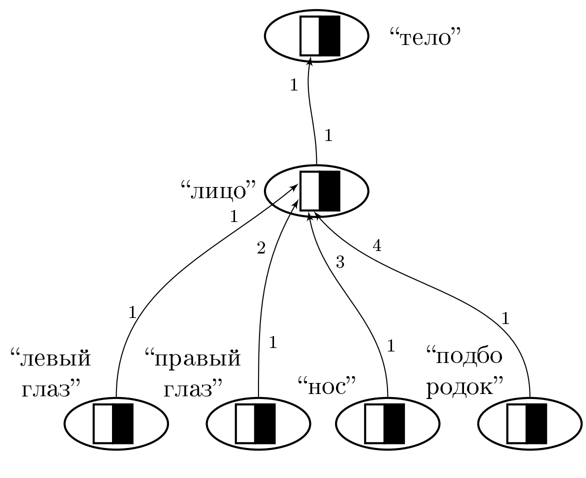

Рис. 4: Схема каузальной сети. Здесь каузальные матрицы изображены в виде квадратов, столбцы условий - левая белая часть квадрата, столбцы эффектов - черная правая часть квадратов. Метка ϵ_1 отображается в начале каждой стрелки, метка ϵ_2 определяется как номер квадрата, к которому идет стрелка, а метка ϵ_3 отображается в конце каждой стрелки.

3. Семиотическая сеть

Далее определим три семейства бинарных отношений на множестве знаков, которые генерируются на основе структуры фрагментов трех типов каузальных сетей, к которым принадлежат соответствующие компоненты знаков.

3.1. Отношения на множестве образов

Начнем с определения отношений на множестве знаков, генерируемых на основе каузальной сети на образах. Для этого потребуется определения равенства, сходства, включения и противопоставления двух каузальных матриц:

***Определение* 1.** *Две каузальных матрицы z_1 и z_2 равны ($z_1 = z_2$) тогда и только тогда, когда размерности матриц равны, множества индексов столбцов эффектов и условий совпадают $\Lambda(z_1) = \Lambda(z_2)$ и каждый битовый вектор e_t^1, столбец матрицы z_1, равен соответствующему по порядку битовому вектору e_t^2, столбцу матрицы z_2.*

***Определение* 2.** *Две каузальных матрицы z_1 и z_2 схожи ($z_1 \sim z_2$) тогда и только тогда, когда существуют такие два битовых вектора e_i и e_j, столбца матриц z_1 и z_2, что они равны $e_i = e_j$ и они одновременно являются либо столбцами условий $i \in I_c(z_1), j \in I_c(z_2)$, либо столбцами эффектов $i \in I_e(z_1), j \in I_e(z_2)$.*

***Определение* 3.** *Каузальная матрица z_1 включена в каузальную матрицу z_2 ($z_1 \subseteq z_2$) тогда и только тогда, когда для любого битового вектора e_i, столбца матрицы z_1, существует битовый вектор e_j, столбец матрицы z_2, такой, что $e_i | e_j = e_j$ ($|$ - операция* *побитового «или») и они одновременно являются либо столбцами условий $i \in I_c(z_1), j \in I_c(z_2)$, либо столбцами эффектов $i \in I_e(z_1), j \in I_e(z_2)$.*

Определение 4. *Две каузальных матрицы z_1 и z_2 противопоставлены друг другу ($z_1 \perp z_2$) тогда и только тогда, когда размерности матриц равны, множества индексов столбцов эффектов и условий совпадают $\Lambda(z_1) = \Lambda(z_2)$ и каждый битовый вектор e_t^1, столбец матрицы z_1, не имеет пересечения с соответствующим ему по порядку битовым вектором e_t^2, столбцом матрицы z_2, т.е. $e_t^1 \& e_t^2 = e_0$, где & - операция побитового «и», а e_0 - нулевой вектор той же длины, что и вектора e_t^1 и e_t^2.*

На основе этих определений введем четыре отношения на множестве знаков S.

Определение 5. *Пара знаков s_1 и s_2 принадлежит **отношению эквивалентности по образам** R_1^p, $(s_1, s_2) \in R_1^p$, если мощность кортежа $S_p(s_1) = (z_1^1, z_2^1, ...)$ равна мощности кортежа $S_p(s_2) = (z_1^2, z_2^2, ...)$ и каждая каузальная матрица первого кортежа равна соответствующей по порядку матрице второго кортежа, т.е. $|S_p(s_1)| = |S_p(s_2)|, \forall z_t^1 \in S_p(s_1)\ \exists z_t^2 \in S_p(s_2) : z_t^1 = z_t^2$.*

Определение 6. *Пара знаков s_1 и s_2 принадлежит **отношению сходства по образу** R_2^p, $(s_1, s_2) \in R_2^p$, если для каждой каузальной матрицы z_i кортежа $S_p(s_1)$ в кортеже $S_p(s_2)$ найдется такая матрица z_j, что z_i будет схожа с z_j, т.е. $\forall z_i \in S_p(s_1)\ \exists z_j \in S_p(s_2) : z_i \sim z_2$.*

Определение 7. *Пара знаков s_1 и s_2 принадлежит **отношению включения по образу** R_3^p, $(s_1, s_2) \in R_3^p$, если для каждой каузальной матрицы z_i кортежа $S_p(s_1)$ в кортеже*

$S_p(s_2)$ *найдется такая матрица* z_j, *что* z_i *будет включена в* z_j, *т.е.* $\forall z_i \in S_p(s_1)\ \exists z_j \in S_p(s_2) : z_i \subseteq z_2$.

Определение 8. *Пара знаков* s_1 *и* s_2 *принадлежит* ***отношению противопоставления по образу*** R_4^p, $(s_1, s_2) \in R_4^p$, *если мощность кортежа* $S_p(s_1) = (z_1^1, z_2^1, ...)$ *равна мощности кортежа* $S_p(s_2) = (z_1^2, z_2^2, ...)$ *и каждая каузальная матрица первого кортежа противопоставлена соответствующей по порядку матрице второго кортежа, т.е.* $|S_p(s_1)| = |S_p(s_2)|, \forall z_t^1 \in S_p(s_1)\ \exists z_t^2 \in S_p(s_2) : z_t^1 \perp z_t^2$.

3.2. Отношения на множестве значений

Ролевые отношения

3.3. Отношения на множестве личностных смыслов

Ситуационное отношения и сценарное отношение.

3.4. Семиотическая сеть

Будем называть *семиотической сетью* пятерку $\Omega = \langle W_p, W_m, W_a, R_n, \Theta \rangle$, где

- W_p, W_m, W_a - соответственно каузальные сети на множестве образов, значений и личностных смыслах,
- R_n - семейство отношений на множестве знаков, сгенерированных на основе трех каузальных сетей, т.е. $R_n = \{R_p, R_m, R_a\}$,
- Θ - семейство операция на множестве знаков, которые будут определены ниже.

4. Операции в семиотической сети

Операции осуществляется в одной сети — как это сказывается на компонентах знака в другой сети, как они преобразуются. Содержательной описание операций. Пример: обобщение на сети образов для знаков «яблоко» и «апельсин» общее значение не включает в себя действие «чистить», т.к. не присутствуют все необходимые признаки в обобщенном образе (нет ссылки на знак «кожура»).

4.1. Операция обобщения

4.2. Операция замыкания по значению

4.3. Операция агглютинации смыслов

Заключение

Список литературы

1. *Kuznetsov S. O.*, *Ob”edkov S. A.* Comparing Performance of Algorithms for Generating Concept Lattices // ICCS’01 International Workshop on Concept Lattices-based KDD. — 2001. — С. 35—47.

2. *Осипов Г. С.*, *Панов А. И.*, *Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2014. — № 4. — С. 49—62.

3. *Осипов Г. С.*, *Панов А. И.*, *Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения // Известия Российский академии наук. Теория и системы управления. — 2015. — № 6. — С. 47—61.

4. *Панов А. И.* Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных. — 2014. — Т. 1, № 7. — С. 863—874.