

Научная статья
УДК 004.832
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.7.005

РАССУЖДЕНИЯ С ТЕМПОРАЛЬНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

Александр Анатольевич Зуенко^{1✉}, Ольга Владимировна Фридман²

^{1, 2}Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹zuenko@iimm.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-7165-6651>

²ofridman@iimm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1897-4922>

Аннотация

Работа посвящена вопросам организации темпоральных рассуждений на основе методов удовлетворения ограничений. Приводятся определение задачи удовлетворения ограничений и понятие их совместности. Рассматриваются возможности представления задач планирования в виде сети интервальных ограничений. В качестве математического аппарата для формализации темпоральных рассуждений описывается интервальная алгебра Алена, основными операциями которой являются композиция и пересечение временных отношений. Приводится алгоритм достижения совместности по путям, реализующий один из видов локальной совместности на сети интервальных ограничений и использующий вычисления на основе операций интервальной алгебры. Представлен пример применения данного алгоритма. В заключении рассматриваются перспективы развития методов темпоральных рассуждений.

Ключевые слова:

задача удовлетворения ограничений, темпоральные рассуждения, сеть интервальных ограничений, интервальная алгебра Алена

Благодарности:

работа выполнена в рамках НИР «Разработка теоретических и организационно-технических основ информационной поддержки управления жизнеспособностью региональных критических инфраструктур Арктической зоны Российской Федерации» (регистрационный номер 122022800547-3).

Для цитирования:

Зуенко А. А., Фридман О. В. Рассуждения с темпоральными ограничениями // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 7. С. 43–51. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.7.005.

Original article

REASONING WITH TEMPORAL CONSTRAINTS

Aleksandr A. Zuenko^{1✉}, Olga V. Fridman²

^{1, 2}Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

¹zuenko@iimm.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-7165-6651>

²ofridman@iimm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1897-4922>

Abstract

The work deals with the organization of temporal reasoning basing on constraint satisfaction methods. The definition of the constraint satisfaction problem and the notion of constraint consistency are given. The possibilities of representation of a planning problem as an interval constraint network are considered. As a mathematical apparatus for the formalization of temporal reasoning, the Allen's interval algebra is described, which main operations are composition and the intersection of temporal relations. A path consistency algorithm is given that implements one of the types of local consistency on interval constraint network and uses computations based on operations of interval algebra. An example of the application of this algorithm is presented. In the conclusion the prospects for the development of methods of temporal reasoning are considered.

Keywords:

constraint satisfaction problem, temporal reasoning, interval constraint network, Allen's interval algebra

Acknowledgments:

the study was carried out within the framework of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic "Development of theoretical and organizational and technical foundations of information support for managing the viability of regional critical infrastructures of the Arctic zone of the Russian Federation" (registration number of the research topic 122022800547-3).

For citation:

Zuenko A. A., Fridman O. V. Reasoning with temporal constraints // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 7. P. 43–51. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.7.005.

Введение

В настоящее время существует большой интерес к разработке систем планирования, которые нацелены на решение практически значимых задач. Отходя от чисто иллюстративных областей, характерных для ранних работ (см. пример задачи планирования из мира блоков (для трех блоков), описанный в п. 3), исследователи обращаются к широкому кругу вопросов, включая рассуждения в неопределенных мирах, взаимодействие с процессами и событиями, находящимися вне прямого контроля агента, и управление механизмами в режиме реального времени. Одна из проблем, возникающих при расширении существующих подходов, — слабая выразительность отображения действий и событий внешнего мира.

В связи с вышеизложенным, в течение последних двадцати лет рассуждения с темпоральными ограничениями являются актуальной темой исследований. Важность этой темы была признана во многих областях компьютерных наук и искусственного интеллекта, например, в планировании [1], составлении расписаний [2], понимании естественного языка [3], представлении знаний [4], пространственно-временных базах данных и географических информационных системах [5], базах данных ограничений [6], медицинских информационных системах [7], компьютерной верификации [8], мультимедийных презентациях [9] и т. п.

Темпоральные рассуждения — это область, которая значительно выиграла от применения методов программирования в ограничениях, начиная с ранних работ Джеймса Ф. Аллена и др. [10–20]. Программирование с временными ограничениями (*Temporal Constraint Programming* — TCP) является одной из ключевых техник в поиске решений.

В работе [21] Джеймс Ф. Аллен предложил 13 основных отношений между временными интервалами, которые являются различными, исчерпывающими и качественными:

- различные, потому что никакая пара определенных интервалов не может быть связана более чем одним из отношений;
 - исчерпывающие, поскольку любая пара определенных интервалов описывается одним из соотношений;
 - качественные (а не количественные), потому что не учитываются числовые промежутки времени.
- Эти отношения и операции над ними образуют интервальную алгебру Аллена.

Интервальная алгебра Аллена

Тринадцать основных отношений Аллена приведены на рис. 1. Показаны все возможные отношения, которые могут иметь два определенных интервала. Каждое из них графически задается диаграммой, связывающей два определенных интервала a и b . Например, на первой диаграмме показано, что « a предшествует b » означает, что a заканчивается до того, как начинается b , и их разделяет промежуток; вторая диаграмма показывает, что « a встречается с b » означает, что b начинается, когда заканчивается a . Шесть пар отношений являются обратными. Например, обратное « a предшествует b » — это « b предшествует a »; всякий раз, когда верно некоторое отношение, верно и его обратное отношение. На рисунке 1 обратные отношения обозначены прописными буквами. Каждая пара символов обратного отношения состоит из строчных и прописных букв одной и той же буквы. Обычно отношения перечисляют в таком порядке: ($pmoFDseSdfOMP$).

Временные отношения между двумя событиями могут быть представлены как элементы булеана множества $pmoFDseSdfOMP$. Каждое из основных отношений, представленных на рис. 1, является отношением, как и все их комбинации. Полное отношение ($pmoFDseSdfOMP$) имеет место между двумя интервалами, о которых ничего не известно. Пустое отношение ($\emptyset$) является результатом некоторых операций над интервальными отношениями и необходимо для подалгебр интервальной алгебры Аллена.

Рассмотрим некоторые операции над отношениями, которые используются при построении планов.

Пересечение ($\cap$). Пересечение ($r \cap s$) двух отношений (r) и (s) является их теоретико-множественным пересечением; это отношение, состоящее из всех основных отношений, которые принадлежат как r , так и s .

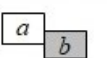
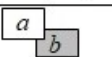
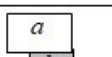
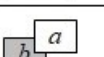
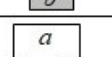
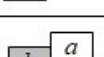
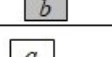
Отношение	Интерпретация	Обозначение	Отношение	Интерпретация	Обозначение
precedes		p	started by		S
meets		m	during		d
overlaps		o	finishes		f
finished by		F	overlapped by		O
contains		D	met by		M
starts		s	preceded by		P
equals		e			

Рис. 1. Тринадцать основных соотношений Аллена

Пересечение коммутативно и ассоциативно. Примеры пересечения отношений: $(pmo) \cap (FDseS) = ()$, $(pFsSf) \cap (pmoFD) = (pF)$, $(pmo) \cap (pmo) = (pmo)$.

Композиция ($\circ$). Композиция $(r \circ s)$ двух отношений (r) и (s) — это отношение между событиями a и c . Если существует b такое, что $a(r)b$ и $b(s)c$, тогда имеем $a(r \circ s)c$.

Вычисление результата операции композиции составных отношений можно осуществить, используя определения основных отношений, или путем вычисления композиции каждого базового отношения из r с каждым базовым отношением из s и последующего объединения результатов. На рис. 2 приведен фрагмент таблицы, где представлен результат операции композиции для любой пары основных отношений [21].

Композиция не коммутативна, но ассоциативна как слева, так и справа, распределяется по объединению. Приведем примеры: $(m) \circ m = p$, $(pm) \circ pm = p$, $(oFD) \circ oFDseS = (pmoFD)$.

Операция композиции является основой для вывода интервальных отношений между событиями.

Пусть $a_0(r_1)a_1, a_1(r_2)a_2, \dots, a_{(n-1)}(r_n)a_n$ — цепочка отношений между интервалами от a_0 до a_n , которая может быть использована для вывода следующего составного отношения между событиями a_0 и a_n : $a_0(r_1 \circ r_2 \circ \dots \circ r_n)a_n$.

	p	m	o	F	D	s	e	S	d
p	(p)	(p)	(p)	(p)	(p)	(p)	(p)	(p)	$(pmosd)$
m	(p)	(p)	(p)	(p)	(p)	(m)	(m)	(m)	(osd)
o	(p)	(p)	(pmo)	(pmo)	$(pmoFD)$	(o)	(o)	(o)	(osd)
F	(p)	(m)	(o)	(F)	(D)	(o)	(F)	(o)	(osd)
D	$(pmoFD)$	(oFD)	(oFD)	(D)	(D)	(oFD)	(D)	(oFD)	$concur$
s	(p)	(p)	(pmo)	(pmo)	$(pmoFD)$	(s)	(s)	(s)	(d)
e	(p)	(m)	(o)	(F)	(D)	(s)	(e)	(s)	(d)
S	$(pmoFD)$	(oFD)	(oFD)	(D)	(D)	(seS)	(S)	(seS)	(dfO)
d	(p)	(p)	$(pmosd)$	$(pmosd)$	$full$	(d)	(d)	$(dfOMP)$	(d)

Рис. 2. Фрагмент таблицы композиции любых двух основных отношений

Для набора отношений на интервалах можно вывести самую сильную подразумеваемую связь между a_0 и a_n , исследуя все возможные цепочки вывода между a_0 и a_n выполнив пересечение всех результирующих композиций цепочек отношений. Каждая цепочка выводов накладывает ограничение на отношение, поэтому выводы объединяются путем их пересечения. Количество возможных цепочек растет очень быстро по мере увеличения количества отношений в коллекции.

Темпоральные задачи удовлетворения ограничений

Начало исследований, посвященных темпоральным CSP, было положено Джеймсом Алленом в его основополагающей статье [21]. Он предложил представлять качественные временные знания с помощью сетей интервальных ограничений. Сеть интервальных ограничений (рис. 3) представляет собой ориентированный граф, узлы которого — интервалы и ребра — помечены векторами, задающими ту или иную комбинацию из основных 13 бинарных качественных интервальных отношений.

Введем некоторые определения и обозначения, необходимые при дальнейшем изложении. Используем $dom(x_i)$ для обозначения области определения переменной x_i .

Определение 1. Пусть C — множество ограничений на переменные $x_1, \dots, x_n$. Множество решений C , обозначаемое $Sol(C)$, представляет собой следующее множество:

$$\{(v_1, \dots, v_n) \in dom(x_1) \times \dots \times dom(x_n) : \text{для любого } c \in C, (v_1, \dots, v_n) \text{ удовлетворяет условию } c\}.$$

Каждый элемент $Sol(C)$ называется решением множества ограничений C .

Определение 2. Набор ограничений называется совместным или удовлетворяемым тогда и только тогда, когда множество его решений непусто.

Определим стандартные понятия i -совместности, строгой i -совместности и глобальной совместности (или разложимости).

Пусть C — множество ограничений на переменные $x_1, \dots, x_n$. Для любого i такого, что $1 \leq i \leq n$, обозначим множество ограничений в C как $C(x_1, \dots, x_i)$, включающих только переменные $x_1, \dots, x_i$.

Определение 3. Пусть C — множество ограничений на переменные $x_1, \dots, x_n$ и $1 \leq i \leq n$. C называется i -совместным тогда и только тогда, когда для каждого множества $i - 1$ различных переменных $x_1, \dots, x_{i-1}$, все присваивания $u = \{x_1 \leftarrow v_1, \dots, x_{i-1} \leftarrow v_{i-1}\}$ такие, что $v_1 \in dom(x_1), \dots, v_{i-1} \in dom(x_{i-1})$, удовлетворяют ограничениям $C(x_1, \dots, x_{i-1})$, и для каждой переменной x_i , отличной от $x_1, \dots, x_{i-1}$, существует значение $v_i \in dom(x_i)$ такое, что u можно расширить до присваивания $u' = u \cup \{x_i \leftarrow v_i\}$, удовлетворяющего ограничениям $C(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i)$. Говорят, что C строго i -совместно, если оно j -совместно для каждого j , $1 \leq j \leq i$. C называется глобально совместным или разложимым тогда и только тогда, когда оно i -совместно для каждого i , $1 \leq i \leq n$.

Теперь определим стандартное понятие минимального набора ограничений. Минимальные наборы ограничений особенно важны для темпоральных CSP, потому что они делают явными все подразумеваемые бинарные ограничения. В сетевом представлении бинарных ограничений понятие минимального набора ограничений эквивалентно понятию минимальной сети.

Определение 4. Множество ограничений C будет называться минимальным, если любое означивание двух переменных, которое удовлетворяет ограничениям, включающим только эти переменные, может быть расширено до решения C .

В темпоральных CSP переменные используются для представления временных элементов (точек или интервалов), домены представляют собой временные структуры (обычно Z , Q или R для временных точек и набор интервалов над Z , Q или R для временных интервалов), а ограничения представляют собой временные отношения.

Следуя по статье [21], многие исследователи сосредоточились на CSP (или, что то же самое, на сетях ограничений) как на средстве представления и рассуждений о темпоральных знаниях.

Рассмотрим следующий пример [7].

Пример 1. «Фред читал газету во время завтрака. Он отложил газету и допил кофе. После завтрака он пошел гулять».

Если мы используем «завтрак», «бумагу», «прогулку» и «кофе», чтобы описать соответствующие временные интервалы, то вся информация о действиях Фреда описывается сетью, представленной на рис. 3.

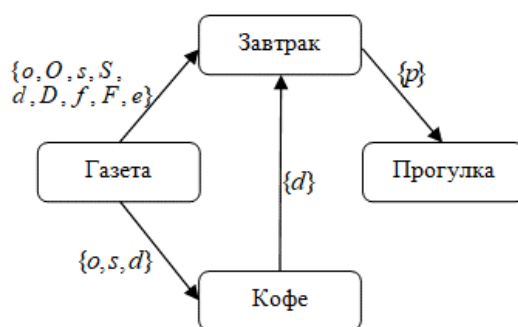


Рис. 3. Пример сети интервальных ограничений для задачи о действиях Фреда

Приведем еще один пример [22], здесь, в отличие от первого, используются не только качественные, но и метрические временные ограничения.

Пример 2. Джон и Фред работают в компании, имеющей локальный и главный офисы в Лос-Анджелесе. Обычно они работают в местном офисе, и в этом случае Джону требуется менее 20 мин, а Фреду — 15–20 мин, чтобы добраться до работы. Дважды в неделю Джон работает в главном офисе, и в этом случае его дорога на работу занимает не менее 60 мин. Сегодня Джон ушел из дома с 7:00 до 7:05, а Фред приехал на работу с 7:50 до 7:55. Также известно, что Фред и Джон встретились на светофоре по дороге на работу. Пусть x_0 будет вещественной переменной, обозначающей «начало времени» (снова 7:00). Пусть $J = [x_1, x_2]$ — интервал времени, соответствующий поездке Джона на работу, а $F = [x_3, x_4]$ — интервал времени, соответствующий поездке Фреда на работу, где x_1, x_2, x_3, x_4 — действительные переменные, представляющие конечные точки интервала. На рисунке 4 показана сеть ограничений, фиксирующая временные отношения в приведенном выше тексте.

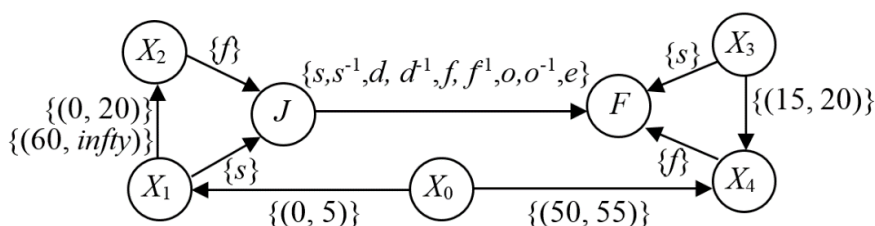


Рис. 4. Пример сети с качественными и метрическими временными ограничениями

Алгоритмы распространения темпоральных ограничений

Алгоритмы, относящиеся к классу алгоритмов локальной совместности или просто совместности, преобразуют заданную задачу с ограничениями в эквивалентную задачу, выводя новые ограничения. Сами по себе новые ограничения не обязательно приводят к решению задачи удовлетворения ограничений, но способны существенно сократить пространство поиска решений; эта процедура сужает набор частных решений.

В статье [21] Аллен представил алгоритм распространения ограничений для сетей интервальных ограничений, основанный на понятии совместности по путям (*Path Consistency*), который выполняется за время $O(n^3)$, где n — количество интервалов (узлов) в сети.

При заданном ТСР для n переменных его матрица ограничений M представляет собой матрицу размером $n \times n$, элементами которой являются M_{ij} — ограничения относительно пары переменных (x_i, x_j) (в каждой временной структуре можно свести каждую ТСР к эквивалентной, которая имеет ровно одно ограничение между каждой парой переменных). Решением матрицы ограничений M является кортеж $(a_1, \dots, a_n)$ такой, что для каждого $i, j \leq n$, (a_i, a_j) удовлетворяет ограничению M_{ij} . Если для некоторых $i, j \leq n$, получено $M_{ij} = \emptyset$, тогда делается вывод, что ТСР является несовместной.

Представим алгоритм распространения ограничений для сетей интервальных ограничений, основанный на понятии совместности по путям:

```

1: function LRPC (var  $M$  : matrix): boolean
2: repeat
3:  $M \leftarrow M^2$ 
4: until  $M = M^2$ 
5: return  $M \neq \emptyset$ 

```

Операции пересечения и композиции матриц M и N размерностью $n \times n$ определяются следующим образом:

$$(M \cap N)_{ij} := M_{ij} \cap N_{ij},$$

$$(M \circ N)_{ij} := \bigcap_{k=1}^n M_{ik} \circ N_{kj}$$

Операция возведения в степень M^n определяется по индукции: $M^1 := M$, $M^{n+1} := M^n \circ M$.

Возвращаясь к интервальной сети ограничений, представленной на рис. 3, исходя из описанного алгоритма сначала исследуются все возможные цепочки вывода между временными интервалами, представленными в узлах сети, затем находится пересечение всех результирующих композиций цепочек отношений для одинаковых пар узлов.

Проиллюстрируем работу алгоритма, пользуясь данными примера 1 (рис. 3) для двух цепочек вывода.

Из узла «Газета» в узел «Завтрак» можно попасть напрямую (временное отношение $\{o, O, s, S, d, D, f, F, e\}$) или через промежуточный узел «Кофе». Найдем композицию временных отношений, соответствующими дугам «Газета» — «Кофе» ($\{o, s, d\}$) и «Кофе» — «Завтрак» ($\{d\}$). Для этого пользуясь таблицей композиции (рис. 2) найдем попарную композицию элементов временных отношений. Получим: $\{o, s, d\} \circ d = \{o, s, d\} \cup \{d\} \cup \{d\} = \{o, s, d\}$. Теперь согласно приведенному выше алгоритму найдем пересечение временных отношений $\{o, O, s, S, d, D, f, F, e\}$ (соответствует пути «Газета» — «Завтрак») и $\{o, s, d\}$ (соответствует пути «Газета» — «Кофе» — «Завтрак»), которое будет равно $\{o, s, d\}$. Таким образом, временное отношение $\{o, O, s, S, d, D, f, F, e\}$ сузилось за счет исключения части базовых отношений, что позволяет уточнить расположение во времени рассматриваемых временных интервалов относительно друг друга.

Заключение

Применение темпоральных рассуждений обеспечивает единую основу для изучения многих различных структур планирования, разработанных на сегодняшний день. Так, рассуждения в традиционных системах планирования могут быть прямо преобразованы в специализированный процесс логического вывода на основе темпоральной логики.

Развитие и применение темпоральных рассуждений в планировании обусловлено тем, что:

- 1) действия имеют продолжительность — очень немногие действия выполняются мгновенно;
- 2) одновременно может выполняться более одного действия;
- 3) сложные планы действий могут включать сложные ограничения на порядок действий;
- 4) действия могут взаимодействовать с внешними событиями вне прямого контроля агента.

Из этих проблем наиболее важной является проблема одновременного выполняющихся действий. Без рассмотрения одновременно происходящих действий круг проблем, которые можно решить, очень ограничен специализированными ситуациями такими, как компьютерное программирование и игры. Нет смысла изучать планирование в динамично меняющемся мире, если планировщик не может действовать, пока происходит какое-то другое событие.

В исследовании [23] рассмотрены работы по темпоральным CSP начиная с ранних статей таких, как [17–21]. Ожидается, что исследования темпоральных CSP будут продолжаться в ближайшие годы из-за их важности для реальных приложений. Вероятнее всего, приоритетными будут следующие направления разработки:

- новые алгоритмические методы решения временных ограничений, например, рандомизированные алгоритмы [24] или локальный поиск [22, 25];
- теория и алгоритмы объединения темпоральных CSP и концепций оптимизации [26, 27];
- теория и алгоритмы для количественных формул с временными ограничениями [28–30];
- исследование управляемости для классов, где на этот вопрос не дан полный ответ, например, [22];
- интеграция с пространственными CSP для работы с пространственно-временными сценариями [5].

Список источников

1. Allen J., Kautz H., and Pelavin R., editors. Reasoning About Plans. Morgan Kaufmann, 1991.
2. Cesta A., Oddi A., and Smith S. F. A constraint-based method for project scheduling with time windows // Journal of Heuristics. 2002. № 8(1). P. 109–136.
3. Schubert L. and Hwang C. Episodic logic meets Little Red Riding Hood: A comprehensive, natural representation for language understanding. In L. Iwanska and S. Shapiro, editors, Natural Language Processing and Knowledge Representation: Language for Knowledge and Knowledge for Language. MIT/AAAI Press, 2000. P. 111–174.
4. Mylopoulos J., Borgida A., Jarke M., and Koubarakis M. Telos: A Language for Representing Knowledge About Information Systems // ACM Transactions on Information Systems. 1990. № 8(4). P. 325–362.
5. Koubarakis M., Sellis T. K., Frank A. U., Grumbach S., Güting R. H., Jensen C. S., Lorentzos N. A., Manolopoulos Y., Nardelli E., Pernici B., Schek H.-J., Scholl M., Theodoulidis B., and Tryfona N. editors. Spatio-Temporal Databases: The CHOROCHRONOS Approach, volume 2520 of Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2003.
6. Revesz P. Introduction to Constraint Databases. Springer, 2002.
7. P. van Beek. Reasoning About Qualitative Temporal Information // Artificial Intelligence, 1992. № 58. P. 297–326.
8. Alur R. Timed automata. CAV, 1999. P. 8–22.
9. Balbiani P., Condotta J.-F., and Ligozat G. Reasoning about generalized intervals: Horn representability and tractability. TIME, 2000. P. 23–30.
10. Balbiani P., Condotta J.-F., and Ligozat G. On the consistency problem for the INDU calculus. TIME, 2003. P. 203–211.
11. Cohen D. A., Jeavons P., and Koubarakis M. Tractable disjunctive constraints. CP, 1997. P. 478–490.
12. Console L. and Terenziani P. Efficient processing of queries and assertions about qualitative and quantitative temporal constraints // Computational Intelligence, 1999. № 15(4). P. 442–465.
13. Cormen T., Leiserson C., and Rivest R. Introduction to Algorithms. MIT Press, 1990.
14. Dean T. Using temporal hierarchies to efficiently maintain large temporal databases // Journal of the ACM, 1989. № 36(4). P. 687–718.
15. Dean T. and McDermott D. Temporal Data Base Management // Artificial Intelligence, 1987. № 32(1). P. 1–55.
16. Dechter R. Constraint Processing. Morgan Kaufmann, 2003.
17. Vilain M. and Kautz H. Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning. AAAI, 1986. P. 377–382.
18. Dean T. and McDermott D. Temporal Data Base Management // Artificial Intelligence, 1987. № 32(1). P. 1–55.
19. Vilain M., Kautz H., and Van Beek P. Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning: A Revised Report. editors D. Weld and J. de Kleer. Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufmann, 1989. P. 373–381.
20. Dechter R., Meiri I., and Pearl J. Temporal Constraint Networks // Artificial Intelligence, 1991. № 49(1–3). P. 61–95.
21. Allen J. Maintaining Knowledge about Temporal Intervals // Communications of the ACM, 1983. № 26(11). P. 832–843.

22. Meiri I. Combining qualitative and quantitative constraints in temporal reasoning // *Artificial Intelligence*, 1996. № 87(1–2). P. 343–385.
23. Handbook of Constraint Programming Edited by F. Rossi, P. Van Beek and T. Walsh. Elsevier. 2006.
24. Kumar T. K. S. On the tractability of restricted disjunctive temporal problems. *ICAPS*, 2005. P. 110–119.
25. Beaumont M., Thornton J., Sattar A., and Maher M. J. Solving over-constrained temporal reasoning problems using local search. *PRICAI*, 2004. P. 134–143.
26. Kumar T. K. S. A polynomial-time algorithm for simple temporal problems with piecewise constant domain preference functions. *AAAI*, 2004. P. 67–72.
27. Liffiton M. H., Moffitt M. D., Pollack M. E., and Sakallah K. A. Identifying conflicts in overconstrained temporal problems. *IJCAI*, 2005. P. 205–211.
28. Ladkin P. Satisfying First-Order Constraints About Time Intervals. *AAAI*, 1988. P. 512–517.
29. Koubarakis M. The Complexity of Query Evaluation in Indefinite Temporal Constraint Databases // *Theoretical Computer Science, Special Issue on Uncertainty in Databases and Deductive Systems*, Editor: L. V. S. Lakshmanan. 1997. № 171. P. 25–60.
30. Koubarakis M. and Skiadopoulos S. Querying Temporal and Spatial Constraint Networks in PTIME // *Artificial Intelligence*, 2000. № 123(1–2). P. 223–263.

References

1. Allen J., Kautz H., and Pelavin R., editors. Reasoning About Plans. Morgan Kaufmann, 1991.
2. Cesta A., Oddi A., and Smith S. F. A constraint-based method for project scheduling with time windows. *Journal of Heuristics*, 2002, no. 8(1), pp. 109–136.
3. Schubert L. and Hwang C. Episodic logic meets Little Red Riding Hood: A comprehensive, natural representation for language understanding. In L. Iwanska and S. Shapiro, editors, *Natural Language Processing and Knowledge Representation: Language for Knowledge and Knowledge for Language*. MIT/AAAI Press, 2000, pp. 111–174.
4. Mylopoulos J., Borgida A., Jarke M., and Koubarakis M. Telos: A Language for Representing Knowledge About Information Systems. *ACM Transactions on Information Systems*, 1990, no. 8(4), pp. 325–362.
5. Koubarakis M., Sellis T. K., Frank A. U., Grumbach S., Güting R. H., Jensen C. S., Lorentzos N. A., Manolopoulos Y., Nardelli E., Pernici B., Schek H.-J., Scholl M., Theodoulidis B., and Tryfona N. editors. *Spatio-Temporal Databases: The CHOROCHRONOS Approach*, vol. 2520 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2003.
6. Revesz P. Introduction to Constraint Databases. Springer, 2002.
7. P. van Beek. Reasoning About Qualitative Temporal Information. *Artificial Intelligence*, 1992, no. 58, pp. 297–326.
8. Alur R. Timed automata. *CAV*, 1999, pp. 8–22.
9. Balbiani P., Condotta J.-F., and Ligozat G. Reasoning about generalized intervals: Horn representability and tractability. *TIME*, 2000, pp. 23–30.
10. Balbiani P., Condotta J.-F., and Ligozat G. On the consistency problem for the INDU calculus. *TIME*, 2003, pp. 203–211.
11. Cohen D. A., Jeavons P., and Koubarakis M. Tractable disjunctive constraints. *CP*, 1997, pp. 478–490.
12. Console L. and Terenziani P. Efficient processing of queries and assertions about qualitative and quantitative temporal constraints. *Computational Intelligence*, 1999, no. 15(4), pp. 442–465.
13. Cormen T., Leiserson C., and Rivest R. Introduction to Algorithms. MIT Press, 1990.
14. Dean T. Using temporal hierarchies to efficiently maintain large temporal databases. *Journal of the ACM*, 1989, no. 36(4), pp. 687–718.
15. Dean T. and McDermott D. Temporal Data Base Management. *Artificial Intelligence*, 1987, no. 32(1), pp. 1–55.
16. Dechter R. Constraint Processing. Morgan Kaufmann, 2003.
17. Vilain M. and Kautz H. Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning. *AAAI*, 1986, pp. 377–382.
18. Dean T. and McDermott D. Temporal Data Base Management. *Artificial Intelligence*, 1987, no. 32(1), pp. 1–55.

19. Vilain M., Kautz H., and Van Beek P. Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning: A Revised Report. editors D. Weld and J. de Kleer. Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufmann, 1989, pp. 373–381.
20. Dechter R., Meiri I., and Pearl J. Temporal Constraint Networks. *Artificial Intelligence*, 1991, no. 49(1–3), pp. 61–95.
21. Allen J. Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. *Communications of the ACM*, 1983, no. 26(11), pp. 832–843.
22. Meiri I. Combining qualitative and quantitative constraints in temporal reasoning. *Artificial Intelligence*, 1996, no. 87(1–2), pp. 343–385.
23. Handbook of Constraint Programming Edited by F. Rossi, P. Van Beek and T. Walsh. Elsevier. 2006.
24. Kumar T. K. S. On the tractability of restricted disjunctive temporal problems. ICAPS, 2005, pp. 110–119.
25. Beaumont M., Thornton J., Sattar A., and Maher M. J. Solving over-constrained temporal reasoning problems using local search. PRICAI, 2004, pp. 134–143.
26. Kumar T. K. S. A polynomial-time algorithm for simple temporal problems with piecewise constant domain preference functions. AAAI, 2004, pp. 67–72.
27. Liffiton M. H., Moffitt M. D., Pollack M. E., and Sakallah K. A. Identifying conflicts in overconstrained temporal problems. IJCAI, 2005, pp. 205–211.
28. Ladkin P. Satisfying First-Order Constraints About Time Intervals. AAAI, 1988, pp. 512–517.
29. Koubarakis M. The Complexity of Query Evaluation in Indefinite Temporal Constraint Databases // *Theoretical Computer Science, Special Issue on Uncertainty in Databases and Deductive Systems*, Editor: L. V. S. Lakshmanan, 1997, no. 171. pp. 25–60.
30. Koubarakis M. and Skiadopoulos S. Querying Temporal and Spatial Constraint Networks in PTIME. *Artificial Intelligence*, 2000, no. 123(1–2), pp. 223–263.

Информация об авторах

А. А. Зуенко — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;
О. В. Фридман — кандидат технических наук, ведущий инженер.

Information about the authors

A. A. Zuenko — Candidate of Science (Tech.), Leading Research Fellow;
O. V. Fridman — Candidate of Science (Tech.), Leading Engineer.

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 01.10.2023; принята к публикации 08.11.2023.
The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 01.11.2023; accepted for publication 08.11.23.