УДК 688.511.2

В.А. ТВЕРДОХЛЕБОВ

Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия

ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ И СВОЙСТВ СИСТЕМ

Предлагается новый способ задания автоматов геометрическими образами законов их функционирования. Это позволяет исключить рекурсию при определении функционирования автомата на протяженных и удаленных от начала функционирования интервалах абстрактного времени. Работоспособное состояние диагностируемой системы и ее неисправности задаются геометрическими образами законов функционирования автоматов. Разработаны методы анализа и построения процедур технического диагностирования, базирующиеся на анализе геометрических фигур, соответствующих законам функционирования автоматов.

конечный детерминированный автомат, геометрический образ функционирования, диагностический эксперимент

Введение

В работе [1] изложен метод технического диагностирования, при котором используются процедуры получения диагностической информации различными по природе и формальному аппарату действиями: тестирование, измерение физических параметров, визуальный осмотр, имеющийся до диагностирования информации и т.п. Показано, что с формальной точки зрения воздействие на объект диагностирования, имеющее физический, информационный, логический или алгоритмический и т.п. характер, могут быть систематизированы на единой и общей теоретической основе. Получению диагностической информации соответствует эксперимент, в котором воздействиями полагаются тестовый сигнал, измерение значения параметра, решение диагностической задачи, наблюдение физического или другого признака и т.д. Систематизацию воздействий и их связей с возможными реакциями можно осуществлять на основе построения анализа дерева вариантов функционирования, аналогичного диагностическим и установочным деревьям (см. А. Гилл. «Введение в теорию конечных автоматов»). В работе [1] указанный подход проиллюстрирован для мехатронных систем. Существенным «недостатком» задания конечных детерминированных автоматов таблицами, матрицами, графами и логическими уравнениями является то, что такими средствами явно представлены связь только соседних тактов функционирования (таблицами, матрицами, логическими уравнениями) или связь начальных отрезков функционирования (графом автомата). Это делает необходимым строить варианты функционирования рекурсивно с принципиально неустранимой потерей обзора поведения автомата в целом, в частности, на отдаленных от начала временных отрезках функционирования. Для того чтобы устранить этот недостаток в известных средствах задания автоматов, предлагается геометрическое представление свойств законов функционирования автоматов и конкретных процессов функционирования.

Управление автоматом при ограничениях на изменения его состояний

Задачи управления, в которых требуется сформировать траектории (состояний автомата, связей входных и выходных сигналов) с заданными свойствами, образуют один из фундаментальных классов задач управления. В таких задачах возможные варианты функционирования автомата представлены его функциями переходов и выходов, а требующиеся траектории выделяются условиями и ограничениями на процесс функционирования автомата.

В работах [2 – 4] М. Арбиб удачно предложил дискретный аналог классического понятия непрерывности в числовых множествах, построенный на отношении толерантности, т.е. рефлексивного и симметричного бинарного отношения. Конкретные отношения толерантности задаются на основе содержательных представлений и выделяют в множестве всех возможных вариантов функционирования автомата подмножество вариантов с ограничениями. В так выделенных процессах функционирования представлены только «непрерывные» траектории. Развитие предложенной М. Арбибом идеи дискретной непрерывности позволяет рассматривать требующиеся траектории состояний как результат совмещения бинарных отношений на множестве состояний автомата. Для этого набор различных содержательных ограничений на изменения состояний задается набором бинарных отношений $\rho_1,\rho_2,\ldots,\rho_c$ вида $\rho_i \subset S{\times}S$, $1 \le i \le c$.

Совмещение ограничений $\rho = \bigcup_{i=1}^{c} \rho_i$ и внесение результата совмещения в форму задания автомата определяют варианты функционирования автомата, среди которых производится поиск стратегии управления.

Задание автомата (A, s) геометрическим образом γ_s позволяет ставить и решать некоторые задачи управления, постановка и решение которых невозможны при других (таблицей, матрицей, диаграммой Мура) формах задания автомата.

Пусть γ_s – геометрический образ автомата (A, s) и задано изменение состояния s_p на s_{px} для конкретных $p \in X^*$ и $x \in X$. По номеру $r(p)$ определяется отрезок разбиения η_1 и в этом отрезке по номеру $r(x)$ выделяется запрещенная точка оси (X^*, ω_1). Точка геометрического образа γ_s, у которой первая координата является запрещенной точкой оси абсцисс, исключается из γ_s. Части геометрического образа γ_s, которые соответствуют отрезкам с номером $r(px)$ в разбиениях η_i, $i = 1, 2 \ldots$, исключаются из γ_s. Полученная в результате ломаная линия определяет варианты функционирования автомата (A, s) с учетом рассмотренного ограничения. Покажем, что в общем случае включение такого ограничения в табличное задание автомата невозможно.

Пусть для некоторых $p_1, p_2 \in X^*$ и $p_1 \neq p_2$ изменение состояний $s_{p_1} \to s_{p_1 x}$ разрешено, а $s_{p_2} \to s_{p_2 x}$ запрещено. В таблице, задающей минимальный конечный детерминированный автомат (A, s_ε), $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$ и $S = \{s_1, s_2,\ldots,s_n\}$, состояниям s_{p_1} и s_{p_2} соответствуют некоторые состояния s и s'. Если s и s' одно и то же состояние в табличном задании автомата, то представить в таблице одновременно разрешение и запрет изменения этого состояния под воздействием входного сигнала x невозможно. В геометрическом образе γ_s состояния s_{p_1} и s_{p_2} представлены положением в ломаной линии и обозначении с указанием, что состояние s_ε переведено в s_{p_1} и s_{p_2} различными последовательностями входных сигналов: после перевода последовательностью P_1 приложение x разрешено, а после перевода последовательностью P_2 запрещено. Исключить возможность приложения к автомату (A, s_ε) входной последовательности P_2 нельзя, так как разрешенной может быть последовательность $P_2 x'$, где $x' \neq x$.

Задача представления в автоматной модели объекта управления ограничений на изменение состояний

Заданы: геометрический образ γ_{s_ε} инициального конечного детерминированного автомата (A, s_ε), где $A = (S', X, Y, \delta, \lambda)$, и набор бинарных отношений $\rho_1, \rho_2, \ldots, \rho_c$, где $\rho_i \subset S \times S$, $S = \{s_p : p \in X^*\}$ пары имеют структуру (s_p, s_{px}) и $1 \le i \le c$ (бинарные отношения ρ_i интерпретируются как ограничения на изменения состояний автомата).

Требуется построить геометрический образ, в котором представлены все возможные варианты функционирования автомата (A, s_ε), для которых выполняются ограничения, заданные бинарными отношениями ρ_i, $1\le i \le c$.

Метод решения поставленной задачи включает этапы:

I этап. Вычисляется бинарное отношение ρ по формуле $\rho = \bigcup_{i=1}^{c} \rho_i$.

II этап. Для каждой пары (s_p, s_{px}) $\in \rho$:

- вычисляются номера $r(p)$, $r(px)$ и $r(x)$;
- в отрезке с номером $r(p)$ разбиения η_1 точка с номером $r(x)$ выделяется и получается запрещенной.

III этап. Все точки геометрического образа γ_{s_ε} , у которых первые координаты являются запрещенными точками на оси абсцисс, исключаются из γ_{s_ε} .

IV этап. Все части геометрического образа γ_{s_ε} , которые связаны с отрезками с номерами $r(px)$ во всех разбиениях η_i $i = 1, 2, \ldots$ исключаются из γ_{s_ε} .

Геометрический метод представления поведения автомата

Техническое диагностирование является инженерной дисциплиной, в которой задачи проверки работоспособности и локализации дефекта по местоположению или функциональному воздействию решаются на основе использования инженерных приёмов и формальных методов. В многообразии задач технического диагностирования содержатся задачи, при решении которых определяющими оказываются математические модели, критерии и методы. Выбор конечных детерминированных автоматов как моделей для задания функционирования объекта диагностирования в непрерывном состоянии и при рассматриваемых неисправностях (дефектах, ошибках в программных компонентах и т.д.) позволил разработать теорию тестирования на основе экспериментов с автоматами.

Автоматная модель, созданная на идеях, предложенных У. Мак-Каллоком и В. Питтсоном ([5], 1943г.), определялась для объектов с небольшими количествами состояний, входных и выходных сигналов. Задание автоматов таблицами, графами, матрицами, логическими уравнениями и формулами языка регулярных выражения не позволяет исследовать сложные системы.

К недостаткам указанных способов задания автоматов относятся:

– невозможность практического задания автоматов в случаях, когда объекты диагностирования имеют большие множества сигналов и состояний;

– рекурсивный процесс определения функционирования автомата не позволяет явно (актуально) рассматривать поведение автомата на всей оси абстрактного времени;

– получаемая диагностическая информация характеризует только формальные отношения между входными и выходными сигналами и влияющими на эти отношения состояниями автомата.

Последний из отмеченных недостатков частично устраняется расширением интерпретации состояний, сигналов и функций переходов и выходов автомата. Для этого различным средством получения диагностической информации (тестирование, измерение параметров процессов, отдельные процедуры логического анализа, действия по визуальному осмотру и т.п.), придаётся общая форма воздействия на объект диагностирования и получения «наблюдаемой» реакции. Воздействия (наблюдаемые реакции) включаются в множество входных (выходных) сигналов автомата. Результаты теории экспериментов с автоматами, как правило, переносятся на автоматы с расширенной интерпретацией и позволяют рассматривать автоматные методы в техническом диагностировании [6].

Замена абстрактных автоматов структурными расширяет практическую область применения теории автоматов в техническом диагностировании, но не даёт принципиального устранения недостатков использования указанных способов задания автоматных моделей.

Одним из возможных путей развития технического диагностирования дискретных детерминированных динамических систем может быть использование геометрического представления законов функционирования объектов диагностирования. Геометрический образ γ_s инициального автомата (A, s) определяется как множество точек в специальной дискретной словарной геометрии Γ_1, для лучшей интуитивной обозримости полагаемых вершинами ломанной линии. Отображение φ_s: $X^* \rightarrow Y^*$, реализуемое автоматом $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$, где S, X и Y – множества соответственно состояний, входных и выходных сигналов, а δ: $S{\times}X{\rightarrow}S$ и λ: $S{\times}X{\rightarrow}Y$ – функции переходов и выходов автомата, разбивается на последовательность отображений

$$\varphi_s^1 : X{\rightarrow}Y,\ \varphi_s^2 : X^2{\rightarrow}Y^2,\ \ldots,\ \varphi_s^k : X^k{\rightarrow}Y^k,\ \ldots, \quad (1)$$

где X^k и Y^k является k-й степенью по конкатенации множества $X(Y)$.

Множество X^* всех конечных входных последовательностей элементов множества X линейно упорядочивается и располагается на оси абсцисс, образуя последовательность подмножеств X^1, X^2,…X^k,… точек дискретной оси.

Последовательность (1) заменяется последовательностью (2) по правилу:

для любых $p \in X^*$ и $x \in X^*$ $\lambda(s, px) = \lambda(\delta(s, p), x)$:

$$\Psi_s^1 : X{\rightarrow}Y,\ \Psi_s^2 : X^2{\rightarrow}Y^2,\ldots,\ \Psi_s^k : X^k{\rightarrow}Y^k,\ldots. \quad (2)$$

После размещения в некотором порядке на оси ординат конечного множества точек Y получаем для последовательности (2) ломанную линию γ_s, определяемую вершинами ломаной (рис. 1).

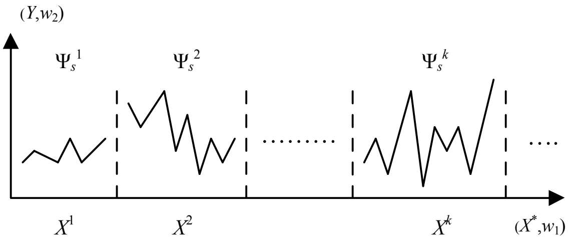

Рис. 1. Структура геометрического образа γ_s инициального автомата (A, s)

В геометрическом образе γ_s автомата (A, s), построенном на базе последовательностей отображений (1) и (2), функция переходов δ представлена неявно, а функция выходов λ для неопределенных состояний автомата $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$.

Для того, чтобы геометрический образ γ_s явно определял функции δ и λ, введем следующее правило обозначения состояний:

s_ε – начальное состояние и для любых $p \in X^*$ и $x \in X^*$ $\delta(s, px) = s_{px}$.

Это позволяет для любых автоматов с общим множеством входных сигналов X формально построить единую функцию переходов вида $\delta{:}\{s_p,\ p \in X^*\}{\times}X{\rightarrow}\{s_p,\ p \in X^*\}$. Специфика функции переходов для конкретного автомата выражается построением конечного множества классов эквивалентных состояний и заменой всех состояний каждого класса одним представителем класса эквивалентных состояний.

Трудная задача разбиения бесконечного множества формальных состояний $\{s_p,\ p \in X^*\}$ на классы эквивалентных состояний требует анализа бесконечного геометрического образа, что возможно только для частных вариантов автоматов.

Геометрическому образу γ_s автомата (A, s) соответствует последовательность вторых компонент точек, являющихся вершинами ломаной линии γ_s:

$$Y_{i1},\ Y_{i2},\ \ldots, Y_{it},\ \ldots$$

По заданному геометрическому образу γ_s автомата (A, s) функции δ и λ определяются таблицей с бесконечным числом столбцов, которая заполнена стандартно по правилу изменения формальных состояний (3) и размещением элементов последовательности (4) по столбцам сверху вниз внутри столбцов и слева направо по столбцам (табл. 1).

Таблица 1

Таблица определения функций δ и λ

δ \ λ	S_ε	S_0	S_1	S_{00}	…	S_p	…
$X_1=0$	S_0 \ Y_{i1}	S_{00} \ Y_{i3}	S_{10} \ Y_{i5}	S_{000} \ Y_{i7}	…	S_{P0} \ Y_{iu}	…
$X_2=0$	S_1 \ Y_{i2}	S_{01} \ Y_{i4}	S_{11} \ Y_{i6}	S_{001} \ Y_{i8}	…	S_{P1} \ Y_{iu+1}	…

Бесконечная табл. 1, соответствующая конечному детерминированному автомату (A, s_ε), может быть преобразована в конечную таблицу на основе анализа последовательности (4). Такое преобразование таблицы возможно, например, для периодической таблицы вида (4). Указанный способ построения функции δ по заданному геометрическому образу γ_s и построение функции λ по последовательности вторых компонент точек геометрического образа позволяет связывать «зашифрованное» в таблицах, графах, матрицах и т.п. поведение автомата с наглядными геометрическими свойствами фазовых траекторий поведения.

Представленные в статье основные положения, математические структуры, теоремы и методы могут рассматриваться как фрагмент теории автоматов, базирующийся на геометрическом представлении их законов функционирования. Задание автоматов геометрическими образами позволяет представлять их функционирование явно на всем бесконечном множестве управляющих входных последовательностей.

Литература

1. Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Техническое диагностирование мехатронных систем // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2003. – № 2. – С. 2-6.
2. Arbib M. Automata theory and control theory: a rapprochement // Aulomatica. – 1966. – № 3. – P.161-189.
3. Arbib M. Tolerance autometa // Kybernetik. – 1967. – № 3. – P. 223-233.
4. Калман Р., Фолб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971. – 380 с.
5. McCulloch W., Pitts. A logical calculis of the ideas immanent in nervous activity // Bull. Math. Biophys. – 1943. – № 5. – P. 115-133.
6. Гилл А. Введение в теорию конечных автоматов. – М.: Наука, 1966. – 466 с.

Поступила в редакцию 15.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.