

Пополнение знаний автономного беспилотного квадрокоптера – манипулятора в недоопределенной проблемной среде*

В. Б. Мелехин^I, М. В. Хачумов^{II}

^I Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Россия

^{II} Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Разработан способ пополнения знаний квадрокоптера, оснащенного манипулятором, основанный на нечетком выводе правдоподобных умозаключений, позволяющий получить недостающие сведения об объектах проблемной среды, необходимые для планирования целенаправленного поведения в недоопределенных условиях функционирования. Предложены и определены условия применения различных оценок аналогичности и сходства, сравниваемых между собой нечетко описанных объектов проблемной среды. На этой основе организован вывод правдоподобных умозаключений с необходимой для принятия решений степенью истинности. Синтезированы правила дедуктивного, индуктивного и традуктивного вывода правдоподобных умозаключений на основе посылок, сформированных на базе нечетко заданных условно-зависимых предикатов и высказываний. Это позволяет интеллектуальному решателю задач беспилотного летательного аппарата оперативным образом пополнять недостающие для вывода решений знания в различных условиях недоопределенной проблемной среды.

Ключевые слова: пополнение знаний, условно-зависимый предикат, правдоподобные умозаключения, правила вывода, квадрокоптер - манипулятор.

DOI 10.14357/20718594190104

Введение

Одной из актуальных проблем искусственного интеллекта является эффективное планирование целенаправленной деятельности автономных квадрокоптеров – манипуляторов (КМ) оснащенных техническим зрением в априори недоопределенных условиях сложной проблемной среды (ПС) [1]. Это обусловлено тем, что в априори задать подробную модель реальной ПС практически не представляется возможным и, как правило, в результате ее закономерности остаются недоопределенными, а вследствие этого возникает необходимость:

– в представлении знаний интеллектуальных КМ в общем виде безотносительно к конкретной предметной области;

– в конкретизации заданных в общем виде знаний и их пополнение недостающими для вывода решений сведениями в текущих условиях недоопределенной ПС.

Таким образом, под недоопределенной следует понимать ПС, для которой ряд закономерностей изменения ее ситуаций являются в априори неизвестными КМ. Однако заданные КМ в обобщенном виде знания безотносительно к конкретной предметной области в результате их конкретизации, пополнения и обработки в текущих условиях функционирования,

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 17-71-10163 «Разработка методов и моделей интеллектуально-геометрического управления автономными летательными аппаратами в условиях возмущенной воздушной среды»).

Хачумов Михаил Вячеславович. E-mail: khmike@inbox.ru

позволяют ему спланировать целенаправленную деятельность обеспечивающую выполнение полетных заданий, связанных с необходимостью целенаправленного преобразования различных ситуаций ПС. Например, перевести найденный в ПС объект из текущего состояния в требуемое и т.д.

Следовательно, основная цель создания интеллектуальных КМ связана с целесообразностью наделяния автономных беспилотных летательных аппаратов способностью целенаправленного преобразования ситуаций труднодоступных и агрессивных для человека ПС. Например, при выполнении спасательных операций во время пожара, КМ может быть задано следующее полетное задание: «Найти в ПС заданный объект, захватить этот объект и перелететь с ним в безопасную зону местности» и т.п.

Следует отметить, что к одной из основных проблем, связанных с планированием целенаправленного поведения для выполнения сложного полетного задания в недоопределенной ПС, следует отнести необходимость в пополнении недостающих для принятия решений знаний о находящихся в проблемной среде объектах и происходящих в ней событиях. Классические способы пополнения знаний, основанные на применении моделей здравого смысла, сценариев и псевдофизических логик [2-7], а также современные их модификации [8-10] ориентированы на заданную предметную область, что не позволяет на их основе эффективным образом организовать процесс пополнения недостающими сведениями решающую систему КМ в процессе функционирования в недоопределенной ПС. Кроме того, при использовании данных способов, пополнение знаний и вывод решений осуществляется на различных моделях их представления и обработки, что приводит к необходимости наделяния решающей системы КМ дополнительными функциональными возможностями.

Обойти отмеченные выше проблемы позволяет способ пополнения знаний, основанный на применении логики условно-зависимых предикатов [11] при нечетком представлении характеристик определяющих в них предметные переменные (ПП) и описывающих различные объекты ПС. Такой подход обеспечивает возможность интеллектуальному решателю КМ организовать пополнение недостающих для

планирования целенаправленного поведения знаний на основе вывода правдоподобных умозаключений обладающих высокой степенью достоверности в априори недоопределенных условиях функционирования.

1. Методика сравнения объектов проблемной среды и определения их сходства между собой

Необходимость в пополнении заданных в обобщенном виде знаний в процессе планирования целенаправленной деятельности КМ в основном возникает, когда требуется получить недостающие для вывода решений характеристики различных объектов и наблюдаемых в априори недоопределенной ПС событий.

Определим произвольные объекты ПС $O = \{o_i(\tilde{X}_i)\}, i = \overline{1, n}$ с помощью нечетко заданного множества характеристик $\tilde{X}_i = \{\mu(x_{ij}), x_{ij}\}, j = \overline{1, m_j}$, где; n - количество известных КМ объектов, которые могут встретиться в ПС; m_j - количество характеристик, с помощью которых описывается i -й объект среды; $\mu(x_{ij}) \in [0, 1]$ - степень достоверности того, что объект $o_i(\tilde{X}_i)$ обладает характеристикой x_{ij} .

Используем в качестве степени достоверности $\mu(x_{ij})$ степень принадлежности $\mu(o_k(\tilde{X}_k))$ объектов ПС $o_k(\tilde{X}_k)$, к нечеткому множеству $\tilde{O}(x_{ij}) = \{< \mu(o_k(\tilde{X}_k)), o_k(\tilde{X}_k) >, k = \overline{1, n_j}\}$ объектов, обладающих характеристикой x_{ij} . Например, каждый летающий с высокой скоростью объект обладает стреловидным крылом со степенью принадлежности к нечетко заданному множеству «Объекты, летающие с высокой скоростью», равной 0,8. Для нечеткого представления характеристик $x_{ij} \in \tilde{X}_i$, которыми могут обладать различные объекты ПС, они определяются биективно соответствующими им лингвистическими переменными (ЛП)[12].

Такой подход к описанию характеристик различных объектов ПС позволяет.

1. Определять значения различных характеристик $x_{ij} \in \tilde{X}_i$ в виде следующих пар: $x_{ij}^* = \langle \mu(x_{ij}^*), T_{ij}(k) \rangle$, где $\mu(x_{ij}^*)$ – степень принадлежности количественной оценки x_{ij}^* характеристики $x_{ij} \in \tilde{X}_i$ объекта ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in O$ к нечеткому множеству значений, определяемому термом $T_{ij}(k)$ соответствующей ЛП.

2. Обобщить хранящиеся в памяти интеллектуального решателя КМ знания о различных объектах и событиях ПС. Например, все объекты ПС, имеющие небольшие размеры и средний вес, могут быть захвачены манипулятором и перенесены с одного места на другое.

3. Оперативным образом выполнить вывод решения сложных задач, оперируя различными значениями характеристик анализируемых в ПС объектов. Например, все близко отстоящие объекты могут быть захвачены манипулятором КМ и т.п.

4. Определить насколько один объект ПС $o_1(\tilde{X}_1)$ является схожим другому объекту $o_2(\tilde{X}_2)$.

Определение 1. Объект ПС $o_1(\tilde{X}_1)$ является схожим с объектом $o_2(\tilde{X}_2)$, если выполняется условие « $\tilde{X}_1 \cap \tilde{X}_2 \neq \emptyset$ », а степень схожести $\rho^*(o_1(\tilde{X}_1), o_2(\tilde{X}_2))$ сравниваемых между собой объектов

$$\rho^*(o_1(\tilde{X}_1), o_2(\tilde{X}_2)) = \frac{2|\tilde{X}_1 \cap \tilde{X}_2|}{|\tilde{X}_1| + |\tilde{X}_2|},$$

принимает значение не менее порога h , где $\cap$ – операция пересечения нечетких множеств по [13]; $|\tilde{X}_i|$ – мощность множества. На этой основе могут быть сформулированы, например, следующие правила правдоподобного вывода: «Если действие МК $b_j \in B$ является результативным над объектом ПС $o_1(\tilde{X}_1)$, то оно также является результативным и с аналогичным ему объектом $o_2(\tilde{X}_2)$ », где $B = \{b_j\}, j = \overline{1, m}$ – мно-

жество действий, которое способен отрабатывать КМ над различными объектами ПС.

5. Использовать для сравнения различных объектов ПС $o_1(\tilde{X}_1)$ и $o_2(\tilde{X}_2)$ между собой в процессе пополнения знаний степень $\rho(o_1(\tilde{X}_1) \leftrightarrow o_2(\tilde{X}_2))$ их нечеткой идентичности:

$$\begin{aligned} \rho(o_1(\tilde{X}_1) \leftrightarrow o_2(\tilde{X}_2)) &= \\ &= \min_{j=1}^m \rho(\mu(x_{1j}^*), \mu(x_{2j}^*)), \end{aligned}$$

где $\rho(\mu(x_{1j})\mu(x_{2j}))$ – степень нечеткого равенства значений x_{1j} и x_{2j} одноименной характеристики в сравниваемых между собой объектах ПС, которая вычисляется согласно следующему правилу (1):

если $(|\mu(x_{1j}) - \mu(x_{2j})| \leq \mu_0) \otimes (T_{1j}(k) = T_{2j}(k))$,

то $\rho(\mu(x_{1j})\mu(x_{2j})) = 1$,

иначе, если

$|\mu(x_{1j}) - \mu(x_{2j})| \leq \mu_0) \otimes (T_{1j}(k) = T_{2j}(k))$,

то $\rho(\mu(x_{1j})\mu(x_{2j})) = \mu(x_{1j}) \leftrightarrow \mu(x_{2j})$,

иначе, если $T_{1j}(k) \neq T_{2j}(k)$,

то $\rho(\mu(x_{1j})\mu(x_{2j})) = 0$,

где: $\leftrightarrow$ – операция нечеткой эквивалентности по [13]:

$\min(\max(\mu(x_{1j}), 1 - \mu(x_{2j})), \max(\mu(x_{2j}), 1 - \mu(x_{1j})))$;

μ_0 – допустимое значение отклонений; $\otimes$ – операция, обозначающая необходимость одновременного выполнения правой и левой части проверяемого условия.

Сравниваемые таким образом нечеткие значения x_{1j}, x_{2j} характеристики x_{ij} в описании

различных объектов ПС $o_1(\tilde{X}_1)$ и $o_2(\tilde{X}_2)$ равны между собой, если $\rho(\mu(x_{1j})\mu(x_{2j})) = 1$, т.е. оба значения характеристики попадают в заданную окрестность μ_0 одной и той же точки на базовой шкале соответствующей им ЛП. Сравнимые значения x_{1j} и x_{2j} характеристики x_{ij} нечетко равны между собой при условии, что $\rho(\mu(x_{1j}), \mu(x_{2j})) \geq h$, т.е., когда степень их нечеткого равенства принимает значение не менее пороговой величины h на интервале численных значений одного и того же терма

одноименной с ней ЛП. Наконец, сравниваемые значения x_{1j} и x_{2j} характеристики x_{ij} не равны между собой, если степень их нечеткого равенства принимает значение, равное нулю, т.е. они попадают на интервалы численных значений различных термов ЛП.

Основным недостатком правила сравнения (1) между собой характеристик различных объектов ПС является то, что в результате применения в нем операции нечеткой эквивалентности, получаемая степень аналогичности не удовлетворяет свойствам метрического пространства, в частности аксиоме треугольника, когда значения функции принадлежности $\mu(x_{1j})$ и $\mu(x_{2j})$ лежат по обе стороны от ее максимума. Другими словами, когда для j -й характеристики одного объекта $o_1(\tilde{X}_1)$ выполняется условие: $\mu(x_{1j} + \Delta x_j) - \mu(x_{1j}) > 0$, а для второго объекта $o_2(\tilde{X}_2)$ – $(\mu(x_{2j} + \Delta x_j) - \mu(x_{2j})) < 0$.

Обойти указанный недостаток можно используя правило сравнения (2), когда выполняется следующее условие:

$$\begin{aligned} & ((\mu(x_{1j} + \Delta x) - \mu(x_{1j})) > 0) \& \\ & ((\mu(x_{2j} + \Delta x) - \mu(x_{2j})) > 0) \vee \\ & \vee ((\mu(x_{1j} + \Delta x) - \mu(x_{1j})) < 0) \& \\ & ((\mu(x_{2j} + \Delta x) - \mu(x_{2j})) < 0), \end{aligned}$$

то для определения степени нечеткого равенства различных значений одноименных характеристик в сравниваемых между собой объектах ПС используется правило 1. В противном случае, одноименные характеристики x_{ij} для сравниваемых между собой объектов ПС определяются парами $x_{ij} = \langle x_{ij}^*, T_{ij}(k) \rangle$, а степень их нечеткого равенства вычисляется следующим образом [14]:

$$\begin{aligned} & \text{если } |x_{1j}^* - x_{2j}^*| \leq \varepsilon, \text{ то } \rho(x_{1j}^*, x_{2j}^*) = 1, \text{ иначе} \\ & \text{если } (T_{1j}(k) = T_{2j}(k)), \rho(x_{1j}^*, x_{2j}^*) = 1 - \frac{|x_{1j}^* - x_{2j}^*|}{a_k^* - a_{k-1}^*}, \\ & \text{иначе,} \\ & \text{если } T_{1j}(k) \neq T_{2j}(k), \text{ то } \rho(x_{1j}^*, x_{2j}^*) = 0, \end{aligned}$$

где: ε – величина допустимого отклонения между количественными значениями x_{1j}^* и x_{2j}^*

характеристики x_{ij} , обеспечивающая требуемую точность решаемой задачи; a_k^*, a_{k-1}^* – соответственно верхняя и нижняя границы числовых значений терма $T_{ij}(k)$.

Сравниваемые между собой значения x_{1j}^* и x_{2j}^* характеристики x_{ij} в описании различных объектов ПС равны между собой, если $\rho(x_{1j}^*, x_{2j}^*) = 1$, т.е. оба значения характеристики попадают в заданную окрестность ε одной и той же точки на шкале численных значений базовой переменной ЛП. Различные значения x_{1j}^* и x_{2j}^* одной и той же характеристики сравниваемых объектов ПС нечетко равны между собой, если они попадают в интервал численных значений одного и того же терма $T_{ij}(k)$ одноименной им ЛП, а степень их нечеткого равенства $\rho(x_{1j}^*, x_{2j}^*)$ больше заданной пороговой величины h . В этом случае, оценка степени нечеткого равенства различных значений одной и той же характеристики зависит от их удаленности друг от друга на интервале численных значений терма $T_{ij}(k)$ соответствующей этой характеристики ЛП. Значения x_{1j}^* и x_{2j}^* характеристики x_{ij} не равны между собой, если степень их нечеткого равенства $\rho(x_{1j}^*, x_{2j}^*) = 0$.

Следовательно, интеллектуальный решатель КМ может принять следующее решение, если сравниваемые объекты ПС $o_1(\tilde{X}_1)$ и $o_2(\tilde{X}_2)$ являются либо схожими, либо нечетко идентичными между собой, то они и могут обладать одними и теми же свойствами в соответствии со следующими правилами.

1. Если множества $\tilde{X}_1$ и $\tilde{X}_2$ включают не только одинаковые характеристики, то принимается решение о том, что объекты $o_1(\tilde{X}_1)$ и $o_2(\tilde{X}_2)$ являются схожими между собой при условии, что степень их сходства $\rho^*(o_1(\tilde{X}_1), o_2(\tilde{X}_2)) \geq h$. Это позволяет КМ сформулировать правила правдоподобного вывода, имеющие, например, следующее содержание:

- «Если объект ПС $o_1(\tilde{X}_1)$, обладая множеством характеристик $X = \tilde{X}_1 \cap \tilde{X}_2 \neq \emptyset$, является подвижным, то аналогичный ему объект $o_2(\tilde{X}_2)$ может оказаться подвижным и самостоятельно сменить свое местоположение в проблемной среде»;

- «Если КМ способен догнать подвижный объект ПС $o_1(\tilde{X}_1)$, то движущийся в ПС объект $o_2(\tilde{X}_2)$, аналогичный объекту $o_1(\tilde{X}_1)$ можно также догнать в процессе его преследования » и т.п.

2. Если множества характеристик $\tilde{X}_1$ и $\tilde{X}_2$ нечетко равны между собой, то решателем задач КМ принимается решение о том, что сравниваемые между собой объекты ПС $o_1(\tilde{X}_1)$ и $o_2(\tilde{X}_2)$ относятся к одному и тому же классу при условии, что степень их нечеткой идентичности $\rho(o_1(\tilde{X}_1), o_2(\tilde{X}_2)) > h$. Отсюда, для принятия решений КМ в недоопределенной ПС могут быть сформулированы следующие правила правдоподобного вывода: «Если объект $o_1(\tilde{X}_1)$, обладает определенным умением или свойством, то данным умением или свойством могут обладать все произвольные нечетко идентичные ему объекты ПС».

Отсюда, изменяя в большую сторону пороговое значение h степени аналогичности и нечеткого равенства можно повысить точность сравнения между собой одноименных характеристик в описании различных объектов ПС и оценку степени их схожести или идентичности между собой. Это позволяет сформулировать различные правила вывода умозаключений, обеспечивающие возможность пополнения недостающих для принятия решений знаний в процессе планирования целенаправленной деятельности КМ в априори недоопределенной ПС.

Рассмотрим в качестве аксиом для правдоподобного вывода умозаключений в процессе пополнения знаний КМ нечетко заданные формулы логики условно-зависимых предикатов.

Пусть задан нечеткий условно-зависимый предикат (далее просто предикат) $P(x_i(\tilde{X}_i^P))$ -

«Объекты $x_i(\tilde{X}_i^P)$, летающие с высокой скоростью», предметная переменная которого $x_i(\tilde{X}_i^P)$ определяется множеством нечетко заданных характеристик $\tilde{X}_i^P$.

Определение 2. Нечеткий условно-зависимый предикат $P(x_i(\tilde{X}_i^P))$ становится правдоподобно истинным высказыванием при означивании его предметной переменной $x_i(\tilde{X}_i^P)$ произвольным объектом ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in O$, тогда и только тогда, когда нечеткое множество $\tilde{X}_i^P$ является собственным подмножеством нечеткого множества $\tilde{X}_i$, т.е. если выполняется условие $\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i$ со степенью нечеткого включения $\rho(\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i) \geq h$.

Степень нечеткого включения $\rho(\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i)$ множества характеристик объектов ПС $\tilde{X}_i^P = \{ \langle \mu(x_j^P), T_j^P(k) \rangle, j = \overline{1, m_1} \}$ во множество характеристик $\tilde{X}_i = \{ \langle \mu_j^i(x_j^i), T_j^i(k) \rangle, j = \overline{1, m_2} \}$ определяется согласно следующему правилу (3):

«Если $\forall T_j^P(k) \in \tilde{X}_i^P \exists T_j^i(k) [T_j^P(k) = T_j^i(k)]$,

то $\rho(\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i) = \min_{j=1}^{m_P} (\max(1 - \mu(x_j^P), \mu(x_j^i)))$,

в противном случае $\rho(\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i) = 0$ ».

Определение 3. Если одноименные характеристики в описании ПП $x_i(\tilde{X}_i^P)$ предиката $P(x_i(\tilde{X}_i^P))$ и объекта ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in O$ соответственно определяются следующими парами $x_{ij}^P = \langle \mu(x_{ij}^P), T_{ij}^P(k) \rangle$ и $x_{ij} = \langle \mu(x_{ij}), T_{ij}(k) \rangle$, то нечеткое множество $\tilde{X}_i^P$ является собственным подмножеством нечеткого множества $\tilde{X}_i$ тогда и только тогда, если выполняется следующее условие:

$$\forall x_{ij}^P \in \tilde{X}_i^P \exists x_{ij} \in \tilde{X}_i [\rho(\mu(x_{ij}^P), \mu(x_{ij})) \geq h].$$

Определение 4. Если одноименные характеристики в описании предметной переменной $x_i(\tilde{X}_i^P)$ предиката $P(x_i(\tilde{X}_i^P))$ и объекта ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in O$ соответственно определяются следующими парами: $x_{ij}^P = \langle x_{ij}^*, T_{ij}^*(k) \rangle$ и $x_{ij} = \langle x_{ij}, T_{ij}(k) \rangle$, то нечеткое множество $\tilde{X}_i^*$ является собственным подмножеством нечеткого множества $\tilde{X}_i$, если выполняется условие: $\forall x_{ij}^P \in \tilde{X}_i^P \exists x_{ij} \in \tilde{X}_i [(\lvert x_{ij}^* - x_{ij} \rvert \leq \varepsilon) \oplus (\rho(x_{ij}^*, x_{ij}) \geq h)]$, где: x_{ij}^*, x_{ij} – количественные значения одноименной характеристики соответственно в нечетко заданных множествах $\tilde{X}_i^P$ и $\tilde{X}_i$; $\oplus$ – операция, означающая необходимость выполнения хотя бы одной части проверяемого условия; $\rho(x_{ij}^*, x_{ij})$ – степень нечеткого равенства значений одноименных характеристик x_{ij}^*, x_{ij} , определяемая по правилу 2.

2. Правила вывода правдоподобных умозаключений на основе нечетко заданных условно-зависимых предикатов

Опираясь на приведенные выше оценки схожести и нечеткой идентичности объектов ПС, можно построить следующие правила вывода правдоподобных умозаключений, обеспечивающих возможность планирования целенаправленным манипулированием различными объектами ПС.

1. Трактутивные (от частного к частному) правила вывода правдоподобных умозаключений. Пусть в модели знаний КМ зафиксирован факт в виде следующего истинного высказывания $P(o_1(\tilde{X}_1), \text{МК}(b_j))$ – «Объект

$o_1(\tilde{X}_1)$ способен летать с высокой скоростью и МК b_j – не способен его догнать» и наблюдает в ПС подвижный объект $o_i(\tilde{X}_i)$. Отсюда, трактутивные правила вывода правдоподобных

умозаключений о том, что КМ b_j – не способен преследовать подвижный объект ПС $o_i(\tilde{X}_i)$, можно сформулировать следующим образом.

1.1. С использованием степени нечеткой схожести сравниваемых между собой объектов:

$$P(o_1(\tilde{X}_1), \text{МК}(b_j)) \otimes (\rho^*(o_1(\tilde{X}_1), o_i(\tilde{X}_i)) \geq h) \rightarrow \\ \rightarrow P(o_i(\tilde{X}_i), \text{МК}(b_j)), h.$$

Приведенная запись означает: если высказывание $P(o_1(\tilde{X}_1), \text{МК}(b_j))$ является истинным, а степень нечеткого сходства $\rho^*(o_1(\tilde{X}_1), o_i(\tilde{X}_i))$ сравниваемых между собой объектов $o_1(\tilde{X}_1)$ и $o_i(\tilde{X}_i)$ принимает значение не менее заданного порога h , то высказывание $P(o_i(\tilde{X}_i), \text{МК}(b_j))$ «Объект $o_i(\tilde{X}_i)$ летит с высокой скоростью и МК b_j – не способен его преследовать» является правдоподобным со степенью истинности, равной h .

1.2. С использованием степени нечеткого равенства сравниваемых между собой объектов:

$$P(o_1(\tilde{X}_1), \text{МК}(b_j)) \otimes (\rho(o_1(\tilde{X}_1), o_i(\tilde{X}_i)) \geq h) \rightarrow \\ \rightarrow P(o_i(\tilde{X}_i), \text{МК}(b_j)).$$

Приведенная запись означает: если высказывание $P(o_1(\tilde{X}_1), \text{МК}(b_j))$ является истинным, а степень нечеткого равенства $\rho(o_1(\tilde{X}_1), o_i(\tilde{X}_i))$ сравниваемых между собой объектов принимает значение не менее заданного порога h , то высказывание $P(o_i(\tilde{X}_i), \text{МК}(b_j))$ является истинным.

1.3. По степени нечеткого вхождения $\rho(\tilde{X}_1 \subseteq \tilde{X}_i)$ множества характеристик объекта $o_1(\tilde{X}_1)$ в множество характеристик объекта $o_i(\tilde{X}_i)$:

$$P(o_1(\tilde{X}_1), \text{МК}(b_j)) \& (\rho(\tilde{X}_1 \subseteq \tilde{X}_i) \geq h) \rightarrow \\ \rightarrow P(o_i(\tilde{X}_i), \text{МК}(b_j)), h.$$

Данное выражение означает, что если высказывание $P(o_i(\tilde{X}_1), KM(b_j))$ истинно, а степень нечеткого вхождения $\rho(\tilde{X}_1 \subset \tilde{X}_i)$ нечеткого множества $\tilde{X}_1$ в нечеткое множество $\tilde{X}_i$ принимает значение не менее заданного порога h , то высказывание $P(o_i(\tilde{X}_i), KM(b_j))$ является правдоподобно истинным со степенью истинности h .

2. Индуктивные правила вывода правдоподобных умозаключений формируются с целью обобщения различных фактов установленных КМ о различных объектах ПС, например, в процессе традуктивного вывода.

Пусть задано правдоподобное высказывание $S(o_i(\tilde{X}_i^s), KM(b_j^*))$ - «КМ способен догнать b_j^* подвижный объект $o_i(\tilde{X}_i^s)$, обладающий множеством характеристик $\tilde{X}_i^s$ » и полученные из него в процессе пополнения знаний на основе различных правил традуктивного вывода правдоподобные высказывания $S(o_i^j(\tilde{X}_i^j), KM(b_j^*))$,

$j = \overline{1, n}$, имеющие степени истинности, равные h_j . Каждое такое высказывание означает, например, что соответствующий ему объект способен летать со средней скоростью и КМ способен догнать такой объект ПС. Тогда на основе следующего индуктивного вывода можно сформировать условно-зависимый предикат Q , позволяющий обобщить исходные правдоподобные высказывания:

$$\begin{aligned} & S(o_i^1(\tilde{X}_i^1), KM(b_j^*)), \rho(\tilde{X}_i^s \subset \tilde{X}_i^1) = h_1; \\ & \dots \\ & S(o_i^j(\tilde{X}_i^j), KM(b_j^*)), \rho(o_i(\tilde{X}_i^s), o_i^j(\tilde{X}_i^j)) = h_j; \\ & \dots \\ & S(o_i^n(\tilde{X}_i^n), KM(b_j^*)), \rho(o_i(\tilde{X}_i^s), o_i^n(\tilde{X}_i^n)) = h_n; \\ & \underline{Q = \forall o_i(\tilde{X}_i) \in \tilde{O} | ((\rho(\tilde{X}_i^s \subset \tilde{X}_i) \geq h) \oplus} \\ & (\rho(o_i(\tilde{X}_i^s) \leftrightarrow o_i^j(\tilde{X}_i^j)) \geq h) \oplus (\rho(o_i(\tilde{X}_i^s), o_i^j(\tilde{X}_i^j)) \\ & \geq h) [S(o_i(\tilde{X}_i), KM(b_j^*)), h^*], \end{aligned}$$

где $P(x_i(\tilde{X}_i^P), KM(b_j^*))$ – условно-зависимый предикат «Все подвижные объекты ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in O$, обладающие множеством характеристик $\tilde{X}_i^P$, КМ способен догнать», при допустимом означивании которого произвольными объектами ПС, обладающими множеством характеристик $\tilde{X}_i^P = \bigcap_{j=1}^n \tilde{X}_i^j$, получают правдоподобные высказывания со степенью истинности h^* , $h^* = \min_{j=1}^n h_j$; $|$ – операция означающая: объекты, для которых выполняется следующее за чертой условие.

Приведенное правило вывода показывает, что в результате обобщения одинаковых правдоподобных высказываний, полученных относительно схожих и нечетко идентичных между собой объектов ПС, формируется условно-зависимый предикат: Q = «Все объекты, которые

обладают множеством характеристиками $\tilde{X}_i^P$, КМ способен преследовать и догнать в ПС».

3. Дедуктивные правила вывода правдоподобных умозаключений применяются для пополнения знаний, если требуется, например, установить обладает или нет, тот или иной объект ПС определенным умением или свойством.

Пусть задан условно-зависимый нечеткий предикат $P(y_i(\tilde{X}_i^P), KM(b_j^*))$ – «КМ(b_j^*) спосо-

бен преследовать подвижные объекты $y_i(\tilde{X}_i^P)$,

обладающие множеством характеристик $\tilde{X}_i^P$, на основе которого получают правдоподобные высказывания при допустимом означивании в нем предметной переменной $y_i(\tilde{X}_i^P)$

объектами ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in O$, т.е., например, ко-

гда справедливым является условие $\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i$. Опираясь на вышесказанное, дедуктивные правила вывода правдоподобных умозаключений можно построить следующим образом.

3.1. В логической форме записи:

$$\forall o_i(\tilde{X}_i) \in \tilde{O} | ((\rho(\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i) \geq h) [P(o_i(\tilde{X}_i), KM(b_j^*))]);$$

$$\tilde{X}_i^P \subseteq \tilde{X}_i^* \rightarrow o_i^*(\tilde{X}_i^*)[P^*(o_i^*(\tilde{X}_i^*), \text{KM}(b_j^*))]; h,$$

где: $\tilde{O}$ – нечеткое множество аналогичных между собой объектов ПС, способных летать;

$P^*(o_i(\tilde{X}_i), \text{KM}(b_j^*))$ – правдоподобное высказывание, полученное из предиката $P(x_i(\tilde{X}_i^P), \text{KM}(b_j^*))$ в результате означивания в

нем нечеткой предметной переменной $y(\tilde{X}_i^P)$ объектом ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in \tilde{O}$, для которого выпол-

няется условие $\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i$; $\rightarrow$ – импликация в продукционном правиле вывода, означающая: если множество характеристик произвольного

объект ПС $o_i(\tilde{X}_i)$ удовлетворяет условию

$\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i$, то правдоподобным является выска-

зывание $P^*(o_i(\tilde{X}_i))$ со степенью истинности, равной степени нечеткого включения множества $\tilde{X}_i^P$ в нечеткое множество $\tilde{X}_i$.

3.2. В содержательной форме записи:

Для каждого объекта ПС $o_i(\tilde{X}_i) \in \tilde{O}$, обладающего множеством характеристик $\tilde{X}_i^P$, правдоподобным является высказывание: «КМ способен преследовать объект $o_i(\tilde{X}_i)$ »

Объект $o_i^*(\tilde{X}_i^*)$ обладает множеством характеристик $\tilde{X}_i^P$, следовательно, для МК способен преследовать данный объект со степенью истинности, равной оценке $\rho(\tilde{X}_i^P \subset \tilde{X}_i)$.

В качестве примера рассмотрим следующее правило вывода:

КМ может преследовать произвольный объект ПС, если он летит со средней скоростью.

Наблюдаемый в ПС объект $o_i^*(\tilde{X}_i^*)$ летит со средней скоростью.

КМ способен догнать объект $o_i^*(\tilde{X}_i^*)$.

Необходимо отметить, что аналогичным образом строятся и правила дедуктивного вывода правдоподобных умозаключений, когда одноименные характеристики в нечетких мно-

жествах $\tilde{X}_i^P$ и $\tilde{X}_i^*$ определяются соответственно парами $x_{ij}^P = \langle x_{ij}^*, T_{ij}^*(k) \rangle$ и $x_{ij} = \langle x_{ij}, T_{ij}(k) \rangle$.

Следует также отметить, что изменяя нечеткое множество характеристик $\tilde{X}_i^P$, и нечеткое содержание предиката P , аналогичным образом можно построить правила дедуктивного вывода правдоподобных умозаключений для различных объектов ПС и отрабатываемых КМ действий.

Заключение

1. Предложенные в работе правила традиционного, индуктивного и дедуктивного вывода правдоподобных умозаключений на основе нечетко заданных условно-зависимых предикатов, позволяют интеллектуальному решателю задач КМ оперативным образом пополнять недостающие для планирования целенаправленного поведения знания в условиях неопределенности на основе конкретизации или обобщения заданных ему или установленных в процессе поведения сведений. Это достигается за счет отсутствия необходимости применения для пополнения знаний трудоемких процедур логического вывода, характерных для широко используемых в настоящее время способов пополнения знаний в известных интеллектуальных решателях проблем.

2. Использование нечетких условно-зависимых предикатов в качестве аксиом для и пополнения знаний позволяет обобщить описание различных объектов и событий ПС и на этой основе обеспечить решение сложных проблем в априори недоопределенных условиях ПС без привлечения для этого трудоемких процедур логического вывода.

3. Дальнейшее развитие предложенного способа пополнения знаний сводится к построению комбинированных правил вывода сложных правдоподобных умозаключений в априори недоопределенных условиях ПС с применением в ка-

честве аксиом нечетко заданных формул логики условно-зависимых предикатов.

Литература

1. Абрисимов В.К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов. М.: Наука, 2017. 304 с.
2. Шенк Р. Обработка концептуальной информации. М.: Энергия, 1980. 360 с.
3. Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Руководство. М.: Диалектика / Вильямс, 2015. 1408 с.
4. Литвинцева Л.В. Сценарии. В кн. Искусственный интеллект. В 3-х кн. Кн. 2. Методы и модели: Справочник / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. С. 56 – 60.
5. Сотник С.А. Проектирование систем искусственного интеллекта. М.: НОУ «Институт», 2016. 228 с.
6. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 284 с.
7. Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. М.: Либерком, 2014. 272.
8. Scheper W. J., Scheper G. C. Autopsies on autopoiesis. Behavioral Science, 1996, Vol.41, N.1, p.3-12.
9. Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Руководство. М.: Диалектика / Вильямс, 2015. 1408 с.
10. Осуга С., Саэки Ю., Судзуки Х. и др. Под ред. Осуги С., Саэки Ю. Приобретение знаний. М.: Мир, 1990. 304с.
11. Мелехин В.Б. Логика условно-зависимых рассуждений: представление знаний и правила вывода умозаключений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. №1. С 65–74.
12. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
13. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
14. Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. №1. Том 44. С. 48-60.

Knowledge Autonomous unmanned quadcopter – manipulator in an uncertain environment problem

V. B. Melekhin ¹, M.V. Khachumov ^{II}

¹Federal state budgetary educational institution of higher education "Dagestan state technical University", Makhachkala, Russia

^{II} Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. We develop a method replenishing the knowledge of the quadcopter equipped with a manipulator based on the fuzzy inference of plausible conclusions, allowing to obtain the missing information about the objects of the problem environment necessary for the planning of targeted behavior in under-defined operating conditions. Conditions for the application of different similarity assessments for comparing incompletely described objects of the problematic environment are proposed. The conclusion of plausible reasoning is organized on this basis with the required for decision-making degree of truth. The rules for deductive, inductive and transductive reasoning are synthesized using the assumptions formed by indistinctly defined condition-dependent predicates and statements. This allows the intelligent task solver of unmanned aerial vehicles with limited computing resources to fill expeditiously the missing knowledge in various conditions of underdetermined problem environment.

Keywords: knowledge, condition-dependent predicate, plausible reasoning, rules of inference, unmanned aerial vehicle.

DOI 10.14357/20718594190104

References

1. Abrosimov V. K. Groups of intelligent flight vehicles. – М.: Nauka, 2017. 304 p.
2. Schenk R. Processing of conceptual information. М.: Energy, 1980. 360 p.
3. Norvig P. Artificial intelligence. A modern approach. Guide. М.: Dialectics / Williams, 2015. 1408 p.
4. Litvintseva L. V. Scripts. In the book. Artificial intelligence. Methods and models: Handbook / ed. by D. A. Pospelov. М.: Radio and communication, 1990. Pp. 56 – 60.
5. Centurion, S. A., Design of artificial intelligence systems. Moscow: NOU "Institute", 2016. 228 p.
6. Pospelov D. A. Situational control: theory and practice. М.: Nauka, 1986. 284 p.
7. Osipov G. S. Lectures on artificial intelligence. М.: Liberkom, 2014. 272 p.
8. Scheper W. J. and Scheper G. C. Autopsies on autopoiesis. Behavioral Science, 1996, Vol.41, N.1, p.3-12.
9. Norvig P. Artificial intelligence. Modern approach. Guide. М.: Dialectics / Williams, 2015. 1408 c.

10. Osuga S., Saeki, Y., Suzuki, H. and others, ed Osugi, S., Saeki, Y. the Acquisition of knowledge. M.: Mir, 1990. 304 p.
11. Melekhin, V. B. The logic of conditionally-dependent reasoning: knowledge representation and inference rules reasoning // Artificial intelligence and decision-making, 2016. №. 1. Pp. 65-74.
12. Zadeh L. The concept of linguistic variable and its application to approximate decision making. M.: Mir, 1976. 165 p.
13. Melikhov A. N., Bershtein L. S., Korovin S. Y. Situational advising systems with fuzzy logic. M.: Nauka, 1990. 272 p.
14. Abduragimov T. T., Melekhin V. B., Khachumov V. M. Information-analytical model of a fuzzy PID controller // Bulletin of the Dagestan state technical University. Technical Sciences. 2017. №. 1. Vol.44. Pp. 48-60.