

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ПРЕЦЕДЕНТОВ

Александр Еремеев, Иван Куриленко

Аннотация: Работа посвящена методам моделирования временных зависимостей в интеллектуальных системах типа систем поддержки принятия решений (ИСППР) на основе прецедентов. Описываются и анализируются методы построения рассуждений на основе темпоральных прецедентов (СВР-систем). Анализируются преимущества применения систем на основе темпоральных прецедентов для поддержки принятия решений в открытых и динамических предметных областях в условиях наличия неопределенности в исходных данных и достаточно жестких временных ограничений.

Ключевые слова: интеллектуальные системы поддержки принятия решений, моделирование временных зависимостей, временные логики, задачи согласования временных ограничений, темпоральные прецеденты, СВР-системы.

ACM Classification Keywords: H.4.2 [Information systems applications]: Types of systems – Decision support; I.2.3 [Artificial intelligence]: Deduction and Theorem Proving – Uncertainty, "fuzzy," and probabilistic reasoning; I.2.4 [Artificial intelligence]: Knowledge Representation Formalisms and Methods – Temporal logic.

Введение

Важной задачей в области создания перспективных интеллектуальных систем типа интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени (ИСППР РВ) является задача моделирования правдоподобных рассуждений [Вагин и др., 2008].

Наряду с широко используемыми в области искусственного интеллекта (ИИ) методами правдоподобных рассуждений на основе индукции, абдукции, аргументации и аналогии активно применяются методы на основе прецедентов (СВР-методы) [Варшавский и др., 2009]. Вывод на основе прецедентов позволяет принимать решения в новых, неизвестных ситуациях, используя или адаптируя решение, принятое ранее в уже известной ситуации, т.е. используя уже накопленный к моменту принятия решения опыт [Watson et al., 1994, Schank, Abelson, 1977].

Обычно СВР-методы включают четыре этапа, образующих цикл обучения по примерам (прецедентам) - СВР-цикл. Информация о новой проблемной ситуации используется для извлечения из базы прецедентов (БП) прецедентов, удовлетворяющих заданному порогу подобия [Варшавский и др., 2006]. Они используются повторно при получении решения задачи (определяемой проблемной ситуацией). В случае необходимости, предложенное решение может быть адаптировано к особенностям новой ситуации и применено на практике. Если решение успешно применено оно совместно с описанием проблемной ситуации образует новый прецедент, который сохраняется в БП, что позволяет системе накапливать опыт (в виде прецедентов).

Таким образом, CBR-система должна обеспечивать: поиск прецедентов, наиболее соответствующего наблюдаемой ситуации с определением меры сходства (извлечение прецедента), пересмотр и адаптацию полученного решения, сохранение вновь принятого решения в качестве нового прецедента или для изменения имеющегося (обучение) [Eremeev et al., 2009]. На практике в CBR-системах обычно предусматривается база решающих правил, база известных прецедентов и алгоритмы обобщения, которые используются для построения решающих правил, на основе которых распознаются новые проблемные ситуации.

Извлечение прецедентов напрямую связано со способом представления прецедентов и соответственно со способом организации БП. Известны различные методы извлечения прецедентов из БП системы: метод ближайшего соседа и его модификации; метод поиска на деревьях решений; метод извлечения на основе знаний; метод извлечения с учетом применимости прецедентов.

CBR-методы хорошо проработаны и используются на практике, однако, как правило во многих случаях при извлечении прецедентов используются «мгновенные» снимки ключевых параметров контролируемого объекта или системы, а история их изменения не учитывается [Еремеев и др., 2011].

С учетом того, что природа физических процессов такова, что к одному и тому же значению ключевых параметров контролируемый процесс зачастую может перейти разными путями, которые и будут во многом определять дальнейшую динамику их изменения, остро встает вопрос об улучшении CBR-методов за счет надления их возможностью учета временных и причинно-следственных зависимостей [Еремеев и др., 2013]. Учитывая историю изменения состояний наблюдаемого объекта или процесса, можно находить более качественные решения, чем на основании анализа только по текущему состоянию. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов рассуждений на основе прецедентов, позволяющих учитывать историю изменения параметров, а также адаптированных к учету фактора времени алгоритмы извлечения прецедентов.

В рамках данной работы предлагается расширение CBR-методов, позволяющее учитывать поведение контролируемого процесса или объекта во времени. При учете фактора времени появляется возможность рассматривать проблемную ситуацию в динамике, что позволяет отслеживать процесс изменения значений. Использование темпоральных прецедентов дает возможность строить предположения, используя не только критерий сходства, но и учитывать временные и причинно-следственные зависимости.

Построение темпорального расширения CBR-методов

Известно несколько методов внедрения фактора времени в существующие способы описания прецедентов – в частности методы, на основе подмены «мгновенного» снимка параметров историей изменения параметров, метод учета истории принимаемых решений и метод временных аргументов. Метод подмены «мгновенного» снимка ключевых параметров – историей их изменения является наиболее простым, но при этом и более затратным с точки зрения объема хранимой информации [Смирнова и др., 2012, Еремеев и др., 2013].

Эта история может быть представлена в виде матрицы значений, составленной на определенный период наблюдения с определенным временным шагом (тактом). Для работы с такими прецедентами могут использоваться имеющиеся алгоритмы и методы, так как легко перейти к обычному параметрическому представлению прецедента путем переупаковки матрицы в вектор через последовательную запись в него элементов ее столбцов. При этом эксперту или ЛПР в интерфейсе CBR-системы может представляться

более удобная для интерпретации и заполнения матричная или графическая форма, а ее трансформация в массив СВР-система может выполняться автоматически.

Методы учета истории принимаемых решений позволяют учитывать решения, выводимых ранее на прошлых этапах, при выборе решения на текущем этапе. Т.е. решения, принятые на прошлом шаге влияют на выбор решения на текущем шаге.

В первую очередь определяется отрезок времени для анализа проблемной ситуации (глубина анализа истории изменения параметров). Далее рассматриваемый промежуток времени разбивается на N равных интервалов. После этого происходит извлечение прецедентов с заданным порогом подобия на основе сравнения значений параметров ситуации в каждый момент времени i , где $i = 0, 1, \dots, N$ с прецедентами, имеющимися в БП. Таким образом, для всех моментов времени i получаются варианты прецедентов с некоторыми оценками подобия, которые могут быть выбраны как соответствующие ситуации в этой точке для текущего значения порога подобия. На следующем этапе по интегральным оценкам в точках i выбирается наиболее вероятный прецедент или группа прецедентов, удовлетворяющих поисковому пороговому условию. Каждому результирующему прецеденту в соответствие ставится усредненная мера сходства (вычисляемая как отношение суммы мер сходства для этого прецедента во всех точках i от 0 до N). Далее среди получившегося множества прецедентов с оценками сходства выбираются удовлетворяющие заданному порогу [Eremeev et al., 2012].

Следует отметить, что с использованием параметров в точке i с помощью интерполяции можно построить прогноз развития проблемной ситуации (на уровне параметров). Также для такого прогноза, могут использоваться данные из имеющихся прецедентов, в случае комбинации этого метода, с рассмотренным ранее.

На результат поиска прецедентов, оказывают влияние выбор метрики, выбор шага, с которым разбивается на промежутки рассматриваемый отрезок времени, и выбор порогового значения, определяющего степень сходства. Выбор метрики в каждом конкретном случае производится по-разному, в зависимости от целей ЛПР, физической и статистической природы используемой информации при управлении сложным объектом и других ограничений и факторов. Вариация размеров шага оказывает влияние не только на точность выбора прецедента, но и на скорость поиска, а так же на величину погрешности, с которой может быть построен прогноз.

Далее в сформированной БП, где каждый прецедент представляется в параметризованном виде, происходит сравнение значений параметров ситуации в каждый момент времени t_i , где $i = 1, \dots, N$. Значения параметров прецедентов сравниваются между собой по методу ближайшего соседа с учетом выбранной метрики (например, Евклидовой) и соответствующего порогового значения [Варшавский и др., 2006, 2009]. Каждому результирующему прецеденту в соответствие ставится мера сходства (расстояние Хэмминга), которая определяется по правилу: «При совпадении всех параметров в описании прецедента и текущей ситуации степень сходства будет равна 1, а каждый совпавший параметр дает вклад равный $1/K$, где K – число параметров в описании прецедента и текущей ситуации».

Следует отметить, что на результат поиска прецедентов, удовлетворяющих проблемной ситуации, оказывает влияние несколько факторов. Так, влияние оказывает выбор шага, с которым разбивается на промежутки рассматриваемый отрезок времени. Вариация размеров шага дает различное количество дискретных точек, по которым происходит сравнение значений параметров прецедентов. Это оказывает влияние не только на точность выбора прецедента, но и на скорость выполнения поискового алгоритма, а так же на величину погрешности, с которой может быть определено соответствие. Также важным оказывается выбор порогового значения, определяющего степень сходства.

Предложенные методы могут быть использованы как по отдельности, так и в комбинации друг с другом. В практических приложениях важно правильно определить величину N и размер такта. Если следует учитывать вероятность скачкообразного изменения поведения параметров контролируемого объекта или процесса, то предпочтительнее использовать первый из рассмотренных выше методов.

Следует отметить, что у рассмотренных методов есть несколько недостатков. Первым является необходимость хранения большого объема информации. Ведь даже в случае, если в такты i и $i+1$ ничего не изменялось, будут повторно сохранены все контрольные параметры. Вторым недостатком может рассматриваться неявная форма учета временных характеристик (через изменения), что не позволяет в явной форме задавать сложные временные зависимости. Оба эти недостатка могут быть устранены, если для построения представления прецедента будет использована временная логика. В настоящее время известно большое количество временных логик, характеризующихся разным уровнем выразительности и разным уровнем сложности алгоритмов вывода. С учетом фактора, что разрабатываемые методы создаются для применения в составе современных ИС реального времени, следует рассматривать логики, для которых существуют алгоритмы вывода с полиномиальными оценками сложности. Исходя из этого, для реализации механизма вывода на основе темпоральных прецедентов могут быть применены качественная точечная временная логика и метрическая временная логика [Еремеев и др., 2007].

Использование темпоральной логики

Рассмотрим метод представления прецедентов с использованием выражений метрической точечной временной логики. Данный выбор обусловлен тем, что для этой логики существуют алгоритмы вывода с полиномиальной оценкой сложности [Еремеев и др., 2010]. Эти алгоритмы основываются на переходе к задаче согласования временных ограничений (ЗСВО).

Метрическая точечная ЗСВО (МЗСВО) определяется как $Z=(V,D,C)$, где $V = \{V_1..V_k\}$ - конечное множество временных переменных, соответствующих моментам времени; D - область значений временных переменных (является либо множеством вещественных чисел, либо множеством целых чисел); C - конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij}=\{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$, где интервалы попарно не пересекаются. Для решения задачи требуется скорректировать все ограничения так, чтобы они не противоречили друг другу. Если подобная корректировка возможна МЗСВО считается согласованной, иначе – несогласованной.

Каждое бинарное ограничение C_{ij} определяет для временных переменных V_i и V_j разрешенную дистанцию между соответствующими моментами времени и интерпретируются как дизъюнктивное ограничение: $(a_1 \leq V_j - V_i \leq b_1) \vee \dots \vee (a_k \leq V_j - V_i \leq b_k)$.

Над метрическими точечными ограничениями определяются следующие операции:

- *отрицание ограничения* $C_{ij}=\{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$ ($\sim C_{ij}$) определяется как $\sim C_{ij}=\{[-b_1, -a_1], \dots, [-b_k, -a_k]\}$;
- *пересечение ограничений* T и S ($T \cap S$) содержит значения, которые одновременно присутствуют в обоих ограничениях;
- *композиция ограничений* T и S ($T \cdot S$) содержит значения r , для которых существуют значения $t \in T$ и $s \in S$, такие, что $r = t+s$.

МЗСВО может быть применена как основа для описания наблюдаемых ситуаций и прецедентов [Куриленко, 2012]. При этом есть возможность фиксации как самого факта наступления тех или иных событий, их порядка, так и времени их появления (метрики). Далее будем предполагать, что эти МЗСВО согласованы и преобразованы к минимальной форме.

Для задания структуры темпорального прецедента на основе МВЛ вводится определение ситуации как $S = \langle V, D, C, P \rangle$, где Z - МЗСВО; $P = \{P^1, \dots, P^k\}$ – наборы параметров, $P^1 \dots P^k$, где $P^i = \{p_{i1} \dots p_{im}\}$ - задают набор параметров, которые характеризовали состояние контролируемого объекта или процесса в моменты времени $V_1 \dots V_k$ соответственно.

Темпоральный прецедент $U = \langle V, D, C, P, R \rangle$ формально определяется как ситуация, дополненная диагнозом и рекомендациями ЛПП - R . Кроме этого компонент R может содержать статус прецедента (норма, ошибка, предупреждение), описание, ссылки, и т.д.

Организация прецедентов на основе МЗСВО позволяет учитывать как последовательности событий, так и их длительности. Для определения прецедента на основе выборки похожих ситуаций (обучения) используется смягчение временных ограничений C_{ij} в одном из вариантов так, чтобы выполнялись условия его подобия другим ситуациям.

Рассмотрим алгоритм построения темпорального прецедента по истории изменения параметров. Он содержит несколько этапов. На первом этапе используется алгоритм 1 (алг. 1) для сжатия истории изменения параметров наблюдаемого объекта в серию событий $S = \{e_1 \dots e_j\}$, где $e_i = (t_i, P_i)$ – событие, $t_i \in \mathbb{R}$ – время наблюдения события, $P_i = (p_{i1} \dots p_{ik})$ – параметрическое описание объекта в момент времени t_i . На втором шаге если регистрируется новый прецедент, то полученная серия событий нормализуется (по времени) и трансформируется в МЗСВО с помощью алг. 2.

Алгоритм 1. Формирование сжатого описания ситуации по истории изменения параметров наблюдаемого объекта

Входные данные: $H = \{H_i\}$, где $H_i = (p_{i1} \dots p_{ik})$ - параметрическое описание объекта на i -м такте, τ – число записанных тактов

Выходные данные: $S = \{e_j\}$ – сжатое описание ситуации, где $e_j = (t_j, P_j)$ – событие, $t_j \in \mathbb{R}$ – время наблюдения события, $P_j = (p_{j1} \dots p_{jk})$ – параметрическое описание объекта в момент времени t_j

```

01:  $k \leftarrow 0$ 
02:  $S \leftarrow S \cup \{(k, H_k)\}$ 
03: for ( $i \leftarrow 1$  to  $\tau - 1$ )
04: {
05:   if ( $H_i \neq H_k$ )
06:   {
07:      $S \leftarrow S \cup \{(i, H_i)\}$ 
08:      $k \leftarrow i$ 
09:   }
10: }
11: return  $S$ 

```

При этом получается МЗСВО в подклассе STP (Simple Temporal Problems) с точными ограничениями. Если же уточняется уже имеющийся прецедент, то после выполнения алг. 2 используется алг. 3 для получения объединенного прецедента.

Отметим, что в строке 8 алг.3 могут применяться различные стратегии. Простое объединение ограничений может привести к увеличению уровня фрагментации, чтобы ее избежать и при этом смягчить получаемые ограничения можно применить метод верхне-нижнего сжатия. В этом случае получаемая МЗСВО останется в подклассе STP и на уровне оценки сходства наблюдаемой ситуации и прецедента по времени будут разрешены любые значения времени наступления рассматриваемого события между нижней и верхней границами (рис. 1).

Отметим, что в алг. 3 предполагается, что состояние контролируемого объекта в объединяемых прецедентах идентично в соответствующие моменты времени. Однако на практике, такое условие является достаточно жестким.

Алгоритм 2. Формирование первичного темпорального прецедента по описанию ситуации

Входные данные: $S=\{e_i\}$, $i=0..n$, где $e_i=(t_i, P_i)$ – событие, $t_i \in R$ – время наблюдения события, $P_i=(p_1..p_k)$ – параметрическое описание объекта в момент времени t_i , Q – диагноз и рекомендации ЛПР

Выходные данные: $U = (V, P', D, C, W)$ – темпоральный прецедент, где $V=\{V_i\}$, $i=0..n$, – множество переменных (моментов времени), $V_i \in R$, $P' = \{P'_i\}$ – параметрическое описание объекта в момент времени V_i , $P'_i=(p_1..p_k)$, D - область значений временных переменных (множество вещественных чисел); C - конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij}=\{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$, где интервалы попарно не пересекаются, Q – диагноз и рекомендации ЛПР

01: $e_i \leftarrow e_i=(t_i, P_i) \in E : \forall j \neq i \ t_j > t_i$, где $e_j=(t_j, P_j)$

02: **foreach** ($e_k \in S$)

03: {

04: $e_k \leftarrow (t_k - t_i, P_k)$

05: $V \leftarrow V \cup \{V_k\}$

06: $P' \leftarrow P' \cup \{P_k\}$

07: }

08: **for** ($i \leftarrow 0$ to $n+1$)

09: **for** ($j \leftarrow 0$ to $n+1$)

10: {

11: **if** ($i \neq j$)

12: $C_{ij} \leftarrow \{[t_i - t_j, t_j - t_i]\}$, где t_i и t_j определяются из $e_i=(t_i, P_i)$ и $e_j=(t_j, P_j)$

13: **else**

14: $C_{ij} \leftarrow \emptyset$

15: }

16: **return** $U = (V, P', D, C, Q)$

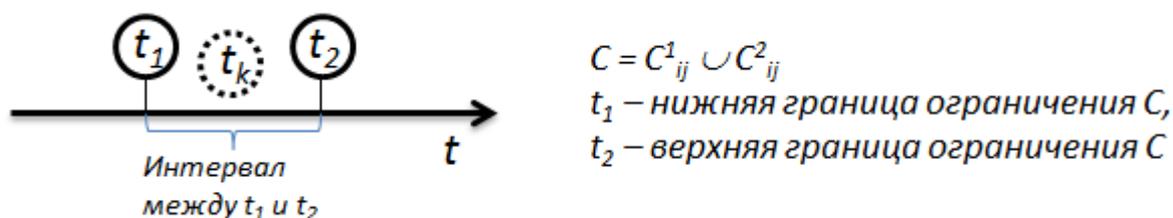


Рис. 1. Иллюстрация стратегии для уменьшения фрагментации метрических временных ограничений при формировании темпоральных прецедентов слиянием

Алгоритм 3. Слияние темпоральных прецедентов

Входные данные: U^1, U^2 – прецеденты для слияния, где $U^i = (V^i, P^i, D^i, C^i, Q^i)$ – где $V^i = \{V_j\}, j=0..n$, – множество переменных (моментов времени), $V_j \in R, P^i = \{P_j\}$ – параметрическое описание объекта в момент времени $V_j, P_j = (p_1, \dots, p_k), D^i$ – область значений временных переменных (множество вещественных чисел); C^i – конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij} = \{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$, где интервалы попарно не пересекаются, Q – диагноз и рекомендации ЛПР.

Предполагается что $|V^1| = |V^2|$ и $P^1 = P^2$

Выходные данные: $M = (V, P^*, D, C^*, Q)$ – темпоральный прецедент, где $V = \{V_j\}, j=0..n$, – множество переменных (моментов времени), $V_j \in R, P^* = \{P_j\}$ – параметрическое описание объекта в момент времени $V_j, P_j = (p_1, \dots, p_k), D$ – область значений временных переменных (множество вещественных чисел); C^* – конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij} = \{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$, где интервалы попарно не пересекаются

01: **if** ($|V^1| \neq |V^2|$)

02: **return** // Не удалось построить объединенный прецедент

03: **for** ($i \leftarrow 0$ **to** $n+1$) // Смягчение временных ограничений

04: **for** ($j \leftarrow 0$ **to** $n+1$)

05: {

06: **if** ($i \neq j$) $C^*_{ij} \leftarrow C^1_{ij} \cup C^2_{ij}$

07: }

08: **return** $M = (V^1, P^*, D, C^*, Q)$

Поэтому имеет смысл реализовать алгоритм, производящий усреднение значений параметров при объединении событий (как это делается в алг. 4) или осуществляющий переход от точного значения параметра к допустимому диапазону изменения его значения. Следует отметить, что усреднение не единственный выход в данной ситуации. Например, можно реализовать также учет качественных характеристик для каждого параметра, таких как рост, постоянство, уменьшение и так далее.

При поиске прецедента для наблюдаемой ситуации используется алгоритм, учитывающий временные характеристики и состояние контролируемого объекта или процесса в момент наблюдения тех или иных событий (алг. 5). Для вычисления соответствия временной структуры наблюдаемой ситуации и прецедента могут быть предложены несколько методов [Egemenov et al., 2012]. Самым простым из них является метод с «жесткими» ограничениями. Он предполагает точное соответствие наблюдаемых событий и событий, имеющих в прецеденте, а также для каждого метрического ограничения C_{ij} в

прецеденте его пересечение с ограничением C_{ij}^* в наблюдаемой ситуации должны равняться C_{ij} ($C_{ij} \cap C_{ij}^* = C_{ij}$). При этом для того, чтобы события в прецеденте и анализируемой ситуации соответствовали друг другу предполагается использовать для их нумерации числа, получаемые в результате сортировки по имени параметра и времени. В этом случае для определения подобия параметров контролируемого объекта или процесса в момент наступления того или иного события может использоваться подходящий на практике метод. Этот метод полезен для систем, в которых временные характеристики протекающих процессов (время наступления событий и их порядок) достаточно стабильны. Однако столь жесткое соответствие временной структуры необходимо далеко не всегда. Смягчение условия $C_{ij} \cap C_{ij}^* = C_{ij}$ может рассматриваться в нескольких вариантах. В первом снимается условие, что для каждого метрического ограничения C_{ij} в прецеденте его пересечение с ограничением C_{ij}^* в наблюдаемой ситуации должны равняться C_{ij} заменяется на то, что это пересечение не пусто и C_{ij}^* вложено в C_{ij} ($C_{ij} \cap C_{ij}^* \neq \emptyset$ и $C_{ij}^* \subseteq C_{ij}$). Во втором случае снимается требование вложенности ограничения C_{ij}^* в C_{ij} . Также это условие можно заменить на условие близости границ в ограничениях ($C_{ij} = \{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$ и $C_{ij}^* = \{[a_1^*, b_1^*], \dots, [a_k^*, b_k^*]\} : (|a_1 - a_1^*| < \varepsilon) \wedge \dots \wedge (|a_k - a_k^*| < \varepsilon) \wedge (|b_1 - b_1^*| < \varepsilon) \wedge \dots \wedge (|b_k - b_k^*| < \varepsilon)$, где $\varepsilon > 0$). Дальнейшее смягчение условий возможно при анализе степени сходства с учетом изменения истории изменений каждого параметра по отдельности. Тут возможны разные стратегии (например, учитывающие ограничения между событиями изменения значений разных параметров с большим весом, чем ограничения, наложенные на события полученные из-за изменения одного параметра) [Куриленко, 2012].

Алгоритм 4. Слияние темпоральных прецедентов

Входные данные: U^1, U^2 – прецеденты для слияния, где $U^i = (V^i, P^i, D^i, C^i)$ – где $V^i = \{V_{ij}, i=0..n$, – множество переменных (моментов времени), $V_{ij} \in R$, $P^i = \{P_{ij}\}$ – параметрическое описание объекта в момент времени V_{ij} , $P_{ij} = (p_1, \dots, p_k)$, D^i – область значений временных переменных (множество вещественных чисел); C^i – конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij} = \{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$, где интервалы попарно не пересекаются. Предполагается что $|V^1| = |V^2|$.

Выходные данные: $M = (V, P', D, C)$ – темпоральный прецедент, где $V = \{V_{ij}, i=0..n$, – множество переменных (моментов времени), $V_{ij} \in R$, $P' = \{P'_{ij}\}$ – параметрическое описание объекта в момент времени V_{ij} , $P'_{ij} = (p_1, \dots, p_k)$, D – область значений временных переменных (множество вещественных чисел); C – конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij} = \{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$, где интервалы попарно не пересекаются

01: if ($|V^1| \neq |V^2|$)

02: **return** // Не удалось построить объединенный прецедент

03: **for** ($i \leftarrow 0$ to $n+1$) // Усреднение значений параметров

04: {

05: $P_i = (P_i^1 + P_i^2) / 2$

05: }

08: **for** ($i \leftarrow 0$ to $n+1$)

09: **for** ($j \leftarrow 0$ to $n+1$)

10: {

11: **if** ($i \neq j$)

12: $C_{ij}^* \leftarrow C_{ij}^1 \cup C_{ij}^2$

13: }

14: **return** $M = (V1, P', D, C^*)$

В случае если анализ длительностей не принципиален, а важен порядок наступления событий можно воспользоваться качественной временной логикой – например, точечной временной логикой, для которой имеются быстродействующие алгоритмы вывода.

Для определения подобия (сходства) по параметрам, описывающих состояние контролируемого объекта в конкретный момент времени, может быть применен подходящий для решаемой задачи метод.

При сравнении с альтернативными подходами к представлению темпоральных прецедентов предложенные методы являются достаточно сбалансированными и позволяют с большей легкостью осуществлять CBR-цикл, чем, например, при использовании аппарата искусственных нейронных сетей для организации вывода на основе прецедентов с учетом фактора времени [Варшавский и др., 2012].

Алгоритм 5. Извлечение прецедента

Входные данные: S – наблюдаемая ситуация, где $S = \{e_i\}, i=0..n$, где $e_i = (t_i, P_i)$ – событие, $t_i \in R$ – время наблюдения события, $P_i = (p_1, .., p_k)$ – параметрическое описание объекта в момент времени t_i , Q – диагноз и рекомендации ЛПР,

$U = \{U_i\}$ – база прецедентов, где $U_k = (V^k, P^k, D^k, C^k)$ – темпоральный прецедент, где $V^k = \{V_j^k\}, i=0..n$, – множество переменных (моментов времени), $V_i \in R$, $P^k = \{P_j^k\}$ – параметрическое описание объекта в момент времени V_i , $P_j^k = (p_1, .., p_k)$, D^k – область значений временных переменных (множество вещественных чисел); C^k – конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij} = \{[a_1, b_1], .., [a_k, b_k]\}$, где интервалы попарно не пересекаются.

Выходные данные: U_k – прецедент, соответствующий ситуации S или \emptyset

```

01:  $U^s =$  Алгоритм 2 ( $S, \emptyset$ )
02: foreach ( $U^k = (V^k, P^k, D^k, C^k) \in U$ ) {
03:   bool isFailed  $\leftarrow$  false
04:   foreach ( $C_{ij}^k \in C^k$ ) // Сравнение временных характеристик
05:     if ( $C_{ij}^k \cap C_{ij}^s = \emptyset$ , где  $C_{ij}^k \in C^k, C_{ij}^s \in C^s$ )
06:       {
07:         isFailed  $\leftarrow$  true;
08:         break;
09:       }
10:   if (!isFailed)
11:     {
12:       for ( $i \leftarrow 0$  to  $|V^s|$ )
13:         if (!СравнитьПодобие( $\alpha(V^i), \alpha(V^k)$ ))
14:           {
15:             isFailed  $\leftarrow$  true;
16:             break;

```

```
17: }
18:  if (!isFailed) return Uk
19: }
20: }
21: return ∅
```

Программная реализация прототипа

Рассмотренные выше методы реализованы в прототипе CBR-системы, используемой для анализа нетиповых (нештатных) ситуаций на примере ИС для управления крупными парковочными комплексами (ИС УП), построенной по модульному принципу с учетом требований расширяемости и простоты интеграции [Куриленко, 2009].

ИС УП связана с большим количеством датчиков и исполнительных устройств для обеспечения жизненного цикла парковки и сведение к минимуму функций обслуживающего персонала. В задачи ИС УП входит управление движением на территории комплекса, учет владельцев транспортных средств, предотвращение угона и актов вандализма. Возможность анализа последовательностей действий, наблюдаемых системой, позволяет реализовать в ней более надежные механизмы контроля функционирования парковочного комплекса. Рассмотрены ситуации, в которых учет временных характеристик и расположения наблюдаемых событий позволяют реализовать реакцию системы на ситуации, не подлежащие контролю обычных систем управления движением, реализованных аппаратно (без применения программного обеспечения).

Благодаря хранению истории проведения операций на точках проезда и точках доступа в СВР возможна организация модуля поиска аномальных ситуаций и автоматической классификации сбоев. При построении этого модуля использовано то, что операции, протекающие на точках доступа и проезда в штатном режиме, формируют во времени достаточно стандартные последовательности событий. При этом процесс работы точки въезда/выезда может быть представлен в виде последовательности однотипных операций, каждая из которых также есть совокупность наблюдаемых стандартных событий. Таким образом, аномальные ситуации могут быть выделены за счет анализа этой последовательности путем проверки эквивалентности наблюдаемых в процессе конкретной операции событий и эталонных моделей штатного или нештатного развития ситуации.

На базе предлагаемых моделей, методов и алгоритмов реализован и апробирован прототип блока анализа нештатных ситуаций для промышленной системы управления крупными парковочными комплексами, которая разрабатывается и поставляется компанией ООО «ААМ Автоматик». Также разработанный прототип использован в учебно-научном процессе кафедры Прикладной математики НИУ МЭИ.

Программная реализация выполнена на базе платформы Microsoft .NET Framework на языке C# в среде разработки Microsoft Visual Studio 2010 и является кросс-платформенной. Прототип реализует следующие функции: поиск и выделение сбоев в работе парковочного комплекса, которые относятся к типовым проблемным ситуациям, а также определение нештатных ситуаций, которые возникли в процессе эксплуатации ИС УП, но не были учтены при разработке управляющих правил. Прецеденты, включая темпоральные, хранящиеся в БП, представляют собой операции (ситуации). В общем случае каждый прецедент имеет имя, код (номер), описание (диагноз), последовательность действий (что необходимо предпринять при выявлении этого прецедента), а также структуру событий.

В блоке сопоставления для выявления типовых и нестандартных ситуаций применяются алгоритмы сопоставления. Алгоритм сопоставления ситуаций опирается на их представление. В зависимости от представления прецедентов строится та или иная модель прецедента. Решатель на основе прецедентов соотносит временные диаграммы в последовательностях операций за определенный период с моделями, хранящимися в этих базах. В случае, если выявляется типовая нестандартная ситуация, ее данные заносятся в базу нестандартных ситуаций. Если же выделяется ситуация, которая не описана ни в базе штатных типовых ситуаций, ни в базе нестандартных типовых ситуаций, то эта ситуация заносится в отдельную базу, содержимое которой анализируется разработчиками (экспертами) ИС УП.

Заключение

В работе рассмотрена проблема моделирования правдоподобных рассуждений (рассуждений «здравого смысла») на основе темпоральных прецедентов. Предложенные методы моделирования временных зависимостей в CBR-системах на основе темпоральных прецедентов и соответствующие алгоритмы могут применяться для расширения возможностей и повышения эффективности современных ИСППР реального времени, позволяя учитывать в процессе поиска решения (процессе рассуждения) временные зависимости и динамику развития ситуации на объекте. Подход на основе использования темпоральных прецедентов позволяет упростить процесс принятия решений в нестандартных (аномальных) ситуациях, которые могут возникнуть по причине различного рода «НЕ-факторов» (неполноты, противоречивости, неопределенности и др.) в исходных данных и экспертных знаниях, а также перспективен для создания систем мониторинга технических систем и объектов, функционирующих по алгоритмам, описываемым автоматными моделями. К таким системам относится широкий класс систем автоматизации, систем контроля доступа, систем управления движением и транспортом.

Использование темпоральных прецедентов в CBR-системах, ориентированных на использование в составе ИСППР реального времени для мониторинга и управления различными сложными техническими объектами и процессами позволяет ЛПП своевременно выбрать необходимую стратегию поведения для устранения проблемной ситуации за счет сокращения поискового пространства и уменьшения времени реакции системы.

Благодарности

Работа поддержана РФФИ (проекты 11-01-00140, 12-07-31239, 12-07-00508).

Список литературы

- [Eremeev et al., 2009] Alexander Eremeev, Ivan Kurilenko, Pavel Varshavskiy. Application of Temporal Reasoning and Case-based Reasoning in Intelligent Decision Support Systems // International Book Series «Information science & computing», Number 10, Supplement to IJ «Information technologies & knowledge» Volume 3/2009 – 2009. – Pp. 9–16.
- [Eremeev et al., 2012] Alexander Eremeev, Ivan Kurilenko, Pavel Varshavskiy. Моделирование временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // Information technologies and knowledge Vol. 6, 2012, № 3, с. 279-294.
- [Schank, Abelson, 1977] Schank R.C., Abelson R.P. Scripts, Plans, Goals and Understanding. Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, US, 1977, - 248 p.
- [Watson et al., 1994] Watson I.D., Marir F. Case-based reasoning: A review. The Knowledge Engineering Review, Vol. 9, No. 4, 1994. – Pp. 355-381.

- [Вагин и др., 2008] Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. 2-е изд. // Под редакцией В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
- [Варшавский и др., 2006] Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Методы правдоподобных рассуждений на основе аналогий и прецедентов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Новости искусственного интеллекта. 2006. №3. – С. 39-62.
- [Варшавский и др., 2009] Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений, №2, 2009, с. 45-57.
- [Варшавский и др., 2012] Варшавский П.Р., Куриленко И.Е., Макашова М.Б. Реализация нейромодуля для поиска решения на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Труды XIII национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012. Т.3. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. - С.80-87.
- [Еремеев и др., 2007] Еремеев А.П., Куриленко И.Е. Реализация механизма временных рассуждений в современных интеллектуальных системах // Известия РАН. Теория и системы управления, 2007, № 2, с. 120–136.
- [Еремеев и др., 2010] Еремеев А.П., Куриленко И.Е. Применение темпоральных моделей в интеллектуальных системах / Интеллектуальные системы. Коллективная монография. Выпуск четвертый. / Под. Ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2010, 300 с., 222-252.
- [Еремеев и др., 2011] Еремеев А.П., Куриленко И.Е., Смирнова А.Е. Разработка темпорального расширения методов рассуждений на основе прецедентов // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'11). Научное издание в 4-х томах. - Т.1. – М.: Физматлит, 2011. - С.50-59.
- [Еремеев и др., 2013] Еремеев А.П., Куриленко И.Е. Расширение возможностей моделирования временных зависимостей в интеллектуальных системах на основе применения темпоральных прецедентов / Интеллектуальные системы. Коллективная монография. Выпуск 6. / Под. Ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2013, 300 с., 89-118.
- [Куриленко, 2009] Куриленко И.Е. Применение временной логики при построении интеллектуальной системы управления крупными парковочными комплексами // Сб. док. научно-практ. конф. «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» 2009 в 2 т. – Т.2 – М.:ФизМатЛит, 2009. С. 171 -180.
- [Куриленко, 2012] Куриленко И.Е. О применении метрической временной логики при построении механизма вывода на основе прецедентов // Труды XIII национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012. Т.1. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. - С.25-33.
- [Смирнова и др., 2012] Куриленко И.Е., Смирнова А.В. Реализация прототипа системы анализа типовых ситуаций для интеллектуальной системы // Труды XX международной научно-технической конференции Информационные средства и технологии – М.:Издательский дом МЭИ, 2012. - С.152-158.

Сведения об авторах

Еремеев Александр Павлович – д.т.н., проф., заведующий кафедрой Прикладной математики Московского энергетического института, 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14; e-mail: eremeev@apmat.ru

Область научных интересов: искусственный интеллект, принятие решений, экспертные системы

Куриленко Иван Евгеньевич – к.т.н., доцент кафедры Прикладной математики Московского энергетического института, 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14; e-mail: ivan@apmat.ru

Область научных интересов: искусственный интеллект, принятие решений, темпоральные логики, методы правдоподобных рассуждений