

удк 007.5

Т. С. Тарханов

Автоматический синтез плана целенаправленного поведения на основе разрешения конфликтов

Аннотация. В статье представлен новый алгоритм, решающий задачу интеллектуального планирования при классических допущениях. Алгоритм использует подход, основанный на поиске в пространстве планов. Синтез планов осуществляется с помощью нового метода разрешения конфликтов путём подстановки действий.

Ключевые слова и фразы: планирование, искусственный интеллект.

1. Введение

В области динамических интеллектуальных систем одной из наиболее сложных является задача автоматического синтеза плана.

Здесь эта задача рассматривается при так называемых классических допущениях [6], а именно, в условиях:

- (1) статичности среды, изменения в которой возникают лишь в результате действий управляемой системы;
- (2) полной наблюдаемости среды;
- (3) детерминированности действий управляемой системы;
- (4) недопустимости параллельного исполнения действий.

Эта задача EXPSPACE-полна [4].

Актуальность создания эффективных алгоритмов решения задачи планирования определяется тем, что синтез плана является одним из основных этапов моделирования целенаправленного поведения интеллектуальных систем [1, 2, 8].

Существуют различные подходы к решению задачи планирования при классических допущениях [9].

В этой статье представлен новый алгоритм, решающий задачу интеллектуального планирования при классических допущениях, основанный на поиске в пространстве планов. Алгоритм использует новый метод синтеза планов — *разрешение конфликтов путём подстановки действий*.

2. Постановка задачи

Напомним, определение домена планирования P и задачи планирования T в соответствии с [5].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. $P = \langle s_0, \Sigma R \rangle$ — домен планирования, где s_0 — начальное состояние, ΣR — конечное множество действий.
 $T = \langle P, G \rangle$ — задача планирования с классическими допущениями, где G — цель, заданная множеством предикатов.

Во избежание трудностей, изложенных в [7], ограничим язык описания домена планирования P так, что в нём будут использованы лишь элементарные ППФ. Далее будем рассматривать разрешимый случай планирования [3], то есть в описании действий не допускаются функциональные символы. Кроме того, для простоты изложения будем полагать, что все действия в ΣR являются полностью конкретизированными. Суммируем введённые ограничения в следующем определении.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2. Факт f — это элементарная ППФ f ИППП без функциональных символов и без переменных, либо отрицание $f - \bar{f}$, либо дизъюнкция $-f \vee \bar{f}$. Факты f и $f \vee \bar{f}$ будем называть дополнением факта f .

Модифицируем понятие действия, данное в [5].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 3. Полное предусловие действия $\alpha \in \Sigma R$ $pre(\alpha) = \{C(\alpha) \cup AD^V(\alpha)\}$, где $AD^V(\alpha)$ — это множество дизъюнкций вида $f \vee \bar{f}$, формируемое так: для каждого факта $f(\bar{f})$ такого, что $(f \in A(\alpha) \vee f \in D(\alpha)) \wedge f(\bar{f}) \notin C(\alpha)$ добавить дизъюнкцию $f \vee \bar{f}$ в $AD^V(\alpha)$. Здесь C — предусловие действия α , A — список добавлений действия α , D — список удалений действия α .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 4. Полный эффект действия $\alpha \in \Sigma R$ $eff(\alpha) = \{A(\alpha) \cup not D(\alpha) \cup C^+\}$, где C^+ формируется так: для каждого факта $f(\bar{f})$ такого, что $f(\bar{f}) \in C(\alpha) \wedge f \notin A(\alpha) \wedge f \notin D(\alpha)$, добавить $f(\bar{f})$ в C^+ . Здесь not — операция отрицания, применяемая к каждой формуле в $D(\alpha)$.

Замечание. Дизъюнктивный факт $f \vee \bar{f}$ может содержаться в $pre(\alpha)$, но никогда в $eff(\alpha)$, где α — некоторое действие из ΣR .

Сформируем множество SEQ всевозможных последовательностей действий из ΣR , причём любое действие из ΣR может встречаться в некоторой последовательности $seq \in SEQ$ произвольное количество раз. Будем говорить, что пара действий $\alpha \in seq_1$ и $\beta \in seq_2$ подобны, если $pre(\alpha) = pre(\beta)$ и $eff(\alpha) = eff(\beta)$, где seq_1 и seq_2 — произвольные последовательности из SEQ . Подобие действий обозначим: $\alpha \sim \beta$.

Замечание. Предположим, что в некоторой последовательности $seq \in SEQ$ имеет место: $\alpha < \chi$. Однако, возможно, что существует действие $\beta \in seq$ такое, что $\alpha < \beta$ и $\beta < \chi$.

В определении 1 каждый факт начального состояния s_0 — это результат выполнения некоторых действий в прошлом. Также можно предположить, что достижение целевых фактов из G требуется для выполнения некоторых более важных действий в будущем. Введём для этих гипотетических множеств действий следующие обозначения — соответственно $start$ и $finish$. Пополним множество SEQ этими действиями.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 5. Действие $start$ таково, что $pre(start) = \emptyset$, $eff(start) = s_0$. Действие $finish$ таково, что $pre(finish) = G$, $eff(finish) = \emptyset$. Добавим действие $start$ в начало каждой последовательности множества SEQ , а $finish$ в конец каждой такой последовательности. Последовательность $(start, finish) \in SEQ$ будем называть начальной, и обозначать $init$.

Введём отношения между действиями в последовательности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 6. Взаимовлияние по факту f между действиями $\alpha, \chi \in seq$, где $\alpha < \chi$, имеет место, если:

- 1) $f(\bar{f}) \in eff(\alpha)$ либо $f(\bar{f}) \in pre(\alpha)$
- 2) $f(\bar{f}) \in eff(\chi)$ либо $f(\bar{f}) \in pre(\chi)$
- 3) не существует действия $\beta \in seq$ такого, что $\alpha < \beta < \chi$ и $(f(\bar{f}) \in pre(\beta))$ либо $(f(\bar{f}) \in eff(\beta))$.

Взаимовлияние будем обозначать: $\alpha \uparrow f \uparrow \chi$. $INT(seq)$ — множество взаимовлияний последовательности seq .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 7. Конфликт по факту f между действиями $\alpha, \chi \in seq$ — это взаимовлияние $\alpha \uparrow f \uparrow \chi$ такое, что:
либо (1) $f \in eff(\alpha) \wedge \bar{f} \in pre(\chi) \wedge (f \vee \bar{f}) \notin pre(\chi)$,
либо (2) $\bar{f} \in eff(\alpha) \wedge f \in pre(\chi) \wedge (f \vee \bar{f}) \notin pre(\chi)$.

Конфликт будем обозначать $\alpha \uparrow f \downarrow \chi$. $CF(seq)$ — множество конфликтов, в которых состоят действия последовательности seq . Последовательность seq будем называть бесконфликтной, если $CF(seq) = \emptyset$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 8. *Согласие по факту f между действиями $\alpha, \chi \in seq$ — это взаимовлияние $\alpha \uparrow f \downarrow \chi$ такое, что:*
 либо (1) $f \in eff(\alpha) \vee (f \in pre(\chi) \vee (f \vee \bar{f}) \in pre(\chi))$,
 либо (2) $\bar{f} \in eff(\alpha) \vee (\bar{f} \in pre(\chi) \vee (f \vee \bar{f}) \in pre(\chi))$.
 Согласие будем обозначать $\alpha \uparrow f \uparrow \chi$.

Сформулируем критерий наличия плана.

Утверждение 1. (Критерий наличия плана.) Некоторая последовательность действий $seq \in SEQ$ является планом, если и только если $CF(seq) = \emptyset$.

Доказательство: Из $CF(seq) = \emptyset$ следует, что: 1) применение любого действия [5] из seq доставляет предусловие одного из последующих действий; 2) применение любого действия из seq не удаляет предусловия одного из последующих действий. Так как в конце seq по определению 5 расположено действие finish, следовательно, в последнем состоянии будет иметь место G. Утверждение доказано.

Теперь можно сформулировать задачу планирования как задачу поиска в множестве SEQ такой последовательности действий seq , что $CF(seq) = \emptyset$.

3. Преобразования последовательностей действий и взаимовлияний

Последовательности действий можно преобразовывать путём добавления или удаления действий. Вначале определим отношения гомоморфизма на последовательностях.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 9. *Определим гомоморфизм $h : SEQ \rightarrow SEQ$ следующим образом:*

- 1) $\forall \alpha \in seq \exists \alpha' \in seq' \alpha \sim \alpha'$
- 2) $\forall \alpha, \beta \in seq \exists \alpha', \beta' \in seq'$ такие, что из $\alpha \sim \alpha'$ и $\beta \sim \beta'$ и $\alpha < \beta$ следует $\alpha' < \beta'$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 10. *Последовательности seq_1 и seq_2 изоморфны, если: $h_1(seq_1) = seq_2$ и $h_2(seq_2) = seq_1$. Изоморфизм seq_1 и seq_2 будем обозначать: $seq_1 \cong seq_2$.*

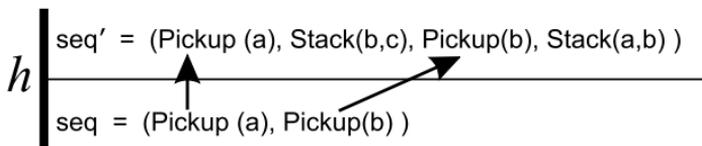


Рис. 1. Пример гомоморфизма двух последовательностей

Определим теперь отображение g , действующее из $\hbar(SEQ) \rightarrow SEQ$ следующим образом: если $\hbar(seq) = seq'$ таково, что $h(\alpha) = \alpha'$, то $g(\hbar(seq))$ элементу α' ставит в соответствие α . $g(\hbar(seq))$ в некотором смысле можно рассматривать как частичное отображение из $SEQ \rightarrow SEQ$, с другой стороны — как гомоморфизм из $\hbar(SEQ) \rightarrow SEQ$, то есть сужение отображения, обратного \hbar (которого в общем случае не существует) на $\hbar(seq) \subset SEQ$, поэтому будем обозначать его через \hbar^{-1} .

Элементарными операциями преобразования последовательности являются добавление или удаление одного произвольного действия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 11. *Добавление действия β' в последовательность seq , $Insert(seq, \beta')$, — это недетерминированная операция, возвращающая последовательность $seq' \in SEQ' \subset SEQ$ такую, что:*

- 1) $\hbar(seq') = seq'$;
- 2) любое действие $\mu' \in seq'$ и $\mu' \neq \beta'$ таково, что $\hbar^{-1}(\mu') = \mu$, где μ — некоторое действие в seq .

В последовательность seq можно добавить или удалить множество действий.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 12. *Добавление множества действий B^+ в некоторую последовательность seq — это суперпозиция операций добавления действий из B^+ в seq :*

$Insert(\dots(Insert(Insert(seq, \beta'_1), \beta'_2)), \dots, \beta'_n)$, где β'_k — некоторое добавляемое действие из B^+ , $k = 1..n$ — порядковый номер действия β' в B^+ .

Последовательность seq может быть преобразована за несколько шагов в некоторую последовательность seq' .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 13. *Пошаговое преобразование seq в seq' — это последовательность $\langle seq_0, seq_1, \dots, seq_\ell \rangle$, в которой любая последовательность действий seq_t ($t = 1..l$) получена из seq_{t-1} путем добавления или удаления действий, где $seq_0 = seq, seq_\ell = seq'$. Индекс t некоторой последовательности действий seq_t является номером шага преобразования.*

В результате добавления или удаления действия в/из последовательности seq , некоторое взаимовлияние $\alpha \uparrow f \downarrow \chi \in INT(seq)$ может

оказаться преобразованным. Существуют различные типы преобразования. Однако для наших целей рассмотрим лишь так называемое *обычное преобразование взаимовлияния путём добавления действия*.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 14. (Обычное) преобразование взаимовлияния $int = \alpha \uparrow f \downarrow \chi \in INT(seq)$ в $int' = \rho \uparrow f \downarrow \phi \in INT(seq')$ — это добавление такого действия β' в последовательность $seq, seq' = Insert(seq, \beta')$, что:

либо 1) $\bar{h}(\alpha) = \rho'$ и $\beta' = \phi'$

либо 2) $\bar{h}(\chi) = \phi'$ и $\beta' = \rho'$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 15. Преобразование некоторого множества взаимовлияний — это добавление (удаление) множества действий, преобразующих эти взаимовлияния.

4. Синтез планов на основе разрешения конфликтов

Напомним, что в соответствии с критерием наличия плана (утверждение 1), план не содержит конфликтов. Следовательно, преобразование последовательности, при котором происходит преобразование конфликтного взаимовлияния в пару согласованных взаимовлияний может быть использовано в поиске плана.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 16. Разрешение конфликта $cf = \alpha \uparrow f \downarrow \chi \in CF(seq)$ — это обычное преобразование взаимовлияния $\alpha \uparrow f \downarrow \chi \in INT(seq)$ таким действием β' , что: $(f \in pre(\beta') \vee (f \vee \bar{f}) \in pre(\beta')) \wedge \bar{f} \in eff(\beta')$. Действие β' будем называть действием, разрешающим конфликт cf , или просто разрешающим действием.

Заметим, что существуют различные варианты разрешения некоторого конфликта, в силу существования: а) конечного множества действий, способных разрешить конфликт, б) конечного множества позиций, в которые можно было бы поместить разрешающее действие.

Поскольку заранее не известно, какой из вариантов разрешения конфликтов приведёт к плану, то необходимо учитывать все варианты разрешения всех конфликтов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 17. Разрешение всех конфликтов $CF(seq)$ будем называть полным разрешением конфликтов в последовательности seq и обозначать: $ResolveAll(seq)$.

Множество последовательностей, возвращаемое операцией $ResolveAll(seq)$ обозначим RES^{seq} .

Таким образом, синтез плана на основе разрешения конфликтов — это такое пошаговое полное разрешение конфликтов исходной последовательности seq , что результирующая последовательность seq' содержит лишь согласия.

Сформулируем и докажем теорему, которая показывает возможность использования операции полного разрешения конфликтов для поиска планов.

Пусть имеется последовательность seq , не являющаяся планом, и последовательность $plan$, являющаяся конкретным планом.

Теорема 1. Полное разрешение конфликтов последовательности seq такое, что $\bar{h}(seq) = plan$ и $seq \neq plan$ возвращает одну и только одну последовательность $res \in RES^{seq} \subset SEQ$ такую, что $\bar{h}(res) = plan$, либо $res \cong plan$.

Доказательство:

А. Докажем существование последовательности действий res , такой что $\bar{h}(res) = plan$. Рассмотрим произвольный конфликт $cf = \alpha \uparrow f \downarrow \chi \in CF(seq)$.

1. В соответствии с основным положением $\bar{h}(seq) = plan$, существуют действия $\bar{h}(\alpha) = \alpha'$, $\bar{h}(\chi) = \chi'$, где $\alpha', \chi' \in plan$. Напомним, что в плане не существует конфликтных действий. Следовательно, должно существовать некоторое действие β' , не позволяющее конфликтовать паре действий $\bar{h}(\alpha) = \alpha'$ и $\bar{h}(\chi) = \chi'$, такое, что: $\alpha' < \beta' < \chi' \in plan$.

2. По определению полного разрешения конфликтов некоторая последовательность $res \in RES^{seq}$ содержит действие $\beta'' \in res$, которое подобно $\beta' \in plan$ и является действием, разрешающим конфликт $cf = \alpha \uparrow f \downarrow \chi \in CF(seq)$. Заметим, в множестве результирующих последовательностей RES^{seq} имеются всевозможные варианты расположения β'' между действиями $\bar{h}(\alpha'') = \alpha$ и $\bar{h}(\chi'') = \chi$, где $\alpha'', \chi'' \in res$.

3. а) для любого действия $\mu'' \neq \beta'' \in res$ верно, что $h^{-1}(\mu'') = \mu \in seq$,

б) для любого действия $\mu \in seq$ верно, что $\bar{h}(\mu) = \mu' \in plan$,

в) из а) и б) следует что, $\mu'' \sim \mu'$.

4. Количество альтернативных расположений $\beta' \in plan$ среди действий $plan$ 'а, подобных действиям из res (имеется в виду подобие, выведенное в 3 пункте: $\mu'' \sim \mu'$) и между действиями $\bar{h}(\alpha) = \alpha'$ и $\bar{h}(\chi) = \chi'$, конечно.

5. из 2, 3, 4 и по определению 9 (гомоморфизм последовательностей) следует, что существует такая последовательность действий $res \in RES^{seq}$, что $\hat{h}(res) = plan$.

В. Единственность существования res , такого, что $\hat{h}(res) = plan$, следует из того факта, что не существует альтернативного порядка следования действий в res , для которого сохранилось бы утверждение $\hat{h}(res) = plan$. Следовательно, последовательность res единственна.

С. Докажем возможность $res \cong plan$.

1. В любой последовательности $res \in RES^{seq}$ количество действий больше, чем в seq .
2. Количество действий в плане конечно.
3. Тогда из А.5, С.1, С.2 следует, что в одном из вариантов пошагового разрешения действительно имеет место $res \cong plan$.

Теорема доказана.

Приведём алгоритм планирования CRPA, который использует разрешение конфликтов путём подстановки действий.

CRPA

вход : seq

выход: $plan$

1. **если** $CF(seq) = \emptyset$ **то вернуть** seq
2. $RES^{seq} = ResolveAll(seq)$
3. **недетерминированно** для любой $res \in RES^{seq}$
выполнить CRPA(res)

Заметим, что начальная последовательность $init$ гомоморфна любому плану, поэтому на вход алгоритму CRPA подаётся $init$. Более того, задача планирования T может оказаться тривиально разрешимой, то есть $G \subset s_0$ и $eff(start) = pre(finish)$ без каких-либо конфликтов.

Теорема 2. Если для задачи планирования T существует решение, то алгоритм CRPA найдёт план.

Доказательство: 1. На вход CRPA подаётся последовательность $seq \cong init$, обладающая свойством $\hat{h}(init) = plan$, где $plan$ — это некоторый конкретный план. 2. Алгоритм CRPA есть не что иное, как процедурная реализация пошагового полного разрешения конфликтов входной последовательности seq . 3. Из 1 и 2, и в соответствии с теоремой 1 следует, что существует одна из рекурсивных ветвей алгоритма, которая возвращает конкретный план $plan$. Теорема доказана.

5. Заключение

До настоящего времени алгоритмы, основанные на поиске в пространстве планов, избегали возникновения конфликтов посредством неконфликтной перестановки действий. В статье был представлен новый алгоритм, допускающий возникновение конфликтов, которые разрешаются путём подстановки действий.

Список литературы

- [1] Осипов Г. С. *Динамические интеллектуальные системы. Моделирование целенаправленного поведения* // Известия РАН «Теория и системы управления», № 6, с. 119–127. ↑1
- [2] Тарханов Т. С. *Архитектура и ядро комплекса инструментальных программных средств для создания динамических интеллектуальных систем* // Программные продукты и системы, № 1, с. 9–13. ↑1
- [3] Chapman D. *Planning for Conjunctive Goals* // Artificial Intelligence. — № 32 (3), с. 333–377. ↑2
- [4] Erol K. *Complexity, Decidability and Undecidability Results for Domain-Independent Planning* // Technical Report of Maryland University. — № CS-TR-2797. ↑1
- [5] Nilsson N. J. *STRIPS: a new approach to application of theorem proving to problem solving* // Artificial Intelligence, № 2, с. 189–208. ↑2, 2, 2
- [6] Kambhampati S. *Refinement Planning as a Unifying Framework For Synthesis Plan* // AI Magazine. — № 18(2), с. 333–377. ↑1
- [7] Lifschitz V. *On the Semantics of STRIPS* // Reasoning About Actions and Plans. — San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1986, с. 300–353. ↑2
- [8] Myers K. *CPEF—A Continuous Planning and Execution Framework* // AI Magazine, № 26, с. 521–544. ↑1
- [9] Weld D. *An Introduction to Least Commitment Planning* // AI Magazine. — № 12(4), с. 301–350. ↑1

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ИПС РАН

T. S. Tarkhanov. *Automated plan synthesizing of goal directed behavior based on conflict resolution.* (in russian.)

ABSTRACT. This paper presents new algorithm for classical AI-planning. Algorithm based on approach of total-ordered plan space search. Plan synthesizing is performed by use of new method called conflict resolution by action substitution.