ЭМПИРИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ
(Вычислительные системы)
1976 год Выпуск 67

УДК 362-5:621.391

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УГЛУБЛЕНИЯ ПОНИМАНИЯ

Н.Г.Загоруйко, Д.И.Свириденко

§ 1. Содержательное описание задачи

Исследование объекта обычно начинается с выяснения его внешних, легко воспринимаемых свойств. По этим свойствам на вопрос "что это такое?" можно дать определенный ответ, который, однако, окажется удовлетворительным далеко не для всех целей. Более глубокое изучение объекта связано с ответом на вопросы как этот объект функционирует, как он устроен или как его можно было бы сделать. Такой уровень понимания, при котором можно объяснить, что это за вещь и как она устроена, обычно считается достаточно глубоким. "Чтобы понять вещь, надо её сделать", - говорил Платон. Эту точку зрения на понимание разделяют и многие современные исследователи. Но процесс познания и, как результат этого процесса - глубина понимания, бесконечны. Уяснив себе, что это за вещь и как она устроена, естественно поинтересоваться, почему она устроена именно так, а не иначе. Обнаруженные при этом причины (например, свойства элементов конструкции) можно также исследовать - что это за причины, как они действуют, почему именно так и т.д.

Глубина этой цепочки ограничивается, вероятно, двумя обстоятельствами - целью исследования и возможностями (ресурсами) исследующей системы. Примечательно, что для целей, встречающихся в человеческой практике, часто оказывается достаточной глубина в 2-3 шага.

Считается, что мы не только идентифицируем, но и хорошо понимаем объект или процесс, если мы можем объяснить (хотя бы себе) что это такое, как он устроен или как он протекает, и почему именно так, а не иначе. Примечателен также тот факт, что мы зачастую ответ на вопрос как отождествляем с ответом на вопрос что, ответ на почему с ответом на как и что, и т.д. Последовательно углубляющийся анализ характерен не только для процесса понимания человеком, так сказать, на уровне сознания. Аналоги таких цепочек можно обнаружить при изучении процессов восприятия внешних стимулов отдельными сенсорными системами и при анализе развитых машинных алгоритмов, моделирующих восприятие или "машинное понимание".

Общность структуры процессов понимания и восприятия в разных системах и широкую распространенность двух-, трехшаговой глубины анализа в этих системах можно проиллюстрировать несколькими примерами:

1. В о с п р и я т и е з р и т е л ь н ы х о б р а з о в. При моделировании процессов восприятия окружающего мира роботами ("анализ сцен") обнаружено, что язык, удобный для описания видимых объектов, и язык, удобный для описания программы построения этих объектов, один и тот же. Программа распознавания, например, куба и программа его построения практически не отличаются (отождествление ответов на вопросы "что" и "как"). "Машинный смысл" куба может быть сформулирован в таких терминах: Имеются следующие элементарные объекты: "квадратная грань", "точка", "линия", "ребро", "угол", "вершина". Куб – это объект, для построения которого нужно взять шесть квадратных граней; одну грань соединить с другой так, чтобы угол между их смежными ребрами был равен 90°. Затем третью грань соединить с двумя первыми так, чтобы их смежные ребра образовали три прямых угла и т.д.

Если машина будет иметь правильную инструкцию построения куба, она сможет отличить его от других похожих объектов – пустой кубической коробки с двойным дном и т.п. Знание (понимание) того, из чего состоит куб и как его строят, достаточно для его распознавания на фоне других, даже очень похожих объектов.

2. А н а л и з с л у ч а й н ы х с о б ы т и й. Первый уровень знакомства со случайным процессом состоит в накоплении протокола его реализаций. Каким большим бы протокол не был, ощущение качественного скачка в понимании процесса появляется только после определенного обобщения этих экспериментальных данных. При этом эмпирические гистограммы обычно аппроксимируются аналитическими функциями распределения вероятностей тех или иных событий изучаемого процесса. Считается, что понимание процесса более глубокое, если тем или иным путем найдены доверительные интервалы или указана вероятность того, что такое-то событие произойдет с такой-то вероятностью. Цепочку "вероятность вероятности" можно было бы продолжать, однако дальше указанного выше третьего шага анализ обычно не идет.

3. В о с п р и я т и е р е ч и. Согласно "моторной теории" восприятие речи состоит в преобразовании воспринимаемого сигнала в набор моторных команд, которые были бы необходимы для имитации услышанного. При этом "мысленный" синтез звуков или звукосочетаний эквивалентен поиску ответа на вопрос "как этот звук мог бы быть воспроизведен?" Ответ на следующий вопрос: "почему именно так?" – мог бы быть сформулирован в терминах физиологических (биомеханических) ограничений, затрудняющих или совсем не позволяющих воспроизвести другие звукосочетания. Некоторым аналогом этого процесса служат машинные алгоритмы распознавания речи, использующие метод "анализа через синтез".

§ 2. Формальное представление процесса углубления понятий

Описанный выше процесс пошагового углубления понимания может быть представлен и изучен на строго формальном уровне. В настоящем параграфе мы опишем наиболее простую формальную конструкцию, соответствующую этой задаче. Но прежде сделаем несколько "нестрогих" замечаний.

Фраза: "Обучение начинается с чистого листа, который нужно заполнить" *), – для нас фактически является тезисом. Конечно, не существенно, чтобы лист был абсолютно чистым, важно, чтобы были участки, которые можно было бы уточнять, либо корректировать. Некоторым образом заполненный лист будет соответствовать уровню что, процесс заполнения – уровню как, а выбор этого процесса, обоснование этого выбора и его описание – уровню почему. Упрощая проблему, мы остановимся лишь на формальном описании уровней что и как, считая, что уровень как является аналогом уровня что для уровня почему, т.е. для нас что

*) То же самое относится и к пониманию.

есть, грубо говоря, что под номером I, как – что № 2, почему – что № 3 и т.д.

Будем считать, что формальной записью свойств объекта будут служить последовательности символов некоторого фиксированного алфавита $Q_0 = \{a, b, c, \ldots\}$. Предположим также, что в алфавите Q_0 выделен символ, который получит у нас специальное обозначение: □ ("пустой квадратик" или "чистый лист").

Пусть $Q = Q_0 \cup \{[,]\}$, где $[,] \notin Q_0$; и пусть Q^* – множество всех конечных последовательностей в алфавите Q.

С л о в а м и н а д Q_0 назовем элементы множества $W(Q_0) \subseteq Q^*$, которое есть наименьшее множество $Y \subseteq Q^*$ такое, что

$$x \in Q_0 \Rightarrow x \in Y, \tag{I}$$

$$\alpha, \beta \in Y \Rightarrow [\alpha, \beta] \in Y. \tag{2}$$

Положим по определению, что $[\Box\Box] \leftrightharpoons \Box$.

В дальнейшем для $[\alpha, \beta]$ будем писать $\alpha \cdot \beta$, обозначая через точку $(\cdot)$ операцию, определенную условием (2). Заметим, что эта операция не ассоциативна. Используя (I) и (2), определим для каждого $\alpha \in W(Q_0)$ его сложность $\rho(\alpha)$:

$$\rho(\alpha) = 0, \quad \text{если } \alpha \in Q_0,$$

$$\rho(\alpha \cdot \beta) = \max(\rho(\alpha), \rho(\beta)) + 1.$$

Пусть $W_0 = Q_0$ и $W_n = \{\alpha \mid \rho(\alpha) \leq n\}$. Определим на множестве $W(Q_0)$ очень важное для нас отношение частичного порядка $\leq$:

$$\Box \leq \alpha, \text{ для каждого } \alpha \in W(Q_0);$$

$$\gamma \leq \alpha \cdot \beta \Leftrightarrow \exists \gamma_1, \gamma_2 \in W(Q_0)\ [\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \ \&\ \gamma_1 \leq \alpha \ \&\ \gamma_2 \leq \beta].$$

Анализ определения отношения $\leq$ показывает, что $\alpha \leq \beta$ в том и только в том случае, когда некоторые пустые квадратики, присутствующие в записи слова α (если они есть), расшифровываются, заполняются "смыслом", уточняются, а строго говоря, заменяются на слова из $W(Q_0)$ таким образом, чтобы в результате получилось слово β, т.е. некоторому представлению о процессе заполнения пустых квадратиков до слова β соответствует определенная конечная цепь слов $(\alpha_i)_{1 \leq i \leq n}$ из $W(Q_0)$ (может быть, и не одна) таких, что

$$\alpha = \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \ldots \leq \alpha_n = \beta.$$

В конкретном языке $L \subseteq W(Q_0)$ могут присутствовать ограничения на подстановку. Более того, возможно, что сам язык L задается правилами подстановки некоторых слов из $W(Q_0)$ вместо пустых квадратиков. Для нас главное не это. Важна интерпретация отношения $\leq$, согласующаяся с тем, что уровню как в нашем формализме соответствует возрастающая цепочка слов, последним словом которой описывается уровень что. Можно отождествить что с как, рассматривая уже не последовательности символов, а последовательности последовательностей символов. Но в силу неоднозначности такого отождествления хотелось бы иметь некоторое каноническое представление слова в множестве последовательностей слов. Рассмотрим произвольное слово $\alpha \in W(Q_0)$. Пусть $\rho(\alpha) = n$. Определим последовательность

$$\langle \alpha_0, \alpha_1, \ldots, \alpha_{n-1}, \alpha_n \rangle = \bar{\alpha}$$

условиями:

I) $\rho(\alpha_i) = i$, $i \leq n-1$, $\alpha_n = \alpha$.

2) слово α_{i-1} является максимальным словом β из $W_{i-1}(Q_0)$ таким, что $\beta \leq \alpha_i$, $i \leq n$.

Заметим, что определение такой последовательности корректно, так как структура $\langle W(Q_0)_1 \leq \rangle$ является частично упорядоченным множеством, для которого выполняется следующее условие:

$$\forall x, y[[\exists z[x \leq z \ \&\ y \leq z]] \rightarrow [\exists z\ \forall z'[x \leq z \ \&\ y \leq z' \leftrightarrow z \leq z']]].$$

И, следовательно, для каждого слова α такая последовательность $\bar{\alpha}$ единственна. Таким образом, мы имеем вложение множества $W(Q_0)$ во множество $P(Q_0)$ – множество всех конечных последовательностей. Иногда удобно рассматривать не множество $P(Q_0)$, а несколько другое – $P'(Q_0)$ – множество бесконечных последовательностей, у которых, начиная с некоторого места, все последующие слова тождественны. Тогда на $P'(Q_0)$ можно также ввести отношение $\leq'$, сравнивая покомпонентно последовательности, используя отношение $\leq$. Соответствие f, ставящее в соответствие a каноническую последовательность $\bar{a}$, изотонно:

$$\alpha \leq \beta \Rightarrow f(\alpha) \leq' f(\beta).$$

Таким образом, последовательности элементов $(\alpha_i)_{1 \leq i \leq n}$ для слова α в $W(Q_0)$ (как $(\alpha_i)_{1 \leq i \leq n}$ для "что" α) будет соответствовать последовательность $(f(\alpha_i))_{1 \leq i \leq n} \subseteq P'(Q_0)$. Возникает вопрос: возможна ли такая модель, в которой углубление уровня не выводило бы за рамки самой модели. Ответ положителен, но обсуждение этого вопроса не входило в задачу авторов.

Необходимо обратить внимание на другой аспект введенного формализма. Разные слова из $W(Q_0)$ могут быть обозначением одного и того же что, т.е. речь идет о некотором отношении эквивалентности $\equiv$ на множестве $W(Q_0)$, отражающем природу объектов и характер их взаимодействия. В предложенном формализме можно исследовать определенные синтаксические аппроксимации данного отношения, отражающие наше представление о реальности. Эти синтаксические эквивалентности могут задаваться системой правил, позволяющих включать мощные формальные аппараты исследования, которые дает нам теория формальных систем и математическая логика. И, наконец, предложенный формализм позволяет дать четкое определение схожести объектов, используя их синтаксическое описание. Точнее, процессы построения этих синтаксических описаний, соответствующих нашему представлению уровня как. Один из возможных вариантов можно мыслить себе так. Определим для слова $\alpha \in W(Q_0)$ множества

$$\hat{\alpha} = \{\beta \mid \beta \in W(Q_0) \& \beta \le \alpha\},$$

$$\check{\alpha} = \{\beta \mid \beta \in W(Q_0) \& \alpha \le \beta\}.$$

Очевидно, что

$$\alpha \le \beta \Rightarrow \hat{\alpha} \subseteq \hat{\beta} \Rightarrow \check{\beta} \subseteq \check{\alpha}.$$

Заметим, что если α есть слово над алфавитом $Q_0 \setminus \{\square\}$, то $\check{\alpha} = \{\alpha\}$; в остальных случаях множество $\check{\alpha}$ бесконечно и соответствует множеству тех возможных ситуаций, к которым мы можем прийти, используя процесс подстановки. Предположим, что нам даны два слова α и β. Слова γ_1, γ_2 такие, что $\gamma_1 = \hat{\alpha} \cap \hat{\beta}$ и $\gamma_2 = \check{\alpha} \cap \check{\beta}$ можно использовать для описания степени близости слов α и β, отражающую тот факт, что α и β "близки" в том случае, когда "близки" им соответствующие как. Интуитивно эта "близость" соответствует близости по содержанию понятий.