Конструктивные геометрические модели и их применение в проектно-конструкторской деятельности

А.А. Бойков¹

¹РТУ МИРЭА, Проспект Вернадского, д. 78, г. Москва, 119454, Российская Федерация

Аннотация

Анализируются особенности проектно-конструкторской деятельности. Отмечается, что значительная ее часть состоит в создании геометрической составляющей электронных моделей изделий. Делается вывод об актуальности разработки алгоритмов и программных средств, которые упрощают создание и повышают качество геометрической части электронных моделей изделий. Анализируются понятия, введенные ГОСТом, и показывается, что на разных этапах проектно-конструкторской деятельности геометрическая часть электронной модели включает в себя множество геометрических и графических моделей. При этом с точки зрения конструктивного геометрического моделирования, тесно связанного с проектно-конструкторской деятельностью, нет принципиальной разницы между плоскими и трехмерными геометрическими моделями и их следует рассматривать единообразно. Вводится понятие конструктивной геометрической модели, позволяющее объединить электронные геометрические модели и электронные чертежи. Конструктивная геометрическая модель может одновременно содержать плоские, трехмерные и многомерные геометрические данные, которые по необходимости отображаются с применением тех или иных средств компьютерной графики. Для представления конструктивных геометрических моделей предлагается использовать визуальную и текстовую формы, приводятся их особенности и области применения. Показывается применение конструктивных геометрических моделей для автоматизации создания электронных геометрических моделей, а также проверки электронных чертежей и моделей.

Ключевые слова

CAD-системы, конструктивные геометрические модели, язык геометрических построений, автоматическая проверка

Constructive geometric models and their application in design and engineering activities

A.A. Boykov¹

¹MIREA — Russian Technological University, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russian Federation

Abstract

The features of design and engineering activities are analyzed. It is noted that the main part of the design and engineering activity belongs to the development of the geometric component of electronic product model. It is concluded that the development of algorithms, methods and software to simplify the creation or improve the quality of geometric data is relevant. The terms introduced by the State Standard are analyzed and it is shown that at different stages of design and engineering activities, the geometric component of electronic product model includes a plurality of geometric and graphic models. At the same time, from

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: albox@mail.ru (А.А. Бойков)

ORCID: 0000-0002-2068-1267 (А.А. Бойков)

the point of view of constructive geometric modeling, closely associated with design and engineering activities, there is no fundamental difference between flat and three-dimensional geometric models, and they should be considered uniformly. The concept of a constructive geometric model, combining electronic geometric models and electronic drawings, is introduced. A constructive geometric model can simultaneously contain flat, three-dimensional and multidimensional geometric data, which can be displayed using different computer graphics tools. Text and visual forms are offered to represent constructive geometric models. The features and areas of applying a visual and text presentation of constructive geometric models are given. The article considers the use of constructive geometric models to automate the creation of electronic geometric models, as well as verification of electronic drawings and models.

Keywords

CAD, constructive geometric model, geometry constructions language, automatic verification

1. Введение

Проектно-конструкторская деятельность занимает центральное место в жизни общества, поскольку, в широком смысле, затрагивает (инициирует) любые перемены в окружающей человека среде [1]. При этом очевидна тенденция к усложнению проектно-конструкторской деятельности – от кустарного производства к чертежному способу и к современным компьютеризированным *CALS*-технологиям, предметом которых оказывает уже не только сам предмет проектирования, но весь его жизненный цикл.

Непосредственно проектно-конструкторская деятельность может быть связана с проектированием и конструированием нового объекта (по образцу, модели, требованиям или замыслу) либо с преобразованием образца (нескольких образцов) для получения новых (заданных) свойств [2], и в любом случае состоит в решении комплекса проблемных задач – конструкторских (достижения оптимальной формы и структуры, улучшение свойств изделия, устранение вредных явлений и др.) и/или технологических (выбор технологии для производства, улучшения качества изделия, сокращения времени или ресурсов и др.).

Современное проектирование сконцентрировано вокруг электронной модели изделия и связанных с ним процессов, составляющих жизненный цикл изделия, которая в свою очередь содержит одну или несколько геометрических и графических моделей (модель геометрической формы изделия и составляющих его частей, модели для инженерных расчетов, аддитивного производства или изготовления на станках с ЧПУ, электронные макеты для презентаций и рекламы, комплект конструкторских, технологических чертежей и пр.). Проектно-конструкторская деятельность в самом общем виде состоит из этапа поиска и анализа, на котором собирается необходимая информация и вынашивается образ будущего изделия, и этапа синтеза, в ходе которого создается, преобразуется и улучшается информационная модель изделия. Именно геометрическая составляющая электронной модели изделия играет ключевую роль для проектно-конструкторской деятельности [3], поскольку впоследствии определяет экономические, технологические, эксплуатационные и др. аспекты проектного решения.

Сказанное позволяет сделать вывод об актуальности разработки программных средств, алгоритмов и методов, упрощающих создание и повышающих качество геометрической составляющей электронной модели изделия. Этим вопросам посвящена настоящая статья.

2. Конструктивные геометрические модели

2.1. Геометрические модели в проектно-конструкторской деятельности

Рассмотрим подробнее, что из себя представляет геометрическая составляющая электронной модели изделия с позиций проектировщика.

ГОСТ вводит следующие понятия:

- электронный документ (ГОСТ 2.051);

- электронная модель изделия, электронная геометрическая модель, твердотельная модель, поверхностная модель, каркасная модель, электронный макет (ГОСТ 2.052);

- электронная модель детали, электронная модель сборочной единицы (ГОСТ 2.102).

Также, в соответствии с ГОСТ 2.102, «все графические документы (чертежи, схемы) могут быть выполнены в электронной форме как электронные чертежи и (или) как электронные модели изделия».

Таким образом, в соответствии с ГОСТ, геометрическая составляющая в составе электронной модели изделия на разных этапах его проектирования может быть представлена множеством «моделей» и графических документов.

С точки зрения проектировщика все эти геометрические и графические модели представляют собой файлы с векторными изображениями (чертежами и диаграммами) или 3D-моделями в том или ином формате. Между файлами могут как существовать, так и отсутствовать так называемые ассоциативные связи (которые обеспечивают обновление данных в одних файлах в ответ на изменения данных в других файлах). При этом большая часть времени проектировщика уходит на создание, преобразование и проверку таких моделей.

Все многообразие геометрических моделей, которые используются на практике, может быть сведено к пяти типам [4], из которых при создании трехмерных моделей изделий используют, как правило, граничную (из точек, линий и отсеков поверхностей) и конструктивно-блочную (объединения и вычитания базовых объемов). Электронные чертежи представляют собой наборы плоских примитивов, заданных своими параметрами. Синтез трехмерной модели на основе данных чертежа выполняется в создании человека, читающего чертеж. Технологии компьютерного синтеза трехмерных моделей на основе чертежей составляют основу так называемых несвязанных систем геометрического моделирования и машинной графики 2-го рода [3, 5], но они не получили достаточно широкого распространения на практике.

Как отмечается в [4], имеется принципиальное сходство в моделировании трехмерной геометрии средствами чертежа и компьютерными способами. Например, при граничном представлении (*B-rep.*) твердотельных моделей множество ограничивающих объем кусков поверхностей задают этот объем, то есть выступают в роли своеобразного репера (определителя), но также и геометрические задачи на чертеже решаются на основе представления трехмерных объектов своими определителями – парами проекций, группами точек и линий [6, 7].

Такие возможности открывает так называемое конструктивное геометрическое моделирование [7]. Его основу составляет манипулирование геометрическими объектами и их множествами, что, как показано в [8], имеет тесную связь с процессом создания компьютерных геометрических моделей в CAD-системах. При этом использование различных реперов одного объекта для решения одного класса задач сводится к использованию разных вариантов конструктивного алгоритма.

Таким образом, с точки зрения конструктивного геометрического моделирования, а также с точки зрения представления геометрических данных в файлах плоских чертежей или трехмерных моделей CAD-систем, нет принципиальной разницы между моделью, представленной чертежом, и «истинной» трехмерной моделью. Не удивительно, что многие CAD-системы соединяют в себе функции 2D- и 3D-редакторов. Различие состоит в том, с каким интерфейсом – 2D или 3D – имеет дело проектировщик. При этом для решения задачи используется одна или другая последовательность команд геометрического редактора (конструктивный алгоритм).

2.2. Структура конструктивной геометрической модели

Как показано в [7, 8, 9, 10], объединение возможностей конструктивного геометрического моделирования и CAD-систем позволяет во многих случаях упростить создание и повысить качество геометрических моделей. Здесь под геометрическим моделированием понимается «электронное геометрическое моделирование», а под геометрическими моделями – «электронные геометрические модели» в соответствии с [11]. В проектно-конструкторской деятельности электронные геометрические модели составляют основу геометрической

составляющей электронных моделей изделий и графической части конструкторских документов, но, как отмечается в [11], формируются на основе аналитического метода геометрического моделирования. В действительности же проектировщик не прибегает для получения ЭМИ или чертежа к вычислению координат точек модели к помощи формул или уравнений (аналитический подход), наоборот, выполняет построение геометрических объектов, достраивает новые к уже существующим (конструктивный подход). И, хотя реализуются эти построения при помощи вычислений, геометрическая модель, с которой взаимодействует проектировщик, отличается от аналитической примерно как язык высокого уровня отличается от языка ассемблера. Для формализации электронной геометрической модели этого типа вводится понятие конструктивной геометрической модели [9, 12].

Определение. **Конструктивная геометрическая модель** (КГМ) – это совокупность идентифицированных (именованных) элементов (геометрических и вспомогательных) с их параметрами и атрибутами и связей между ними. С формальной точки зрения КГМ представляет собой кортеж вида

$$M = \langle O, R, G, A, E \rangle$$

где O – множество идентифицированных элементов (различаются значением *ключ*), составляющих решение, R – множество связей между объектами, G – множество видов связей (допустимые значения *связи*), A – множество видов объектов или **алфавит** (допустимые значения *вида фигуры*), E – совокупность свойств пространства, в котором рассматриваются объекты O и связи R .

Каждый элемент описывается четверкой $o = \langle a, \text{ключ}, P, V \rangle$, где a – символ вида объекта, P – множество параметров, V – множество атрибутов в виде пар (название, значение). Каждая связь описывается четверкой $r = \langle q, o_1, o_2, V \rangle$, где q – символ вида связи, o_1, o_2 – *ключи* целевого и исходного объекта, V – множество атрибутов связи. Каждый элемент алфавита A описывается тройкой $\langle a, P_0, V_0 \rangle$, где a – символ вида объекта, P_0 – множество параметров, V_0 – множество атрибутов. Каждый элемент G описывается четверкой $\langle q, a_1, a_2, V_0 \rangle$, где q – символ вида связи, a_1, a_2 – символы целевого и исходного объекта, V_0 – множество атрибутов связи.

Отметим, что множество видов связей, видов объектов (алфавит) и свойства пространства остаются неизменными для некоторого класса моделей, причем свойства пространства E определяют алфавит A , и с алфавитом – состав возможных связей G . Будем называть тройку $J = \langle G, A, E \rangle$ **контекстом** для некоторого класса моделей. Будем называть КГМ вида $M = \langle O, R \rangle^J$ КГМ в контексте J .

Из введенного определения следует, в частности, что электронный чертеж и трехмерная модель, в общем случае, различаются именно контекстами. Также из определения следует, что КГМ, создаваемые в одной CAD-системе, в общем случае, имеют общий контекст.

2.3. Представление конструктивной геометрической модели

Элементы КГМ для удобства применения в проектно-конструкторской деятельности должны иметь человеко-ориентированное представление.

Человек в своей деятельности привык использовать две формы представления информации – визуальную и текстовую. Каждое из этих представлений обладает как достоинствами, так и недостатками. Для КГМ подходят обе эти формы, поэтому далее рассмотрим их подробнее.

Визуальное представление. Поскольку элементами КГМ являются, в конечном счете, геометрические фигуры (точки, линии, области, куски поверхностей, тела-примитивы, значки и пр.), очевидно, что такая модель может быть представлена, как это обычно делается в векторном редакторе или редакторе CAD-системы. Для этого достаточно, чтобы каждый из элементов алфавита A с заданным символом a_i мог быть отрисован на экране. Соответствующим образом организуется диалог с проектировщиком – отрисованный объект можно указать (select), изменить его параметры и атрибуты, удалить, используя команды редактора, создать новый. При этом могут быть использованы все возможности современных систем плоской и трехмерной компьютерной графики – ортогональные, параллельные и центральные проекции, прозрачность, удаление невидимых частей объекта и пр.

Кроме того, ничто не мешает использовать и иные способы визуализации, например, группы плоских объектов отображать отдельно, трехмерных (многомерных) – отдельно, и вообще разделить объекты при помощи «виртуальных» слоев или видов, так чтобы объекты разных групп при отображении не смешивались. С информационной точки зрения такие объекты легко помещаются в одной КГМ и могут воздействовать на геометрию друг друга посредством ассоциативных связей. Речь идет лишь о способе представления геометрических данных для проектировщика, то есть об интерфейсе управления геометрической моделью. На рис. 1 показаны примеры «гибридных» представлений геометрической модели, когда в качестве основного используется плоское изображение, но сама модель является трехмерной и соответствующее отображение может быть активировано в любой момент.

Рисунок 1: «Гибридное» плоско-трехмерное представление геометрической модели

Текстовое представление. Существует большое количество форматов графических файлов, которые могут отображаться и редактироваться при помощи текстовых редакторов. К ним, например, относятся – формат векторной графики *SVG*, форматы трехмерных моделей *VRML*, *X3D* или *STEP*. Отметим, что на самых ранних этапах становления машинной графики были широко распространены так называемые «дисплейные файлы» [13], как программы специального дисплейного процессора, система команд которого реализовывала отображение графических объектов. С этой точки зрения современные графические и геометрические файлы представляют собой именно программы соответствующих трансляторов.

Легко описать способ представления элементов КГМ в виде последовательности строк определенного формата так, чтобы обеспечить однозначное взаимно-обратное преобразование КГМ в текст и наоборот.

Представление КГМ в виде текста может быть полезным для обеспечения возможности поиска элементов по текстовым значениям атрибутов или редактированию модели способом копирования отдельных строк и фрагментов.

Еще больше возможностей открывается, если среди элементов КГМ используются специальные управляющие объекты – объекты, копирующие по определенному правилу связанные с ними фигуры (аналоги цикла), или отображающие ту или иную фигуру в зависимости от условий (аналоги ветвлений), параметризованные макроэлементы (аналоги подпрограмм). Очевидно, все перечисленное уже сейчас является набором инструментов *CAD*-системы, где есть команды-массивы или возможность параметризации блоков (*AutoCAD*) или макроэлементов (Компас). С этих позиций КГМ в виде программы может служить удобной формой записи макроса для повторного многократного использования, а возможность редактирования в виде текста – позволяет повысить гибкость автоматически генерируемых элементов модели [10].

3. Применение конструктивных геометрических моделей

3.1. Применение конструктивных геометрических моделей для создания геометрической составляющей электронной модели изделия

Текстовое представление элементов КГМ является, по сути, некоторым языком программирования с системой операторов и синтаксических конструкций, соответствующих геометрическим фигурам и связям между ними. Это может быть как расширение известного

языка программирования геометрическими командами (*FreeCAD+Python*, *AutoCAD+AutoLISP*) или полностью новый язык. Обзор подходов к символическому представлению геометрических построений ранее приводился в [10].

Использование существующего языка имеет один важный недостаток – требует специфических знаний и навыков, не связанных с геометрией (иерархии классов в объектной модели приложения, правил работы с памятью, переменными, типами данных и т.п.) Так выглядит построение окружности средствами языка *Python* в системе *FreeCAD*:

```
import Draft
pl=FreeCAD.Placement()
pl.Rotation.Q=(0.0,0.0,0.0,1.0)
pl.Base=FreeCAD.Vector(x, y, 0.0)
circle = Draft.makeCircle(radius=r, placement=pl, face=False, support=None)
```

– где вместо x , y , r нужно подставить значения координат центра и радиуса.

Из примера видно, что написание сценариев для такой системы потребует по крайней мере разобраться, что такое *FreeCAD*, *Draft*, *Placement.Rotation.Q*, *Placement.Base*, почему значения в *FreeCAD.Vector* передаются списком, а в *Draft.makeCircle* с указанием *radius*, *placement* и т.п.

Построение окружности на языке геометрических построений, показанном в [8, 10] выглядит так (значения параметров также подставляются вместо x , y , r):

$c = \text{схув}(x, y, r)$

Поскольку обычно объекты требуют указания довольно большого числа параметров и атрибутов (например, тип и толщина линии, цвет и др.), для достижения компактности предложений предполагается использование значений «по умолчанию», которые хранятся в соответствующих элементах алфавита и грамматики КГМ.

В [8, 9] показывается использование КГМ в форме программ на языке геометрических построений для создания моделей некоторых поверхностей конструктивным способом (рис. 2).

В [10] предложения языка геометрических построений используются как средство анализа и разработки команд *CAD*-системы.

В [14] показывается один подход к реализации использования КГМ в форме программ на языке геометрических построений в *CAD*-системе, в частности, обсуждается автоматическое формирование такой КГМ на основе параметризованной модели *CAD*-системы.

Рисунок 2: Модель элемента купола (а), модели некоторых луковичных куполов (б) и модель фрагмента судовой поверхности (в), построенные на основе КГМ в форме программы из работ [8, 9]

Возможности этого подхода не исчерпываются только задачами создания моделей кривых и поверхностей, поскольку весь спектр команд *CAD*-системы, в том числе компоновка готовых деталей в составе сборки, может быть представлен при помощи КГМ и, соответственно, предложений геометрического языка. Также становится возможным соединение произвольного числа «плоских» КГМ, управляющих трехмерной геометрией модели изделия, как это предлагается в [5].

3.2. Применение конструктивных геометрических моделей для проверки геометрической составляющей электронной модели изделия

Вторая частная задача проектно-конструкторской деятельности, решение которой может быть упрощено при помощи КГМ, – это проверка созданной модели на соответствие некоторому набору требований.

Как бы ни была совершенна CAD-система и каким бы большим ни был опыт проектировщика, при создании чертежа или трехмерной геометрической модели существует вероятность допустить ошибку, часто малозаметную, такую, что поиск ее может потребовать большого числа дополнительных измерений и проверок.

Основу подхода, предложенного в [12, 15], составляет формализация требований к создаваемой модели в виде эталонной КГМ, с которой затем созданная модель сопоставляется. Проверка выполняется в полностью автоматическом режиме.

Использование в качестве эталона КГМ, содержащей специальные управляющие фигуры, позволяет проверять не только точное соответствие значений параметров и атрибутов объектов эталонным, но осуществлять проверку в форме своеобразных геометрических «запросов» к проверяемой модели.

Тот факт, что эталонная и проверяемая модели могут принадлежать разным контекстам, то есть отличаться алфавитом, грамматикой и даже размерностью пространства, делает возможным сопоставление эталонных чертежей и проверяемых 3D-моделей и наоборот.

Это, в частности, позволяет для создания эталонной модели использовать инструменты какого-либо геометрического редактора, например, блоки системы AutoCAD для задания довольно сложной структуры эталонной КГМ, в том числе управляющие процессом проверки «специальные» фигуры [15].

В [16] рассматривается внедрение команд проверки в CAD-систему (сама проверка при этом реализуется размещенной в сети Интернет проверяющей системой).

В [17] рассматривается применение этого подхода к проверке графической части чертежей для одного класса деталей в составе общей задачи нормоконтроля (рис. 3).

форме текстовых или видеоуроков, а сдача квалификационных экзаменов на получение сертификата пользователя – в форме тестирования. Предлагаемый подход позволяет «на лету» проверять типовые задания на построение фигур и объектов.

4. Заключение

В приведенной работе сделана попытка обобщить решение некоторых задач, возникающих в проектно-конструкторской деятельности. В первую очередь, обобщение касается единства геометрической информации, которая формируется в ходе геометрических построений, будь то построения циркулем и линейкой или выполнение команд трехмерного или плоского геометрического редактора. Объединить плоские и трехмерные геометрические модели позволяет введение понятия конструктивных геометрических моделей, не зависящих, строго говоря, от размерности пространства и состава используемых геометрических фигур.

Две формы представления конструктивных геометрических моделей – визуальная и текстовая позволяют создавать их в ходе построений в геометрическом редакторе (визуальная форма) или как программы на языке геометрических построений (текстовая форма).

Сами по себе конструктивные геометрические модели могут затем использоваться как средство анализа и расширения инструментов CAD-системы, как средство автоматизации создания геометрической составляющей электронной модели изделия и как способ представления требований к геометрическим моделям в ходе их проверки.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках научной темы № 140-ИРТС РТУ МИРЭА.

6. Литература

- [1] Дж. К. Джонс Методы проектирования. М.: Мир, 1986. 326 с.
- [2] В. М. Заенчик, А. А. Карачев, В. Е. Шмелев Основы творческо-конструкторской деятельности: методы и организация. М.: Академия, 2004. 256 с.
- [3] С. И. Ротков Средства геометрического моделирования и компьютерной графики пространственных объектов для CALS-технологий: Дис. докт. техн. наук: 05.01.01. Н.Новгород, 1999. 287 с.
- [4] Е. В. Попов, С. И. Ротков Кратко о сути компьютерной геометрии и графики // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и ин-новации (КГП-2016). Пермь, 2016. С. 62–67.
- [5] А. А. Бойков О несвязанных системах геометрического моделирования и машинной графики 2-го рода в контексте возможностей современных САПР // Надежность и долговечность машин и механизмов: сб. материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 2020. С. 138–141.
- [6] В. А. Пеклич Высшая начертательная геометрия. М.: АСВ, 2000. 344 с.
- [7] Д. В. Волошинов Конструктивное геометрическое моделирование. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2010. 355 с.
- [8] A. A. Boykov Development and application of the geometry constructions language to building computer geometric models // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Volume 1901 (012058). DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012058.
- [9] А. А. Бойков Некоторые вопросы автоматизации конструктивных алгоритмов формирования геометрических моделей для CAD-систем // SCVRT'2018. Международная научная конференция Московского физико-технического института (государственного университета). Москва-Протвино, 2018. С. 281–290.
- [10] А. А. Бойков Язык геометрических построений и его применение в разработке функций CAD-систем // SCVRT'2019. Международная научная конференция МФТИ (ГУ) ИФТИ. Нижний Новгород, 2019. С. 42–50.

- [11] Геометрическое моделирование в инженерной и компьютерной графике. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 460 с.
- [12] А. А. Бойков, А. М. Федотов Автоматическая проверка решений задач инженерной геометрии // ГРАФИКОН'2016 Труды 26-й Международной научной конференции. Москва-Протвино, 2016. С. 352–356.
- [13] У. Ньюмен, Р. Спрулл Основы интерактивной машинной графики. М.: Мир, 1976. 576 с.
- [14] А. А. Бойков Об одном способе автоматизации конструктивных алгоритмов формирования геометрических моделей в среде САД-систем // СРТ2019 Международная научная конференция НГАСУ и НИЦ ФТИ. Нижний Новгород, 2019. С. 393–399.
- [15] А. А. Бойков, А. М. Федотов Использование чертежей с разметкой для проверки электронных чертежей и трехмерных моделей // ГРАФИКОН'2018 Труды 28-й Международной научной конференции. Томск, 2018. С. 328–331.
- [16] А. А. Бойков, А. М. Федотов Внедрение средств автоматической проверки решений конструктивных задач инженерной геометрии в САД-систему // GraphiCon 2019: труды 29-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Брянск, 23–26 сент. 2019 г.). Брянск, 2019. С. 172–175.
- [17] А. А. Бойков О реализации автоматического нормоконтроля графической части конструкторских документов для одного класса чертежей деталей // СРТ2020. 8-я Международная конференция «Физико-техническая информатика». Часть 2. Нижний Новгород, 2020. С. 339–346.