

УДК 655.39

И. Г. Громыко, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**Д. М. Медяк**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**М. И. Кулак**, доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой (БГТУ)

ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ОБЪЕКТОВ 3D-ПЕЧАТИ

Статья посвящена оценке объектов, средств и результатов репродуцирования в технологии 3D-печати. Рассмотрены способы представления 2D- и 3D-графики, особенности моделирования трехмерных объектов, форматы данных, используемые 3D-принтерами, а также существующие технологии 3D-печати. Для оценки объектов в технологии 3D-печати предложен информационный подход с использованием соответствующей терминологии. Приведен вывод формулы и рассчитаны значения информационной емкости 3D-объектов.

Article evaluates the objects, means and results reproduced in 3D-printing technology. The methods of representation of 2D- and 3D-graphics, features modeling three-dimensional objects, data formats used by 3D-printers, as well as existing 3D-printing technology. To estimate the objects in 3D-printing technology offered an information approach using the appropriate terminology. The derivation of the formula and calculate the value of the information capacity of 3D-objects.

Введение. До недавнего времени полиграфия подразумевала создание или копирование плоских (двумерных) объектов — оттисков. Однако современные технологии открывают для нее новые возможности — создание или копирование объемных (трехмерных) объектов, т. е. 3D-печать. Как и в классической полиграфии, печатному процессу должен предшествовать допечатный. Современные допечатные, а иногда и печатные процессы выполняются в цифровой форме с помощью компьютера. Создание будущего издания или объекта начинается с создания его цифрового макета с помощью средств обработки компьютерной графики.

Основная часть. Плоская, или 2D, графика, представляет собой двумерное изображение, которое создается на плоском носителе: бумажный лист, виртуальный лист. При этом отображается только одна из сторон предмета. Для получения представления обо всех сторонах предмета, необходимо нарисовать несколько рисунков. 3D-графика представляет собой цифровую объемную модель, которую можно отобразить в нужном ракурсе в плоской 2D-графике или распечатать на 3D-принтере.

3D-графика, как и 2D, имеет пиксельное и векторное представление.

Объемный пиксель носит название воксель (от англ. *Voxel* — образованного из слов *volume* (англ. объемный) и *pixel* (англ. пиксел)) и в идеале представляет собой куб. Воксельные файлы содержат информацию о расположении каждого вокселя в трехмерной матрице и значении цвета. Объем файла с цифровой воксельной моделью определяется его разрешением. Несжатые воксельные изображения имеют большой объем и предъявляют повышенные требования к аппаратной части компьютера для обработки данных. Поэтому воксельные изо-

бражения на сегодняшний день применяются достаточно ограничено и только в тех областях, где их использование целесообразно: для визуализации и анализа медицинской и научной информации.

Более простым и удобным для представления объемной информации является векторное моделирование. Наиболее популярно и универсально полигональное моделирование, где поверхности представляются в виде простых геометрических двумерных объектов — полигонов. В качестве полигонов могут использоваться треугольники, четырехугольники или фигуры с большим количеством углов. Как правило, при создании 3D-объекта используют четырехугольники, т. е. прямоугольную сетку, которая обеспечивает более гибкие возможности моделирования поверхности объекта. Чем меньше размер полигонов и больше их количество, тем более реалистично будет выглядеть модель, но это приводит к снижению производительности компьютера. Поэтому для сохранения файлов и последующей аппаратной обработки графики четырехугольники преобразуются в треугольники.

Кроме того, некоторые векторные трехмерные объекты можно создавать с помощью сплайнов, или NURBS-поверхностей, образованных неоднородными рациональными сплайнами Безье. Данные кривые описываются математическими формулами, координатами начала и конца кривой. Сплайны служат основой для построения трехмерных тел посредством операций вращения, выдавливания и др.

Также можно применять метод формирования векторных трехмерных моделей на основе опорных сечений — метод лофтинга. Для построения лофт-объекта необходимы траектория (путь) и одно или более сечений. Путь задает основную линию объекта и может иметь форму

прямой, окружности, спирали, произвольной кривой, а сечения определяют его форму и также могут быть различными. При использовании нескольких сечений они размещаются вдоль пути по указанному пользователем принципу.

К полученной цифровой модели можно также добавлять информацию о цвете, плотности, отражающей способности, т. е. о текстуре поверхности. В общем случае текстура — это двумерный рисунок, который накладывается на 3D-модель. Она может быть процедурной — сгенерированной при помощи алгоритма, или нарисованной в графическом редакторе, или фотографией реального объекта. Эти параметры задаются в свойствах «материала» объекта.

Как правило, трехмерное моделирование является пустотелым моделированием, где создается только внешняя поверхность объекта. Программы, реализующие данный принцип можно условно разделить на две группы. Первая — программы универсального назначения, например программы Blender, Autodesk 3D Studio Max, Autodesk Maya. Вторая группа — это программы 3D-лепки (ZBrush, Autodesk Mudbox, Poser Pro), в которых реализуется техника, напоминающая лепку из глины — на заготовке создаются углубления или выпуклости. Это позволяет получить реалистичный рельеф поверхности, например, фактуры шерсти, складок ткани и т. п.

Однако существуют программы, которые реализуют принципы твердотельного моделирования, как правило, это системы автоматизированного проектирования среднего и профессионального классов, например Autodesk Inventor, SolidWorks, Pro/Engineer, Compas 3D. Они имеют средства для моделирования с учетом особенностей технологического процесса: наличие фасок, сверление отверстий и т. п. Кроме того, эти программы реализуют параметрическое моделирование трехмерного объекта, т. е. моделирование с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время проанализировать с помощью изменения параметров или геометрических соотношений различные конструктивные схемы, результаты изменения конфигурации деталей, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п., и избежать принципиальных ошибок в будущей конструкции.

В практике 3D-печати используют двухстадийный процесс создания цифровой трехмерной модели, предназначенной для последующего вывода на 3D-принтер. На первом этапе создается заготовка модели (форма, дизайн и цвет) с помощью полигонального моделирования, например в программе 3D Studio

Max. Для второго этапа могут применяться либо системы автоматизированного проектирования для добавления технических деталей, либо программы 3D-лепки для создания мелких деталей лиц или текстуры объекта.

Для сохранения и вывода на 3D-принтер созданной трехмерной модели применяются различные форматы данных, поддерживаемые конкретными моделями 3D-принтеров: STL, gcode (принтер MakerBot), STL и SLC (принтеры Objet24 и Objet30), STL, VRML, PLY, 3DS (принтер Spectrum Z450), STL, VRML, PLY, FBX, 3DS, ZPR (принтер ZPrinter® 850, Zbuilder Ultra System).

STL (от англ. *stereolithography*) — формат файла, используемый для хранения трехмерных моделей объектов, которые применяются в технологиях быстрого прототипирования обычно методом стереолитографии. Информация об объекте хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность, и их нормалей. Файл начинается с заголовка, далее указывается количество треугольных граней в данном файле, а затем идут данные, характеризующие каждый треугольник. Кроме того, файл может содержать информацию о цвете для синего, зеленого и красного канала с уровнями интенсивности от 0 до 31 каждый.

Gcode — язык программирования устройств с числовым программным управлением, который используется для управления обрабатывающими станками. Программы строятся из команд управления: первыми указываются подготовительные команды (например, выбор рабочей плоскости), затем команды перемещения, выбора режимов обработки и технологические команды.

SLC (SliCe) — формат файла, разработанный компанией 3D Systems. Представляет собой контурное представление трехмерной модели, состоящее из последовательных сечений, расположенных по возрастанию Z координаты. Твердые тела представляются в виде ломаных, ограничивающих внешний и внутренний контуры.

VRML (Virtual Reality Modeling Language — язык моделирования виртуальной реальности). Это стандартный формат файлов для демонстрации трехмерной интерактивной векторной графики, чаще всего используемый в интернете. Это текстовый формат, где вершины и грани многогранников указываются вместе с цветом поверхности, текстурой, прозрачностью и другими параметрами. VRML-файлы имеют расширение *.wrl, поддерживают сжатие с использованием алгоритма компрессии gzip.

PLY (Polygon Model File) — это формат файлов, который предназначен для хранения

трехмерных данных из 3D-сканеров. Он поддерживает относительно простое описание объекта в виде списка плоских многоугольников. Кроме того, могут быть сохранены и различные свойства плоскостей: цвет, прозрачность, поверхности нормалей, текстурные координаты и значения контрольных данных. Формат позволяет назначать различные свойства для передней и задней плоскости многоугольника.

3DS — один из внутренних форматов программы 3D Studio Max, предназначен для хранения полигональных трехмерных моделей, состоящих из треугольных полигонов. Он может использоваться для обмена трехмерными моделями между программами.

FBX — это формат файлов, разработанный компанией Autodesk, который предназначен для обмена 3D-данными между различными программами трехмерной графики. Формат поддерживает описание вершин, NURBS-кривых и поверхностей, описание материалов и текстур, деформацию и анимацию.

ZPR — это внутренний формат приложений ZEdit и ZPrint, разработанных фирмой Z Corporation. Он предназначен для сохранения и вывода информации на 3D-принтеры данной фирмы: ZBuilder Ultra, ZPrinter 450. Формат содержит описание 3D-модели и информацию о ее цвете.

OBJ — это формат файлов, разработанный фирмой Wavefront Technologies для анимационного пакета Advanced Visualizer. Данный формат является открытым, он был принят другими разработчиками приложений 3D-графики и может быть экспортирован во многие из них. Формат файлов OBJ содержит описание позиции каждой вершины, связь координат текстуры с вершиной, нормаль для каждой вершины, а также дополнительные параметры создания полигонов.

DXF (Drawing eXchange Format) — открытый формат файлов для обмена графической информацией между приложениями САПР. Был создан фирмой Autodesk для системы AutoCAD, поддерживается многими системами автоматизированного проектирования, сохраняет векторные изображения чертежей.

В настоящее время существует несколько технологий 3D-печати:

- 1) лазерная стереолитография;
- 2) селективное лазерное спекание;
- 3) моделирование методом наплавления;
- 4) ламинирование;
- 5) склеивание порошков.

Лазерная стереолитография получила наибольшее распространение среди технологий 3D-печати. Объект формируется из специального жидкого фотополимера, затвердевающего

под действием лазерного излучения. При этом лазерное излучение формирует на поверхности текущий слой разрабатываемого объекта, после чего, объект погружается в фотополимер на толщину 0,025–0,300 мм для формирования следующего слоя.

В технологии селективного лазерного спекания объект формируется из порошкового материала путем его плавления под действием лазерного излучения. Порошкообразный материал наносится на платформу тонким равномерным слоем с помощью выравнивающего валика, после чего лазерное излучение формирует на поверхности текущий слой разрабатываемого объекта. Затем платформа опускается на толщину одного слоя и на нее снова наносится порошкообразный материал. Данная технология не нуждается в поддерживающих структурах элементов разрабатываемого объекта за счет заполнения пустот порошком. Для уменьшения необходимой для спекания энергии температура рабочей камеры поддерживается на уровне ниже точки плавления рабочего материала, а для прекращения окисления процесс проходит в бескислородной среде.

Формирование объекта моделированием методом наплавления осуществляется путем послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, металл, воск). Рабочий материал подается в экструзионную головку, которая выдавливает на охлаждаемую платформу тонкую нить расплавленного материала, формируя текущий слой разрабатываемого объекта. Далее платформа опускается для нанесения следующего слоя. В данной технологии могут участвовать две рабочие головки: одна выдавливает на платформу рабочий материал, другая — поддерживающий материал.

В технологии изготовления объектов с использованием ламинирования объект формируется послойным склеиванием (нагревом, давлением) тонких пленок рабочего материала с вырезанием (с помощью лазерного луча или режущего инструмента) соответствующих контуров на каждом слое. За счет отсутствия пустот данная технология не нуждается в поддерживающих структурах.

Принтеры с технологией склеивания порошков используют два вида материалов: крахмально-целлюлозный порошок, из которого формируется модель, и жидкий клей на водной основе, проклеивающий слои порошка. Клей поступает из печатающей головки принтера, связывая между собой частицы порошка и формируя контур модели. После завершения печати излишки порошка удаляются. Чтобы придать модели дополнительную прочность, ее пустоты заполняют жидким воском.

Для оценки объектов в технологии 3D-печати предлагается использовать информационный подход, для реализации которого вводится следующая терминология:

- 1) 3D-аналог растровой точки — кластер;
- 2) 3D-аналог микроточки — микрогранула;
- 3) 3D-аналог градации — текстура.

В технологии 2D-печати количество информации на единице площади растрованного монохромного изображения зависит от линиатуры и количества градаций оптической плотности. В свою очередь, количество градаций зависит от формы и способа записи растровых элементов, качества бумаги и краски, используемых при печати. Рассмотрим, как изменяются основные соотношения для определения информационной емкости, если их обобщить на 3D-печать.

Информационная энтропия Шеннона одинакова для обоих представлений изображений или объектов [1]:

$$H = -\sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i, \quad (1)$$

где P_i — вероятность появления градации / текстуры i в изображении / объекте; m — количество градаций оптической плотности или текстур, формируемых с помощью микрогранул.

Если появление каждой градации / текстуры равновероятно, то вероятность этого события

$$P_i = \frac{1}{m}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$H = \log_2 m. \quad (3)$$

В электронных репросистемах количество передаваемых градаций определяется [2] глубиной цвета λ .

Для 2D-печати

$$m_2 = 2^{\lambda_2}. \quad (4)$$

Для 3D-печати

$$m_3 = 2^{\lambda_3}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) выражение (3) можно представить в виде

$$H_2 = \log_2 2^{\lambda_2} = \lambda_2. \quad (6)$$

$$H_3 = \log_2 2^{\lambda_3} = \lambda_3. \quad (7)$$

Таким образом, количество информации, содержащееся в одной растровой точке или

микрогрануле, теоретически равно глубине битового представления.

Количество растровых точек в 2D-изображении определяется по формуле

$$N_2 = abL_2^2, \quad (8)$$

где a и b — размеры изображения по вертикали и горизонтали; L_2 — линиатура изображения.

Количество микрогранул в 3D-объекте определяется по формуле

$$N_3 = abcL_3^3, \quad (9)$$

где a , b и c — размеры объекта в горизонтальной плоскости и по вертикали; L_3 — линиатура объекта.

Количество растровых точек на единице площади растрованного изображения определяется следующим образом:

$$n_2 = \frac{N_2}{ab} = L_2^2. \quad (10)$$

Количество микрогранул в единице объема растрованного объекта рассчитывается по формуле

$$n_3 = \frac{N_3}{abc} = L_3^3. \quad (11)$$

Общее количество информации на единице площади растрованного монохромного изображения будет определяться по формуле

$$I_2 = n_2 H_2 = L_2^2 \log_2 m_2. \quad (12)$$

Если учесть (6), то формулу (12) можно представить в следующем виде:

$$I_2 = n_2 H_2 = L_2^2 \lambda_2. \quad (13)$$

Соответственно, общее количество информации в единице объема растрованного 3D-объекта определим по формуле

$$I_3 = n_3 H_3 = L_3^3 \log_2 m_3 = L_3^3 \lambda_3. \quad (14)$$

В технологии 2D-печати разрешение принтера и линиатура печати связаны между собой следующим образом:

$$m_2 = \left(\frac{R_2}{L_2} \right)^2 + 1. \quad (15)$$

После обобщения для технологии 3D-печати формула (15) принимает вид

$$m_3 = \left(\frac{R_3}{L_3} \right)^3 + 1. \quad (16)$$

Расчет информационной емкости для 2D- и 3D-печати

Модель принтера	Разрешение, dpi	Линиатура, lpi	Информационная емкость, 2D — бит/дюйм ² , 3D — бит/дюйм ³
2D-печать			
Laser Jet 1200	1200	140	121 884
Xerox Phaser 4400HP	600	100	71 799
Epson EPL 5200	300	50	13 023
3D-печать			
Objet 24	600×600×900	90	6 593 746
ProJet CP 3000	328×328×700	70	2 668 883
ProJet 150	1024×768×250	25	213 031

В тех случаях когда принтер имеет различное разрешение по осям x , y и z , формула (16) преобразуется:

$$m_3 = \left(\frac{R_x}{L_x}\right) \left(\frac{R_y}{L_y}\right) \left(\frac{R_z}{L_z}\right) + 1. \quad (17)$$

Подставив (15) в формулу (12), получим для расчета информационной емкости [3]:

$$I_2 = L_2^2 \log_2 \left[\left(\frac{R_2}{L_2}\right)^2 + 1 \right]. \quad (18)$$

Если подставить (16) в формулу (14), то получим аналог формулы (18) для расчета информационной емкости объектов в технологии 3D-печати:

$$I_3 = L_3^3 \log_2 \left[\left(\frac{R_3}{L_3}\right)^3 + 1 \right]. \quad (19)$$

Формулы (18) и (19) дают возможность по характеристикам принтера рассчитать информационную емкость оттиска / объекта.

Расчетные значения информационной емкости для различных моделей 2D- и 3D-принтеров приведены в таблице.

Заключение. Выполненный расчет позволяет оценить верхний теоретический предел информационной емкости оттиска / объекта в зависимости от основных характеристик принтера. Качество воспроизведения реального оттиска / объекта в общем случае не обязательно будет соответствовать максимуму информации и будет определяться условиями проведения процесса печати. Представленный информационный подход для технологии 3D-печати позволяет оценить влияние параметров печатного процесса на результат воспроизведения объекта.

Литература

1. Методы и средства переработки информации в допечатных системах / О. А. Винокурова [и др.]. М.: МГУП, 2003. 270 с.
2. Кузнецов Ю. В. Основы подготовки иллюстраций к печати. Растривание. М.: Изд-во МГУП «Мир книги», 1998. 174 с.
3. Кулак М. И., Русова Ю. Ю. Оценка информационной емкости элементов защиты полиграфической продукции // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. 2005. Вып. XIII. С. 44–47.

Поступила 20.03.2014