Artificial Intelligence Review manuscript No. (will be inserted by the editor)

Multilayer cognitive architecture for AUV control

Dmitry Makarov ***·*** Aleksandr Panov ***·***

Konstantin Yakovlev

Received: date / Accepted: date

Аннотация Our abstract.

Keywords First keyword *·* Second keyword *·* More 1 Introduction

Проектирование и разработка беспилотных транспортных средств различного ти- па и назначения – одна из наиболее динамично развивающихся областей в науке и технике в последнее время. К факторам, положительно влияющим на наблюда- емое ускорение прогресса в этой области, можно отнести: миниатюризацию дат- чиков, улучшение их характеристик, удешевление компонентной базы, повышение производительности бортовых вычислителей и др. Одна из тенденций последне- го времени – появление унифицированных робототехнических платформ, осна- щенных необходимым набором датчиков и исполнительных механизмов (актуа- торов), а также программным обеспечением с открытыми интерфейсами (API), позволяющих исследователям сосредоточиться непосредственно на программной реализации системы управления (СУ) аппаратом. Если говорить о беспилотных летательных аппаратах (БЛА), то к таким платформам, пользующимся большой популярностью, можно отнести AR.Drone [1, 2], mikrokopter [3]. Характерно, что обе эти платформы представляют собой малые квадрокоптеры (вес – менее ки- лограмма, размеры – не более 50 см. в диаметре), т.е. винтокрылые аппараты вертикального взлета и посадки с числом винтов 4-6 шт.

Стоит заметить, что в последнее время наблюдается смещение интересов робо- технического сообщества от колесных роботов к летательным аппаратам (ЛА), т.к. первые изучаются уже достаточно давно и считается, что задача создания беспи- лотного, полностью автономного колесного аппарата (например, на базе серийного

This work was supported by the Russian Scientific Foundation, project no. 14-11-00692.

D. Makarov *·* A. Panov *·* K. Yakovlev

Institute for Systems Analysis RAS, Moscow, Russia Tel.: +7-499-131273

E-mail: [makaro](mailto:makarov@isa.ru)[v@isa.ru](mailto:v@isa.ru)

автомобиля) принципиально решена, что подтверждается успешным завершени- ям ряда масштабных проектов в этой сфере (см. например результаты одного из последних соревнований беспилотных автомобилей DARPA Urban Challenge [4]). Задача же автоматизации управления объекта со сложной нелинейной динамикой в трехмерном пространстве на текущий момент не решена. И именно c решением этой задачи связывают существенный прогресс в области создания новых мето- дов и алгоритмов распознавания образов, управления, планирования траектории, построения модели мира и др.

В данной работе под БЛА понимается в первую очередь малый квадрокоптер, такой как, например, уже упомянутый AR.Drone. При этом описываемые в статье принципы построения архитектуры СУ БЛА применимы и для других типов ЛА как то: БЛА классических вертолетных компоновок (с одним несущим и одним рулевым винтами, с двумя несущими соосными винтами), БЛА самолетного типа и др.

1. Recent works

Одним из наиболее распространенных подходов к построению архитектуры про- граммной системы управления БЛА является подход, основанный на функци- ональный декомпозиции, когда СУ представляет собой совокупность взаимно- увязанных программных модулей, каждый из которых предназначен для реше- ния определенного типа задач. Число таких модулей и принципы их связывания в единую структуру в общем случае не регламентированы. Заметим, однако, что в конце 90-х годов ХХ века принимались определенные попытки стандартизации в этой сфере. Так можно отметить стандарт JAUS [5], определяющий протоколы и форматы межмодульных взаимодействий. Предполагалось, что следование это- му стандарту обеспечит возможность создания СУ путем включения модулей от различных разработчиков, а также «быстрой замены» модулей в случае необхо- димости.

При модульной декомпозиции, обычно выделяются следующие классы задач:

* + планирование – составление планов достижения целей и решения поставлен- ных задач;
  + взаимодействие – формирование групп БЛА и обеспечение взаимодействия между членами групп;
  + управление в нештатных ситуациях – идентификация, анализ и ликвидация последствий возникающих незапланированных/нештатных ситуаций;
  + оценка обстановки – формирование модели мира;
  + управление коммуникациями – обеспечение взаимодействия с коммуникацион- ными системами БЛА;
  + управление БЛА – планирование траектории (с учетом рельефа, препятствий и динамики вертолета), управление системами и узлами вертолета, датчиками, оружием;
  + управление ресурсами – управлением вычислительными ресурсами, распреде- ление ресурсов между компонентами системы.

Пример СУ БЛА, состоящей из модулей, предназначенных для решения вы- шеприведенных классов задач, описан в [6].

В начале 2000х годов, в национальном институте стандартизации США (NIST) под руководством профессора Альбуса (Albus) функционировала группа, занима- ющаяся разработкой концептуальной модели архитектуры СУ для беспилотной техники, которая бы не опиралась на функционально-модульную декомпозицию. Такая концептуальная модель архитектура была создана и получила название 4D/RCS [7].

Основным структурным элементом 4D/RCS является узел, определяемый как совокупность четырех процессов системы управления:

* + обработка сенсорной информации;
  + построение модели мира;
  + оценивание свойств;
  + выбор управляющих воздействий (генерация поведения).

Фактически процесс в модели 4D/RCS – есть архитектурный модуль, основ- ное отличие которого от модулей, описываемых выше – неявная типизация. То есть отдельный модуль, например, планирования или составления расписаний не предусматривается моделью, однако функционал последних включается в модуль генерации поведения.

Стоит отметить, что модель 4D/RCS предполагает возможность создания иерар- хий узлов (т.е. создания многоуровневых архитектур управления). При этом со- став компонент узлов 4D/RCS не меняется от уровня к уровню, но меняется се- мантика протекающих в узлах процессов – например, на более высоком уровне управления под генерацией поведения понимается планирование поведения (дей- ствий), а на более низком – планирование траектории (перемещений).

Заметим, что идея многоуровневых архитектур не нова в робототехнике, искус- ственном интеллекте (ИИ), теории управления и смежных дисциплинах. Однако обычно, когда речь идет о разделении на уровни, выделяют два из них – делибе- ративный и реактивный [8]. Программные модули реактивного уровня, реализуют непосредственно управление исполнительными механизмами беспилотного аппа- рата, а также «быструю» обработку информации для решения задач так или иначе связанных с поддержание заданных параметров (скорости, углового положения и т.д.). На делиберативном уровне выполняются задачи построения модели мира, оценки обстановки, планирования и т.д. Важным вопросом при таком подходе яв- ляется принцип организации взаимодействия между двумя уровнями. Проработ- ке этого вопроса посвящен ряд работ (например, обзор [9]), анализируя которые можно сделать вывод о том, что наиболее распространен следующий подход. Мо- дули реактивного уровня являются полностью самодостаточными, то есть задачи, решаемые на этом уровне, имеют наивысший приоритет (например, задача под- держания заданной высоты и/или скорости). Результатом же функционирования модулей делиберативного уровня является формирование целей и задач на таком уровне абстракции, что они являются непосредственными входными данными для реактивных модулей (например, «в течение 10 минут обеспечить зависание над за- данной точкой»).

Можно утверждать, что к настоящему моменту применение одно- и двух- уровневых архитектур для построения систем управления беспилотной техникой нецелесообразно в силу следующих двух, взаимосвязанных факторов. Во-первых, возрастает объем данных, поступающих от датчиков объекта управления. Во- вторых, анализируя и обрабатывая определенным образом поступающие данные, становится возможным решение широкого спектра задач, объединение которых в

рамках одного делиберативного уровня приводит к чрезмерному усложнению мо- дульной архитектуры и дублированию модулей, концептуально предназначенных для решения единой задачи, но использующих для этого разные методы. В каче- стве примера можно привести задачу планирования, одновременно решаемую на делиберативном уровнях в разных контекстах (и разными методами) – контексте целей (планирование поведения) и контексте перемещений (планирование траек- тории). Соответственно целесообразным видится дальнейшее разбиение делибе- ративного уровня на подуровни: стратегический (ответственный за постановку и выбор целей, прогнозирование, и высокоуровневую обработку информации) и так- тический (ответственный за распознавание образов, построение карты местности, планирование траектории и др.).

Итак, на основе проведенного анализа имеющихся подходов к построению ар- хитектуры системы управления БЛА, можно сделать вывод о целесообразности применения трехуровневой архитектуры с выделением следующих уровней: стра- тегического, тактического и уровня управления. Основным отличием программ- ных модулей расположенных на разных уровнях является степень обработки вхо- дящей информации и время отклика. Так на нижнем уровне (уровне управле- ния) происходит оперативная обработка данных непосредственно поступающих от датчиков БЛА для решения задач выдерживания параметров управления. На среднем уровне (тактическом) происходит дальнейшая обработка информации и создание простейших информационных структур (графов, таблиц) для решения задач распознавания образов, построения модели местности, локализации, плани- рования траектории и др. На верхнем уровне (стратегическом) решаются задачи, требующие наибольшей степени обработки данных и создания сложных информа- ционных структур (систем фреймов, неоднородных семантических сетей, систем правил и др.).

1. General view of architecture

In the course of the project developed a conceptual diagram of the control system architecture consisting of three levels: strategic, tactical and reactive. Architecture describes (see. Fig. 1) core modules, selected in accordance with the functionality of each of the levels, as well as the interaction between them (type and direction of the transmitted data).

The main task of management at the strategic level is to build a plan of the behavior every member of the joint activity agreed upon by the members of the coalition. Each participant has its own world model, which is specific because of both the characteristic properties limiting the set of activities available to the control system and components of elements of the world model. Significant components ​of all elements of the world model for all members of the coalition are the same by definition. Plan of behaviour is constructed due to exchange messages with other members of the coalition. At each stage of the plan implementation is updated the description of the current situation, including with the information coming from the sensors. From the description of the current situation stands out temporal-spatial information, which forms the task supplied to the tactical control level and contained spatial description of the goal area and the time limits for its achievement.

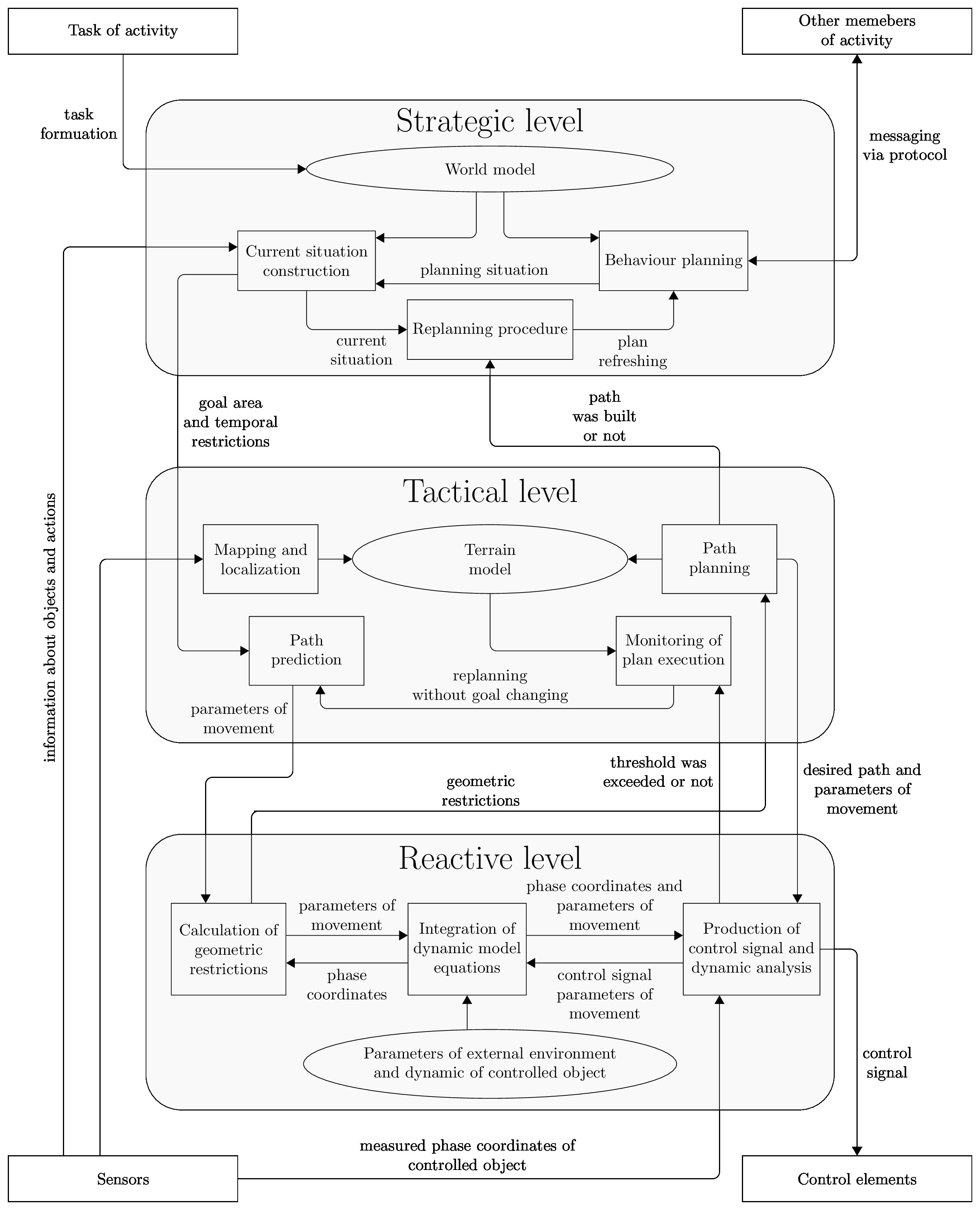


Fig. 1 Schema of proposed cognitive architecture.

Replanning procedure gets the result of the possibility or impossibility to perform the task of the movement with set restrictions and, if it's necessary, makes adjustments to the overall plan concerted with the other members of the coalition. Navigation tasks of control object in space are solved at the tactical level control, the main ones are: mapping (construction, updating, refinement of the model (map) area), localisation (binding of the control object to an existing map), and path planning. The final task is divided into 3 phases: prediction, plan construction and monitoring. Information of the goal space area and time limits on the achievement this area by control object is supplied from the strategic control level to the prediction unit, then a preliminary calculation of the necessary movement parameters (e.g. - speed) carried out to perform assigned tasks. The main difference between the prediction methods of the path and planning methods is the first one can ignore limits on the dynamics motion of control object and other limits. In this way the prediction of path is performed minimal costs of computing resources. Movement parameters calculated by prediction unit are transferred to the lower (reactive) control level, which is carried the registration of limits on movement dynamics of control object. As a result, geometric restrictions on the path form are formed, the observance of which guarantees the possibility of following through it at a fixed, previously calculated movement parameters (speed). Prediction unit constructs the path considering these geometric restrictions. The result of work is a constructed path (then a corresponding message is sent to the top level), or a signal about that task of path planning is impossible with specified restrictions (in the allotted time). In the final case, replanning request is transmitted to the strategy level, i.e. for selecting other goal area in space and / or other time limits. Thereby, the path planning is an iterative process with feedbacks from both the upper and the lower levels of control, which is a significant difference between the proposed architecture and the modern analogues. Supposed, that the use of an iterative loop "prediction - calculation of geometric restrictions - path planning - behavior planning" will significantly improve the quality of task solution of intelligent control complex technical objects, i.e. allow to solve such tasks, which can not be solved within the framework of existing approaches. The main task of control complex technical objects on the reactive level is ensuring the specified characteristics of the dynamic object via control influence by the feedback basis. For that into development procedure of the control signal desired path and desired movement parameters (for example, speed) are received from the tactical level. The level can operate in two modes: control of the real object and numerical modelling of the control. In the first case, the information about the current characteristics of the dynamic object (phase coordinates) comes from sensor and controlling is served on the control elements. In the second - information about the current characteristics of the dynamic object comes from the integration procedure equations of model of the flight dynamics, in procedure is also transmitted the current control action. At the reactive level also via the appropriate procedure is solved the task of determining the geometric restrictions on the acceptable path of movement. For that the desired movement parameters which are passed further to the procedure of integration equations of the model passed to this procedure from tactical level from the prediction unit. Based on the analysis of the received phase coordinates are determined geometric restrictions that are passed back at the tactical level to the path planning unit. In addition, at the tactical level, there is the analysis of control error, i.e. how the phase coordinates of the object (actually measured or obtained in the course of numerical modeling) differ from those specified. The error is compared with allowed threshold, the comparison result is transmitted to the tactical level in unit for monitoring the implementation of the plan.

1. Details of organization of strategic level
   1. Knowledge representation

As a basic psychological theories in which provides not only a qualitative description of the properties of cognitive functions, but also provides the structural description of the underlying mental formations were used cultural-historical approach of Vygotsky-Luria [1,2], the theory of activity Leontief [3] and the model of the psyche Artemieva [4]. According to these theories, the higher conscious cognitive functions are carried out within the framework of the so-called motivated objective activity when objects and processes are mediated by the external environment for the subject of special education, called signs. The process of engaging the sign in a particular cognitive function has three generators: an image, a significant and a personal meaning. Image component is responsible for playback and discernment mediated object or process during the activity. Significant component is a place of the sign in some overpsychological sign system that reflects in the functional sense the ways of using an mediated object or a process, which were gained of general historical practice collectivity - owner of the sign system. Finally, the personal meaning component carries its own experience of action between the subject and denotation of sign, which is expressed including in the integrated estimate of the role of denotation in its current activities: if the process or object satisfy current motive.

The three-component structure of individual knowledge, which, as mentioned above, in psychology called the sign, and confirmed by the work of neuroscientists, in which an attempt is made to construct a general theory of operation of the human brain. Thus, in the re-entry theory Edelmena [5] and Ivanitsky [6] is approved that the formation of conscious sensation or fixing input flow occurs only when the excitation activated by sensory input via the associative cortex from the hippocampus, and then from hypothalamus imposed on the sensory track on the projection cortex. This "circle of sensations" that passes over a characteristic time in the 150-300 ms, sequentially activates the three components of individual knowledge: the image (primary and sensory cortex), the significant component (hippocampus) and personal meaning (the hypothalamus). In addition, based on modern neurophysiological concepts structure of the cerebral cortex is almost uniform in its entirety (the existence of neocortical columns). Hereby the plurality of links between small enough areas of the cortex (the so-called connectome) clearly indicate its hierarchical structure and the presence of both uplink and back downlink. It follows that the components of individual knowledge element should have hierarchical homogeneous structure with ascending information flows and descending feedback. Furthermore, the significant component should have such recognition function, which except the categorization static objects and dynamic processes uses feedback signal for predicting of a sign at the next time.

To define the mathematical model of components of individual knowledge elements infinite Mili automation with variable structure and finite memory (recognizing automation or -automation):

where – the index of automation through the hierarchy, – the level of the hierarchy, – the set of input signals, – the set of output signals, – the set of control signals from the upper layer of the hierarchy, – the set of control signals to the lower layer of the hierarchy, – the set of states (Boolean of prediction matrices (see below)), – the transition function, – the vector-function of outputs. Input, output and control signals are vectors of real numbers. Each component of these vectors is a weight of recognizing or input feature.

As a recognition function of the th output feature in –automation convenient to use the set of bit prediction matrices . In these matrices each column is the prediction vector of input features in the moment , where is a start of the calculation circle (the moment of operation of the control signal ). The matrix specify the sequence of bit vectors where each bit indicates presence of a feature recognizing by the function . The algorithm that calculates the transition function and the vector-function of outputs by the initial moment , the control effect and the input effect is shown in fig. 1.

Introduction of that automation and several relationships on the set of –automata allows to define all components of the sign. The image of the sign corresponding to the feature is such subset of features where . Here the relationship is the relationship of absorption of one feature by another. If the set of columns of a prediction matrix is divided into two subsets: columns of conditions and columns of effects then each feature that has such prediction matrices is named as procedural feature. If is the feature corresponding to the sign , is procedural feature absorpted by in condition column () then is named as an element of significance of . If is the subset of features where each feature describes characteristics of the control system then the definition of personal meaning will be as follows: – the feature corresponding to the sign , – the procedural feature, , , is named as an element of personal meaning of .

* 1. Self-organized processes

On the sets of sign components specific relationships are occurred within the process of the actor activity. In its turn it leads to formation of world model of the actor. As a model of the actor’s world model three types of semantic networks were used. These are the network based on the set of sign image, the network based on the set of sign significance and the network based on the set of personal meanings. Self-organized processes on these networks involve as well the supplementation of the relationships’ collection as the formation of new nodes of the network which corresponds to the formation of a new element of individual knowledge.

Process of the formation of new sign includes the establishing connections between sign components and the naming generated structure. Until the name is not obtained this structure is called protosign and its components are called as percept evolved into sign image, functional significance evolved into sign significance and biological meaning evolved into personal meaning after sign formation completion. Common schema of the new sign formation [Osipov]:

1. The formation of percept.
2. Generation of the set of pairs “percept–functional significance” of the functional significance of the object based on earlier experience or precedents..
3. The actor obtains from the cultural environment accumulated in a natural language system the pair “sign name–significance” and evaluates the degree of closeness of the functional significance obtained in phase 2 to the significance obtained from the cultural environment. If these significances are not close enough, then the percept formation is continued by returning to phase 1.
4. Linking the name from the pair sign name–significance to the percept constructed after the completion of phases 1–3. At this time, the percept turns into an image.
5. Formation of personal meanings of the sign based on precedents of actions with the object.
6. Linking the name from the pair “sign name–significance” to each personal meaning. From this time on, the functional significance turns into the significance and the biological significance turns into the personal meaning.
7. Continuing the mapping biological significance–percept by including the personal meaning (formed in the preceding phase) in the domain and by including the image formed in phase 4 in the set of values.

Consideration of procedural features in the form of rules with defined sets of added and removal features allows construct the algorithm of the main iterative process (steps 1-3) of the described sign formation schema with -automation. To define conflictness and applicability properties of rules on the set of procedural features special operations are introduced. These are the cast of the column to the –automata () and the cast of the column to the –automata by the column ()...

1. Details of organization of tactic level
2. Details of organization of reactive level 7 Conclusion

В последнее время наблюдается повышенный интерес к автономным летательным

аппаратам вертолетного типа. Исследователями было предложено множество архитектур систем управления такими аппаратами. Большая сложность реализа- ции автономных вертолетов приводит к тому, что двухкомпонентная архитектура систем управления, состоящая из делиберативного и реактивного уровней, стано- вится неэффективной и появляется необходимость явного выделения иерархичной трехуровневой архитектуры, содержащей стратегический, тактический уровни и уровень управления.

На стратегическом уровне осуществляется высокоуровневое планирование, в ходе которого стоится последовательность действий, решающих поставленную пе- ред автономным летательным аппаратом задачу. Этот уровень является наименее проработанным, и существующие подходы обладают существенными недостатка- ми. Преодоление основной трудности – проблемы автономного целеполагания – может быть достигнуто с помощью создания такого представление знаний, в ко- тором описание действий с понятием, связи этого понятия с другими понятиями и процедуры выделения этого понятия из сообщений с нижележащего уровня управ- ления представляли собой одну единицу знаний.

На тактическом уровне решаются задачи навигации БЛА и ключевой является задача построения траектории. Основная трудность, возникающая при решении последней, – громоздкость модели, описывающей трехмерную окружающую среду. Целесообразным способом преодоления указанной трудности является использо- вание эвристических и декомпозиционных алгоритмов планирования.

На уровне управления основной задачей является построение регуляторов и наиболее перспективно развитие методов синтеза нелинейных робастных регуля- торов с гладким управлением, обладающих строгим математическим обоснова- нием. Для улучшения работы полученных регуляторов возможно их совместное применение с механизмами адаптации (асимптотические наблюдатели, методы ИИ и др.), не нарушающих найденные условия устойчивости замкнутого контура.

Разработанная архитектура позволяет решать большой спектр задач управ- ления коалициями сложных технических объектов в динамической среде и будет использована для создания экспериментального образца программного обеспече- ния многоуровневой системы управления на следующих этапах работ по проекту.