

## Синтез 3D модели объекта по изображениям на поле чертежа\*

С.А. Роменский, С.И. Ротков, М.М. Смычѣк, В.А. Тюрина

romensky.serge@gmail.com|rotkov@nngasu.ru|mariasmychek@gmail.com|55555\_73@mail.ru

Кафедра инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования  
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

*В статье рассматривается проблема синтеза электронной геометрической модели 3D объекта по его изображениям, заданным на различных носителях, т.е. решения обратной задачи геометрии и графики (преобразование данных из 2D в 3D). Основной упор делается на методы, алгоритмы и средства получения 3D информации по изображениям, составляющим обратимый многовидовый чертѣж. Проблема приобретает особое значение в связи с производственной необходимостью преобразования архивной информации с бумажных носителей в электронную модель объекта производства для PDM-систем.*

**Ключевые слова:** 3D модель, изображения объекта, многовидовый чертѣж, синтез модели, обратная задача.

В современных условиях 3D модели становятся все более востребованными. Сфера применения 3D моделей практически безгранична. Трехмерное моделирование применяют для создания макетов изделий (например, на 3D принтере) для визуального представления продукции, при проверке на собираемость и расчете на прочность, при создании наглядных инструкций и т.д. В связи с этим становится актуальной проблема ввода в ЭВМ данных о 3D объекте, координатах точек на его поверхности, коэффициентах уравнений поверхностей, его описывающих и др.

Практически все системы геометрии и графики позволяют осуществлять проекционное изображение 3D объекта, в том числе и генерацию чертежей, по трехмерной модели, решая при этом прямую задачу геометрии и графики. Решение обратной задачи, т.е. получение трёхмерной модели по изображениям, и по чертежу в частности, вызывает у проектировщиков затруднения, связанные со слабой разработкой необходимого математического и программного обеспечения.

В настоящее время в архивах предприятий накоплено большое количество технических чертежей, представленных как в бумажном, так и в электронном виде. Разработка многих объектов в большинстве случаев начинается не с трехмерной модели, а с чертежа. Но технический многовидовый чертѣж часто сложен для понимания и неудобен для использования в качестве основы для дальнейших разработок объектов проектирования с использованием компьютерных систем.

Процессы чтения и построения чертежа являются основными в системе графического конструирования. Они обеспечивают возможность построения различных изображений одного и того же объекта. Пусть, например, в память компьютера введена информация о некотором изделии, представлен-

ная в виде комплексного чертежа. Требуется автоматически построить другое изображение изделия, например, его аксонометрический чертѣж или перспективу. Для решения такой задачи, прежде всего, необходимо по видам исходного чертежа восстановить пространственный образ изображенного объекта.

Природа операции проецирования такова, что между двумя изображениями одного и того же оригинала стоит его пространственный образ [1]. Анализ последнего необходим для образования структуры нового изображения. Можно, конечно, предположить, что в ЭВМ введено описание пространственного образа. Однако такой ввод затруднен, по крайней мере, двумя обстоятельствами: 1) большей сложностью описания пространственного образа по сравнению с описанием его проекций, которые сами по себе являются очень удобным и универсальным графическим языком; 2) трудностями представления и анализа объекта на уровне пространственного образа в силу ограниченности процесса мышления, поэтому, если конструирование проводится в системе человек-машина, где оператор интерактивно воздействует на процесс, то лучшим языком общения здесь все-таки будет чертѣж. Технология, связанная с обработкой чертежей и формирование трехмерной модели по изображениям на поле многовидового технического чертежа, лежит в основе информативной технологии автоматического формирования трехмерной модели. Эта технология позволяет генерировать 3D модель только для объектов класса «Деталь», и на данном этапе не применима для сборочных узлов и единиц. Необходимость внедрения в промышленность CALS- и BIM- информационных технологий приводит к созданию на предприятии банка моделей объектов проектирования на основе имеющихся архивов чертѣжно-конструкторской и технологической документации, хранящихся, как правило, на бумажных носителях и в различных структурных подразделениях предприятия. В силу этого обстоятель-

Работа выполнена по гранту РФФИ №15-07-05110. Работа опубликована по гранту РФФИ №16-07-20482.

ства перед проектировщиком ставится выбор: либо заново вручную переконструировать деталь сразу в 3D представление с использованием функциональных возможностей CAD/CAM/CAE систем, либо автоматизировать ввод и преобразование 2D информации, содержащейся в архивных чертежах, для синтеза 3D модели объекта.

Проблему преобразования 2D данных, содержащихся на чертеже, в 3D данные для синтеза модели при различных вариантах входных данных и методов решения рассматривали очень многие исследователи и коллективы [2, 3, 4, 5], однако эта задача до конца не решена в силу различных причин, например, ошибок исходных данных на поле чертежа (недостоверность). В этих публикациях проблема решалась в идеальных условиях, не затрагивая технологическую задачу ввода исходных данных, без рассмотрения структуры данных при программной реализации алгоритма преобразования, без привязки к системе управления данными. Все это приводит к неоднозначности восстановления модели. В работе [6] поставлена проблема преобразования архивных чертежей с бумажного носителя в электронную модель детали.

В силу изложенного задача автоматизации обсуждаемых процессов может ставиться следующим образом. Исходным для алгоритмов построения и чтения чертежа является некоторый обратимый чертеж объекта [7], введенный в память программы тем или иным способом. Мы не рассматриваем здесь технологию ввода данных с архивного чертежа, хотя она важна для полного цикла преобразования данных с архивного чертежа. Этот чертеж является базой, на которой развертывается графическое конструирование. При этом в силу структурной связи между пространственным образом и чертежом не устраняется возможность работы в случаях, когда исходным является пространственный образ. В качестве поверхностей, образующих оригинал, могут входить плоскости и каркасные поверхности.

Процесс восстановления пространственного образа по заданному чертежу, т.е. процесс чтения чертежа, является сложным для формализации. Первые исследования в области восстановления 3D моделей по проекциям были проведены Х.И. Тани (1964), В.А. Щеколдиным (1966), и В.С. Полозовым в его докторской диссертации (1971). Аналогичные исследования были проведены профессором Masanori Idesawa в 1973 году и были представлены в его работе «A system to generate a solid figure from three views». В работах [4, 5] приведен аналитический обзор публикаций по рассматриваемой проблеме, составлено дерево вариантов решений обратной задачи геометрии и графики.

Рассмотрим более подробно модель процесса чтения чертежа. Эвристическое моделирование убеж-

дает, что в этом процессе присутствуют тесно переплетающиеся между собой узнавание объекта по его проекциям и геометрической анализ формы и положения объекта по его чертежу.

Рассмотрим сначала процесс анализа, без которого не обходится чтение почти всякого чертежа. В основе модели этого процесса можно выделить два утверждения, которые легко выявить из принятой геометрической схемы построения чертежа.

1. Если проекции двух точек соединены на комплексном чертеже какими-нибудь линиями на всех проекциях (либо совпадают на одной из проекций, а на других соединены), то точки соединены в пространстве (являются смежными в оригинале).
2. У двух проекций одной и той же точки, координаты, отложенные по общей координатной оси, численно равны между собой.

Учитывая изложенное, можно разработать алгоритм, который по исходным координатам проекций точек будет восстанавливать пространственные координаты этих точек и формировать в памяти информацию о соединениях вершин в оригинале. В частности, любой многогранник, являющийся основой построения любой формы, может быть восстановлен по своим проекциям. Сложности чтения чертежа возникают при неудачном выборе видов (такой выбор может быть вынужденным). Из утверждения 1 вытекает, что виды исходного чертежа надо выбирать так, чтобы относительно любой пары точек, не соединенных в пространстве, была однозначная информация на чертеже (т.е. на одной из проекций пара таких точек не должна быть соединена). Такое требование можно выполнить не всегда, так как виды комплексного чертежа выбираются, как известно, из других соображений. Кроме того, при чтении чертежа, который является множеством линий, человек пользуется не только понятиями начертательной геометрии. Он учитывает также некоторые общие свойства оригинала, например, непрозрачность объема объекта, замкнутость объема и т.п. Для учета всех этих особенностей в алгоритме необходимо внести их в процесс чтения чертежа.

Пусть на обратимом комплексном чертеже задано некоторое множество линий, отображающих клеточное разбиение на поверхности  $\Pi$  оригинала. Будем рассматривать клетки разбиения, заданного на чертеже. Содержание внутренней области каждой клетки может быть или поверхностью  $\Pi$  (принадлежащей оригиналу), или геометрической поверхностью. Если выявить содержание внутренней области каждой клетки, то можно распознать все части оригинала и отличить трехмерные клетки, принадлежащие оригиналу, от геометрических трехмерных клеток. Этим будет распознана топологи-

ческая структура оригинала, что является наиболее сложным в чтении чертежа. Восстановление формы оригинала и его размеров для случая, когда он отнесен к системе координат, базируется на возможности восстановления пространственного положения множества точек оригинала и их соединений. Если такие соединения выполнить отрезками прямых, то восстанавливается некоторая многогранная поверхность, аппроксимирующая  $\Pi$  оригинала. Эта поверхность может быть взята за основу для вывода изображения.

Исходным для алгоритма, который будем называть основным, является трехкартинный комплексный чертеж оригинала, построенный по геометрической схеме, изложенной выше. С этого чертежа снимаются и кодируются только данные о точках и линиях, которые могут быть сняты с него автоматическим устройством. Относительно каждой точки, которая на чертеже является результатом пересечения каких-либо линий, должно быть известно следующее:

- координаты проекций точки на каждом поле чертежа;
- список рёбер, которые проходят через точку чертежа.

Если имеются  $n$  видов чертежа, то в памяти программы формируются  $n$  списков, определяющих каждый из этих видов как линии и точки их пересечений на чертеже. Результатом работы алгоритма являются координаты точек в пространстве, проекции которых были введены в программу, а также матрица смежности точек, содержащая информацию о том, какие точки необходимо соединить рёбрами. Таким образом, восстанавливается каждая клетка клеточного разбиения оригинала. Если необходимо восстановить структуру оригинала (например, распознать отверстия, определить видимость линий и т.д.), то необходимо иметь дополнительную информацию об оригинале.

Формирование указанной информации выполняется алгоритмами, которые являются вспомогательными по отношению к основному, реализующему процесс анализа чертежа. Рассмотрим три ортогональные проекции несложного трехмерного объекта (рис.1) на горизонтальной, фронтальной и профильной плоскостях проекций и покажем процесс формирования множеств  $M(i)$ , которые позволят сформировать матрицу смежности вершин объекта. Все проекции вершин определяются двумя координатами, соответствующими своей плоскости проекций. Пусть  $T_1$  описывает проекцию вершины  $T$  на горизонтальную плоскость, тогда  $M(T_1)$  описывает набор проекций вершин, которые смежны с  $T_1$  на горизонтальной проекции. Аналогично для фронтальной проекции  $T_2$  и профильной проекции  $T_3$  составляем множества  $M(T_2)$  и  $M(T_3)$ .

Проекция  $T_1(x_T, y_T)$ ,  $T_2(x_T, z_T)$ ,  $T_3(y_T, z_T)$  содержат информацию о всех трех координатах точки  $(x_T, y_T, z_T)$  в выбранной системе координат, поэтому можно восстановить положение точки  $T$  в пространстве. Аналогично - положение точки  $K$  и всех остальных вершин объекта.

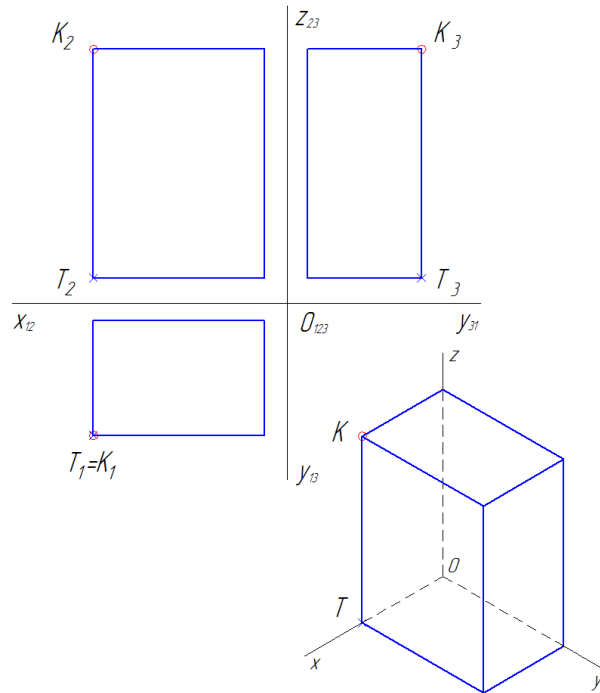


Рис. 1: Ортогональные проекции и прямоугольная изометрия простейшего трехмерного объекта - параллелепипеда

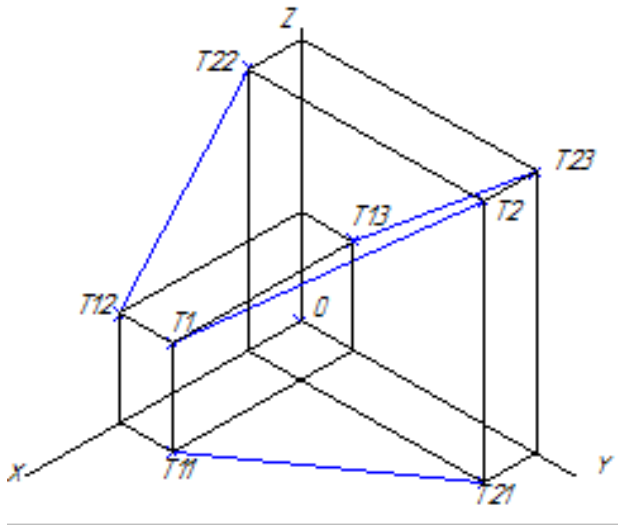
Следующий шаг алгоритма – формирование списка ребер (одновременно с заполнением матрицы смежности вершин объекта). Элемент матрицы смежности определяется следующим соотношением:  $M_{ij}(T; K) = (K_1 \subset M(T_1)) \& (K_2 \subset M(T_2)) \& (K_3 \subset M(T_3))$ , где  $i$  – номер вершины в списке вершин объекта, а  $j$  – номер вершины.

Если выполняется условие:  $M_{ij}(T; K) = 1$ , то вершины  $T$  и  $K$  являются смежными в трехмерном пространстве и в список ребер заносится ребро  $R(T, K)$ .

Если выполняется условие:  $M_{ij}(T; K) = 0$ , то вершины и не имеют соединения.

Другими словами, две вершины в 3D смежны тогда и только тогда, когда все их проекции смежны или совпадают. На рис.2 показано аксонометрическое изображение ребра  $R(T_1, T_2)$ , соединяющего в пространстве вершины  $T_1$  и  $T_2$ . Вторичные проекции соответствуют трем ортогональным проекциям вершин и наглядно демонстрируют связь проекций вершин на каждой из проекций.

Но выполнение описанного выше условия топологической связи вершин не гарантирует действи-

Рис. 2: Ребро  $R(T_1, T_2)$ 

тельного существования данных вершин и рёбер в пространстве (в силу возможности возникновения конкурирующих элементов в процессе ортогонального проектирования). Последующие этапы алгоритма синтеза предполагают проверку множества вершин и рёбер на истинность либо ложность.

### Описание основного алгоритма

Общий алгоритм синтеза 3D модели объекта по изображениям содержит 6 этапов:

1. Ввод данных.
2. Проверка исходных данных на достоверность.
  - 2.1. Проверка на разрывы, двойные линии и т.п.
  - 2.2. Проверка проекционных связей.
  - 2.3. Коррекция.
3. Формирование точечной модели [4]. Точечной моделью (ТМ) геометрического объекта называется совокупность  $M = \{V, A\}$ , где  $V$  - вектор координат  $X_i, Y_i, Z_i$  вершин объекта, где  $i = 1, \dots, n$ ;  $A$  - информационный массив атрибутов вершин  $V_i$ .
4. Формирование каркасной модели [2, 4]. Каркасной моделью (КМ) геометрического объекта называется совокупность  $KM = \{V, R, A\}$ , где  $V$  - вектор координат  $X_i, Y_i, Z_i$  вершин объекта, где  $i = 1, \dots, n$ ;  $R$  - информационный массив, содержащий данные о ребрах  $R_{ij}$ , соединяющих вершины  $V_i$  и  $V_j$  объекта.  $A$  - информационный массив атрибутов вершин  $V_i$  и ребер  $R_{ij}$ .

Каждому ребру может быть поставлен в соответствие квалификационный признак (атрибут), характеризующий данное ребро: линейное или нелинейное, коэффициенты уравнений линий – носителей ребер, каким типом линии, согласно ГОСТ 2.305-2008 [7], изображаются проекции ребра (основная, штриховая, штрих-

пунктирная, волнистая и т.д.), толщина изображающих проекции линий (основная, тонкая, утолщенная), цвет линий.

5. Поиск, определение и удаление из каркасной модели ложных геометрических элементов [4, 5].
6. Формирование граничной модели по полученной каркасной модели [5].
7. Формирование конструктивной модели (CSG, constructive solid geometry).

К сожалению, в полной мере, без ограничений на исходные данные и типы рассматриваемых объектов, данный алгоритм не реализован ни в одной из известных авторам статьи САПР, поэтому проблема преобразования многовидового комплексного чертежа в 3D модель остается актуальной и требует дальнейшего изучения.

### Литература

- [1] Котов И.И., Полозов В.С., Широкова Л.В. Алгоритмы машинной графики. М., Машиностроение, 1977 г., 270 стр.
- [2] Полозов В.С., Ротков С.И. и др. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи. М., Машиностроение, 1983 г., 280 стр.
- [3] Полозов В.С. моделирование и синтез операторов геометрического расчета и машинной графики в системах автоматизированного проектирования и автоматизации технологической подготовки производства. Автореферат дисс. докт. техн. наук, МАИ, 1983
- [4] Ротков. С.И. Разработка средств геометрического моделирования и компьютерной графики пространственных объектов для САЛС-технологий. Дисс. Докт. Техн. Наук, Нижний Новгород, 05.01.01, ННГАСУ, 1999 год, 300 стр.
- [5] Тюрина В.А. Разработка методов преобразований каркасной модели в задаче синтеза образа 3D-объекта по его проекциям. Дисс. канд.техн. наук, 05.01.01 - Инженерная геометрия и компьютерная графика, Нижний Новгород, ННГАСУ, 2003 г, 150 стр.;
- [6] Ротков С.И., Попов Е.В., Мошкова Т.В., Тюрина В.А., Васин Д.Ю., Роменский С.А., Макаров Н.Л., Чепкасов В.Л. Проблема преобразования бумажных архивов чертежно-конструкторской документации в электронную модель изделия и связанные с ней геометро-графические задачи.// Proceedings of the International Conference on Computing for Physics and Technology CPT2015, ИФТИ, Протвино, 2015 г., стр. 300-317
- [7] ГОСТ 2.305-2008 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Изображения - виды, разрезы, сечения.