

Ситуационный логический вывод на основе нечеткой кластеризации состояний

(Рецензирована)

Аннотация:

В статье рассматривается частный случай проблемы управления сложным объектом в условиях нечеткой исходной информации. Вводится понятие нечеткой ситуации. Предлагается метод автоматической классификации состояний сложного объекта на основе алгоритма кластеризации нечетких с-средних и алгоритм ситуационного логического вывода для управления сложным объектом в условиях нечеткой исходной информации.

Ключевые слова:

Управление, сложный объект управления, классификация состояний, нечеткий кластер-анализ, ситуационный логический вывод.

Одной из отличительных характеристик сложных объектов (СО) является наличие большого количества независимых входных и выходных параметров, характеризующих состояние системы неоднозначным образом. Построение адекватной модели при большом количестве входных переменных требует большого объема базы знаний, количество продукционных правил в которой экспоненциально возрастает с увеличением входов модели, что снижает качество нечеткого логического вывода.

В этом случае на этапе генерации базы знаний, состоящей из нечетких логических правил, целесообразно оперировать не конкретными параметрами системы, а классами ее состояний. Это, в большинстве случаев приводит к уменьшению объема базы знаний, и соответственно к повышению точности управления.

Следовательно управление СО должно осуществляться не по его параметрам, а по состояниям [1]. Таким образом, в САУ СО возникает задача идентификации состояния сложного объекта управления по его наблюдаемым (известным) параметрам.

Нечеткие ситуации. Пусть $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ множество признаков, значениями которых описывается состояние объекта управления, окружающей среды и системы управления. Каждый признак y_i ($i \in I = \{1, \dots, p\}$) описывается соответствующей лингвистической пере-

менной $\langle y_i, T_i, D_i \rangle$, где $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ – терм-множество ЛП y_i (набор лингвистических значений признака), m_i – число значений признака; D_i – базовое множество признака y_i . Для описания термов T_j^i ($i \in L = \{1, 2, \dots, m_i\}$) соответствующих значениям признака y_i , используются нечеткие переменные $\langle T_j^i, D_i, \tilde{C}_j^i \rangle$,

т.е. значение T_j^i – описывается нечетким множеством \tilde{C}_j^i в базовом множестве D_i .

$$\tilde{C}_j^i = \left\{ \langle \mu_{C_j^i}(d) / d \rangle \right\}, \quad d \in D_i \quad (1)$$

Тогда нечеткой ситуацией \tilde{S} называется [2] нечеткое множество второго уровня

$$\tilde{S} = \left\{ \langle \mu_S(y_i) / y_i \rangle \right\}, \quad y_i \in Y, \quad \text{где} \quad (2)$$

$$\mu_S(y_i) = \left\{ \langle \mu_{\mu_S}(T_j^i) / T_j^i \rangle \right\}, \quad T_j^i \in T_i,$$

где $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ множество признаков, характеризующих состояние системы, и каждому признаку $y_i \in Y$ поставлена в соответствие лингвистическая переменная $\langle y_i, T_i, D_i \rangle$,

где $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ – терм-множество ЛП y_i , D_i – предметная шкала.

Нечеткими ситуациями задаются состояния, в которых находятся объект управления, окружающая среда и система управления.

Классификация состояний. Пусть состояние объекта или предметной области можно охарактеризовать значениями некоторых признаков или параметров. Если множество состояний объекта обладает общими свойствами, или значениями признаков описания состояний, говорят о наличии класса состояний объекта.

Под процедурой формирования классов, классификацией, понимают упорядочение состояний объекта по их схожести [4].

Существуют несколько методов задания классов состояний объекта [5]:

- метод перечисления членов класса;
- метод общности средств;
- метод кластеризации.

Когда состояние объекта можно представить в виде вектора чисел, определяющее геометрическое расположение состояния в пространстве, координатами которого являются признаки описания состояния, говорят о кластеризации состояния [5, 6].

Группа состояний объекта, образующих в пространстве описаний компактную в некотором смысле область, называется кластером. Реализация метода кластеризации в интеллектуальной системе (ИС) определяется взаимным пространственным расположением кластеров в пространстве. Если кластеры, соответствующие разным классам, разнесены достаточно далеко друг от друга, можно воспользоваться классификацией по какой-либо из метрик. Среди множества алгоритмов кластеризации наиболее известны алгоритм ISODATA и алгоритм максимального расстояния [7]. При работе со сложными объектами кластеры могут перекрываться и/или иметь размытые границы, что происходит в результате неполной или нечеткой информации о состоянии объекта. В этом случае применяются методы разбиения пространства состояний, оперирующие понятиями теории нечетких множеств [8].

Алгоритм кластеризации нечетких средних. В 1981 г. Дж. К. Беждек (J. C. Bezdek) обобщил алгоритм ISODATA на случай произвольных нечетких многообразий и предложил для этого алгоритма название нечетких средних (FCM, Fuzzy C-Means). Пусть X мно-

жество состояний некоторого объекта, $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ – функции принадлежности нечетким кластером F_1, F_2, \dots, F_k . Нечеткие кластеры образуют нечеткое покрытие множества X в том и только в том случае, если

$$\mu_1(x) + \mu_2(x) + \dots + \mu_k(x) \geq 1, \quad \forall x \in X.$$

Качество нечеткого покрытия можно оценить при помощи следующей характеристики:

$$J(\mu) = \min \sum_{i=1}^k \sum_{x \in X} (\mu_i(x))^2 \|x - V_i\|^2,$$

где V_1, V_2, \dots, V_k – центры кластеров, $V_i \in L$ – векторное пространство с нормой $\|\cdot\|$, порожденной скалярным произведением.

$J(\mu)$ оценивает среднеквадратичные отклонения состояний из X относительно центров V_1, V_2, \dots, V_k .

Шаг 1. По одному из алгоритмов кластер-анализа (например, ISODATA), производится начальная классификация состояний по кластерам, причем $\mu_i(x)$, $i = \overline{1, k}$, характеризует близость состояния x центру i -го кластера.

Шаг 2. Центры кластеров уточняются при помощи формулы:

$$V_i = \frac{\sum_{x \in X} (\mu_i(x))^2 x}{\sum_{x \in X} (\mu_i(x))^2}, \quad i = \overline{1, k}, \quad x \in X \subset L.$$

Шаг 3. Строится новое покрытие F_1, F_2, \dots, F_k описываемое при помощи $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$ в соответствии с правилом:

$$\hat{\mu}_i(x) = \frac{1}{\|x - V_i\|^2} \left/ \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{\|x - V_j\|^2} \right) \right.$$

Шаг 4. Вычисляются отклонения T величины $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$ от $\hat{\mu}$. Если $\delta \leq \varepsilon$ – некоторого порога, то алгоритм завершен. Иначе производится переход к шагу 2.

Размер обучающей выборки, необходимой для построения покрытия пространства состояний объекта кластерами, относится к числу неопределенных параметров, которые должны быть определены в процессе обучения.

При помощи алгоритма нечеткой кластеризации определяется принадлежность состояния x кластеру F , а до какой степени x принадлежит к F .

Пусть в процессе кластер-анализа было построено нечеткое покрытие пространства состояний объекта нечеткими кластерами F_1, F_2, \dots, F_k и на вход ИС подается текущее состояние объекта S_0 . В процессе распознавания S_0 определяется множество значений $\mu_{01}, \mu_{02}, \dots, \mu_{0k}$, характеризующее соответствие состояния S_0 каждому кластеру $F_i, i = \overline{1, k}$. Если получаемые значения μ_{0i} приводят к выполнению соотношения $\mu_{01} + \mu_{02} + \dots + \mu_{0k} < 1$ или $\max_i \mu_{0i} \leq T$, где i – номер кластера, T – некоторый порог, то принимается решение о создании нового нечеткого кластера F_{k+1} , центром которого является S_0 .

В процессе классификации текущего состояния объекта S_0 может быть сформирован новый кластер $k + 1$ и каждому i -му кластеру ($i = \overline{1, k}$) должен быть поставлен в соответствие диагноз (в случае системы диагностики) или управляющее воздействие на объект (в случае системы управления объектом), соответствующие данному состоянию.

Учет неполноты информации о состоянии объекта (ситуации, в которой находится объект) заключается в следующем. Пусть для признаков описания состояния объекта x_1, x_2, \dots, x_q неизвестны их значения в некоторой ситуации S_i . Тогда соответствующий элемент $a_k^i, k = \overline{1, q}$, характеризующий степень сходства ситуации S_i и центра кластера z_j имеет значение 0,5, что означает неопределенность в отношении этого признака при сравнении S_i и z_j . Чем больше число неопределенных признаков q и выше вес признаков $\omega_k, k = \overline{1, q}$, тем ниже качество классификации состояний.

Ситуационный логический вывод. Для определения состояния объекта управления необходимо сравнить входную нечеткую ситуацию \tilde{S}_0 с каждой нечеткой ситуацией из некоторого набора типовых нечетких ситуаций $S = \{\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_N\}$. В качестве меры для определения степени близости нечеткой ситуации \tilde{S}_0 нечеткой ситуации $\tilde{S}_i \in S (i \in K = \{1, 2, \dots, N\})$ могут использоваться степень нечеткого включения нечеткой ситуации \tilde{S}_0 в нечеткую ситуацию \tilde{S}_i ; степень нечеткого равенства \tilde{S}_0 и

\tilde{S}_i ; степень нечеткой общности \tilde{S}_0 и \tilde{S}_i ; а также другие меры близости. Выбор меры близости определяется особенностями объекта управления и организацией блока принятия решений в ИС.

Пусть $\tilde{S}_i = \{\langle \mu_{Si}(y)/y \rangle\}, \tilde{S}_j = \{\langle \mu_{Sj}(y)/y \rangle\} (y \in Y)$ есть некоторые ситуации. Тогда степенью включения ситуации \tilde{S}_i в ситуацию \tilde{S}_j [3] обозначается величина $v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$, определяемая выражением:

$$v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \bigwedge_{y \in Y} v(\mu_{Si}(y), \mu_{Sj}(y)), \quad (3)$$

где $v(\mu_{Si}(y), \mu_{Sj}(y))$ вычисляется следующим образом:

$$v(\mu_{Si}(y), \mu_{Sj}(y)) = \bigwedge_{l \in L} (\mu_{\mu_{Si}}(T_i^l) \rightarrow \mu_{\mu_{Sj}}(T_j^l)) \quad (4)$$

Здесь $v(\mu_{Si}(y), \mu_{Sj}(y))$ является степенью включения нечеткого множества $\mu_{Si}(y)$, в нечеткое множество $\mu_{Sj}(y)$.

Считается, что ситуация \tilde{S}_i нечетко включается в ситуацию $\tilde{S}_j, \tilde{S}_i \subseteq \tilde{S}_j$ если степень включения \tilde{S}_i в \tilde{S}_j , не меньше некоторого порога включения $t_{inc} \in [0,6; 1]$, определяемого условиями управления, т.е. $v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \geq t_{inc}$.

Существование двух взаимных включений ситуаций \tilde{S}_i и \tilde{S}_j , означает, что при пороге включения t_{inc} ситуации \tilde{S}_i и \tilde{S}_j примерно одинаковы. Такое сходство ситуаций называется нечетким равенством, и степень нечеткого равенства $\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$ ситуаций \tilde{S}_i и \tilde{S}_j определяется следующим образом:

$$\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \& v(\tilde{S}_j, \tilde{S}_i). \quad (5)$$

После преобразований (5) можно получить $\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \bigwedge_{y \in Y} \mu(\mu_{Si}(y), (\mu_{Sj}(y))) \quad (6)$

где $\mu(\mu_{Si}(y), \mu_{Sj}(y))$ вычисляется следующим образом:

$$\mu(\mu_{Si}(y), \mu_{Sj}(y)) = \bigwedge_{l \in L} ((\mu_{\mu_{Si}}(T_i^l) \rightarrow \mu_{\mu_{Sj}}(T_j^l)) \& (\mu_{\mu_{Sj}}(T_j^l) \rightarrow \mu_{\mu_{Si}}(T_i^l))) \quad (7)$$

Считается, что ситуации \tilde{S}_i и \tilde{S}_j , нечетко равны, $\tilde{S}_i \approx \tilde{S}_j$, если $\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \geq t$, $t \in [0,6; 1]$, где t – некоторый порог нечеткого равенства ситуаций.

Нечеткой $(p - q)$ -общностью ситуаций называется [3] такое сходство ситуаций, когда нечеткие значения всех признаков в ситуациях нечетко равны, кроме нечетких значений не более, чем q признаков. Если ситуации \tilde{S}_i и \tilde{S}_j , описываются p признаками, то для их $(p - q)$ -общности достаточно нечеткого равенства $p - q$ признаков из множества.

Если признаки, при помощи которых описывается объект управления, не зависят друг от друга, то из некоторой ситуации \tilde{S}_i можно перейти в любую ситуацию \tilde{S}_j имеющую $(p - q)$ -общность с ситуацией \tilde{S}_i , применением не более чем q локальных (действующих на значение только одного признака) управлений.

Пусть $\tilde{S}_i = \{\langle \mu_{S_i}(y)/y \rangle\}$, $\tilde{S}_j = \{\langle \mu_{S_j}(y)/y \rangle\}$ ($y \in Y$) есть нечеткие ситуации. Тогда степень $(p - q)$ -общности $k_{p-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$ ситуаций \tilde{S}_i и \tilde{S}_j , определяется выражением

$$k_{p-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \&_{y \in Y \setminus Y_q} \mu(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y)),$$

где $|Y_q| \leq q$, признак y_k принадлежит Y_q , если $\mu(\mu_{S_i}(y_k), \mu_{S_j}(y_k)) < t$.

При $Y_q = \emptyset$ ситуации \tilde{S}_i и \tilde{S}_j , нечетко равны.

Аналогично определению нечеткого равенства считается, что ситуации \tilde{S}_i и \tilde{S}_j , имеют $(p - q)$ -общность, если $k_{p-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) > t$.

Пусть множество возможных состояний объекта управления задается набором S эталонных нечетких ситуаций. Предполагается, что множество эталонных ситуаций S полно. Каждой нечеткой ситуации $\tilde{S}_i \in S$ на основе экспертной информации ставится в соответствие управляющее решение $r_i \in R$, где R – множество управляющих решений, используемых для управления объектом. Нечеткий ситуационный логический вывод сводится к распознаванию

входной нечеткой ситуации \tilde{S}_0 , описывающей текущее состояние объекта управления, и выдате соответствующего ей управляющего решения из множества R . Для распознавания нечеткой ситуации можно предложить два способа:

метод «ближайшего соседа» в пространстве эталонных нечетких ситуации;

выдача управляющих решений с учетом всех эталонных ситуаций.

Для этого должна использоваться некоторая мера сходства нечеткой ситуации S_0 эталонами из множества \tilde{S} .

В качестве меры сходства нечетких ситуаций наиболее предпочтительны степень нечеткого включения нечетких ситуаций и степень нечеткого равенства. Обе эти меры состоят в вычислении степени сходства в интервале $[0; 1]$. Наибольшая степень сходства равна 1, наименьшая – 0. Степень сходства 0,5 означает полную неопределенность.

Для оценки равенства или неравенства нечетких ситуаций, включения или не включения вводятся пороги нечеткого равенства и нечеткого включения t из интервала $[0,6; 1]$. Считается, что нечеткая ситуация \tilde{S}_0 нечетко включается или нечетко равна нечеткой ситуации \tilde{S} , если

$$\nu(\tilde{S}_0, \tilde{S}) > t;$$

$$\nu(\tilde{S}_0, \tilde{S}) \& \nu(\tilde{S}, \tilde{S}_0) > t \text{ соответственно.}$$

По методу "ближайшего соседа" считается, что объект управления находится в эталонной ситуации $\tilde{S}_i \in S$, имеющей наибольшую степень сходства с нечеткой ситуацией \tilde{S}_0 , а на объекте управления должно отрабатываться управляющее решение $r_i \in R$.

По второму методу результирующее управляющее воздействие r определяется объединением всех управляющих решений $r_i \in R$, модифицированных в соответствии со степенью сходства эталонных ситуаций $\tilde{S}_i \in S$ с текущей ситуацией \tilde{S}_0 .

Применение предложенной методики управления сложным объектом в условиях нечеткой исходной информации может быть эффективным в случае большого количества не-

зависимых входных и выходных параметров, характеризующих состояние системы.

Примечания:

1. Лохин В.М., Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения / Сб. научн. статей «Интеллектуальные системы автоматического управления / Под. ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. с. 25 – 38.
2. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с
3. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. 272 с.
4. Сокал Р. Р. Кластер-анализ и классификация: предпосылки и основные направления // Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина. – М.: Мир, 1980. С. 7-19.
5. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 415 с.
6. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.
7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
8. Заде Л. А. Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе // Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина. – М.: Мир, 1980.