Введение в искусственный интеллект. Динамические интеллектуальные системы

Александр Панов

Интситут системного анализа РАН

02 марта 2015 г.

Истоки проблемы

- Сложность задач управления.
- Существенная роль экспертных суждений и знаний человека.
- Применение подходов, в которых в качестве значений переменных допускаются не только числа, но и слова или предложения искусственного или естественного языка.

Пример области применения

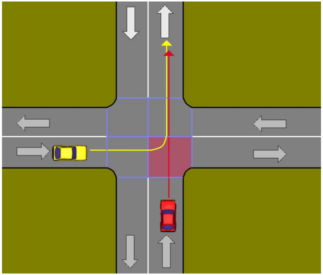
Двухуровневые системы управления в беспилотных автономных вертолётах и квадракоптерах.

- **Стратегический** (или, как иногда говорят, делиберативный) уровень управления, решающий задачи, например, планирования полёта или выбора траектории или выбора цели.
- **Реактивный** уровень управления реализует требуемые действия.

Пример модельной задачи

Задача управления движением автомобилей на нерегулируемом перекрёстке.

- Решения о действии в соответствии с правилами дорожного движения принимаются на делиберативном уровне с помощью применения систем правил.
- На реактивном уровне применяются соответствующие модели обгона или левого поворота.



Правила

Правилом называется упорядоченная тройка множеств $r =< C, A, D >$, где

- C — условие правила,
- A — множество добавляемых правилом фактов,
- D — множество удаляемых правилом фактов.

Выделим в формулах из указанных множеств сорт переменной t, соответствующей дискретному времени: $t \in T$, где T — дискретное упорядоченное множество.

Определение 1

Будем говорить, что условие правила выполнено, если в n-ом состоянии рабочей памяти истинна каждая из атомарных формул условия, в которой $t = n$, где $n \in T$.

Цели курса

Множество правил Π разбивается на два подмножества:

- подмножество правил Π_{CL}, не соответствующих никаким действиям, а лишь пополняющих множество фактов состояния — **правила замыкания**, значения переменной t одни и те же в формулах условия и в формулах из множеств добавляемых и удаляемых фактов;
- подмножество правил Π_{TR}, являющихся, по существу, некоторыми действиями и, поэтому изменяющих состояние системы — **правила переходов**, в формулах из множеств удаляемых и добавляемых фактов этих правил значения переменной t, по крайней мере, на единицу больше, чем в формулах условия.

$$\Pi_{CL} =< C(t), A(t), D(t) >, \Pi_{TR} =< C(t), A(t+1), D(t+1) > . \quad (1)$$

Стратегия CL применения правил

Стратегия CL:

1. Выбрать некоторое правило r из множества правил Π_{CL}.
2. Проверить выполнимость условия правила r в текущем состоянии рабочей памяти.
3. Если выполнено, то подставить на места всех свободных переменных в формулы правила соответствующие значения из рабочей памяти. Иначе перейти к п.1.
4. Применить правило, т. е. записать в текущее состояние рабочей памяти те значения, на которых оказались выполненными формулы из и удалить из рабочей памяти значения, на которых оказались выполнены формулы из D.
5. Перейти к п.1.

Работа стратегии завершается со стабилизацией текущего состояния рабочей памяти. По наступлении стабилизации начинает выполняться стратегия TR.

Стратегия *TR* применения правил

Стратегия *TR*:

1. Выбрать некоторое правило r из множества правил Π_{TR}.
2. Проверить выполнимость условия правила r в текущем состоянии рабочей памяти.
3. Если выполнено, то подставить на места всех свободных переменных в формулы правила соответствующие значения из рабочей памяти. Иначе перейти к п.1.
4. Применить правило, т. е. записать в текущее состояние рабочей памяти те значения, на которых оказались выполненными формулы из и удалить из рабочей памяти значения, на которых оказались выполнены формулы из D.
5. Перейти к стратегии CL.

ДИС, основанная на правилах

Пусть — множество фактов.

- каждое правило из Π_{CL} можно рассматривать как некоторое отображение из 2^X в 2^X,
- каждое правило из Π_{TR} — как некоторое отображение из $2^X \times T$ в 2^X.

Если $\chi(t) = \chi \in 2^X$, то

- $(CL, \chi) = \Phi(\chi)$ — функция замыкания,
- $(TR, \chi) = \Psi(\chi, t)$ — функция переходов.

Определение 2

Четвёрку

$$D =< X, T, \Phi, \Psi >, \tag{2}$$

где $\Phi : 2^X \to 2^X$, $\Psi : 2^X \times T \to 2^X$,будем называть динамической системой, основанной на правилах.

Состояния ДИС и её траектория

Роль стратегии CL и функции Φ системы D заключаются в пополнении описания текущего состояния. Этот процесс завершается при стабилизации состояния:

$$\Phi(\chi) = \chi. \tag{3}$$

Определение 3

Траекторией системы D называется множество

$$\Xi = \{\Phi(\Psi(\chi(t), t)) | t \in T\}, \tag{4}$$

где $\chi(t)$ — решение уравнения (3).

Иначе уравнение траектории системы D можно записать следующим образом:

$$\chi(t+1) = \Phi(\Psi(\chi(t), t)). \tag{5}$$

Управляемые ДИС, основанные на правилах

Определение 4

Система

$$K =< X, T, \Phi, \Psi, U >, \tag{6}$$

где X, T, Φ *и* Ψ *были определены выше, а* $U : 2^X \times T \to 2^X$, *называется управляемой динамической системой, основанной на правилах.*

Функция U реализуется стратегией применения правил управления CN и множеством правил управления Π_{CN}.

Траектория системы (6) запишется в следующем виде:

$$\chi(t+1) = \Phi(\Psi(\chi(t), t), U(\chi(t), t)). \tag{7}$$

Возмущения

Определение 5

Под возмущением понимается некоторое множество событий $\delta(t)$, появление которого в состоянии $\chi(t)$ не является результатом решения уравнений 3.

Если $\delta(t) \in 2^X$, тогда, в отсутствие управления

$$\chi(t+1) = \Phi(\Psi(\underbrace{\Phi(\chi(t) \cup \delta(t))}_{\chi'(t)}, t)). \tag{8}$$

Определение 6

Траектория Ξ называется устойчивой, если для любого t и возмущения $\delta(t)$

$$\Phi(\Psi(\chi(t), t)) \subseteq \Phi(\Psi(\underbrace{\Phi(\chi(t) \cup \delta(t))}_{\chi'(t)}, t)). \tag{9}$$

Достаточное условие устойчивости

Пусть $\chi_1, \chi_2 \in 2^X$.

Определение 7

Функцию Φ будем называть монотонной, если из $\chi_1 \subseteq \chi_2$ следует $\Phi(\chi_1) \subseteq \Phi(\chi 2)$.

Определение 8

Функцию Ψ будем называть монотонной по переменной состояния, если из $\chi_1 \subseteq \chi_2$ следует $\Psi(\chi_1, \cdot) \subseteq \Psi(\chi_2, \cdot)$.

Утверждение 1 (достаточное условие устойчивости)

Траектория Ξ системы (7) устойчива, если функция Φ монотонна, а Ψ монотонна по переменной состояния.

Управление и возмущения

Рассмотрим теперь более общий случай, когда возмущение присутствует в управляемой системе, т. е рассмотрим систему

$$\chi(t+1) = \Phi(\Psi(\underbrace{\Phi(\chi(t) \cup \delta(t))}_{\chi'(t)}, t) \cup U(\chi(t), t)). \qquad (10)$$

Вопрос: каким образом, располагая управлением U, компенсировать влияние возмущения δ на поведение системы (10), если её траектория неустойчива?

В силу непрогнозируемости среды, появление возмущения $\delta(t)$ в состоянии $\chi(t)$ предвидеть невозможно, поэтому применение управления U для компенсации этого возмущения возможно не ранее следующего состояния, т. е. состояния

$$\chi(t+1) = \Phi(\Psi(\Phi(\chi(t) \cup \delta(t)), t)). \qquad (11)$$

Компенсация возмущения

Теорема 1

Для компенсации возмущения $\delta(t)$ системы (10) достаточно применения управления:

$$U(\chi(t+1), t+1) = \Phi(\Psi(\chi(t+1), t+1)) \setminus \Phi(\Psi(\underbrace{\Phi(\Psi(\underbrace{\Phi(\chi(t) \cup \delta(t))}_{\chi'(t)}, t) \cup U(\chi(t), t)), t+1}_{\chi'(t+1)})). \tag{12}$$

Задача компенсации возмущений

В динамических системах, основанных на правилах, множество допустимых управлений определяется множеством Π_{CN} — правил управления.

Задача компенсации возмущения, с этой точки зрения состоит в подборе таких правил из множества Π_{CN}, которые обеспечивают требуемую коррекцию поведения системы, т. е. возврат очередного состояния на расчётную траекторию.

Ранги

Определение 9

Если $r = < C, A, D >$ — *некоторое правило, то величина* $rank(r) = |A| - |D|$, *(где* $|A|$ *и* $|D|$ — *мощности соответствующих множеств), называется рангом правила* r.

Определение 10

Последовательность правил, доставляющих решение уравнению (3): $\Phi(\chi) = \chi$ *называется полной последовательностью.*

Для простоты будем считать, что для всех правил множества добавляемых фактов попарно не пересекаются.

Монотонность и полнота

Утверждение 2

Функция Φ *монотонна тогда и только тогда, когда для всякой полной последовательности из* N *попарно применимых правил в множестве правил* Π_{CL} *выполняется*

$$\sum_{i=1}^{N} rank(r_i) \geqslant N. \tag{13}$$

Утверждение 3

Функция Ψ *монотонна тогда и только тогда, когда для каждого правила* r *в множестве* Π_{TR} $rank(r) \geqslant 1$.

Задача синтеза управления

Теорема (1) говорит о принципиальной возможности существования такого управления, которое может компенсировать любое возмущение системы (10).
Вопрос: как построить такое управление?

Определение 11

Рангом факта F в последовательности правил Π называется величина

$$rank_{\Pi}(F) = rank_{\Pi}(F_F) - rank_{\Pi}(F_D), \tag{14}$$

где $rank_{\Pi}(F_A)$ — количество вхождений факта F в множества добавляемых фактов правил из Π, а $rank_{\Pi}(F_D)$ — количество вхождений факта F в множества удаляемых фактов правил из Π (при этом вычитание производится только из предшествующего правила последовательности Π, содержащего F в списке добавлений).

Стратегия CN

1. Выбрать очередной факт F_i из множества $\Delta_0 = \Phi(\Psi(\chi(t+1)), t+1)) \setminus \Phi(\Psi(\chi'(t+1)), t+1))$.
2. Выбрать из множества Π_{CN} такое правило r, что $F_i \in A(r)$ и $rank_{\Pi}(F_i) \geqslant 1$. Если $C(r) \subset \chi'(t+1)$ — работа стратегии завершена.
3. Построить множество $\Delta_{j+1} = \Delta_j \cup C(r) \cup D(r) \setminus A(r)$.
4. Выбрать из множества Π_{CN} такое правило r, что $A(r) \cap \Delta_{j+1} \neq \varnothing$ и $rank_{\Pi}(F_i) \geqslant 1$. Если $(r) \subseteq \chi'(t+1)$ — работа стратегии для факта F_i завершена.
5. Если множество Δ_0 исчерпано, то работа стратегии полностью завершена, иначе $i := i+1$ и переход к шагу 1.

Существование управления

Теорема 2

Управление $U(\chi(t+1), t+1))$ *системы (10) существует тогда и только тогда, когда для каждого факта* $F_i \in \Phi(\Psi(\chi(t+1)), t+1)) \setminus \Phi(\Psi(\Phi(\Psi(\Phi(\chi(t) \cup \delta(t)), t)), t+1))$ *найдётся последовательность* Π *попарно применимых правил в множестве* Π_{CN}*, такая что* $C(r_1) \subseteq \Phi(\Psi(\Phi(\Psi(\Phi(\chi(t) \cup \delta(t)), t))$ *и* $rank_{\Pi}(F_i) \geqslant 1$*, где* (r_1) *условие первого правила последовательности* Π.

Замыкание уонтура управления

Если замкнуть контур управления, то устойчивость системы можно повысить включением в контур управления механизма обратной связи.

Методы синтеза обратной связи позволяют компенсировать возмущение в том состоянии, в котором наблюдается эффект последнего.

Теорема 3

Для компенсации возмущения $\delta(t)$ системы (10) в состоянии $\chi(t+1)$ достаточно применения обратной связи:

$$\Omega(\chi(t+1)) = \chi(t+1) \setminus \Phi(\Psi(\Phi(\chi(t) \cup \delta(t)), t)). \tag{15}$$

Стратегия CB

1. Выбрать очередной факт F_i из множества $\Delta_0 = \chi(t+1) \setminus \chi'(t+1)$.
2. Выбрать из множества Π_{CB} такое правило r, что $F_i \in A(r)$ и $rank_\Pi(F_i) \geqslant 1$. Если $C(r) \subset \chi'(t+1)$ — работа стратегии завершена.
3. Построить множество $\Delta_{j+1} = \Delta_j \cup C(r) \cup D(r) \setminus A(r)$.
4. Выбрать из множества Π_{CB} такое правило r, что $A(r) \cap \Delta_{j+1} \neq \varnothing$ и $rank_\Pi(F_i) \geqslant 1$. Если $(r) \subseteq \chi'(t+1)$ — работа стратегии для факта F_i завершена.
5. Если множество Δ_0 исчерпано, то работа стратегии полностью завершена, иначе $i := i+1$ и переход к шагу 1.

Задача управляемости системы

Будем рассматривать системы (7)

$$\chi(t+1) = \Phi(\Psi(\chi(t), t), U(\chi(t), t)).$$

Если задана пара точек $(\chi_0, \chi_1) \in 2^X \times 2^X$, то задача управляемости системы (7) состоит в установлении условий существования значений управления $U(\chi(t), t)$, позволяющих перевести систему (7) из состояния $\chi(0) \subseteq \chi_0$ в состояние $\chi(N)$, такое что $\chi_1 \subseteq \chi(N)$, где $N \in T$.

Достижимость состояний

Определение 12

Если 2^X *— множество состояний системы (7), то пара точек* (χ_0, χ_1) *в* $2^X \times 2^X$ *называется* N*–достижимой, если существуют такие значения управления* $U(\chi(t), t)$ $(t = 0, 1, \ldots, N-1)$ *системы (7) , что* $\chi_1 \times \chi(N)$, *при начальных условиях* $\chi(0) \subseteq \chi_0$, *где* $\chi(N)$ *— решение уравнения (7).*

Определение 13

Система (7) называется вполне достижимой если для любой пары точек $(\chi_0, \chi_1) \in 2^X \times 2^X$ *существует* $N \in$ *, такое что пара* (χ_0, χ_1) *является* Ns*–достижимой.*

Управляемость системы

Теорема 4

Пара точек (χ_0, χ_1) системы (7) N–достижима тогда и только тогда когда для каждого факта $F_i \in \chi_1$ в множестве Π_{CN} найдётся последовательность Π попарно применимых правил, такая что $C(r_1) \subseteq \chi_0$ и $rank_\Pi(F_i) \geqslant 1$, где $C(r_1)$ условие первого правила последовательности Π.

Теорема 5

Система (7) вполне достижима если и только если:

1. *для всякого $F_i \in X$ $F_i \in A$, где A — множество добавляемых фактов одного из правил,*
2. *существует последовательность Π, состоящая из всех правил Π_{CN}, что для всякого F из Π_{CN} $rank_\Pi(F) \geqslant 1$.*