отклонений размеров и т. п. Уровень ЧЕРТЕЖ позволяет производить компоновку изображений на формате. Составная рамка, образованная заданным количеством совмещенных по горизонтали листов, размещается на свободном поле экрана. Изображения автоматически упрощаются с целью облегчения чтения чертежа. На этом уровне оформляются технические требования и основная надпись. Система позволяет делать твердую копию чертежа и работать с архивами конструкций. При дальнейшем развитии системы набор выполняемых функций будет расширен возможностями использования конструктивных элементов для формирования чертежа и диалоговой компоновки составных конструкций.

Отработка основных принципов и опытная эксплуатация системы проведены на комплексе ЕС-АРМ. В настоящее время осуществляются развитие системы и адаптация на ЭВМ класса СМ-1700.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ксенофонтова Л. Н., Рябов Е. К.** Интерактивная система моделирования конструкции и оформления рабочего чертежа детали // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Тез. докл. науч.-техн. конф.— Устинов: УДТ НТО, 1985.
2. **Рябов Е. К.** Интерактивный синтез топологической модели чертежа // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по проблемам машинной графики.— Серпухов: ИФВЭ АН СССР, 1987.
3. **Ксенофонтова Л. Н., Рябов Е. К.** Геометрическое моделирование проекционных связей при интерактивном формировании многовидового чертежа // Методы и средства обработки сложной графической информации: Тез. докл. III Всесоюз. конф.— Горький: ГГУ, 1988.— Ч. 2.

Поступила в редакцию 16 января 1990 г.

УДК 681.3.022

Е. В. БИРЯЛЬЦЕВ, А. М. ГУСЕНКОВ, И. Р. НАСЫРОВ,
А. А. САВЕЛЬЕВ

(Казань)

СИСТЕМА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРОМ

Формы представления геометрических моделей. Можно предложить три формы представления геометрических моделей в САПР:

1) дескриптивное — путем явного задания геометрических примитивов, составляющих модель;

2) процедурное — задание модели в виде программы процедурного языка, описывающей процесс ее построения;

3) непроцедурное — описание модели в виде набора геометрических примитивов и связывающих их отношений.

Дескриптивное представление позволяет описывать конкретный геометрический объект, все элементы которого известны. Модификация таких моделей производится пользователем в интерактивном режиме путем указания подмножества примитивов модели и операций над ними (удаление, аффинное преобразование и т. д.).

Процедурное и непроцедурное представления применяются обычно для задания параметрических моделей геометрических объектов. Однако отличие этих двух подходов заключается в том, что при процедурном представлении необходимо описать алгоритм построения модели, а при непроцедурном — описывается геометрическая модель без указания способа ее построения. Таким образом, с непроцедурным представлением, как правило, связывают некоторый автоматизированный или универсальный способ построения. Оба эти подхода обладают как преимуществами, так и недостатками. При процедурном подходе набор параметров модели задается более жестко, а сам процесс описания модели требует указания последовательности шагов ее построения и является достаточно трудоемким. При непроцедурном представлении модели используются либо унифицированные методы, либо методы искусственного интеллекта, которые не всегда гарантируют построение реализации модели и могут потребовать больших вычислительных мощностей.

По этим причинам в системе геометрического моделирования ГРОМ используются все три формы представления моделей.

Учитывая, что дескриптивная и процедурная формы представления геометрических моделей используются достаточно широко и реализованы во многих системах, более подробно остановимся на непроцедурной форме.

Непроцедурное представление геометрических моделей. Для представления геометрических моделей в системе ГРОМ используется базисный набор отношений над примитивами. При описании конкретной геометрической модели задаются отношения, определяющие взаимное расположение примитивов, образующих моделируемый объект. При этом получается абстрактная модель, которая может не иметь однозначной реализации. Реализацию такой модели можно построить, наложив на модель дополнительные отношения, позволяющие найти параметры всех элементов, входящих в модель. Например, для прямоугольника такую модель можно определить следующим образом.

Примитивы:

4 отрезка прямых о1, о2, о3, о4.

Отношения:

конечная точка о1 совпадает с начальной точкой о2,
конечная точка о2 совпадает с начальной точкой о3,
конечная точка о3 совпадает с начальной точкой о4,
конечная точка о4 совпадает с начальной точкой о1,
угол между о1 и о2 прямой,
угол между о2 и о3 прямой,
угол между о3 и о4 прямой,
угол между о4 и о1 прямой.

Данная модель описывает прямоугольник без фиксации его размеров и положения в пространстве. Для построения реализации данной модели необходимо задать ряд дополнительных отношений, например зафиксировать три начальные точки отрезков или указать размеры сторон, угол наклона одного из отрезков к оси OX и начальную точку одного из отрезков.

Автоматизация геометрических построений. В ряде систем искусственного интеллекта для построения реализации непроцедурной модели применяются методы логического вывода решающей последовательности, которая представляет собой последовательность элементарных действий, известных системе (например, построение отрезка по длине и углу) и приводящих к полному построению реализации. Подобный подход используется в системе ПРИЗ [1].

Построение решающей последовательности в ряде случаев не гарантировано, так как наряду с линейными последовательностями вида

$$\begin{gathered} x_1 = F_1(x_2), \\ \vdots \\ x_i = F_i(x_{i+1}), \\ x_{i+1} = \text{const} \end{gathered}$$

могут возникать циклические последовательности вида

$$\begin{gathered} x_i = F_i(x_j), \\ x_j = F_j(x_i), \end{gathered} \qquad (1)$$

которые неразрешимы в терминах элементарных действий, известных системе. В подобных случаях применяются приближенные численные методы (система ПРИЗ), что также связано с рядом трудностей, в основном по определению хорошего начального приближения.

Как правило, нетривиальные геометрические модели отличаются сильной «взаимосвязанностью» входящих в них примитивов, т. е. описание модели нельзя существенно упростить путем расчленения ее на совокупности не связанных общими переменными отношений. Поэтому неизбежно возникают циклические последовательности вида (1).

В настоящей работе предлагается подход, использующий численные методы не как вынужденную меру, а как основной инструмент, не требующий от системы логического вывода.

Для реализации такого подхода необходимо представить все используемые в описании модели отношения в форме, пригодной для численного анализа. Это можно сделать, представив используемые отношения в виде системы равенств и системы неравенств.

Системой равенств будут выражаться отношения типа инцидентности, касания, расстояния и т. п., системой неравенств — отношения типа «точка внутри окружности», «точка в полуплоскости» и т. п.

В качестве численной меры обоих классов отношений естественно взять некоторое «расстояние» R, для которого справедливо:

$R_i = 0$ при выполнении i-го отношения типа равенство,

$R_i < 0$ при выполнении i-го отношения типа неравенство,

$R_i > 0$ при невыполнении i-го отношения.

При этом для решения численными методами необходимо, чтобы

$$\sup R_i \to 0 \text{ при } \mathbf{x} \to \mathbf{x}_0,$$

где $\mathbf{x}$ — вектор аргументов отношений модели; $\mathbf{x}_0$ — решение системы.

Таким образом, подобный подход приводит к необходимости решения системы уравнений

$$R_i(\mathbf{x}) = 0 \tag{2}$$

при ограничениях

$$R_j(\mathbf{x}) < 0. \tag{3}$$

Система (2) с ограничениями (3) решается построением целевой функции качества с последующим решением задачи оптимизации [2]. При этом не требуется, чтобы число неизвестных в системе равнялось числу функций. Это соответствует случаю, когда модель с дополнительными отношениями может иметь неоднозначную реализацию. Рассмотрим это на примере модели сопряжения двух окружностей прямой.

Примитивы:

две окружности $a1$, $a2$;

отрезок прямой t.

Отношения:

начальная точка отрезка t касается окружности $a1$;

конечная точка отрезка t касается окружности $a2$;

расстояние между центрами окружностей $a1$ и $a2$ больше суммы их радиусов.

Если на эту модель наложить дополнительные отношения, которые однозначно определяют радиус и центр обеих окружностей, то модель будет иметь четыре различные реализации. В этом случае система ГРОМ построит одну из возможных реализаций.

Для решения задачи оптимизации целевой функции используются методы нулевого порядка и модификации метода Ньютона [2].

Основной трудностью при реализации данного подхода является выбор хорошего начального приближения, которое гарантирует нахождение минимума, соответствующего решению данной задачи. Наиболее естественным представляется выбор начального приближения конструктором в интерактивном режиме.

Для контроля процесса решения и возможных коррекций условий необходимо обеспечить пользователю возможность визуального наблюдения за ходом решения, что может быть достигнуто построением на графическом терминале каждой k-й итерации. Это позволит при плохой сходимости процесса изменить или временно удалить из модели некоторые отношения либо ввести другие коррективы.

Реализация системы ГРОМ. Реализация предлагаемого подхода проведена в ОС ДЕМОС в рамках системы геометрического моделирования ГРОМ [3].

Ядром системы геометрического моделирования ГРОМ является геометрический процессор, реализованный в виде интерпретатора специализированного языка высокого уровня.

Язык системы геометрического моделирования ГРОМ ориентирован на разработку общемашиностроительных чертежей средствами машинной графики и может использоваться как базовое средство для разработки интерактивных и пакетных программных средств САПР машиностроения.

Язык системы ГРОМ реализован в виде языка программирования высокого уровня со всеми основными конструкциями и операторами (операторы объявления и уничтожения переменных, присваивания, ввода, вывода, управляющие конструкции, описание и вызов подпрограмм).

Интерпретатор языка геометрического моделирования ГРОМ предоставляет возможность работать с геометрическими элементами (ГЭ) восьми типов:

точка,	дуга гиперболы,
отрезок,	дуга параболы,
дуга окружности,	дуга спирали Архимеда,
дуга эллипса,	текст графический.

Пользователь может задать каждый ГЭ оператором присваивания и организовать множество ГЭ. Для постоянного хранения отдельные ГЭ и множества ГЭ могут записываться на внешние носители в виде метафайлов в стандарте GKS.

Разрешен доступ к отдельным полям (координатам, атрибутам) ГЭ для выполнения арифметических операций и операций сравнения, имеется библиотека математических функций.

Для облегчения решения геометрических задач реализованы встроенные функции:

вычисления расстояния между ГЭ от точки до множества ГЭ;

определения угла между отрезками, длины дуги ГЭ;

проверки отношений между ГЭ: касания, инцидентности;

вычисления площади произвольного связного контура;

штриховки произвольного связного контура;

построения эквидистанты к произвольному связному контуру;

преобразования ГЭ и множеств ГЭ: параллельный перенос, поворот, центрально-симметричное и зеркальное отображения, масштабирование;

окнирования множества ГЭ;

выделения замкнутого контура.

Визуализацию графической информации в системе ГРОМ обеспечивает комплекс программ инвариантного графического ядра, позволяющий осуществлять прорисовку на широком спектре графических устройств.

В качестве экспериментальной возможности в систему ГРОМ включен оператор «find — init», позволяющий строить непроцедурные модели и получать различные реализации. Проведенные с оператором «find — init» эксперименты показали принципиальную возможность реализации непроцедурной модели и позволили оценить сходимость решения.

В качестве модельных примеров использовались построения сопрягающих окружностей, отрезков по углу и расстоянию и ряд других примеров. В простых случаях (отрезок по углу и расстоянию) решение находилось за одну итерацию. В более сложных (построения сопрягающих дуг окружностей) число итераций доходило до 10—12, при этом число итераций мало зависимо от начального приближения в окрестности до 100 % относительно характерных размеров модели. В окрестности порядка 1 % решение находилось за одну-две итерации.

Заключение. Предлагаемый подход позволяет разработать технологию построения и модификации геометрических моделей, основанную на непроцедурном представлении геометрических объектов. Выполненная экспериментальная реализация и проведенная серия экспериментов с ней показали возможность использования непроцедурного представления геометрических моделей в САПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кахро М. И., Калья А. П., Тыугу Э. Х.** Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ).— М.: Финансы и статистика, 1988.
2. **Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.** Практическая оптимизация.— М.: Мир, 1985.
3. **Биряльцев Е. В., Гусенков А. М., Насыров И. Р., Савельев А. А.** Информационно-графическая система ГРОМ в ОС ДЕМОС // Всесоюз. конф. «Пути совершенствования разработки программных средств и автоматизированных систем»: Тез. докл.— Свердловск, 1989.
4. **Биряльцев Е. В., Гусенков А. М., Насыров И. Р., Савельев А. А.** Система геометрического моделирования ГРОМ // Всесоюз. конф. «Машинная графика-89»: Тез. докл.— Новосибирск, 1989.

Поступила в редакцию 16 января 1990 г.

УДК 681.3.06 : 656.512.2(075.8)

О. П. КОРМИЛИЦЫН, А. А. САМОДУРОВ

(Ленинград)

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ФИЗИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Описание пространственных объектов в САПР, как правило, ограничено геометрическими характеристиками объектов, что подтверждается отечественными и зарубежными публикациями [1, 2]. В то же время такие важнейшие физические понятия, как пористость, неоднородность и т. д., определяют структуру моделируемых объектов. Поэтому необходимость описания среды следует из концепции комплексного проектирования, где модель разрабатываемого объекта должна формироваться с позиций как геометрического, так и физического моделирования. В настоящей работе предлагается алгоритмически новый подход, отвечающий единой задаче комплексного проектирования технических объектов.

Рассмотрим предлагаемый подход на примере типового геометрического элемента — цилиндра ($\text{ТГЭ}^{\text{ц}}$), модель которого в соответствии с [3] можно представить логической совокупностью элементарных геометрических объектов ($\text{ЭГО}^{\text{ц}}$):

$$\text{ТГЭ}^{\text{ц}} = \bigcup_{\rho \in \Pi} \text{ЭГО}^{\text{ц}}_{\rho},$$

где Π — характеристика распределения ЭГО в рассматриваемой структуре; ρ — коэффициент заполнения.

В свою очередь, $\text{ЭГО}^{\text{ц}}$ представляется поверхностью 2-го порядка в форме

$$\text{ЭГО}_{\rho} = (A_{\rho} R)^{\tau} R,$$