

**СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ****В. М. Шпаков (Санкт-Петербург)**

Наиболее распространенным подходом к компьютерному моделированию динамических систем является математический подход. Он состоит в том, что вначале на основании законов соответствующих динамик разрабатывается математическая модель в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений относительно абстрактных переменных. Модельные эксперименты проводятся на компьютерах с использованием численных методов решения этой системы уравнений. При этом физические параметры системы входят в коэффициенты уравнений, иногда в виде достаточно сложных зависимостей. Недостаток такого подхода проявляется уже при вариациях физических параметров системы, выполняемых в ходе модельных экспериментов, и связан с необходимостью пересчета коэффициентов уравнений. Модификация же исходной модели системы или ее расширение могут потребовать существенной переработки системы уравнений и программы ее решения на компьютере.

Альтернативой этому подходу является использование физического подхода к моделированию динамических систем. В этом случае переменными модели являются физические состояния процессов в реальной системе, такие как силы, ускорения, скорости, углы, температуры, напряжения и т.п. Изменение состояний производится процедурами, реализующими соответствующие законы динамики с учетом существующих ограничений и отношений между элементами системы. Среди достоинств физических моделей необходимо отметить меньшую трудоемкость разработки модели, ее модификации и расширения, а также относительно более простые – верификацию, валидацию, визуализацию модели и интерпретацию результатов моделирования. Простота расширения модели позволяет достаточно легко моделировать процессы влияния системы на окружающую среду и влияние этой среды на систему.

Среди большого количества имеющихся на рынке компьютерных средств имитационного моделирования практически отсутствуют средства, ориентированные на разработку физических моделей. Имеющиеся компьютерные средства, обеспечивающие реализацию физического подхода к моделированию (physics engines) [1], в основном ориентированы на моделирование механических систем и предназначены для разработки компьютерных игр. Вместе с тем высокая производительность современных компьютеров обеспечивает возможность создания сравнительно простых способов реализации физических моделей динамических систем. В докладе показана возможность реализации физических моделей на основе использования ситуационно-событийного формализма спецификации транзитивной модели взаимодействующих гибридных процессов [2]. Основой формализма является абстрактная модель гибридного автомата, в которой дискретные состояния представляются логическими переменными. В множество логических переменных включается также подмножество предикатов от непрерывных состояний, которые используются для моделирования взаимодействий между процессами. Логические переменные могут определять как дискретные изменения состояний непрерывных составляющих, так и изменения динамики их развития. Состояния процессов в модели представляются множеством вещественных переменных X для непрерывных составляющих и множеством логических переменных W , содержащим подмножество Q для дискретных состояний и подмножество предикатов G , т.е. $W = Q \cup G$. Для спецификации процессов необходимо определить функции перехода следующих типов:

$\sigma : W \rightarrow Q \times \{False, True\}$ – функция трансформации дискретных состояний;

$\delta : W \times X \rightarrow X$ – функция трансформации непрерывных состояний процессов;

$\gamma : X \rightarrow G \times \{False, True\}$ – зависимость предикатов от непрерывных состояний.

Область определения функции перехода σ можно описывать с помощью логических формул, что делает описание достаточно наглядным. На наш взгляд, в качестве условия наиболее удобно использовать элементарные конъюнкции логических переменных. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как логико-динамические ситуации [3]. Вводя обозначение S_j , динамическую ситуацию можно определить следующим образом:

$$S_j = s_{j_1}, \dots, s_{j_i}, \dots, s_{j_n}, \text{ где } s_{j_i} = w_{j_i} \text{ или } s_{j_i} = \neg w_{j_i}, w_{j_i} \in W, n = 1 \dots N_w, N_w = |W|.$$

Обозначая множество ситуаций S , тип функции трансформации дискретных состояний теперь можно определить следующим образом: $\sigma : S \rightarrow Q \times \{False, True\}$. Эта функция может быть задана с помощью совокупности продукционных правил:

$$S_j \rightarrow r'_{j_1}, \dots, r'_{j_i}, \dots, r'_{j_m}, \text{ где } r'_{j_i} = q'_{j_i} \text{ или } r'_{j_i} = \neg q'_{j_i}, q'_{j_i} \in Q. \quad (1)$$

Функция δ должна для каждого режима определять новые значения состояния процесса, соответствующие его текущему состоянию, динамике системы, интервалу Δt , а также, возможно, текущим состояниям некоторых других взаимодействующих с ним процессов. Режим гибридного процесса естественным образом представляется с помощью динамической ситуации. Новые значения состояний процессов находятся путем вычисления их транзитивных отношений. Функция перехода δ может быть представлена с помощью совокупности правил вида:

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x_i, \Delta t), \quad (2)$$

где $S_j \in S$ – ситуация, соответствующая режиму, τ_k – соответствующее отношение, $x_k, x_i \in X$ – состояния процессов.

Функцию γ удобно представлять совокупностью правил следующего вида:

$$((x_{j_1} \geq a_k + x_{j_2}) \wedge (x_{j_3} \leq b_k + x_{j_4})) \rightarrow g_k, \quad (3)$$

где $x_{j_1}, x_{j_2}, x_{j_3}, x_{j_4} \in X, g_k \in G, a_k$ и b_k – константы, соответствующие некоторому диапазону. Более сложные предикаты могут формироваться из простых предикатов с помощью правил (1).

Компьютерная реализация процессов, специфицированных правилами (1–3) производится путем использования интерпретатора этих правил. Архитектура и алгоритмы функционирования интерпретатора достаточно просты. Множества переменных состояния процессов (X и W) в интерпретаторе представляются массивами записей, каждая из которых содержит имя переменной и ее значение. Все правила реализуются с помощью условных операторов «if...then...». Обе части оператора содержат записи об использованных в данном правиле переменных. Основу интерпретатора составляет исполняющая процедура, которая в цикле сканирует списки правил. Алгоритм обработки правил вычисляет значение условной части правила. Если это значение равно True, то запускается алгоритм выполнения исполнительной части правила. В случае применения правила (1) переменным из исполнительной части правила присваиваются специ-

фицированные логические значения. В случае использования правила (2) запускается указанная в исполнительной части правила процедура вычисления транзитивного отношения и найденное новое значение состояния процесса присваивается соответствующей переменной. С помощью правила (3) вычисляются значения неравенств, указанных в условной части, и их логическое произведение присваивается предикату, указанному в исполнительной части правила.

Описанный подход к реализации процессов был использован при разработке в СПИИРАН опытного образца компьютерной среды EnviCon, ориентированной на моделирование совокупностей взаимодействующих гибридных процессов [3]. Среда содержит редакторы для формирования векторов состояния процессов и списков правил трансформации описанного выше вида (1–3). Для обработки правил (2) в среде имеется набор процедур реализации арифметических операторов, функциональных зависимостей и транзитивных отношений для элементарных процессов. С помощью среды EnviCon были разработаны модели трех промышленных установок, функционирование которых определяется большим количеством взаимодействующих физических процессов.

Для иллюстрации подхода приведем спецификацию в среде EnviCon физической модели движения упругого обруча при его падении на горизонтальную плоскость. Физическими параметрами обруча являются масса (m), радиус (R) и коэффициент упругости (k). Состояниями процесса являются вертикальное ускорение (A_y), скорость (V_y), высота центра масс (h) и деформация обруча ($R-h$), возникающая при контакте обруча с плоскостью. В модели необходимо реализовать движение обруча в двух ситуациях: свободное падение при ($h > R$) и упругий удар при $\neg(h > R)$. Свободное падение обруча происходит под действием веса (P), а при контактном взаимодействии с плоскостью его движение определяется совместным действием веса и силы упругой реакции обруча (F_y). В ситуации, когда ($h > R$) скорость (V_y) определяется интегралом от ускорения свободного падения g , а высота – интегралом от скорости. Сила реакции пропорциональна деформации обруча. При этом коэффициенты пропорциональности могут быть различными при увеличении деформации и при восстановлении формы. Соответствующие ситуации определяются предикатами, которые вычисляются с помощью правил (3), а переменные состояния – с помощью правил (2). На рис. 1 представлена копия части редактора среды EnviCon, на которой приведены правила трансформации состояния обруча. Имена переменных в правилах соответствуют указанным выше. Ситуации с именами (*торможение*), (*разгон*) заданы правилами трансформации ситуаций (1) следующим образом: $(h < R), (V < 0) \rightarrow (\text{торможение})$, $(h < R), (V > 0) \rightarrow (\text{разгон})$. Представление модели в таком виде является, по нашему мнению, достаточно наглядным. Правила 2 и 3 вычисляют величину упругой реакции обруча на участках торможения и разгона, соответственно. Правило 4 вычисляет сумму сил, а правило 5 – ускорение. Правила 6 и 7 вычисляют скорость и высоту, соответственно, а правило 8 – величину деформации.

На рис. 2 приведен график изменения высоты центра масс обруча, падающего с высоты 400 см и имеющего радиус 30 см. Из графика видно, что вначале обруч приближается к плоскости на расстояние, меньшее радиуса, а в конце останавливается на расстоянии радиуса от плоскости.

№	Переменная	Процедура	Кэфф.	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	имя параметра	значение
1	P вес	Умножение	1.00	m масса	g	EverTrue		
2	Fy реакц.	Пропорциональная	60000.00	R -- h		торможение		
3	Fy реакц.	Пропорциональная	45000.00	R -- h		разгон		
4	Fy реакц+P	Сумма	1.00	Fy реакц.	P вес	EverTrue	2-ой кэфф.	-1.00
5	Ay ускорен.	Деление	1.00	Fy реакц+P	m масса	EverTrue		
6	Vy скорость	Интеграл	1.00	Ay ускорен.		EverTrue		
7	h высота	Интеграл	1.00	Vy скорость		EverTrue		
8	R -- h	Сумма	1.00	R радиус	h высота	h < R	2-ой кэфф.	-1.00

Рис. 1. Правила трансформации состояния обруча

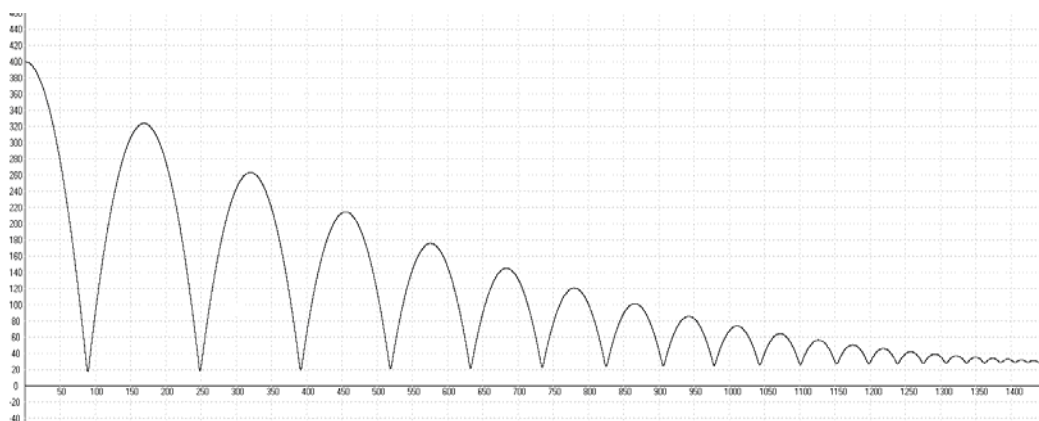


Рис. 2. График движения центра масс обруча

Рассматриваемый ситуационный подход к реализации процессов с помощью трансформационных правил позволяет модифицировать и расширять модели систем простым добавлением и заменой правил. Таким путем достигается возможность при моделировании учитывать влияние системы на окружающую среду и влияние этой среды на процессы в системе. Если, например, необходимо учесть влияние сопротивления воздуха на движение обруча, то к приведенным правилам (см. рис. 1) необходимо добавить правило, вычисляющее силу сопротивления, и сложить эту силу с весом.

Покажем, как можно расширить модель движения упругого обруча на случай его падения под некоторым углом к плоскости, т.е. когда имеется горизонтальная составляющая скорости. При наличии трения обруч в результате контакта с поверхностью начнет вращаться, а его горизонтальная скорость уменьшится. В этом случае кроме вертикальной силы реакции при контакте с поверхностью появляется горизонтальная сила, приложенная к ободу обруча и обусловленная силой трения. Воздействие этой силы на движение обруча эквивалентно действию такой же силы, приложенной к его центру масс и действию пары сил, приложенных к ободу. Их совместное действие вызывает изменение угловой скорости и горизонтальной составляющей скорости. Величина этой силы зависит от коэффициента трения и вертикальной силы, ее знак противоположен знаку скорости обода относительно поверхности.

Для моделирования надо задать момент инерции обруча и ввести переменные для представления новых состояний процесса: горизонтальной координаты (X), горизонтальных ускорения (A_x), скорости (V_x), силы трения (F_x) и момента пары сил (M_{mng}). Надо также ввести скорость точки обода относительно плоскости (V_{mg}), угловое ускорение, угловую скорость и угол. Сила трения возникает в ситуации, когда име-

ется контакт с поверхностью, т.е. когда расстояние центра масс от поверхности меньше радиуса обруча и когда абсолютное значение скорости обода больше нуля. Логическое значение этой ситуации определяется конъюнкцией двух предикатов. Присвоив ей идентификатор *скольжение*, правило для вычисления ее значения будет иметь вид: $(h < R) \wedge (|V_{\text{тнг}}| > 0) \rightarrow \text{скольжение}$. Эта логическая переменная должна использоваться в условной части правила для вычисления F_x . Правила для спецификации изменений этих состояний очевидным образом вытекают из законов механики. Они приведены на рис. 3.

9	УглСкор * R	Умножение	1.00	Угл. скор.	R радиус	EverTrue		
10	Vтангенц.	Сумма	1.00	Vx скорость	УглСкор * R	EverTrue	2-ой коэфф.	-1.00
11	Sign(Vтнг)	Реле	1.00	Vтангенц.		$h < R$	Верх.огран.	1.00
12	Abs(Vтнг)	Абсолютная	1.00	Vтангенц.		$h < R$		
13	Fx реакц.	Умножение	-0.15	Sign(Vтнг)	Fy реакц+P	Скольжение		
14	Ax ускорен.	Деление	1.00	Fx реакц.	m масса	EverTrue		
15	Vx скорость	Интеграл	1.00	Ax ускорен.		EverTrue		
16	X	Интеграл	1.00	Vx скорость		EverTrue		
17	M тнг	Умножение	-1.00	Fx реакц.	R радиус	$h < R$		
18	Угл. ускор	Деление	1.00	M тнг	Мом. Инерц.	$h < R$		
19	Угл. скор.	Интеграл	1.00	Угл. ускор		$h < R$		
20	Угол	Интеграл	1.00	Угл. скор.		EverTrue		

Рис. 3. Правила для моделирования вращения обруча

Добавление этих 12 правил к имеющимся 8 правилам позволяет моделировать падение обруча при наличии горизонтальной составляющей скорости и вращении обруча. На рис. 4. приведены графики изменения высоты, горизонтальной и угловой скоростей, полученные при моделировании процесса падения обруча с высоты 400 см и наличии начальной горизонтальной скорости 300 см/с.



Рис. 4. Изменения во времени высоты, горизонтальной и угловой скоростей

Из графиков видно, что в ситуации, когда имеется контакт обруча с поверхностью ($h < R$), происходит возникновение и нарастание угловой скорости и уменьшение горизонтальной скорости.

Приведенное рассмотрение позволяет сделать вывод о том, что физические модели динамических систем могут быть эффективно реализованы на основе использования ситуационно-событийного формализма спецификации гибридных процессов. Приведенный пример реализации физической модели иллюстрирует удобство разработки физической модели и простоту ее расширения.

Литература

1. **Adrian Boeing, Thomas Bräunl.** Evaluation of real-time physics simulation systems // <http://www.adrianboeing.com/pal/papers/p281-boeing.pdf>.
2. **Шпаков В. М.** Ситуационные спецификации имитационных моделей гибридных реактивных систем // Труды СПИИРАН. Т. 2. Вып. 1. СПб.: СПИИРАН, 2002. С. 212–222 .
3. **Шпаков В. М.** Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сб. докл. конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, Санкт-Петербург, 19–21 октября 2005. Т. II. С. 292–295.