Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной среде. Часть I. Структура и применение фрейм-микропрограмм поведения*

В.Б. Мелехин ^I, М.В. Хачумов ^{II}

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

^{II} ИСА ФИЦ ИУ РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. В работе на основе логики условно-зависимых предикатов построена модель представления процедурных знаний интеллектуального беспилотного летательного аппарата безотносительно к конкретной предметной области, состоящая из множества фрейм-микропрограмм поведения. Предложены процедуры планирования целенаправленной деятельности беспилотного летательного аппарата в недоопределенных проблемных средах. Туальных систем в недоопределенных средах на основе фрейм-микропрограмм поведения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, проблемная среда, планирование целенаправленной деятельности, типовая фрейм-микропрограмма поведения.

DOI 10.14357/20718594180206

Введение

Анализ современных зарубежных и отечественных исследований по планированию поведения роботизированных систем, в том числе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволяет выделить отдельные направления исследований и задачи предметной области. Первое направление посвящено построению иерархического управления, которое в различной степени использует достижения искусственного интеллекта, теории управления, когнитивной и нейрофизиологической наук. Второе связано с решением конкретных задач, связанных с особенностями управления поведением робототехнических устройств. Оно широко использует методы тео-

рии мультиагентных систем, представления знаний и построения протоколов.

Траекторное движение в неопределенной среде находится в центре современных исследований. В работе [1] рассматривается интеллектуальная система управления траекторным движением мобильных роботов, основанная на правилах, которая способна оперативно реагировать на изменения в реальной динамической среде. Проблема синтеза закона управления движением квадрокоптера освещается в [2]. Для ее решения предлагается подход, базирующийся на принципах и методах синергетической теории управления. Применение аппарата нечеткой логики позволяет успешно решать задачи стабилизации движения летательного аппарата по заданной траектории с применением

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

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

адаптивных нейронных сетей для компенсации внешних возмущений [3, 4]. Обзор систем управления современных интеллектуальных роботизированных самолетов с особым упором на автопилоты для небольших беспилотных летательных аппаратов выполнен в работе [5].

Отметим исследования в области планирования движения роботизированных систем при наличии препятствий, как одной из функций интеллектуальных систем управления. Так, например, в работах [6, 7] рассмотрены вопросы построения систем планирования и управления поведением автономных агентов (роботизированных систем) в недетерминированной среде. Один из вариантов системы планирования движения автономных летательных аппаратов в возмущенной воздушной среде на основе правил рассмотрен в работе [8]. В работах [9,10] решаются задачи планирования 3D-траекторий движения летательных аппаратов. В качестве модели среды используется пространственная сетка; предложены эвристические алгоритмы поиска пути на графовых моделях.

К одной из центральных проблем создания эффективного интеллектуального решателя задач для беспилотного летательного аппарата, способного целенаправленно функционировать в недоопределенных проблемных средах (ПС), следует отнести разработку модели представления и обработки знаний в общем виде, безотносительно к конкретной предметной области. Необходимость в таком представлении знаний интеллектуального БПЛА связана с тем, что подробную модель закономерностей трудно доступной для человека сложной ПС сформировать практически невозможно. В этой связи в недоопределенной ПС в процессе целенаправленной деятельности БПЛА приходится адаптироваться к текущим условиям функционирования, что невозможно обеспечить без заданных ему в общем виде знаний. Другими словами, требуется представить знания БПЛА таким образом, чтобы он мог приспосабливаться к текущим условиям среды в процессе целенаправленной деятельности путем их конкретизации, проводимой с учетом характера взаимодействия находящихся в ПС объектов.

К одному из наиболее распространенных подходов, связанных с представлением и обработкой знаний в различных по назначению интеллектуальных системах, можно отнести использование логики предикатов первого порядка [11-15]. Од-

нако эффективное применение сформированной на этой основе модели представления и обработки знаний для планирования целенаправленной деятельности интеллектуального БПЛА в недоопределенных условиях ПС, ограничено следующими проблемами:

1) необходимостью построения подробной модели представления знаний для вывода решений [12, 16];

2) отсутствием возможности использования в моделях знаний предикатов второго и большего порядков, что значительно снижает функциональные возможности построенных на их основе интеллектуальных решателей задач [17];

3) трудоемкостью вывода решений сложных задач в процессе обработки знаний, который сводится к доказательству теорем методом резолюций путем перебора [12, 18]. Этот недостаток вызван тем, что в моделях знаний сформированных на основе логики предикатов первого порядка не используется семантическая составляющая в формальном описании объектов, событий и закономерностей ПС.

Существенный вклад в снятие проблемы экспоненциальной сложности дедуктивного вывода внесен в [19]. В данной работе предложены алгоритмы дедукции, базирующиеся на трансформации семантических сетей, обеспечивающих возможность организации нескольких видов параллельного вывода и снижающих на этой основе значительным образом сложность процесса доказательства теорем. Однако организованные таким образом процедуры вывода решений хотя и позволяют строить эффективные решатели сложных задач, но не снимают остальных отмеченных выше ограничений, связанных с применением логики предикатов первого порядка в моделях представления и обработки знаний для планирования целенаправленной деятельности интеллектуальных БПЛА в недоопределенных условиях ПС.

Отмеченные обстоятельства обусловили переход к новой парадигме, базирующейся на применении специальных моделей представления знаний и продукционных правил вывода решений [20-25]. Но и в этом случае возникает существенное ограничение в эффективности вывода решений в процессе планирования целенаправленной деятельности БПЛА в недоопределенной ПС. Основная проблема использования продукционных моделей представления и обработки знаний

заключается в том, что они требуют предварительного определения порядка устранения различий между фактической и необходимой для достижения цели ситуацией среды [22], а установить такой порядок автоматически в недоопределенных условиях ПС на их основе не представляется возможным.

К одной из первых попыток обойти эту проблему следует отнести использование продукционных моделей представления и обработки знаний на основе фрейм-микропрограмм поведения (ФМП), имеющих следующую структуру «вход»«тело»«выход» [26]. Вход ФМП представляет собой активную расплывчатую семантическую сеть [27], вершины или слоты которой помечаются конкретными объектами ПС в процессе целенаправленного поведения автономной интеллектуальной системы. Входная семантическая сеть ФМП определяет ситуацию ПС, в которой интеллектуальная система может успешно отработать действия, входящие в ее тело. Выход ФМП задается расплывчатой семантической сетью, описывающей результаты отработки действий фрейм-микропрограммы поведения. Недостатком данной модели представления знаний с точки зрения интеллектуального решателя задач для БПЛА, имеющего существенные ограничения на вычислительные ресурсы, является ее громоздкость и то, что в ней не учитываются условия ПС, в которых не требуется отработка всех действий ФМП.

В данной работе предлагается модель представления и обработки процедурных знаний интеллектуального БПЛА в процессе вывода решений в виде типовых ФМП, позволяющих в значительной степени обойти отмеченные выше недостатки известных логических моделей. В основе организации разработанной процедурной модели знаний используются формулы логики условно-зависимых предикатов [28], обеспечивающие возможность их построения в общем виде без громоздкой структуры их представления. На основе данной модели, автоматическое планирование целенаправленного поведения БПЛА в недоопределенной ПС, сводится:

1) к означиванию предметных переменных, реализующих функции слотов в условно-зависимых предикатах, образующих структуру тела ФМП, находящимися в ПС объектами. Это позволяет конкретизировать БПЛА имеющихся у него знания общего назначения и затем их использовать для планирования целенаправлен-

ной деятельности в текущих условиях функционирования;

2) к планированию целенаправленной деятельности, на основе проверки условий, определяющих возможность результативной отработки входящих в структуру ФМП операций и ориентированному выбору типовых элементов процедурного представления знаний, реализация которых позволяет обеспечить выполнение данных условий в текущей ситуации ПС. В результате формируется цепочка операций, которая позволяет БПЛА достигнуть заданную ему цель поведения в конкретных условиях функционирования.

1. Модель представления процедурных знаний БПЛА

Предложенная модель представления процедурных знаний БПЛА, как уже отмечалось ранее, строится на основе формул логики условно-зависимых предикатов. В общем случае в данной логике область допустимых значений каждой предметной переменной

$y_i(X_i) \in Y, Y = \{y_i(X_i)\}, i = \overline{1, m}$ в различных формулах определяется множеством характеристик X_i , позволяющих устанавливать допустимые для их означивания константы - конкретные объекты и события ПС. Тогда, если каждый объект или событие ПС $O = \{o_j(X_j)\}, j = \overline{1, m}$ определить с помощью описывающих их характеристик X_j , то означивание предметных переменных $y_i(X_i) \in Y$ в различных формулах конкретными объектами или событиями ПС $o_j(X_j) \in O$, является допустимым тогда и только тогда, когда для них выполняется условие « $X_i \subset X_j$ ». Например, формула «Уметь летать (технические системы класса А – развитые крылья, тяговый двигатель, отсутствие повреждений)» становится истинным высказыванием только в том случае, когда подставляемая в нее константа из класса объектов А, например, «самолет КС21» имеет развитые крылья, тяговый двигатель и отсутствуют повреждения. Таким образом, в логике условно-зависимых предикатов, произвольная многоместная формула $M[y_1(X_1), \dots, y_k(X_k), \dots, y_9(X_9)]$ принимает ис-

тинное значение тогда и только тогда, когда для всех констант $a_k(X_{ak})$, участвующих в означивании соответствующих им переменных $y_k(X_k) \in M$, выполняются условия « $(X_k \subset X_{ak})$ » [18]. Это позволяет интеллектуальному решателю БПЛА определять справедливость произвольного утверждения в логике условно-зависимых результатов путем означивания в нем предметных переменных объектами ПС в текущих условиях функционирования.

Рассмотрим следующие две формулы:

$Q_1 = P_1(\text{БЛА}, y_i(X_i))$ - «Подлететь (БПЛА к объекту $y_i(X_i)$)»;

$Q_2 = P_2(\text{БЛА}, y_i(X_i))$ - «Выполнить операцию b_j (БПЛА объект $y_i(X_i)$)».

Объединим и дополним данные формулы:

1) условиями, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки входящих в них операций БПЛА;

2) соответствующими ссылками перехода к типовым элементам представления процедурных знаний, в которых входящие в них операции после отработки позволяют обеспечить выполнение в среде необходимых условий, когда они отсутствуют;

3) формализованным описанием результата, получаемого при отработке входящих в них операций.

Это позволяет сформировать типовую ФМП «Выполнить операцию b_j над заданным объектом», имеющую следующую структуру: ««Идентификатор» «Процедуры» «Выход»». Идентификатор обеспечивает выбор ФМП по виду бинарных отношений между БПЛА и объектами ПС, которые изменяются при отработке операций, входящих в ее процедуры. Процедуры ФМП включают условия, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки входящих в них операций БПЛА. Выход ФМП представляет собой семантическую сеть с ребрами, помеченными значениями отношений, которые будут получены в ПС между объектами и БПЛА после отработки операций, входящих в ее процедуры. Различные условия в структуре ФМП определяются значениями бинарных отношений, которые должны выполняться в ПС между БПЛА и ее объектами для успешной отработки соответствующих им операций.

Структуру полученной таким образом ФМП с помощью логической схемы [29] можно представить следующим образом:

$$Q^* \left\langle P_1^* \overset{1}{\uparrow} b_1(y_i(X_i)) \overset{2}{\downarrow} P_2^* \overset{3}{\uparrow} \overset{4}{\downarrow} b_2(y_i(X_i)) \overset{5}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} \right\rangle \\ Q_1^* \overset{2}{\uparrow} \overset{3}{\downarrow} Q_2^* \overset{4}{\uparrow} \overset{5}{\downarrow} \Rightarrow \text{цель достигнута},$$

где Q^* - идентификатор ФМП;

P_1^* - оператор, проверит условие «Между местонахождением БПЛА и объектом $y_i(X_i)$ отсутствуют препятствия;

$b_1(X_i)$ - оператор «Подлететь к объекту $y_i(X_i)$;

P_2^* - оператор, проверить условие «Объект $y_i(X_i)$ находится в пределах разрешающей способности технического зрения БПЛА»;

b_2 - оператор «Выполнить операцию b_2 над объектом $y_i(X_i)$ »;

Q_1^* - идентификатор ФМП Q_1 «Спланировать и отработать маршрут подлета к объекту $y_i(X_i)$ в обход препятствий»;

Q_2^* - идентификатор ФМП Q_2 «Обеспечить выполнение в ПС условия P_2^* »;

Стрелки указывают направления перехода от одного оператора к другому, когда стоящие перед ними условия P_i^* не выполняются в ПС.

Таким образом, для обеспечения интеллектуального БПЛА необходимыми функциональными способностями, исходя из его функционального назначения, модель процедурных знаний можно представить в виде множества заданных ФМП. Данная модель позволяет значительным образом сократить пространство поиска решений достаточно сложных задач за счет выбора нескольких результативных операций на каждом шаге планирования целенаправленной деятельности.

2. Планирование целенаправленной деятельности БПЛА

Рассмотрим случай, когда в недоопределенной ПС цель поведения БПЛА задается в процедурной форме, например, «Выполнить опе-

рацию b_j над объект $o_i(X_i)$ », «Подлететь к объекту $o_j(X_j)$ » и т.д., где X_i, X_j - множества характеристик, соответственно описывающих объекты $o_i(X_i)$ и $o_j(X_j)$. В этом случае выход ФМП не участвует в процессе вывода решений при планировании деятельности БПЛА.

Пусть для достижения заданной цели интеллектуальный решатель задач БПЛА по ее содержанию выбирает ФМП $F(X_i^*)$ «Выполнить операцию b_j над объектом $o_i(X_i)$ ». Процедуры данной ФМП в логической форме представления имеют следующую структуру:

$$\begin{aligned}
 F(X_i^*) &= P_1(h, y_i(X_i^*)) \uparrow P_2(l, y_i(X_i^*)) \uparrow \\
 &\downarrow b_2(y_i(X_i^*)) \uparrow \downarrow F_1(y_i(X_i^*)) \uparrow \\
 &\downarrow P_3(N, y_i(X_i^*)) (F_2(y_i(X_i^*))) \uparrow b_1(y_i(X_i^*)) \uparrow \\
 &\downarrow P_4(l, y_j(X_j)) \uparrow \downarrow b_3(y_i(X_i^*)) \rightarrow (\text{Цель достигнута}) \\
 &\downarrow P_4(N, y_j(X_j)) \uparrow F_2(y_j(X_j)) \uparrow \downarrow b_1(y_j(X_j)) \uparrow,
 \end{aligned}$$

где X_i^* - характеристики, которыми должен обладать произвольный объект ПС $o_i(X_i)$ для результативной отработки операций данной ФМП $F(X_i^*)$, $X_i^* = \{\text{должен иметь допустимые габаритные размеры и вес, быть неподвижным}\}$;

$P_1(h, y_i(X_i^*))$ - оператор, проверить условие «Объект $y_i(X_i^*)$ расположен за пределами рабочей зоны технического зрения БПЛА по высоте h », т.е. для того, что бы установить имеется или нет различие « h_i » между фактической и требуемой для отработки операции $b_2(y_i(X_i^*))$ ситуацией ПС;

$P_2(l, y_i(X_i^*))$ - оператор, проверить условие «Объект $y_i(X_i^*)$ расположен за пределами разрешающей способности технического зрения БПЛА по расстоянию l »;

$b_2(y_i(X_i^*))$ - оператор, «выполнить операцию b_2 над объектом $y_i(X_i^*)$ »;

$F_1(y_i(X_i^*))$ - идентификатор ФМП «устранить различие « h »»;

$P_3(N, y_i(X_i^*))$ - оператор, проверить условие «На пути подлета к объекту $y_i(X_i^*)$ имеются препятствия»;

$F_2(y_i(X_i^*))$ - идентификатор ФМП «Спланировать в обход препятствий и отработать маршрут подлета к объекту $y_i(X_i^*)$ »;

$b_1(y_i(X_i^*))$ - оператор, «Подлететь к объекту $y_i(X_i^*)$ »;

$P_4(l, y_j(X_j))$ - оператор, проверить условие «Объект $o_j(X_j)$, находится в пределах разрешающей способности технического зрения БПЛА по расстоянию l »;

$b_3(y_i(X_i^*))$ - оператор «Выполнить операцию b_3 над объектом $y_i(X_i^*)$ »;

$P_4(N, o_j(X_j))$ - оператор, проверить условие «Между местоположением БПЛА и объектом $o_j(X_j)$ имеются препятствия»;

$F_2(o_j(X_j))$ - идентификатор ФМП «Спланировать в обход препятствий и отработать маршрут подлета к объекту $y_j(X_j)$ »;

$b_1(y_j(X_j))$ - оператор, «Подлететь к объекту $y_j(X_j)$ ».

После выбора данной фрейм-микропрограммы поведения БПЛА, относительно своего местоположения в ПС, формирует в пространстве состояний модель участка среды, на котором ему предстоит функционировать, в виде семантической сети $G=(V, E, v_0)$, где: V - множество вершин помеченных объектами, находящимися в ПС; E - множество дуг, которые определяются бинарными отношениями между объектами ПС и БПЛА; $v_0 \in V$ - ключевая вершина, помеченная БПЛА, относительно которой строится семантическая сеть, определяющая текущую ситуацию ПС.

Затем, интеллектуальный решатель задач БПЛА, используя описание заданного в целом объекта ПС $o_i(X_i)$ и других находящихся в среде объектов необходимых для отработки выбранной ФМП, проверяет условие «Все не-

обходимые объекты ПС удовлетворяют требованиям означивания используемой фрейм-микропрограммы поведения». Если условие выполняется, то принимается решение о том, что выбранная для достижения заданной цели ФМП является выполнимой в текущей ситуации ПС и БПЛА приступает к реализации входящих в нее операций. В противном случае интеллектуальным решателем задач БПЛА принимается решение о том, что отсутствует ФМП, позволяющая выполнить текущее задание. В этом случае БПЛА переходит к планированию поведения на основе типовых элементов процедурной модели представления знаний в виде фреймов-операций, имеющих следующую структуру: «Условия, необходимые для отработки операции $b_i(y_i(X_i^*))$ », «Операция и описание характеристик объектов ПС над которыми возможна ее отработка», «Результат отработки операции».

Необходимо отметить, что, если в ПС выполняются все условия, входящие в структуру выбранной ФМП $F(X_i^*)$, то план целенаправленной деятельности БПЛА, связанный с достижением поставленной цели, будет состоять из следующей последовательности отдельных операций:

«выполнить операцию $b_2(o_i(X_i))$ над объектом $y_i(X_i^)$ » $\Rightarrow$ «выполнить операцию $b_1(o_j(X_j))$ - подлететь к объекту $o_j(X_j)$ » $\Rightarrow$ «выполнить операцию $b_3(o_i(X_i))$ над объектом $y_i(X_i^*)$ ».*

В другом случае, когда, например, в ПС выполняется только условие $P_2(l, y_i(X_i^*))$, план целенаправленной деятельности БПЛА, сформированный на основе ФМП $F(X_i^*)$, будет состоять из следующих отдельных действий:

«выполнить операцию $b_1(o_j(X_j))$ - подлететь к объекту $o_i(X_i)$ » $\Rightarrow$ «выполнить операцию « $b_2(o_i(X_i))$ с объектом $o_i(X_i)$ » $\Rightarrow$ «выполнить операцию $b_1(o_j(X_j))$ - подлететь к объекту $o_j(X_j)$ » $\Rightarrow$ «выполнить операцию $b_3(o_i(X_i))$ над объектом $o_i(X_i)$ ».

В самом же неблагоприятном случае, когда в ПС не выполняются все условия, входящие в

структуру ФМП $F(X_i^*)$, план целенаправленной деятельности БПЛА будет состоять из следующей последовательности фрейм – микропрограмм поведения и одного отдельного действия:

«выполнить ФМП $F_1(y_i(X_i^))$ » $\Rightarrow$ «выполнить ФМП $F_2(y_i(X_i^*))$ » $\Rightarrow$ «выполнить ФМП $F_2(o_j(X_j))$ » $\Rightarrow$ «выполнить операцию $b_3(o_i(X_i))$ над объектом $o_i(X_i)$ ».*

Входящие в сформированный таким образом план целенаправленной деятельности ФМП определяются по содержанию их идентификаторов входящих в структуру исходно заданной фрейм-микропрограммы поведениями. Кроме того, каждая микропрограмма в структуре, выбранной по заданной цели ФМП, может включать различные микропрограммы поведения, необходимые для ее результативной отработки в текущей ситуации ПС.

Для решения более сложных задач цель целенаправленной деятельности БПЛА, как правило, задается в декларативной форме, например, в виде семантической сети S^* , построенной в пространстве состояний. Представленная таким образом цель поведения автоматически разбивается на подцели и планирование целенаправленной деятельности БПЛА осуществляется в несколько этапов.

На первом шаге текущего этапа планирования целенаправленной деятельности интеллектуальный решатель задач БПЛА выбирает ФМП₁ у которой после пометки предметных переменных в образующих ее формулах объектами ПС, все ее условия являются вложено изоморфными, с точностью до одноименной пометки вершин и ребер, в семантическую сеть S^* [27]. После этого, та часть S_1 семантической сети S^* , которая является изоморфной семантической сети, соответствующей «Выходу» ФМП₁, определяется как подсеть, соответствующая S_1^* подцели деятельности БПЛА и вырезается из сети S^* с сохранением, как в ней, так и в подсети S_1 пограничных вершин (пограничными называются такие вершины, после удаления которых, из сети S^* , в ней образуются висячие ребра, не принадлежащие подсети S_1^*) [22]. Затем проверяется: «все условия вхо-

дящие в структуру ФМП₁ являются вложено изоморфными в семантическую сеть S , описывающую текущую ситуацию ПС», где S - семантическая сеть, сформированная на основе сети S_1^* , и отличается БПЛА в текущих условиях ПС.

Если проверяемое условие выполняется, то принимается решение о том, что план поведения, связанный с достижением подцели S_1^* , является сформированным и состоит из ФМП₁. В противном случае, интеллектуальный решатель задач БПЛА переходит на следующий шаг планирования поведения текущего этапа, связанного с достижением подцели S_1^* . На данном шаге выбирается ФМП₂, для которой условия ФМП₁ являются вложено изоморфными в ее выход и т.д. пока не будет найдена такая ФМП_{*n*} на *n*-м шаге планирования, у которой все входящие в ее процедуры условия окажутся вложено изоморфными в семантическую сеть S , что говорит о том, что входящие в ее процедуры операции непосредственно реализуются в текущих условиях ПС. В этом случае принимается решение о том, что план деятельности, приводящий к достижению подцели S_1^* , является сформированным и состоит из полученного в результате кортежа: <ФМП₁, ФМП₂, ..., ФМП₁, ..., ФМП_{*n*}>. В данном кортеже «Выход» ФМП₁ является вложено изоморфным в семантическую сеть S^* (цель поведения), а все условия ФМП_{*n*} являются вложено изоморфными в семантическую сеть S (текущая ситуация ПС). Отработка операций, сформированной таким образом отдельной ветви плана целенаправленной деятельности, связанной с достижением подцели S_1^* , осуществляется БПЛА с последней входящей в ее структуру ФМП_{*n*}.

После этого, интеллектуальный решатель задач БПЛА переходит к следующему этапу планирования поведения, связанному с построением аналогичным образом ветви сложного плана целенаправленной деятельности, состоящей из операций обеспечивающих достижение следующей подцели S_2^* . Процесс автоматического построения плана целенаправленной деятельности БПЛА продолжается до выполнения условия: « $\bigcup_{j=1}^m S_j^* = S^*$ », где *m* - количество эта-

пов планирования; S_j^* - подцель поведения *j*-го этапа планирования. В результате в пространстве подзадач формируется план целенаправленной деятельности в виде дерева решений с корневой вершиной, помеченной сетью S^* и висячими вершинами помеченными ФМП_{*jn*}.

3. Оценка сложности процедур планирования целенаправленной деятельности БПЛА

Для предложенных процедур планирования целенаправленной деятельности БПЛА можно доказать следующее утверждение.

Утверждение. Функциональная сложность β планирования целенаправленной деятельности БПЛА на основе ФМП при заданной цели в виде семантической сети S^* , определяется следующими граничными значениями: $2Nn^2 \leq \beta \leq 2N^{*2}Nn^2$, где *N* - общее количество выполненных этапов планирования; N^* - общее количество ФМП, хранящихся в базе знаний БПЛА; *n* - количество вершин в семантических сетях, определяющих текущую и целевую ситуацию ПС.

Доказательство:

1. Примем в качестве условной единицы оценки функциональной сложности β одну операцию сравнения пометок вершин и ребер различных семантических сетей, выполняемую в процессе планирования целенаправленной деятельности БПЛА.

2. Допустим, что на первом шаге каждого текущего этапа планирования с первой попытки поиска сразу же выявляется такая ФМП_{*j1*}, у которой входящие в процедуры условия и выход являются, соответственно вложено изоморфными в семантические сети S и S^* .

В общем случае, в процессе определения того, что семантическая сеть, описывающая выход выбранной ФМП_{*j1*}, является вложено изоморфной в семантическую сеть S^* , выполняется не менее n^2 сравнений между собой элементов, соответствующих им матриц смежности, где *n* - количество вершин в семантической сети, определяющей заданную цель целенаправленной деятельности. Справедливость сказанного подтверждается тем, что сравнива-

емые между собой семантические сети, являются помеченными графами.

Таким же образом определяется и нижняя граничная оценка количества сравнений между собой элементов матриц смежности, выполняемых в процессе определения вложенного изоморфизма семантических сетей, определяющих бинарные отношения биективно соответствующие условиям, входящим в структуру процедур ФМП_j в семантическую сеть S . Она также будет равна n^2 , так как количество вершин в семантических сетях S и S^* совпадает.

Следовательно, нижнее граничное значение функциональной сложности β автоматической генерации плана целенаправленной деятельности БПЛА на основе ФМП, может быть не менее величины, равной $2N^*n^2$.

3. Согласно п. 2 на каждом i -м шаге планирования целенаправленной деятельности БПЛА в процессе просмотра одной ФМП_j $j = \overline{1, N^*}$ выполняется $2n^2$ сравнений между элементами матриц смежности соответствующих семантическим сетям, определяющим условия в процедурах ФМП_j и сети S , а также выходов ФМП_j и сети S^* .

Следовательно, в худшем случае на каждом i -м шаге планирования целенаправленной деятельности БПЛА выполняется не более $2N^*n^2$ таких сравнений, где N^* - максимальное количество ФМП, которое может быть просмотрено на каждом шаге планирования.

В общем же случае, в процессе целенаправленной деятельности БПЛА на основе ФМП с учетом количества реализованных этапов N выполняется не более N^*N шагов планирования. Следовательно, верхнее граничное значение функциональной сложности β может быть не более величины, равной $\beta \leq 2N^{*2}Nn^2$.

4. Из пп. 2, 3 следует, что функциональная сложность β определяется следующими граничными значениями: $2Nn^2 \leq \beta \leq 2N^{*2}Nn^2$.

Таким образом, порядок функциональной сложности β определяется: квадратом количества ФМП, хранящихся в базе знаний БПЛА; пропорционально количеству этапов планирования поведения и квадратом количества объектов ПС, участвующих в процессе планирова-

ния поведения. В свою очередь, от количества хранящихся в базе знаний БПЛА фрейм-микропрограмм поведения зависят его функциональные возможности, а размерность n семантических сетей, участвующих в планировании поведения, определяет сложность решаемых им задач. Следовательно, минимизировать сложность β процесса планирования поведения на основе предложенной модели представления и обработки знаний можно только в ущерб функциональным способностям БПЛА, ограничив класс решаемых им задач.

Заключение

1. Применение логики условно-зависимых предикатов позволяет представлять знания БПЛА безотносительно к конкретной предметной области и организовать на этой основе планирование различных видов целенаправленной деятельности в априори недоопределенных условиях ПС.

2. Предложенная модель представления и обработки процедурных знаний обеспечивает БПЛА возможность автоматического планирования целенаправленной деятельности в недоопределенных, реальных ПС с полиномиальной сложностью. Для этого целенаправленным образом, без перебора в пространстве подзадач, формируется дерево вывода решений, которое включает только фрейм-микропрограммы поведения, необходимые для достижения стоящей цели.

3. Найденные граничные оценки функциональной сложности процесса планирования целенаправленной деятельности позволяют определять целесообразность применения разработанной модели представления знаний и процедур вывода решений в различных по сложности недоопределенных ПС, с учетом необходимых функциональных способностей БПЛА.

4. Дальнейшее развитие предложенного подхода сводится к разработке более гибкой модели представления процедурных знаний БПЛА на основе типовых фреймов-операций, позволяющих организовать планирование целенаправленной деятельности в недоопределенных условиях ПС при отсутствии в заданной модели представления знаний необходимых для достижения стоящей цели ФМП. Она будет рассмотрена в следующих статьях авторов.

Литература

- Pandey A., Parhi D.R. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered environment // International journal of Advanced Robotics and Automation, 2016, no. 1, pp. 1-11.
- Veselov G., Sklyarov A., Sklyarov S. Synergetic approach to the quadrotor helicopter control in an environment with external disturbances // Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2016» (May 12-14, 2016 Russia, Moscow). 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491680
- Demir B.E., Bayir R., Duran F. Real-time trajectory tracking of an unmanned aerial vehicle using a self-tuning fuzzy proportional integral derivative controller // International Journal of Micro Air Vehicles, 2016, Vol. 8(4) 252–268;
- Zhang C., Hu H., Wang J. An adaptive neural network approach to the tracking control of micro aerial vehicles in constrained space // International Journal of Systems Science, 2017, 48 (1). pp. 84-94
- Santoso F., Garratt M.A., Anavatti S.G. State-of-the-Art Intelligent Flight Control Systems in Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, pp. 1–15
- Allgeuer P., Behnke S. Hierarchical and state-based architectures for robot behavior planning and control // In proceedings of 8th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Atlanta, October 2013
- Xavier J.A., Selvakumari S.R. Behavior architecture controller for an autonomous robot navigation in an unknown environment to perform a given task, International Journal of Physical Sciences, 2015, vol.10, pp. 182-191
- Khachumov M.V. Controlling the motion of a group of unmanned flight vehicles in a perturbed environment based on the rules // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (June 29-30, 2017, Astana, Kazakhstan), 2017, 5 p. – ISBN: 978-1-5090-1081-3 – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7998587/>
- Filippis L.De, Guglieri G., Quagliotti F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 65(1–4), p. 247–264
- Kothari, M., Postlethwaite I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2103, 71(2), p. 231–253
- 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.
- Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Руководство. – М.: Диалектика / Вильямс, 2015. – 1408 с.
- 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.
- Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. – М.: Книга по требованию, 2012.–369 с.
- Льюггер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 863 с.
- 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.
- Вагин В.Н., Деревянко А.В., Кутепов В.П. Алгоритмы параллельного логического вывода и исследование их эффективности на компьютерных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017, № 1, с. 3-9.
- Сорокин Д.Е. Методологические аспекты искусственного интеллекта. – М.: Машиностроение, 2014. –262 с.
- Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. – М.: Либерком, 2014. – 272.
- Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 240 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., Чувииков Д.А., Пунам Д. О перспективах создания автономных интеллектуальных роботов на основе миварных технологий// Радиопромышленность, 2016, №4, с. 96-105.
- Абросимов В.К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов. – М.: Наука, 2017. – 304 с.
- Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура процедурного представления знаний интегрального робота. 1. Фрейм микропрограммы поведения // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика, 1988, № 5, с. 190-194.
- Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура процедурного представления знаний интегрального робота. 1. Распльывчатые семантические сети // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика, 1988, №6, с. 119-124.
- Мелехин В.Б. Логика условно-зависимых рассуждений: представление знаний и правила вывода умозаключений // Искусственный интеллект и принятие решений, 2016, №1, с 65–74.
- Алферова З.В. Теория алгоритмов. – М.: Статистика, 1973. – 137 с.

Мелехин Владимир Борисович. Профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий Государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дагестанский государственный университет народного хозяйства». Количество печатных работ: 153. E-mail: pashka1602@mail.ru

Хачумов Михаил Вячеславович. Научный сотрудник ИСА ФИЦ ИУ РАН. Кандидат физико-математических наук. Старший преподаватель Российского университета дружбы народов. Количество печатных работ: 50. E-mail: khmike@inbox.ru

Planning purposeful activities intellectually autonomous robot in an under defined problem environment. Part 1. Structure and application frame firmware behavior

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

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

^{II} The Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

In operation, using formulas conditional logic-dependent predicate model is developed for the representation of procedural knowledge of intelligent unmanned aerial vehicle without regard to a particular subject area, consisting of multiple frame firmware behavior. The proposed procedures for planning purposeful activities of unmanned aircraft in underdetermined problem environments. The scope of the evaluation the complexity of the planning of purposeful activities of Autonomous intelligent systems in underdetermined environments on the basis of a frame firmware behavior.

Keywords: unmanned aerial vehicle, problematic environment, the planning of focused activities, the model frame firmware behavior.

DOI 10.14357/20718594180206

References

1. Pandey A., Parhi D.R. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered environment // *International journal of Advanced Robotics and Automation*, 2016, no. 1, pp. 1-11.
2. Veselov G., Sklyarov A., Sklyarov S. Synergetic approach to the quadrotor helicopter control in an environment with external disturbances // *Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2016» (May 12-14, 2016 Russia, Moscow)*. 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491680
3. Demir B.E., Bayir R., Duran F. Real-time trajectory tracking of an unmanned aerial vehicle using a self-tuning fuzzy proportional integral derivative controller // *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2016, Vol. 8(4) 252–268;
4. Zhang C., Hu H., Wang J. An adaptive neural network approach to the tracking control of micro aerial vehicles in constrained space // *International Journal of Systems Science*, 2017, 48 (1). pp. 84-94
5. Santoso F., Garratt M.A., Anavatti S.G. State-of-the-Art Intelligent Flight Control Systems in Unmanned Aerial Vehicles // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, pp. 1–15
6. Allgeuer P., Behnke S. Hierarchical and state-based architectures for robot behavior planning and control // *In proceedings of 8th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Atlanta, October 2013*
7. Xavier J.A., Selvakumari S.R. Behavior architecture controller for an autonomous robot navigation in an unknown environment to perform a given task, *International Journal of Physical Sciences*, 2015, vol.10, pp. 182-191
8. Khachumov M.V. Controlling the motion of a group of unmanned flight vehicles in a perturbed environment based on the rules // *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (June 29-30, 2017, Astana, Kazakhstan)*, 2017, 5 p. – ISBN: 978-1-5090-1081-3 – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7998587/>
9. Filippis L.De, Guglieri G., Quagliotti F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 65(1–4), p. 247–264
10. Kothari, M., & Postlethwaite, I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2103, 71(2), p. 231–253
11. Efimov E. I. Reshateli intellektual'nykh zadach [Intellectual problem Solvers task] – M.: Nauka, 1982. – 320 p.
12. Vagin V.N. Deduktivnyy vyvod na znaniyakh [Deductive inference on knowledge]. V kn. *Iskusstvennyy 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.
13. Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt [Artificial intelligence]. Sovremennyy podkhod. Rukovodstvo. [A modern approach. Guide].* – M.: Dialektika / Vil'yams [M.: Dialectics / Williams], 2015. – 1408 p.
14. Kelly A. *Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 808 p.
15. Kober J., Peters J. *Learning motor skills: from algorithms to robot experiments.* – Cham: Springer, 2014. – 201 p.
16. Nilsson N. *Printsipy iskusstvennogo intellekta [Principles of artificial intelligence].* – M.: Kniga po trebovaniyu [M.: Book on demand], 2012. – 369 p.
17. Luger John. F. *Iskusstvennyy intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem [Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems].* 4-e Izd. – M.: Williams, 2005. – 863 p.
18. 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.

19. Vagin V.N., Derevyanko, A.V., Kutepov V.P. Algoritmy parallel'nogo logicheskogo vyvoda i issledovanie ikh ehffektivnosti na komp'yuternykh sistemakh [Parallel Algorithms for logical deduction and study of their effectiveness on computer systems] // // *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making], 2017, № 1, pp. 3-9.
20. Sorokin D. E. Metodologicheskie aspekty iskusstvennogo intellekta [Methodological aspects of artificial intelligence]. – M.: Mashinostroenie, 2014. – 262 p.
21. Osipov G. S. Lektsii po iskusstvennomu intellektu [Lectures on artificial intelligence]. . – M.: Liberkom [M.: Liberkom], 2014. – 272 p.
22. Bershtein L. S., Melekhin V. B. Planirovanie povedeniya intellektual'nogo robota [Planning of intelligent robot behavior]. – M.: Energoatomizdat, 1994. – 240 p.
23. Rudkovskaya D., Pilinski M. Rudkovsky L. Neironnye 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.
24. Varlamov O.O., Lazarev V.M., Chumikov D.A., Poon D.O perspektivakh sozdaniya avtonomnykh intellektual'nykh robotov na osnove mivarnykh tekhnologij [About the prospects of creating Autonomous intelligent robots, based on mivar technologies] // *Radiopromyshlennost'* [The radio industry]. 2016, No. 4, pp. 96-105.
25. Abrosimov V.K. Kollektivy intellektual'nykh letatel'nykh apparatov [Groups of intelligent aircraft]t. – M.: Nauka, 2017. – 304 p.
26. Bershtein L.S., Melekhin V.B. Struktura protsedurnogo predstavleniya znaniy integral'nogo robota. 1. Frejm mikroprogrammy povedeniya [The Structure of a procedural knowledge representation of the integral of the robot. 1. Frame firmware behavior], // *Izv. AN SSSR. Tekhn. Kibernetika* [Izv. USSR academy of sciences. Tech. Cybernetics], 1988, № 5, pp. 190-194.
27. Bershtein L.S., Melekhin V.B. Struktura protsedurnogo predstavleniya znaniy integral'nogo robota. 1. Rasplyvchatye semanticheskie seti [The Structure of a procedural knowledge representation of the integral of the robot. 1. Vague semantic networks] // // *Izv. AN SSSR. Tekhn. Kibernetika* [Izv. USSR academy of sciences. Tech. Cybernetics]. 1988, № 6, pp. 119-124.
28. Melekhin V.B. Logika uslovno-zavisimykh rassuzhdenij: predstavlenie znaniy i pravila vyvoda umozaklyuchenij [The Logic of conditionally-dependent reasoning: knowledge representation and inference rules reasoning] // *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making], 2016, No. 1, pp. 65-74.
29. Alferov Z.V. Teoriya algoritmov [The Theory of algorithms]. – M.: Statistika [M: Statistics], 1973. – 137 p.

Melekhin Vladimir Borisovich –Ph.D. Dr.Sci., professor, Department of applied mathematics and information technology State Autonomous educational institution of higher professional education "Dagestan state University of national economy". The number of scientific publications 153. pashka1602@mail.ru; State Autonomous educational institution of higher professional education "Dagestan state University of national economy", St. D. Ataeva, house, 5, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367008, Russian Federation.

Khachumov Mikhail Vyacheslavovich., Cand. of Phys.-Math. Sciences, researcher at the Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, senior lecturer at the RUDN University. The author of about 50 scientific papers. khmike@inbox.ru; Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences (ISA FRC CSC RAS), 117312, Moscow, Russian Federation, 60-letiya Oktyabrya, 9.