

Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной среде. Часть II. Структура и применение фрейм-операций^{*,1}

В.Б. Мелехин^I, М.В. Хачумов^{II}

^I Дагестанский государственный университет народного хозяйства, г. Махачкала, Республика Дагестан, Россия

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

Аннотация. Предложена модель представления процедурных знаний интеллектуального беспилотного летательного аппарата безотносительно к конкретной предметной области в виде заданного множества фрейм-операций, позволяющая планировать целенаправленную деятельность в априори недоопределенных сложных проблемных средах. Для сжатия и обобщения информации в разработанной модели представления знаний использованы формулы логики условно-зависимых предикатов и лингвистические переменные для описания различных отношений в формируемых ситуациях проблемной среды и условиях, определяющих возможность целенаправленной отработки роботом различных операций. Разработаны процедуры автоматического планирования целенаправленной деятельности по различиям, имеющие полиномиальную сложность вывода, что позволяет беспилотному летательному аппарату, как правилу имеющему ограниченные вычислительные ресурсы, оперативным образом решать сложные задачи целенаправленной деятельности в реальных, априори недоопределенных условиях функционирования.

Ключевые слова: интеллектуальный беспилотный летательный аппарат, планирование целенаправленной деятельности, фрейм-операции, недоопределенная проблемная среда.

DOI 10.14357/20718594180315

Введение

Одной из важных проблем искусственного интеллекта является создание интеллектуального беспилотного летательного аппарата (БПЛА), обладающего широкими функциональными возможностями. Как правило, БПЛА имеет ограниченные вычислительные ресурсы и функционируют в недоопределенных условиях проблемной среды (ПС), что выдвигает особые требования, предъявляемые к модели представления и обработки его знаний. К основным таким требованиям следует отнести:

1) необходимость компактного представления знаний в общем виде безотносительно к конкретной предметной области;

2) полиномиальную сложность процедур вывода решений в процессе планирования целенаправленной деятельности БПЛА в недоопределенных условиях ПС.

Известные модели представления и обработки знаний не могут в полной мере удовлетворить указанные требования. В частности, использование логического подхода, основанного на применении предикатов первого порядка, требует построения громоздкой подробной модели ПС при относительно низких

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 17-29-07003 офи_м, № 18-07-00025 а).

¹Первая часть статьи опубликована в №2, 2018.

✉ Хачумов Михаил Вячеславович e-mail: khmike@inbox.ru

функциональных возможностях создаваемых на ее основе интеллектуальных систем. К тому же процедуры вывода решений в этом случае имеют экспоненциальную сложность [1-5].

Семантические сети и фреймовые структуры хотя и позволяют в компактной форме выразительным образом представлять знания автономных интеллектуальных систем, но для них отсутствуют эффективные процедуры вывода решений [6-8].

Специальные модели представления знаний и продукционные правила вывода ограничены тем, что они не позволяют автоматически выявлять различия между текущей и целевой ситуациями ПС в условиях недоопределенности, устранение которых эффективным образом обеспечивает достижение стоящей цели [9-12].

В первой части данной работы была предложена модель, позволяющая в значительной степени удовлетворить основные требования, предъявляемые к представлению и обработке знаний интеллектуального БПЛА [13]. Данная модель представления знаний определяется упорядоченным множеством фрейм - микропрограмм поведения (ФМП) представляющих собой решения типовых элементарных подзадач поведения безотносительно к конкретной предметной области. ФМП позволяют, используя специальные процедуры вывода, формировать программы поведения обеспечивающие решение сложных задач в процессе целенаправленной деятельности БПЛА в недоопределенных условиях ПС. Важным достоинством такой модели представления процедурных знаний автономных интеллектуальных систем является то, что она позволяет значительно сократить пространство поиска решения сложных задач за счет целенаправленного выбора на каждом шаге планирования поведения нескольких операций, связанных с достижением стоящей перед БПЛА цели.

Однако при отсутствии хотя бы одной ФМП необходимой для достижения заданной БПЛА цели, сформировать план целенаправленного поведения становится практически невозможным. Обойти данный недостаток представления процедурных знаний БПЛА в виде множества ФМП, можно путем их дополнения типовыми структурами, определяющими условия и результат отработки отдельных операций или с помощью фрейм - операций (ФО). Расширенная таким образом модель представления проце-

дурных знаний становится более гибкой и обеспечивает возможность интеллектуальному решателю БПЛА планировать целенаправленную деятельность в различных условиях сложной недоопределенной ПС.

Рассмотрим случай, когда основные задачи целенаправленной деятельности БПЛА сводятся к перелетам в ПС и выполнению различных операций над находящимися в ней объектами. Тогда для планирования целенаправленной деятельности БПЛА требуется предварительное построение формальной модели текущих условий ПС, которое сводится к автоматической генерации семантической сети в пространстве состояний на основе данных поступающих из системы технического зрения. Ключевая вершина такой сети помечается БПЛА, а остальные вершины определяются объектами ПС, над которыми ему предстоит выполнить спланированные операции согласно заданной цели. Ребра между вершинами в формируемой семантической сети определяются бинарными отношениями в пространстве состояний между положением объектов в ПС и БПЛА, а также характеризуют их взаимодействие между собой.

Следует отметить, что упорядоченное множества ФО может быть использовано и как самостоятельная модель представления знаний, позволяющая автоматически формировать сложные программы целенаправленной деятельности автономных интеллектуальных систем различного назначения, активно взаимодействующих с ПС

1. Структура представления процедурных знаний БПЛА и модели текущих ситуаций ПС

В общем случае каждая ФО определяется формулой логики условно-зависимых предикатов [14], имеющей, например, следующую структуру:

$$Q_i(z_i)(P_i(b_i(o_i(X_i), o_j(X_j)))) \rightarrow S_i^*, \quad (1)$$

где, например, операция b_i - «Сфотографировать объекты $o_i(X_i)$ и $o_j(X_j)$ »;

Q_i - идентификатор, определяемый различием между текущей и требуемой ситуацией ПС, которое можно устранить, выполнив операцию соответствующей ФО. Например, для

устранения различия определяемого отношением Z_i - «расстояние между положением БПЛА и заданным объектом» - может потребоваться либо увеличить это расстояние, либо его уменьшить, используя соответствующую по назначению ФО «Отлететь от объекта» или «Подлететь к объекту»;

P_i - условия, которое должно выполняться в ПС для успешной отработки операции b_i - «объект должен находиться в пределах разрешающей способности технического зрения БПЛА»;

X_i, X_j - характеристики, которыми должны обладать соответственно произвольные объекты ПС $o_i(X_i)$ и $o_j(X_j)$ для целесообразности выполнения операции b_i ;

S_i^* - семантическая сеть, определяющая текущую ситуацию ПС после отработки операции b_i .

Следует отметить, что формула, соответствующая ФО (1) является истинной в текущих условиях ПС тогда и только тогда, когда выполняется условие P_i , а воспринимаемые в среде объекты $o_i^*(X_i^*)$ и $o_j^*(X_j^*)$ удовлетворяют требованию « $(X_i \subseteq X_i^*) \& (X_j \subseteq X_j^*)$ ». В этом случае БПЛА способен успешно отработать операцию b_i . В противном случае, когда в ПС условие P_i не выполняется, принимается решение - между фактической и требуемой для обработки операции b_i ситуаций ПС существует различие, которое предварительно следует устранить.

При отсутствии в ПС объектов, для которых выполняются условия « $(X_i \subseteq X_i^*) \& (X_j \subseteq X_j^*)$ », принимается решение о нецелесообразности отработки операции b_i в текущей ситуации.

Рассмотрим ФО, в которой условия, определяющие успешную отработку соответствующей ей операции, состоят из нескольких предварительных требований. Например, ФО - Q_i = «Заполнить горящий объект $o_i(X_i)$ водой» - имеющую следующую структуру:

$$Q_i(<P_i^1, P_i^2, P_i^3 > b_i(o_i(X_i))) \rightarrow S_i^*,$$

где $<P_i^1, P_i^2 >$ - кортеж условий, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки операции b_i с объектом $o_i(X_i)$. В рассматриваемом случае, данные условия определяются следующим образом: P_i^1 - «Резервуар заполнен водой, P_i^2 - объект $o_i(X_i)$ расположен по отношению БПЛА на требуемом расстоянии, P_i^3 - объект расположен под требуемым углом атаки».

Необходимо отметить, что если в ПС одновременно не выполняются все условия P_i^1, P_i^2 и P_i^3 то для успешной отработки операции b_i БПЛА должен устранить соответствующие различия между значениями бинарных отношений в текущей ситуации среды при данных условиях в порядке, определяемом их положением в заданном кортеже.

Следует также отметить, что в ФО и в описании текущих ситуаций ПС отношения между БПЛА и различными находящимися в среде объектами, целесообразно определить в нечеткой форме представления. Это позволяет, с одной стороны, задать процедурные знания БПЛА в более общем виде, безотносительно к конкретным условиям ПС. С другой стороны, при ограниченных объемах памяти и вычислительной мощности интеллектуального решателя задач, - обеспечить БПЛА необходимые функциональные возможности при существенном снижении размерности описаний, требующихся в процессе решения сложных задач целенаправленной деятельности. Например, все объекты, находящиеся «близко» или в пределах разрешающей способности технического зрения, могут быть сфотографированы БПЛА независимо от фактического значения расстояния их текущего положения в ПС.

Для этого каждому отношению $z_j, j = \overline{1, n}$, определяющему либо условия успешной отработки операции выбранной ФО в конкретных условиях ПС, либо характеризующему взаимодействие в среде объектов между собой и БПЛА, ставится в соответствие лингвистическая переменная (ЛП) $Z_j, j = \overline{1, n}$. В общем случае каждая ЛП имеет следующую структуру [15]:

$$Z_j = (Z_j^*, T_j, z_j^*, U_j, F_j),$$

где: Z_j^* - название ЛП, которое совпадает с идентификатором отношения z_j ;

$T_j = \{T_j^i\}, i = \overline{1,5}$ - терм-множество или множество нечетко заданных значений отношения z_j , например, термы отношения «Расстояние между БПЛА и объектом» определяются следующим образом: «расположен очень близко», «расположен близко», «расположен на среднем расстоянии», «расположен на далеком расстоянии» и «расположен на очень далеком расстоянии». Каждый терм T_j^i характеризуется соответствующей ему нечеткой переменной или нечетким множеством количественных значений ЛП с треугольной функцией принадлежности, которые определяются граничными значениями a_j^{i-1} и a_j^i на ее базовой шкале либо экспертным путем, либо на основе технических характеристик БПЛА (Рис. 1);

z_j^* - базовое или конкретное значение ЛП, например, расстояние между роботом и объектом ПС, найденное подсистемой технического зрения БПЛА;

$U_j = [0, a_j^5]$ - множество базовых значений, определяющих шкалу ЛП, верхнее граничное значение которого, например, для лингвистической переменной «Расстояние до объекта» определяется разрешающей способностью технического зрения БПЛА;

F_j - преобразования, определяющие переход от количественного представления различных значений ЛП z_j^* к нечетким их значениям

или термам T_j^i для обобщения знаний в процессе принятия решений, и обратный переход, от нечетких значений T_j^i к соответствующим им количественным значениям, например, для построения программных движений в процессе отработки БПЛА различных операций.

Использование ЛП для обобщенного представления различных отношений в условиях ФО и ситуациях ПС позволяет определять их следующими парами $z_j^* = \langle \mu(z_j^*), T_j^i \rangle$, где $\mu(z_j^*)$ - степень принадлежности количественного значения z_j^* ЛП к нечеткому множеству, определяемому термом T_j^i .

Для формирования пар $z_j^* = \langle \mu(z_j^*), T_j^i \rangle$ используются следующие преобразования F_j [16]:

если $0 \leq z_j^* < a_j^1$, то значению z_j^* соответствует терм T_j^1 , иначе,

если $a_j^1 \leq z_j^* < a_j^2$, то значению z_j^* соответствует терм T_j^2 , иначе,

... ..

если $a_j^4 \leq z_j^* \leq a_j^5$, то значению z_j^* соответствует терм T_j^5 .

В этом случае степень принадлежности $\mu(z_j^*)$ количественного значения ЛП z_j^* к нечеткому множеству, определяемому термом T_j^i , можно вычислить следующим образом:

$$\mu(z_j^*) = 1 - \frac{z_j^*}{a_j^i},$$

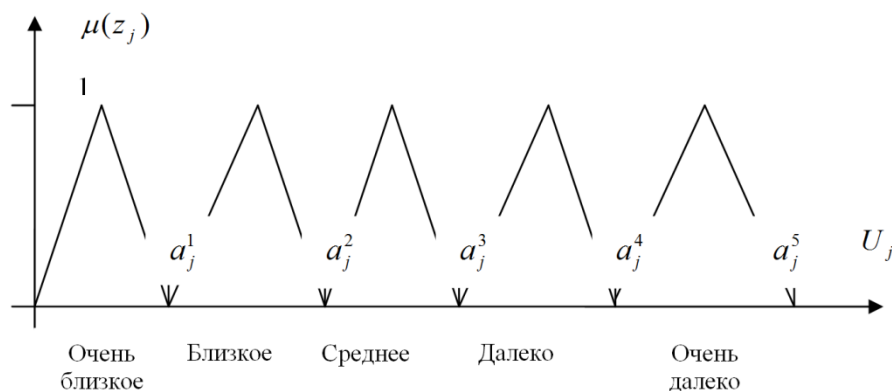


Рис. 1. Лингвистическая переменная «Расстояние до объекта»

где a_j^i - верхняя граница числовых значений терма T_j^i .

Тогда нечетко представленные значения $z_j^1 = \langle \mu(z_j^1), T_j^1 \rangle$ и $z_j^2 = \langle \mu(z_j^2), T_j^2 \rangle$ одного и того же отношения z_j можно сравнить между собой в процессе обработки знаний, используя степень их нечеткого равенства $\rho(z_j^1, z_j^2)$, определяемую следующим образом:

если $(|\mu(z_j^1) - \mu(z_j^2)| \leq \mu_0) \& (T_j^1 = T_j^2)$, то $\rho(z_j^1, z_j^2) = 1$, иначе,
 если $|\mu(z_j^1) - \mu(z_j^2)| > \mu_0) \& (T_j^1 = T_j^2)$, то $\rho(z_j^1, z_j^2) = \mu(z_j^1) \leftrightarrow \mu(z_j^2)$, иначе, (2)
 если $(T_j^1 \neq T_j^2)$, то $\rho(\mu(z_j^1)\mu(z_j^2)) = 0$,

где: $|\mu(z_j^1) - \mu(z_j^2)|$ - абсолютная величина разности; $\leftrightarrow$ - операция нечеткой эквивалентности, по [17]:

$$\min(\max(\mu(z_j^1), 1 - \mu(z_j^2)), \max(\mu(z_j^2), 1 - \mu(z_j^1))) ; \quad (3)$$

μ_0 - допустимая погрешность сравнения; $\&$ - конъюнкция, означающая необходимость одновременного выполнения правой и левой части проверяемого условия.

Полагаем, что сравниваемые таким образом различные значения z_j^1, z_j^2 отношения z_j равны между собой, если $\rho(z_j^1, z_j^2) = 1$, т.е. оба значения отношения попадают в заданную окрестность μ_0 одной и той же точки на шкале допустимых значений, соответствующей ЛП. В этом случае, БПЛА не требуется выполнения каких либо операций для изменения данного отношения в процессе планирования целенаправленной деятельности.

Сравниваемые значения z_j^1, z_j^2 отношения z_j нечетко равны между собой при условии, что $\rho(z_j^1, z_j^2) \geq h$, т.е. степень их нечеткого равенства принимает значение не менее заданного порога h . При $\rho(z_j^1, z_j^2) < h$, для достижения стоящей перед БПЛА цели, может потребоваться корректировка фактического значения данного отношения в ПС.

Наконец, сравниваемые значения z_j^1, z_j^2 отношения z_j не равны между собой, если степень их нечеткого равенства принимает значение, равное нулю. В этом случае между фактической и требуемой для обработки операции ФО ситуацией ПС имеется различие, которое необходимо устранить.

Основным недостатком оценки (2) является то, что получаемое в результате значение по (3) в ряде случаев может не позволить БПЛА выполнить операции различных ФО с требуемой точностью. Это наиболее существенным образом проявляется в том случае, когда термы сравниваемых пар значений отношения z_j равны между собой $T_j^1 = T_j^2$, но для значения z_j^1 отношения z_j в одной паре выполняется условие $\mu(z_j^1 + \Delta z_j) - \mu(z_j^1) < 0$, например, в текущей ситуации ПС, а для другой пары определяющей отношение, в условиях, характеризующих успешную отработку операций различных ФО, выполняется неравенство $\mu(z_j^2 + \Delta z_j) - \mu(z_j^2) > 0$.

Другими словами, точность сравнения нечетко заданных значений отношения z_j по (3) может оказаться недостаточной для получения требуемого результата, если значение функции принадлежности, например, $\mu(z_j^1)$ при приращении на малую величину $\mu(z_j^1) = \mu(z_j^1) + \Delta z_j$ растёт, а функции принадлежности $\mu(z_j^2)$, $\mu(z_j^2) = \mu(z_j^2) + \Delta z_j$ - падает, т.е. значения степеней принадлежности $\mu(z_j^1)$ и $\mu(z_j^2)$ находятся по разные стороны от максимума функции принадлежности $\mu(z_j)$.

Обойти указанный выше недостаток и обеспечить более высокую точность выполняемых БПЛА операций, можно следующим образом.

Если выполняется условие:

$$((\mu(z_j^1 + \Delta z_j) - \mu(z_j^1)) > 0) \& ((\mu(z_j^2 + \Delta z_j) - \mu(z_j^2)) > 0) \vee ((\mu(z_j^1 + \Delta z_j) - \mu(z_j^1)) < 0) \& ((\mu(z_j^2 + \Delta z_j) - \mu(z_j^2)) < 0),$$

то для оценки результата сравнения между собой значений одного и того же отношения z_j используется оценка степени нечеткого равенства (2). В противном случае, различные i -е

значения отношения z_j определяются парами $\langle z_j^i, T_j^i \rangle$, а степень их нечеткого равенства вычисляется следующим образом [18]:

$$\rho(z_j^1, z_j^2) = \begin{cases} 1, & \text{если } |z_j^1 - z_j^2| \leq \Delta z_j; \\ 1 - \frac{|z_j^1 - z_j^2|}{a_i^j - a_{i-1}^j}, & \text{если } (T_j^1 = T_j^2); \\ 0, & \text{если } T_j^1 \neq T_j^2 \end{cases}$$

где Δz_j - величина допустимого отклонения между количественными значениями z_j^1 и z_j^2 отношения z_j , определяемая необходимой точностью выполнения БПЛА операций ФО; a_i^j, a_{i-1}^j - соответственно верхняя и нижняя границы числовых значений терма T_j^i .

В этом случае сравниваемые значения z_j^1 и z_j^2 равны между собой, если $\rho(z_j^1, z_j^2) = 1$, т.е. оба значения данного отношения попадают в заданную окрестность Δz_j одной и той же точки на интервале численных значений T_j^i терма. Сравниваемые значения z_j^1 и z_j^2 нечетко равны между собой с достаточной точностью, если $\rho(z_j^1, z_j^2) \geq h$, и наконец, сравниваемые значения z_j^1 и z_j^2 отношения z_j не равны между собой, если степень их нечеткого равенства $\rho(z_j^1, z_j^2) = 0$.

Рассмотрим модель описания текущих ситуаций ПС в виде нечеткой семантической сети (НСС). Каждая НСС представляет собой мультиграф:

$$G = (V, E, v_0),$$

где V - множество вершин, которые помечаются объектами $o_i^*(X_i^*)$, ПС;

E - множество ребер, которые определяются значениями отношений z_j , которые сложились в ПС между ее объектами и БПЛА, представленными парами $z_j^i = \langle \mu(z_j^i), T_j^i \rangle$;

v_0 - ключевая вершина сети, помеченная БПЛА.

Например, пусть БПЛА наблюдает в ПС два объекта $o_1^*(X_1^*)$ и $o_2^*(X_2^*)$, расположенные от него на расстоянии $l = 25$ м, т.е., на «Среднем расстоянии». Высота h положения БПЛА в среде относительно расположенных на земле объектов равна 2 м, т.е. объекты находятся в пределах разрешающей способности технического зрения или БПЛА находится относительно объектов «Не высоко». Объект $o_1^*(X_1^*)$ расположен рядом с объектом $o_2^*(X_2^*)$. В этом случае, для данной ситуации ПС S_i НСС будет иметь следующую структуру (Рис. 2).

В аналитической форме представления приведенная на Рис. 2 НСС будет иметь следующее описание:

«АИР($\langle \mu(l = 25), \text{среднее} \rangle$,

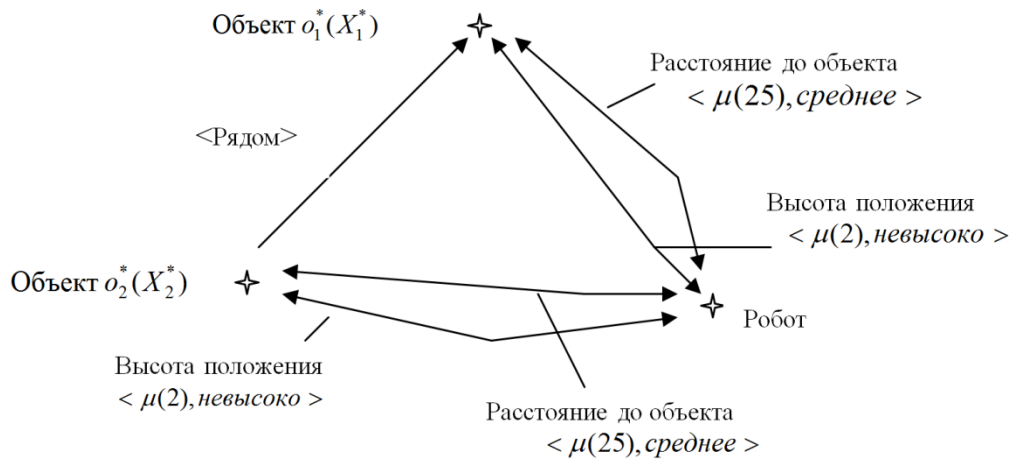


Рис. 2. Структура нечеткой семантической сети S_i

$<\mu(h=2)$, не высоко $>$ объект $o_1^*(X_1^*)$ $\&$
 $(<\mu(l=25)$, среднее $>$, $<\mu(h=2)$, не высоко $>$
 объект $o_2^*(X_2^*)$ $\&$ $\&$ (объект $o_2^*(X_2^*)$ $<$ Рядом $>$
 объект $o_1^*(X_1^*)$). Такая форма описания ситуаций ПС позволяет эффективным образом проверить выполнимость условий, определяющих возможность результативной отработки операций различных ФО в текущих условиях, используя отдельные фрагменты НСС, разделенные операцией $\&$.

2. Процедуры автоматического планирования целенаправленной деятельности БПЛА по различиям

Рассмотрим процедуры планирования целенаправленной деятельности БПЛА с использованием модели представления процедурных знаний в виде упорядоченного множества отдельных ФО.

Допустим, что в процессе планирования целенаправленной деятельности на основе модели представления знаний в виде упорядоченного множества ФМП интеллектуальный решатель задач БПЛА установил, что для результативной отработки операций, выбранной на его текущем ФМП_i, необходимо предварительно устранить различие между фактической и требуемой ситуацией ПС, например, путем изменения местоположения БПЛА относительно заданного объекта $o_1^*(X_1^*)$.

Допустим также, что в модели представления знаний БПЛА отсутствует ФМП, необходимая для решения данной подзадачи. Тогда интеллектуальный решатель задач, для обеспечения в ПС условий требующихся для успешной отработки операций ФМП_i, переходит к планированию целенаправленной деятельности на основе заданного множества ФО. За подцель поведения Q_i^* БПЛА в этом случае принимается устранение различия, которое наблюдается между текущей и требуемой для отработки операций ФМП_i ситуацией ПС.

В основе алгоритма планирования целенаправленной деятельности БПЛА на основе ФО лежат процедуры выбора на каждом текущем шаге таких фрейм - операций, отработка которых позволяет обеспечить в ПС условия для успешной отработки операций, выявленных в

процессе планирования целенаправленной деятельности на ФМП. При этом, если в ПС не выполняется несколько таких условий, то для обеспечения каждого из них формируется своя цепочка целенаправленных операций БПЛА. В результате получается дерево вывода решения стоящей перед БПЛА подзадачи, вершины которого помечаются различиями между текущей ситуацией ПС и ситуацией, необходимой для успешной отработки операций ФО, выбранных в процессе планирования целенаправленной деятельности, а инцидентные данным вершинам ребра определяются операциями БПЛА, позволяющими устранить данные различия.

В структурированном виде алгоритм планирования целенаправленной деятельности БПЛА на основе ФО можно представить следующим образом.

Входные переменные: исходно заданная подцель целенаправленной деятельности – устранить различие Q_i^* ; множество ФО_k, $k=1,2,3,...,m$.

Промежуточные переменные: переменные, выбираемые в процессе планирования ФО_j, и текущие подцели целенаправленной деятельности.

Выходные переменные: последовательность операций, позволяющая достигнуть исходно заданную подцель целенаправленной деятельности.

Метод.

1. Начало.
2. Сформировать текущую ситуацию ПС S_i , принять значение шага планирования $j=1$.
3. Выбрать ФО_j, у которой идентификатор Q_j совпадает с исходно заданной подцелью поведения Q_i^* , перейти к п.5.
4. Выбрать ФО_j, у которой идентификатор Q_j совпадает с текущей подцелью поведения Q_j^* .
5. Проверить условие «объекты ПС, связанные с заданной подцелью Q_j^* , удовлетворяют требованиям означивания предметных переменных в формуле ФО_j»: если условие выполняется, то перейти к п. 6; в противном случае, перейти к п. 15.
6. Проверить условие «в текущей ситуации ПС S_i выполняются все условия $P_j = \{P_j^i\}$, $i=1, m_j$, необходимые для успешной отработки операции b_j выбранной ФО_j»:

если все условия выполняются, то перейти к п. 7;

если не выполняется только одно условие P_j^i из множества условий P_j , то перейти к п. 11;

если не выполняется несколько условий P_j^i , $i = \overline{1, m_j}$ из множества P_j , то перейти к п. 12.

7. Проверить условие « $j = 1$ »: если условие выполняется, то исходно заданная подцель поведения Q_1^* достигается путем отработки операции b_1 ФО₁ выбранной на первом шаге планирования, вернуться к дальнейшему планированию целенаправленной деятельности на основе заданного множества ФМП; в противном случае перейти к п. 8.

8. Проверить условие «сходно заданная подцель поведения Q_i^* достигается в результате отработки операции b_1 после устранения кортежа различий $\langle Q_j^*, Q_{j-1}^*, \dots, Q_2^* \rangle$ в результате отработки операций $\langle b_j, b_{j-1}, \dots, b_2 \rangle$ », выявленных за j шагов планирования целенаправленной деятельности:

если условие выполняется, то план поведения, связанный с устранением различия Q_1^* , является сформированным и представляет собой последовательность действий $b_j \rightarrow b_{j-1} \rightarrow \dots \rightarrow b_2 \rightarrow b_1$. В этом случае следует вернуться к дальнейшему планированию целенаправленной деятельности на основе заданного множества ФМП:

в противном случае, принять $k = j$ и перейти к п. 9.

9. Сформировать кортеж ситуаций $S = \langle S_k, S_{k-1}, \dots, S_1 \rangle$ путем замены отношений в исходной ситуации ПС S_i на их значения в ситуациях S_k^* , определяющих результат отработки операций $b_k, k = \overline{1, j}$, соответствующих ФО_к, выбранных на каждом j -м шаге планирования целенаправленной деятельности БПЛА.

10. Проверить условие «в ситуации S_k устранены все различия для отработки операции b_k ФО_к»:

если условие выполняется и $k \neq 0$, то $k := k - 1$, перейти к п. 10, если $k = 0$, то сформированный план целенаправленной деятельности является некорректным, перейти к п. 2;

если условие не выполняется, то перейти к п. 14.

11. Принять за текущую подцель поведения устранение различия Q_j^* между текущей и требуемой для отработки операции b_j ситуацией ПС, которое соответствует по условию P_j^i , установить $j := j + 1$, перейти к п. 4.

12. Проверить условие « $j = 1$ », если условие выполняется, то перейти к п. 14; в противном случае, перейти к п. 13.

13. Приписать справа к упорядоченному заданному образом списку Q_{j-1} кортежей еще не устраненных различий соответствующих операциям в формируемом плане целенаправленной деятельности, например,

$$\langle \langle Q_1^2 \rangle, \langle Q_2^1, Q_2^2 \rangle, \dots, \langle Q_{j-1}^1, Q_{j-1}^2, Q_{j-1}^3 \rangle \rangle,$$

вновь установленные различия. Например, кортеж различий $\langle Q_j^1, Q_j^2 \rangle$. В результате получим список кортежей еще не устраненных различий, следующего вида:

$$Q_j = \langle \langle Q_1^2 \rangle, \dots, \langle Q_j^1, Q_j^2 \rangle \rangle.$$

14. Выбрать и удалить из списка Q_j первое, стоящее в нем слева различие Q_1^2 , установить номер шага планирования $j := j + 1$, принять в качестве текущей подцели целенаправленной деятельности Q_j^* устранение различия Q_1^2 , перейти к п. 3.

15. У БПЛА отсутствует возможности достижения стоящей цели Q_i^* .

16. Конец.

Следует отметить, что в приведенном алгоритме планирования целенаправленной деятельности БПЛА различия в списках Q_j располагаются в порядке противоположном порядку положения соответствующих им условий $P_j^i, i = \overline{1, m_j}$ в ФО_к. Это позволяет сформировать план целенаправленной деятельности БПЛА в виде дерева решения стоящей перед

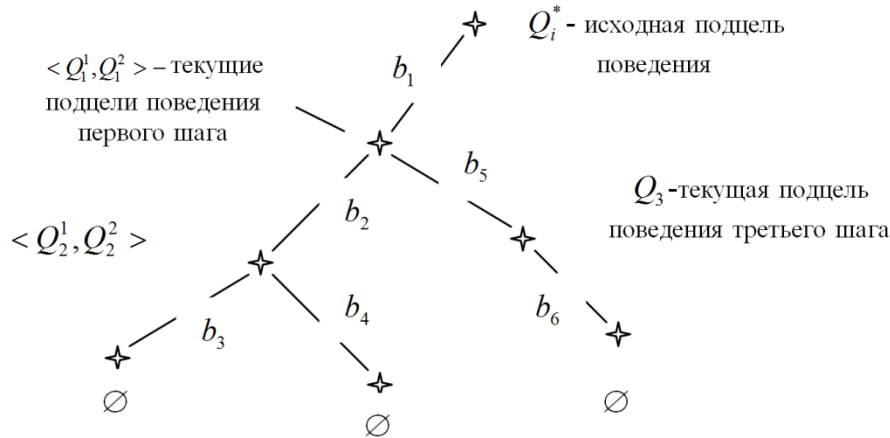


Рис. 3. Пример структуры плана поведения, обеспечивающего БПЛА достижение подцели Q_i^* . Символом пустого множества определяются вершины инцидентные ребрам помеченным операциями, для которых в ПС выполняются необходимые для их отработки условия

ним задачи поведения, например, следующего вида (Рис. 3).

Операции в сформированном таким образом плане целенаправленной деятельности реализуются БПЛА в порядке убывания соответствующих им индексов. В рассмотренном выше примере сформированный план целенаправленной деятельности $b_6 \rightarrow b_5 \rightarrow b_4 \rightarrow b_3 \rightarrow b_2 \rightarrow b_1$ обрабатывается БПЛА, начиная с последнего, выявленного в нем действия b_6 .

Для предложенного алгоритма планирования целенаправленной деятельности БПЛА можно доказать следующие утверждение.

Утверждение. Функциональная сложность β алгоритма планирования целенаправленной деятельности БПЛА по различиям на основе ФО определяется следующими граничными оценками $m_1 \leq \beta \leq \sum_{j=1}^n m_j$, где m_i - количество условий, содержащихся в ФО_j выбранном на j -м шаге планирования; n - общее выполненное количество шагов планирования.

Доказательство.

1. Примем за условную единицу оценки функциональной сложности алгоритма планирования целенаправленной деятельности БПЛА одно сравнение между собой двух значений z_j^1 и z_j^2 отношений z_j , $j = \overline{1, m_j}$ в описании ситуаций ПС.

2. Тогда, если на первом шаге планирования, что вполне вероятно, выбрана ФО₁, у которой

все условия для отработки входящей в нее операции выполняются в ПС, то количество сравнений значений z_j^1 и z_j^2 одноименных отношений z_j в ситуации S_i и условиях P_i^j , $i = \overline{1, m_1}$, выполняемое для определения возможности отработки операции b_1 не может превышать величины, равной m_1 . Следовательно, нижняя граничная оценка функциональной сложности β алгоритма планирования целенаправленной деятельности БПЛА по различиям может быть не менее величины, равной m_1 .

3. В общем же случае, если в процессе планирования целенаправленной деятельности БПЛА выполняется n шагов, связанных с выбором ФО необходимых для устранения всех встречающихся различий, то на каждом таком шаге выполняется не более m_j сравнений значений z_j^1 и z_j^2 одноименных отношений z_j в ситуации S_i и условиях P_i^j , $i = \overline{1, m_j}$.

Следовательно, верхняя граничная оценка функциональной сложности β алгоритма планирования целенаправленной деятельности БПЛА по различиям, может быть не более величины, равной $\sum_{j=1}^n m_j$.

4. Из п. 2-3 следует, что: $m_1 \leq \beta \leq \sum_{j=1}^n m_j$.

Таким образом, учитывая, что каждая ФО, как правило, содержит не более 2-4 условий,

предложенный алгоритм планирования целенаправленной деятельности БПЛА по различиям позволяет ему оперативным образом решать сложные задачи, связанные с достижением стоящих целей в реальных условиях ПС.

Заключение

1. Предложенная модель представления знаний в виде множества фрейм – операций позволяет планировать целенаправленную деятельность БПЛА в априори недоопределенных проблемных средах на основе определения вложенного изоморфизма бинарных отношений, что увеличивает сложность процедур планирования.

2. Использование формул логики условно-зависимых предикатов и лингвистических переменных для описания модели ситуаций ПС и условий, обеспечивающих успешную отработку различных ФО, позволяет получить требуемые функциональные возможности БПЛА согласно его назначению, при минимально необходимой для этого размерности типовых элементов представления процедурных знаний и описаний ПС. Это достигается за счет сжатия информации, используемой для представления знаний БПЛА в общем виде.

3. Предложенный алгоритм автоматического планирования целенаправленной деятельности имеет полиномиальную сложность, что позволяет БПЛА оперативным образом решать сложные задачи целенаправленной деятельности в реальных, априори недоопределенных проблемных средах.

4. Разработанная модель знаний БПЛА на основе ФО является достаточно эффективным самостоятельным способом их представления, позволяющим автономным интеллектуальным системам эффективным образом, при заданной в процедурной форме цели, решать достаточно сложные задачи целенаправленной деятельности без привлечения каких-либо дополнительных средств.

Литература

- Ефимов Е.И. Решатели интеллектуальных задач. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
- Вагин В.Н. Дедуктивный вывод на знаниях. 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. 89 – 105.
- Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 808 p.
- Kober J., Peters J. Learning Motor Skills: From Algorithms to Robot Experiments. – Cham: Springer, 2014. – 201 p.
- Kilani Y., Bsoul M., A. Alsarhan A., Al-Khasawneh A. A Survey of the Satisfiability-Problems Solving Algorithms. // Intern. J. Advanced Intelligence Paradigms. 2013. №3. V.5. Pp. 233 –256.
- Лозовский В.С. Сетевые модели. 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. 28 – 49.
- Осипов Г.С. Методы искусственного интеллекта. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 296 с.
- Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. – М.: Либерком, 2014. – 272 с.
- Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Руководство. – М.: Диалектика / Вильямс, 2015. – 1408 с.
- Рудковская Д., Пилинский М., Рудковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / 2-е. изд. – М.: Горячая линия - Телеком, 2013. – 384 с.
- Варламов О.О., Лазарев В.М., Чувилов Д.А., Пунам Д. О перспективах создания автономных интеллектуальных роботов на основе миварных технологий // Радиопромышленность. 2016, №4, С. 96-105.
- Каляев И.А., Гайлук А.Р., Капустян С.Г. Модели алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
- Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной среде. Часть 1. Структура и применение фрейм-микропрограмм поведения. Искусственный интеллект и принятие решений, 2018, №2, С.73-83.
- Мелехин В.Б. Логика условно-зависимых рассуждений: представление знаний и правила вывода умозаключений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016, №1, С 65–74.
- Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
- Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 240 с.
- Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
- Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017, №1, Том 44, С. 48-60.

Planning purposeful activities intellectually autonomous robot in an under defined problem environment. Part II. The structure and use of frame operations

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

^I Dagestan state University of national economy, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

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

The model of representation of procedural knowledge of intelligent unmanned aerial vehicle without regard to a particular subject region in a given frame operations that can be planned purposeful activity in a priori underdetermined, complex problem environments. To compress and summarise the information in the developed models of knowledge representation used formulas conditional logic-dependent predicate and the linguistic variables to describe the various relations in the emerging situations of problem environment and the conditions that determine the purposeful testing of the robot for different operations. Developed procedures for automatic planning of focused activities for differences with polynomial complexity that allows the unmanned aerial vehicle, generally having limited computing resources in a rapid manner to solve complex problems focused activities in the real, a priori, under defined conditions.

Keywords: smart UAV, the planning of focused activities, the frame-operations, under defined problem environment.

DOI 10.14357/20718594180315

References

1. Efimov E.I. Reshateli intellektual'nykh zadach [Intellectual problem Solvers task]. – M.: Nauka, 1982. – 320 p.
2. Vagin V.N. Deduktivnyy vyvod na znaniyakh [Deductive inference on knowledge]. V kn. Iskustvennyy intellekt. V 3-kh kn. Kn. 2. Metody i modeli: Spravochnik / Pod red. D.A. Pospelova. [In the book. Artificial intelligence. In 3 vol. Kn. 2. Methods and models: Handbook / ed. by D. A. Pospelov]. – M.: Radio i svyaz [M.: Radio and communication], 1990, pp. 89 – 105.
3. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 808 p.
4. Kober J., Peters J. Learning Motor Skills: From Algorithms to Robot Experiments. – Cham: Springer, 2014.–201 p.
5. Kilani Y., Bsoul M., Alsarhan A.A., Al-Khasawneh A. A Survey of the Satisfiability-Problems Solving Algorithms. // Intern. J. Advanced Intelligence Paradigms. 2013, №3, v. 5, pp. 233 -256.
6. Lozovsky V. S. Setevye modeli [Network model]. V kn. Iskustvennyy intellekt. V 3-kh kn. Kn. 2. Metody i modeli: Spravochnik / Pod red. D.A. Pospelova. [In the book. Artificial intelligence. – In 3 vol. KN. 2. Methods and models: Handbook / ed. by D. A. Pospelov]. – M.: Radio i svyaz' [M.: Radio and communication], 1990, pp. 28 – 49.
7. Osipov G.S. Metody iskusstvennogo intellekta [Methods of artificial intelligence]. – M.: FIZMATLIT, 2011. – 296 p.
8. Osipov G.S. Lektsii po iskusstvennomu intellektu [Lectures on artificial intelligence]. – M.: Liberkom [M.: Liberkom], 2014. – 272 p.
9. Norvig P. Iskustvennyy intellekt [Artificial intelligence]. Sovremennyj podkhod. Rukovodstvo. [A modern approach. Guide]. — M.: Dialektika / Vil'yams [M.: Dialectics / Williams], 2015. – 1408 p.
10. Rudkovskaya D., Pilinski M. Rudkovsky L. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems] / 2-e. izd. – M.: Goryachaya liniya – Telekom [2nd. ed. – M.: Hot line – Telecom], 2013. – 384 p.
11. Varlamov O. O., Lazarev V. M., Chumikov D. A., Poon D. O perspektivakh sozdaniya avtonomnykh intellektual'nykh robotov na osnove mivarnykh tekhnologiy [About the prospects of creating Autonomous intelligent robots, based on mivar technologies] // Radiopromyshlennost' [The radio industry]. 2016, No. 4, pp. 96-105.
12. Kalyaev I.A., Giluk A.R., Kapustyan S.G. Modeli algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov. [Model algorithms of collective control in groups of robots]. – M.: FIZMATLIT, 2009. – 280 p.
13. Melekhin, V.B., Khachumov M.V. Planirovaniye tselenapravlennoy deyatel'nosti intellektual'nogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v nedoopredelennoy problemnoy srede. Chast 1. Struktura i primeneniye freym-mikroprogramm povedeniya. – Iskustvennyy intellekt i prinyatiye resheniy. 2018 (v pechati) [Planning purposeful activities of intelligent unmanned aerial vehicle in an under defined problem environment. Part 1. Structure and application of frame-firmware behavior. – Artificial intelligence and decision making, 2018, №2 pp.73-83].
14. Melekhin V.B. Logika uslovno-zavisimykh rassuzhdeniy: predstavlenie znaniy i pravila vyvoda umozaklyuchenij [The Logic of conditionally-dependent reasoning: knowledge representation and inference rules reasoning] // Iskustvennyy intellekt i prinyatiye resheniy [Artificial intelligence and decision-making], 2016, No. 1, pp. 65-74.
15. Zadeh L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The Concept of linguistic variable and its application to making approximate ecisions]. –M.: Mir, 1976. – 165 p.
16. Bershtein L.S., Melekhin V.B. Planirovaniye povedeniya intellektual'nogo robota [Planning of intelligent robot behavior]. – M.: Energoatomizdat, 1994. – 240 p.
17. Melikhov A.N., Bershtein L.S., Korovin S.Y. Situatsionnye sovetuyushhie sistemy s nechetkoj logikoj [Situational advising systems with fuzzy logic]. – M.: Nauka, 1990. – 272 p.
18. Abduragimov T. T., Melekhin V. B., Khachumov V.M. Informatsionno-analiticheskaya model' nechetkogo PID regul'yatora. [Information-analytical model of a fuzzy PID controller] // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Dagestan state technical University. Technical Sciences], 2017, No. 1, Vol. 44, pp. 48-60.