



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2020, № 1, с. 58-71.

Поступила: 22.05.2020

Окончательный вариант: 10.06.2020

© УлГУ

УДК 519.6

Технология построения (синтеза) интеллектуальных систем управления роботами на основе математической модели когнитивного цифрового автомата

**Кожевников В.В.^{1,*}, Леонтьев М.Ю.^{1,2},
Приходько В.В.¹, Сергеев В.А.², Фомин А.Н.¹**

[*vvk28061955@mail.ru](mailto:vvk28061955@mail.ru)

¹УлГУ, Ульяновск, Россия

²УФИРЭ РАН, Ульяновск, Россия

Интеллектуальная система управления (ИСУ) роботом может быть реализована (построена) на основе математической модели когнитивного цифрового автомата (КЦА). ИСУ в данном случае представляет собой программно-аппаратный комплекс, где именно математическая модель КЦА определяет систему управления как интеллектуальную. Когнитивность математической модели определяется возможностью формирования (генерации) новых знаний на основе знаний, полученных на этапе обучения.

Особенность математической модели КЦА заключается в том, что в качестве исходной структурной схемы автомата служит описание структуры нейронной сети (НС), а в качестве модели нейрона используется логическая функция «НЕ-И-ИЛИ». В качестве инструмента построения математической модели КЦА предлагается математический аппарат сетей Петри (СП).

В работе рассматривается структура, состав и алгоритм построения (метод синтеза) интеллектуальной системы управления роботом на основе математической модели КЦА. В соответствии с алгоритмом ИСУ формируется в трех режимах: предварительного обучения, ручного и автоматического управления. То есть обучение математической модели КЦА может выполняться как в режиме ручного, так и в режиме автоматического управления. Возможность обучения в режиме автоматического управления, в свою очередь, обеспечивает возможность регенерации знаний и, соответственно, возможность когнитивного управления.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, роботы, когнитивный автомат, нейронные сети, обучение, познание, мышление, сети Петри, уравнение состояний, математическое моделирование, синтез, генерация, анализ, логика

Введение

Основные направления развития методов построения интеллектуальных систем управления (ИСУ) роботами рассмотрены в работе [1]. Перспективным представляется направление построения систем управления роботами, основанное на использовании методов искусственного интеллекта. Наличие интеллекта определяется возможностью генерации (принятия) эффективных управляющих решений, не предусмотренных логикой, сформированной математиками и программистами. В условиях неопределенности входных воздействий на систему управления, т.е. в ситуации, когда система управления не обучена реакции на входное воздействие, решение принимается в результате генерации новых знаний на базе знаний, полученных в процессе обучения/

Нейронные сети (НС) могут дать интересные результаты по распознаванию, генерации зависимостей и прогнозированию. Однако их очевидный недостаток – отсутствие явного алгоритма действия. Запоминание информации в процессе обучения происходит неявно в результате подбора весовых коэффициентов НС. Практически НС, в данном случае, представляет собой одну из стохастических форм сжатия исходной обучающей таблицы истинности. При этом для обучения НС необходимы все наборы из таблицы истинности, которые затем воспроизводятся НС с различной степенью вероятности. Отсутствующие в процессе обучения наборы не воспроизводятся. Соответственно проблема познания (формирование новых знаний) на основе знаний, полученных ранее в процессе обучения, представляется трудно разрешимой. Положительное решение этой проблемы открывает путь к созданию полноценного искусственного разума [2].

ИСУ роботом может быть реализована (построена) на основе математической логики или математической модели когнитивного цифрового автомата (КЦА) [3]. ИСУ в данном случае представляет собой программно-аппаратный комплекс, где именно математическая модель КЦА определяет систему управления как интеллектуальную. Когнитивность математической модели определяется возможностью формирования (генерации) новых знаний на основе знаний, полученных на этапе обучения. Практически когнитивность (возможность познания) возникает в результате обеспечения возможности синтеза адаптивного алгоритма (формулы) решения задачи, формируемой в процессе обучения КЦА с заданной степенью обобщения. В качестве таких задач могут рассматриваться как задачи распознавания, так и задачи вычислительного характера. Задача когнитивного управления роботом решается на основе адаптивного алгоритма, формируемого в процессе обучения.

1. Формирование исходной структуры и состава интеллектуальной системы управления роботом.

Структурная схема ИСУ на основе КЦА приведена на рис.1. и состоит из трех основных систем: системы технического зрения, системы управления движением и системы искусственного интеллекта.

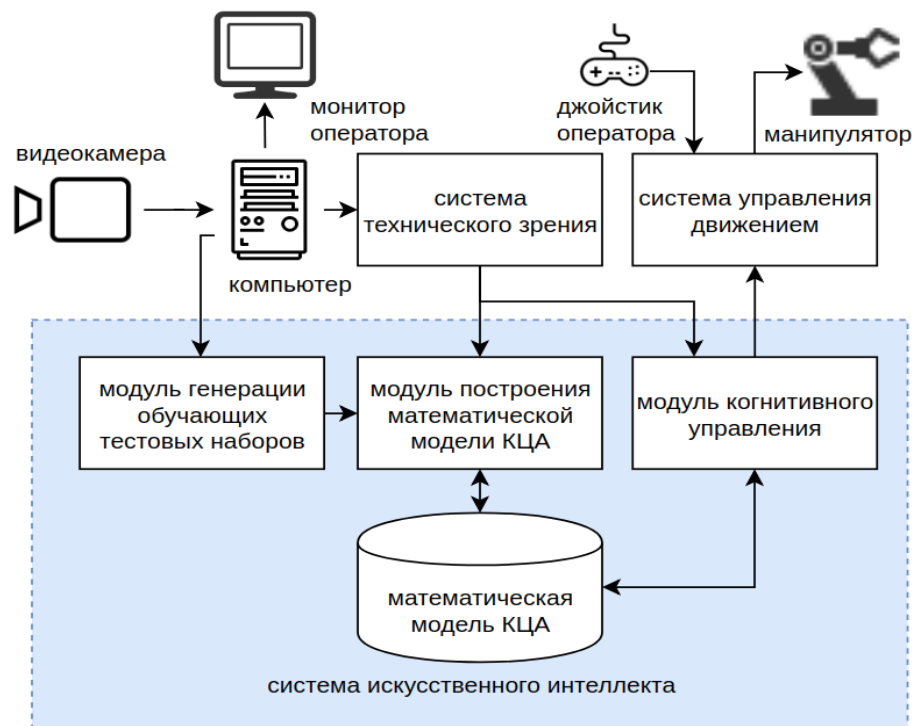


Рис. 1. Структурная схема ИСУ

Система технического зрения

Система технического зрения (СТЗ) - это совокупность программно-аппаратных средств, предназначенных для приема, передачи и обработки информации. Источником информации для СТЗ является камера видеонаблюдения. Она позволяет роботам «видеть» объект и вычислить его X- и Y-позиции. В последнее время роботы стали применяться с возможностью не только двух, но и трех проекций видения. Таким образом, им стала доступна и третья координата, как правило, высота объекта.

Информация об объекте в виде изображений может получаться и с помощью сканирующих дальномеров (лазерных, микрорадиоволновых, ультразвуковых локаторов), тепловизоров (инфракрасные камеры), но в любом случае на выходе имеем цифровое изображение (растр), которое состоит из фиксированного количества строк и столбцов пикселей (pixels). С точки зрения абстрактной структуры данных все изображения представляют собой регулярные двумерные массивы.

В СТЗ, в общем случае, последовательно решаются следующие задачи обработки зрительной информации [2]:

- получение изображения;
- предварительная обработка изображения;
- сегментация изображения;
- определение характеристик образов;
- детектирование объектов;
- работа с нейронными сетями.

Для реализации этих функций можно использовать соответствующие модули библиотеки компьютерного зрения. Из них OpenCV – de facto самая популярная библиотека компьютерного зрения. Для построения программной части СТЗ могут быть использованы следующие группы модулей:

- модули core, highgui - реализуют базовую функциональность (базовые структуры, математические функции, генераторы случайных чисел, линейную алгебру, быстрое преобразование Фурье, ввод/вывод изображений др.);
- модули imgproc, features2d - для обработки изображений (фильтрация, геометрические преобразования, преобразование цветовых пространств, бинаризация, сегментация, обнаружение особых точек и ребер, контурный анализ и др);
- модули video, objdetect, calib3d - реализуют калибровку камеры, анализ движения и отслеживание объектов, вычисление положения в пространстве, построение карты глубины, детектирование объектов;
- модули dnn, ml – предназначены для работы с нейронными сетями, реализуют алгоритмы машинного обучения (метод ближайших соседей, наивный байесовский классификатор, деревья решений, случайный лес, машина опорных векторов, градиентного спуска, обратного распространения ошибки и др).

Система управления движением

Система управления движением (СУД) - это комплекс программно-аппаратных средств, главной задачей которого является планирование и исполнение перемещений робота к некоторой целевой точке с учетом различных факторов. При движении к целевой точке эта система должна учитывать заданные аспекты поведения, а также конструктивные, динамические, а иногда даже энергетические возможности конструкции робота.

Для построения программной части СУД могут быть использованы различные свободно распространяемые фреймворки для планирования и управления движениями роботов такие как, например, операционная система для роботов ROS (Robot Operating System). ROS реализует различные функции робототехники: планирование, восприятие, моделирование и др. Дополнительные возможности обеспечивают такие программные модули как MoveIt, rviz, gazebo и т.п.

MoveIt предоставляет такие возможности как: планирование движения, проверка столкновений, оценка соответствия, хранения сцены, состояния роботов, и планов движения.

Rviz, Gazebo - это робототехнические симуляторы, которые позволяют отображать точки, линии, сетки, объёмные фигуры, а так же их направления изменений. По сути это инструмент который позволяет в реальном времени визуализировать на 3D-сцене все компоненты робототехнической системы координат, движущиеся части, показания датчиков, изображения с камер.

Система искусственного интеллекта

Система искусственного интеллекта (СИИ) – это программный комплекс, способный анализировать, осознавать и различать изменения в объекте и внешней среде, учиться и принимать решения, распознавать и предсказывать развитие как управляемого объекта, так и концепции управления.

Важными показателями интеллектуального уровня системы является уровень обобщения моделей внешней среды и объекта, на основании которых происходит оценка конкретных ситуаций и прогнозирование их развития, а также возможности самоусовершенствования, в том числе при активном взаимодействии для этого с внешней средой.

Для моделирования сцены внешней среды и объекта необходимо создать (либо адаптировать существующий) модуль перехвата (копирования) управляющей и визуальной информации, циркулирующей между камерой, оператором и манипулятором, как представлено на рисунке 2. При этом входными значениями будут изображения с камеры наблюдения и управляющие команды положением манипулятора.

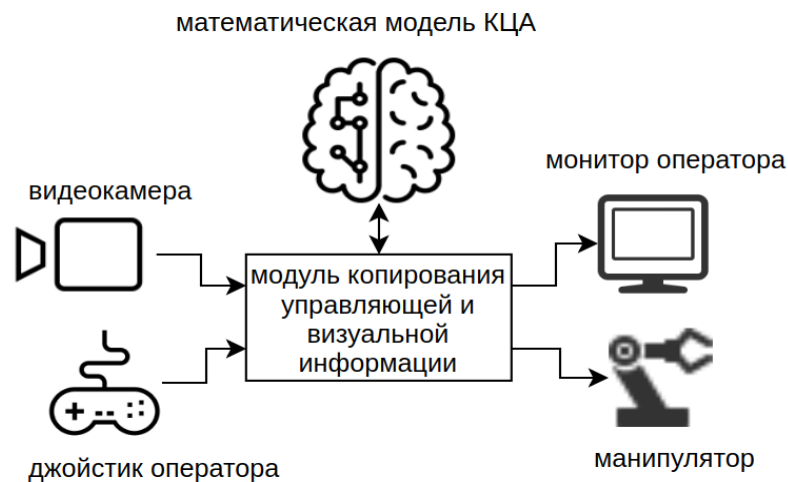


Рис. 2. Схема копирования управляющей и визуальной информации

В общем случае СИИ должна обеспечивать решение следующих основных задач:

- генерации (копирования) обучающих наборов;
- математического моделирования и обучения;
- генерации решений и управления.

Соответственно СИИ на основе математической модели КЦА предполагает разработку следующих модулей:

- модуль генерации обучающих тестовых наборов,
- модуль построения математической модели КЦА,
- модуль когнитивного управления.

Модуль генерации (копирования) обучающих тестовых наборов предназначен для генерации множества базовых элементов исходного раstra и разрядной сетки автомата для моделирования сцены окружающей среды, объектов и, собственно, концепции управления с заданной степенью обобщения. Модуль разрабатывается исходя из конкретных

задач распознавания, генерации решений и управления. Множество обучающих тестовых наборов должно быть достаточным для формирования заданной функции (алгоритма) распознавания и управления.

Модуль построения математической модели КЦА обеспечивает формирование структурной схемы КЦА, модельное представление исходной структурной схемы КЦА и обучение исходной математической модели КЦА (формирование сетевого алгоритма).

Модуль когнитивного управления строится на основе математической модели КЦА и предназначен для распознавания объектов, генерации решений (управляющих кодов), построения протоколов когнитивного управления.

2. Определение математической модели когнитивных цифровых автоматов

Особенность математической модели КЦА заключается в том, что в качестве исходной структурной схемы автомата служит описание структуры НС, а в качестве модели нейрона используется логическая функция «НЕ-И-ИЛИ». При этом логика компонентов структурной схемы изначально не определена.

В качестве инструмента построения математической модели КЦА предлагается математический аппарат сетей Петри (СП) [4]: маркированные графы, ингибиторные СП и СП с программируемой логикой (СППЛ). В отличие от ингибиторных СП логика запуска переходов СППЛ заранее не задана, и любая входная дуга перехода может быть ингибиторной, а переход может быть запрограммирован на выполнение любой логической функции.

Возможность представления КЦА в виде уравнения состояний СП (матричных уравнений) или системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) достигается в результате неявного определения логики в сетевой модели КЦА. При этом понятие неявного определения логики не имеет ничего общего с «нечеткой логикой» СП.

Построение сетевой модели КЦА осуществляется исходя из принципа сохранения потока однородной информации. Свойство однородности сетевой модели обеспечивает сохранение свойств ингибиторных СП в сетевой модели для моделирования логики и одновременно служит в качестве критерия достижимости.

Единство статического и динамического аспектов достигается в результате представления сети в виде фундаментального уравнения состояний СП из класса уравнений Мура-та [5]:

$$\begin{aligned} \Delta \mu &= A \cdot x \\ \text{или} \\ \mu_0 + A \cdot x - \mu &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где μ_0 – вектор начальной разметки сети, μ – вектор конечной разметки сети, $\Delta \mu$ – вектор разности конечной и начальной разметки сети, x – вектор покрытия переходов сети (вектор счёта последовательности срабатываний переходов) или отображение Париха для последовательности срабатываний переходов, который определяет только состав и не

определяет последовательность срабатываний переходов. Множество векторов покрытия переходов \mathbf{x} образует покрытие сети – S , где $\mathbf{x} \in S$.

Правила срабатываний переходов СП могут быть заданы следующими отношениями:

$$\mu_k = \mu_{k-1} + A \cdot u_k \quad (2)$$

и

$$\mu_{k-1} + A \cdot u_k \geq 0, \quad (3)$$

где u_k – вектор запуска переходов сети, $u_k \in \mathbf{x}$, μ_k – вектор текущей разметки сети. Уравнение (2) определяет правило смены разметки СП, условие (3) – правило запуска переходов СП соответственно. Все переходы, каждый и все одновременно, удовлетворяющие условию (3), составляют вектор u_k . Для каждой последовательности переходов $\Delta\mu = \sum_{k=1}^n \Delta\mu_k$, $\mathbf{x} = \sum_{k=1}^n u_k$, где $\Delta\mu_k = \mu_k - \mu_{k-1}$.

Множество достижимых разметок сети определяет пространство состояний или мощность моделирования сети, которая для СП ограничена собственно правилами Петри. Мощность разрешения сети зависит от возможностей ее анализа. Повышение моделирующей мощности сети может быть достигнуто путем определения дополнительных правил срабатываний переходов сети, отличных от правил Петри, применение которых приводит к неопределенной логике срабатывания переходов и соответственно к неопределенной логике функционирования сети, что выражается в нарушении уравнения (1).

Соответственно, все возможные расширения СП могут быть представлены следующими отношениями [6]:

$$\mu_0 + A \cdot \mathbf{x} - \mu \leq 0 \quad (4)$$

и

$$\mu_0 + A \cdot \mathbf{x} - \mu \geq 0. \quad (5)$$

При этом неопределенная логика запуска переходов (входная логика переходов) выражается отношением (4). Неопределенная логика смены разметки сети (выходная логика переходов) – отношением (5). Совмещение расширений СП (4) и (5) в рамках одной сети допускается только в случае введения дополнительных ограничений при построении исходной структуры сети.

Отношения (4) и (5) могут быть использованы для определения ингибиторных СП и их расширений [7]. Введение специальных обозначений для ингибиторных дуг в матрице инцидентности A уравнения (1): $a_{ij} = -1 \rightarrow a_{ij} = -\alpha$ и $a_{ij} = 1 \rightarrow a_{ij} = \alpha$, где $\alpha \neq 0$, эквивалентно отношениям (4) и (5). В случае неявного определения ингибиторных дуг (равными нулю) в матрице инцидентности, то есть при $\alpha = 0$, ингибиторная СП может быть представлена в виде фундаментального уравнения СП (1). Для идентификации ингибиторных дуг в матрице инцидентности выполняется программирование логики срабатывания переходов путем построения (генерации) минимального порождающего множества решений уравнения состояний (1). В общем случае программирование логики срабатывания каждого перехода заключается в определении активности смежных переходов путем частичного определения вектора \mathbf{x} . Вектор покрытия сети \mathbf{x} в данном случае определяет

не только состав, но и логику запуска переходов. Покрывание сети S определяет логику функционирования сети.

Анализ достижимости ингибиторных СП сводится к решению уравнения (1). Процедура решения уравнения (1) строится на базе соответствующего минимального порождающего множества решений. Для построения протоколов достижимости ингибиторных СП могут быть использованы стандартные методы построения протоколов достижимости обычных СП. В общем случае процедура построения протоколов достижимости сводится к вычислению последовательности векторов запуска переходов и текущих разметок сети для каждого вектора x , начиная с вектора начальной разметки μ_0 и до тех пор, пока не будет достигнута разметка μ . Последовательность векторов запуска переходов u_k и векторов текущей разметки μ_k может быть получена путём итеративного решения уравнения (2). На каждом шаге итерации $k = \overline{1, n}$ все переходы, входящие в состав вектора x проверяются на выполнение условия (3). Переходы, удовлетворяющие условию (3) каждый в отдельности и все одновременно, составляют вектор u_k . На каждом шаге итерации $x = x - u_k$. В отличие от процедуры построения протоколов достижимости обычных СП наличие исходного вектора x является обязательным.

Выбор (разработка) математического аппарата, принципов, методов и подходов (основ) математического моделирования КЦА обоснован необходимостью обеспечения возможности модельного представления последовательностных логических схем автомата, исчисления инвариантов сетевой модели, реляционного исчисления инвариантов сетевой модели, анализа достижимости устойчивых состояний, генерации достижимых устойчивых состояний, моделирования динамики асинхронных и параллельных процессов функционирования. При этом на первый план выходят задачи формализации понятия когнитивности ЦА.

Задачи синтеза логики (обучения), проекции неявно определенной логики на исходную структурную схему нейронной сети, анализа достижимости устойчивых состояний (распознавания), генерации достижимых устойчивых состояний (принятия решений) и построения протоколов когнитивного управления (творческого мышления) сводятся к решению матричных уравнений или СЛАУ. Задача генерации логики (познания) решается путем формирования адаптивной формулы (сетевого алгоритма) реляционного исчисления для каждого объекта и функции управления.

Предлагаемый подход определяет новизну математической модели и обеспечивает необходимую мощность моделирования на различных уровнях представления и, в то же время, увеличивает мощность разрешения, необходимую для построения ИСУ. Решение задач синтеза КЦА выполняется на базе приложения стандартных методов решения уравнения состояний СП (матричных уравнений) или СЛАУ, а также методов реляционной алгебры или реляционного исчисления. Соответственно разработка алгоритма построения (синтеза) ИСУ сводится к адаптации стандартных процедур решения СЛАУ и реляционного исчисления.

3. Алгоритм построения (синтеза) интеллектуальной системы управления роботом

Разработка алгоритма построения (синтеза) ИСУ роботом предполагает решение следующих задач:

- генерации тестовых обучающих наборов;
- формирования структурной схемы КЦА;
- модельного представления исходной структурной схемы КЦА;
- обучения математической модели КЦА (формирования сетевого алгоритма);
- генерации решений (управляющих кодов);
- построения протоколов когнитивного управления.

Основу метода решения перечисленных выше задач (метода синтеза), соответственно, составляют следующие процедуры:

1. Генерация тестовых обучающих наборов

Генерация тестовых обучающих наборов выполняется на основе кластерного анализа (классификации) исходной информации о текущем состоянии робота и внешней среды в соответствии с заданными параметрами и целевой установкой построения ИСУ роботом. Информация о текущем состоянии робота и внешней среды поступает от информационной системы и системы управления. В качестве результата кластерного анализа (классификации) формируется минимальное порождающее множество обучающих наборов, разделенное на множество классов и подклассов в соответствии с целевой установкой построения ИСУ роботом.

2. Формирование структурной схемы КЦА

На основе исходных параметров и результатов кластерного анализа или классификации множества обучающих наборов определяется количество входов и выходов исходной структуры, количество слоев и количество компонентов в каждом слое, исходная структура связей между слоями. Количество слоев определяется количеством уровней обобщения входной информации.

Информация о количестве входов, выходов, компонентов (нейронов) в каждом слое исходной структуры КЦА и количестве возможных слоев служит в качестве исходной для формирования структурной схемы КЦА. При формировании исходной структуры автомата множество классов составляет первый слой структурной схемы, где для каждого класса отводится один компонент. Множество подклассов составляет второй слой структурной схемы, где для каждого подкласса также отводится один компонент. Для каждого подкласса деление на подклассы может быть продолжено и соответственно формируется третий слой и т.д. В результате исходная структура автомата состоит из n слоев. Количество компонентов первого слоя равно количеству классов. Количество компонентов второго слоя равно количеству подклассов и т.д. В случае, когда класс состоит из одного подкласса, формируется только один компонент в первом или в n -ом слое. Структура связей между входами и слоями структурной схемы формируется по принципу «все со всеми».

3. Модельное представление исходной структурной схемы КЦА

Исходная структурная схема КЦА представляется в виде маркированного графа путем интерпретации входов и выходов схемы и структурных компонентов позициями маркированного графа, а самих компонентов и линий соединений составными и простыми переходами соответственно. Множество входов и выходов структурной схемы интерпретируется как множество входных и выходных позиций сети. Множество входов и выходов компонентов схемы интерпретируется как множество внутренних позиций сети. Логическая единица интерпретируется как фишка в позиции сети, а ее отсутствие - как логический ноль. Перемещение сигналов интерпретируется как движение фишек в сети. Графическая форма представления структурной схемы КЦА позволяет перейти от описания структурной схемы к ее математическому представлению в виде матрицы инцидентности. Представление КЦА в виде двудольного ориентированного графа или матрицы инцидентности позволяет задать логические схемы статически. Динамику в модель вносит движение фишек, регулируемое правилами запуска переходов и смены разметки сети. Комплексная математическая модель КЦА представляется в виде уравнения состояний СП из класса уравнений Мурата на множестве обучающих наборов.

4. Обучение математической модели КЦА

Обучение модели исходной структуры КЦА сводится к синтезу логики компонентов исходной структурной схемы КЦА и множества структурных связей между ними. Синтез логики компонентов осуществляется на основе множества обучающих наборов. Синтез структурных связей выполняется в результате регрессионного анализа множества тестовых обучающих наборов на базе математической модели исходной структурной схемы КЦА.

Для решения задачи обучения (синтеза логики) КЦА используются методы исчисления инвариантов уравнения состояний маркированного графа структурной схемы автомата. Инварианты СП являются мощным инструментом исследования структурных свойств сетей и представляют собой решения однородных систем уравнений. Проблема заключается в том, что при моделировании логики свойство однородности маркированных графов утрачивается. Возможность исчисления инвариантов уравнения состояний маркированного графа достигается в результате неявного определения логики маркированного графа. Каждый полученный вектор покрытия переходов сети в данном случае определяет не только состав, но и логику запуска переходов. Проекция неявно определенной логики на исходную структурную схему автомата сводится к решению уравнения состояний маркированного графа с неопределенной матрицей инцидентности. Для вычисления неизвестных матрицы инцидентности могут быть использованы стандартные методы решения СЛАУ. При этом значения неизвестных для ингибиторных дуг определяются неявно, что обеспечивает решение проблемы матричного представления решений уравнения состояний КЦА в виде матрицы инцидентности ингибиторных СП. Все множество решений объединяется в единую матрицу инцидентности ингибиторной СП (логическую схему ИСУ).

5. Генерация решений (управляющих кодов).

Генерация управленческих решений выполняется на основе информации о текущем состоянии робота и внешней среды, которая поступает на входы математической модели КЦА. В случае неопределенности или неполного определения входных воздействий (зашумленное помехами изображение) выполняется генерация возможных решений.

Формирование управляющих кодов (генерация управленческих решений) сводится к решению уравнения состояний ингибиторных СП на множестве заданных входных воздействий и устойчивых состояний КЦА. В случае, если входные воздействия полностью определены, выполняется анализ достижимости устойчивых состояний автомата (верификация структурной схемы автомата). Уравнение состояний КЦА может иметь только одно решение. Для анализа достижимости устойчивых состояний КЦА используются методы исчисления инвариантов уравнения состояний ингибиторных СП. Достижимые устойчивые состояния или группы достижимых устойчивых состояний КЦА на множестве заданных входных воздействий определяют объекты распознавания.

В случае неопределенности или неполного определения входных воздействий выполняется генерация возможных решений или возможных устойчивых состояний (поддержка принятия решений). Проблема заключается в том, что известные методы генерации решений линейных систем уравнений в целых неотрицательных числах имеют асимптотически экспоненциальную вычислительную сложность, что затрудняет их применение для анализа реальных систем. Критическим с точки зрения эффективности является время генерации (построения) минимального порождающего множества решений (МПМР) на множестве невыраженных переменных. Решение проблемы может быть получено в результате учета специфики логических схем КЦА на этапе генерации (построения) МПМР. По сути, речь идет о разработке специальных методов генерации МПМР уравнения состояний КЦА.

Генерация МПМР уравнения состояний КЦА выполняется исходя из принципа активности компонентов (составных переходов сетевой модели) для каждого состояния автомата. В составе сетевой модели каждого компонента одновременно может быть активизирован только один простой переход (набор из таблицы истинности компонента). Соответственно количество единиц в комбинации равно количеству активных переходов компонентов схемы. Данное ограничение определяется спецификой срабатывания КЦА и необходимо для минимизации перебора комбинаций переходов, а также для исключения возможных недействительных решений. Практически множество решений, полученных в процессе обучения КЦА для минимального множества обучающих наборов, может быть использовано в качестве МПМР.

6. Построение протоколов когнитивного управления

Для построения протоколов когнитивного управления (последовательности управляющих кодов) предлагается новый класс уравнения состояний ингибиторных СП, отличный от уравнения состояний СП из класса уравнений Мурата и соответственно новый метод построения протоколов, отличный от стандартных методов построения протоколов достижимости обычных СП.

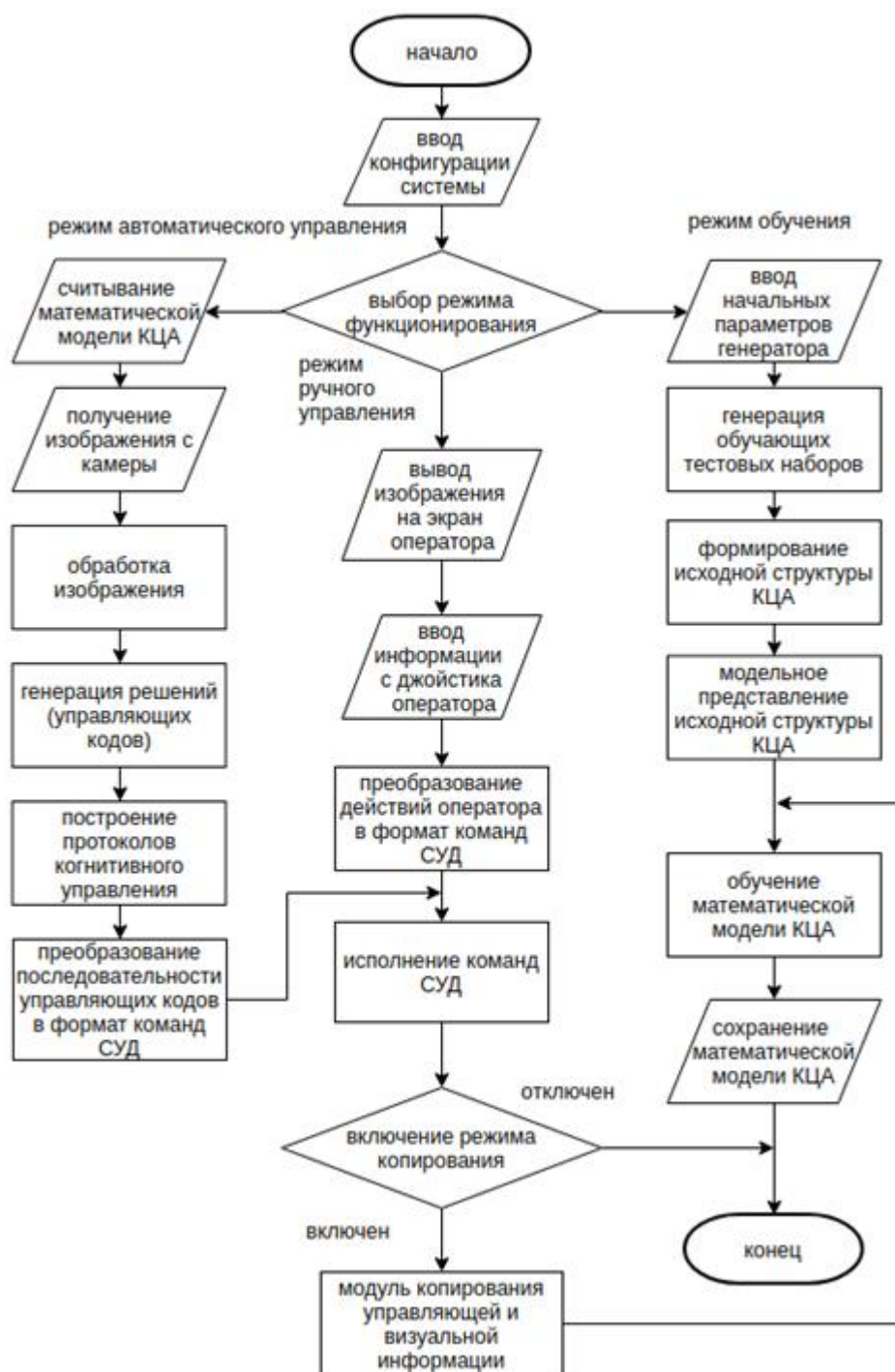


Рис. 3. Блок-схема алгоритма построения (синтеза) ИСУ

Процедура построения протоколов функционирования КЦА сводится вычислению последовательности векторов запуска переходов и текущей разметки сети, начиная с заданной начальной разметки сети и до тех пор, пока сеть не перейдет в устойчивое или тупиковое состояние. При этом начальная разметка постоянно изменяется в процессе построения протоколов функционирования. Возможность достижения устойчивых или тупиковых состояний зависит от длительности и последовательности начальных разметок сети. Кроме того, особенность процедуры построения протоколов функционирования

КЦА заключается в том, что логика компонентов исходной структуры сети в процессе синтеза (обучения) и генерации (познания) логики на каждом шаге итерации изменяется, т.е. таблицы истинности компонентов сети не имеют фиксированного размера и, соответственно, фиксированной логической функции. Процесс формирования логики компонентов ограничен только количеством входов компонентов или полным перебором возможных комбинаций сигналов на входах каждого компонента. При условии достаточно большого количества входов каждого компонента процесс формирования логики компонентов и сети в целом практически бесконечен, что в свою очередь определяет бесконечность процесса построения протоколов функционирования КЦА. Непрерывность процесса синтеза и генерации логики КЦА (обучения и познания) обеспечивает возможность преодоления тупиковых состояний в процессе построения протоколов функционирования КЦА (принятия решений).

Соответствующая блок-схема алгоритма построения (синтеза) ИСУ представлена на рис. 3.

В соответствии с алгоритмом построение (синтез) ИСУ выполняется в трёх режимах: предварительного обучения, ручного и автоматического управления. При этом в режиме предварительного обучения выполняется построение исходной математической модели КЦА на основе разметки раstra и разрядной сетки автомата с заданной степенью обобщения. Дообучение математической модели КЦА в результате копирования может выполняться как в ручном, так и в автоматическом режиме управления.

Заключение

Особенность предлагаемой технологии построения (синтеза) ИСУ заключается в том, что процедура обучения математической модели КЦА может выполняться на ограниченном количестве обучающих наборов в режиме копирования, что, в свою очередь, достигается в результате предобучения математической модели КЦА.

В качестве показателя качества, обеспечивающего преимущества модели КЦА, может служить время обучения, что особенно актуально в случае применения копирующего способа обучения, т.к. запоминание действий оператора с заданной степенью обобщения должно выполняться (в идеале) с первой попытки.

Следует отметить, что обучение математической модели КЦА может выполняться как в режиме ручного, так и в режиме автоматического управления. Возможность обучения в режиме автоматического управления, в свою очередь, обеспечивает возможность регенерации знаний и, соответственно, возможность когнитивного управления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научных проектов № 18-47-732015 p_мк.

Список литературы:

1. Кожевников В.В., Леонтьев М.Ю., Приходько В.В., Сергеев В.А., Фомин А.Н. Нейросетевые технологии построения интеллектуальных систем управления роботами // *Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии. Электрон. журн.* 2019, № 2, с. 36-53. Режим доступа: http://www.ulsu.ru/ru/page/page_2743/
2. Станкевич Л.А., Юревич Е.И. *Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике*. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 167 с.
3. Кожевников В.В. Метод математического моделирования когнитивных цифровых автоматов // *Автоматизация процессов управления*. 2019, № 2(56), с. 101-112.
4. Питерсон Д. *Теория сетей Петри и моделирование систем*. М.: Мир, 1984. 264 с.
5. Мурата Т. Сети Петри. Свойства, анализ, приложения // *ТИИЭР*. 1989, № 44, с. 41-85.
6. Кожевников В.В. Метод анализа достижимости устойчивых состояний логических схем цифровых автоматов // *Автоматизация процессов управления*. 2014, № 1(35), с. 99-108.
7. Кожевников В.В. Метод анализа достижимости ингибиторных сетей Петри // *Автоматизация процессов управления*. 2013, № 3(33), с. 29-34.