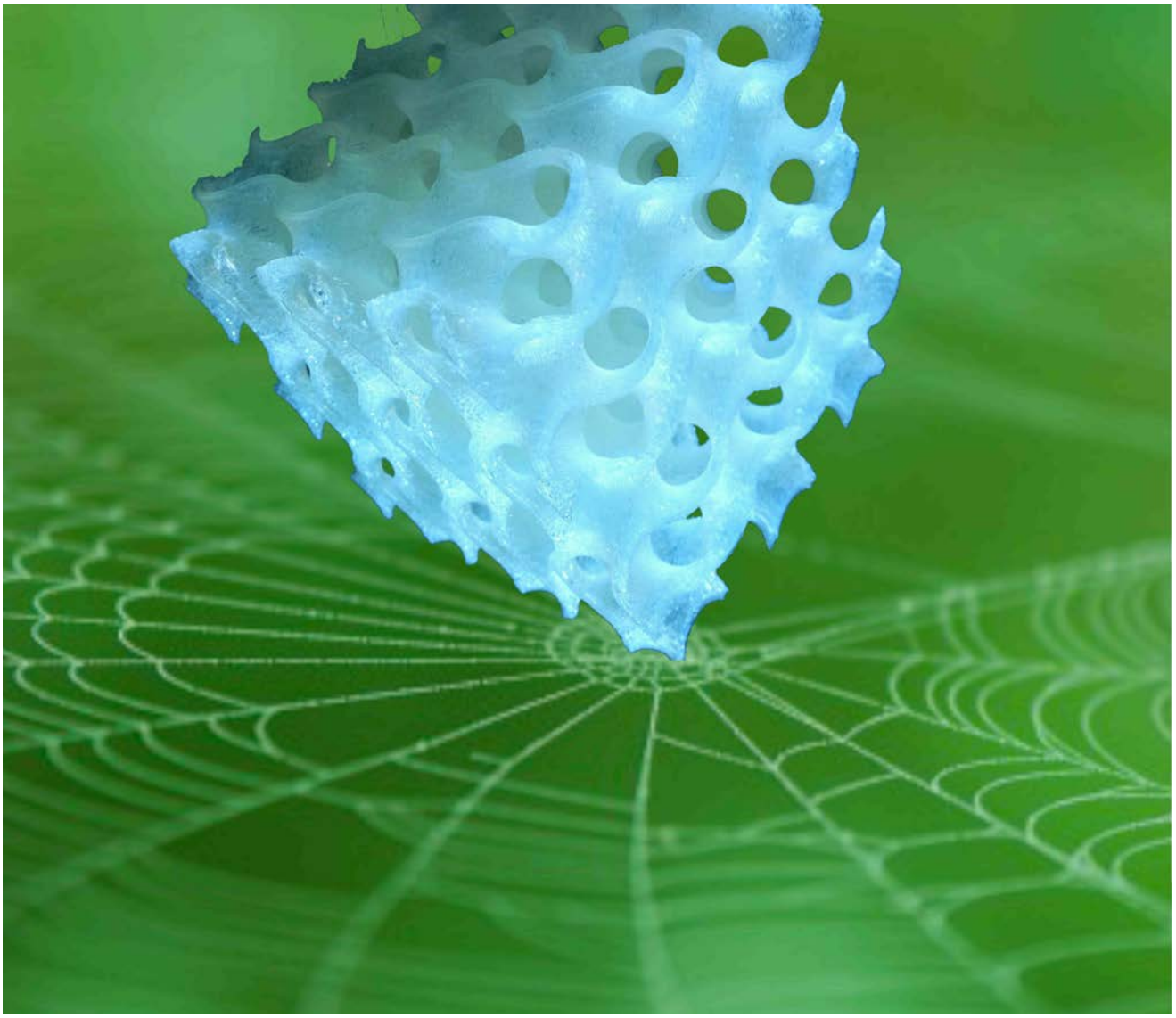
Доступная 3D печать

для науки, образования и устойчивого развития



Редакторы: Э. Канесса, К. Фонда, М. Зеннаро

Переводчики: **Александр Кузнецов** (alex_itz), *alex_itz@mail.ru*, Омск, Россия; **Оксана Соловьёва** (aks_id), *aks_s@explit.net*, Берлин, Германия; **Юлия Сковородкина** (kindra), *yulia.kuparadze@mail.ru*, Краснодар, Россия; **Артём Соболев** (Woolpit), *woolpit@mail.ru*, Краснодар, Россия; **Роман Добровольский** (radical_dreamer), *romandobrovolskiy@gmail.com*, Минск, Беларусь; **Михаил Шестаков** (mishavolkin), *mishavolkin@gmail.com*, Санкт-Петербург, Россия; **Александр Зорин** (fidller_fly), *fidller@yandex.ru*, Краснодар, Россия

От организатора перевода: Всех переводчиков благодарю за проявленный интерес и вложенные силы, особенно хочу отметить aks_id – Оксану Соловьёву и alex_itz – Александра Кузнецова - ребята отдавались переводу до конца не жалея времени и сил. Александр также сверстал книгу и придал ей законченный, аккуратный и удобный вид. Проделана серьёзная работа, прошу читателей отнестись с пониманием к возможным неточностям, все замечания и предложения по переводу прошу направлять по адресу: *woolpit@mail.ru*

Благодарим сайт **notabenoid.com** за уютную атмосферу. Страница с переводом книги: *http://notabenoid.com/book/41907*

Группа создателей перевода:

http://vk.com/3dmake

Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития

Low cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development
Получить более полную информацию можно на сайте http://sdu.ictp.it/3D/
Редакторы: Энрике Канесса, Карло Фонда и Марко Зеннаро

Издатель
Международный центр теоретической физики Абдус Салам – МЦТФ
2013 МЦТФ Отдел научных разработок, e-mail: sdu@ictp.it

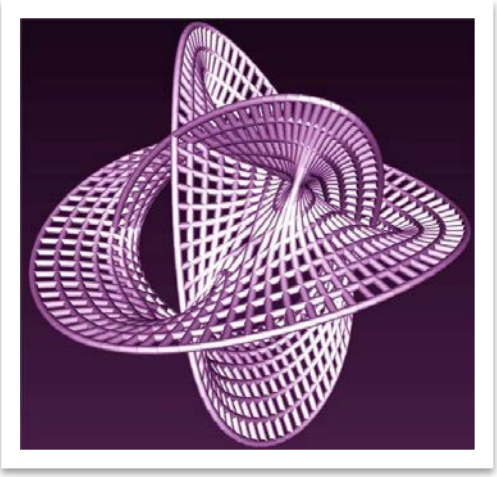
Ранние публикации: Май 2013, первое издание
ISBN 92-95003-48-9

Отказ от ответственности

Издатель и редакторы очень ответственно отнеслись к подготовке этой книги, но не дают каких-либо гарантий и не берут на себя ответственность за ошибки или упущения. Не предусматривается никакая ответственность за случайные или косвенные убытки, возникшие в связи с информацией содержащейся здесь.

МЦТФ не берёт на себя ответственность за указанные вэб-сайты и их содержание. МЦТФ не имеет прав интеллектуальной собственности на данную книгу, поэтому писатели/читатели могут свободно использовать материал в образовательных целях. МЦТФ не передает прав другим организациям для использования книги в коммерческих целях. МЦТФ не поддерживает и не спонсирует какие-либо коммерческие продукты, услуги или деятельность упомянутые в этой книге.

Эта книга создана при содействии **the Creative Commons Attribution-Noncommercial-NoDerivative Works 3.0 Unported License**. За подробной информацией о Ваших правах на использование и распространение данной работы, обращайтесь http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.ru



Содержание

Предисловие 7

Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития 9

3D печать – глоссарий 17

Практическое руководство по вашей первой 3D печати 22

Роль свободного программного и аппаратного обеспечения в революции 3D печати 59

Plug and play, наборы для сборки и готовые 3D принтеры 65

RepRap, Slic3r и будущее 3D печати 73

3D моделирование с OpenSCAD – Часть_1 81

3D моделирование с OpenSCAD – Часть 2 85

Визуализируем математику, используя 3D принтеры 90

Наука и искусство – периодические мозаики 116

Печатная модель детектора ALICE из CERN 120

Крупномасштабная 3D-печать – от океанских глубин до Луны 124

Моделирование губчатой костной ткани посредством 3D печати физических копий 130

Использование 3D принтеров в школе- эксперимент 3drucken.ch 144

Доисторические коллекции и 3D печать для образования 154

3D печать в художественных инсталляциях 158

От математики к драгоценностям – пример 164

3D печать в развивающихся странах: Извлечение уроков из выставки Techfortrade 3D4D 171

Отпечатанные в 3D анатомические копии 176

Проект Бесконечного пластика. 184

О книге

Эта книга опубликована **Creative Commons Attribution-Noncommercial-NoDerivative Works 3.0 Unported License**. Вы можете свободно использовать эту книгу, то есть, копировать, распространять и передавать эту работу согласно следующим условиям:

- *Аттрибуция*: Вы обязаны представлять работу в манере свойственной автору или лицензедателю;
- *Некоммерческая*: Вы не можете использовать эту работу в коммерческих целях;
- *Не допускаются производные работы*: Вы не можете изменять, преобразовать или основываться на этой работе.

За дополнительной информацией по данным условиям обращайтесь на сайт http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.ru

Список разработчиков

Эта книга была подготовлена для первого международного семинара на тему «Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития» проходившего в Триесте, в Италии в 2013 году, организованного Отделом Научных Разработок МЦТФ. Его цель состояла в том, чтобы обсудить и дать понимание новой 3D печати посредством демонстраций в ряде доступных конкурирующих технологий, а так же продемонстрировать продолжающиеся исследования в новых прикладных задачах. Особое внимание было уделено применимости 3D печати для продвижения соответствующих технологий для устойчивого развития, научных исследований и образования.

Редакторы

Энрике Канесса – доктор философии, физик, работающий координатором МЦТФ-ОНР. Главные его исследования находятся в областях конденсированных сред и научных компьютерных приложений. Особое внимание он уделяет распространению науки внутри развивающихся стран, используя общедоступные ресурсы, мультимедийную рекламу, мобильные технологии и также 3D печать.

Карло Фонда работает в МЦТФ-ОНР. Он также принимает участие в подготовке проектов по дешёвой беспроводной связи для образования, научных исследований и развития. Его интересы включают, среди прочего, компьютерное программирование, мультимедийное и сетевое вещание для науки, использование мобильных устройств для образования, а также 3D-печати.

Марко Дзеннаро получил диплом инженера по электронике в Университете Триеста, Италия и степень Доктора философии КТН - Королевского Технологического Института в Стокгольме, Швеция. В настоящее время работает в МЦТФ над проектами, относящимися к беспроводным сетевым датчикам, мультимедиа, открытому доступу и технологиям, основанным на аппаратной вычислительной платформе Arduino. В его исследовательские интересы также входит информационные и коммуникационные технологии для развития.

Финансирование

Создание и публикация этой книги стала возможной благодаря финансовой поддержке Центра Теоретической Физики Абдус Салам, Триест, Италия.

Особая благодарность

Мы выражаем нашу искреннюю благодарность авторам, участвовавшим в написании этой книги. Мы представили автора каждой части и/или главы, включенной в эту работу. Мы хотели бы выразить признательность за вклад и поддержку профессору Фернандо Куэвэдо (директор МЦТФ), Мэри Энн Уильямс, Лизи Яннитти, Джонатану Гэтти, Гае Фьор, а также Мультимедийным изданиям и службам печати МЦТФ и всем, кто сделал этот проект возможным.

Предисловие

Мы надеемся, что эта книга даст вам разумный, первый обзор современных исследований по 3D печати объектов и то, как она может быть использована для обучения науке за пределами традиционного контекста (как альтернатива представлениям на плоской школьной доске, визуализации на бумаге или даже современной цифровой презентации). Мы стремимся вызвать любопытство и глубокое понимание у молодых стипендиатов и новых поколений ученых, чтобы мотивировать их начать накапливать собственный опыт 3D-печати, чтобы исследовать огромный потенциал, который обеспечивает эта доступная технология. Мы приглашаем всех вас на создание прототипов, совершенствование объёмных физических моделей и обмен ими. Это, безусловно, может повысить мотивацию, когда вы увидите связь между абстрактной физикой и математикой, и реальным применением в мире. Эта книга также направлена на повышение обучения через практический опыт и интерактивную деятельность класса, конечной целью является *вкладывание знаний прямо в ваши руки*.

Триест, 29 апреля 2013.

Э. Кэнесса, К. Фонда и М.Дзеннаро

Редакторы

Введение

Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития

Энрике Канесса

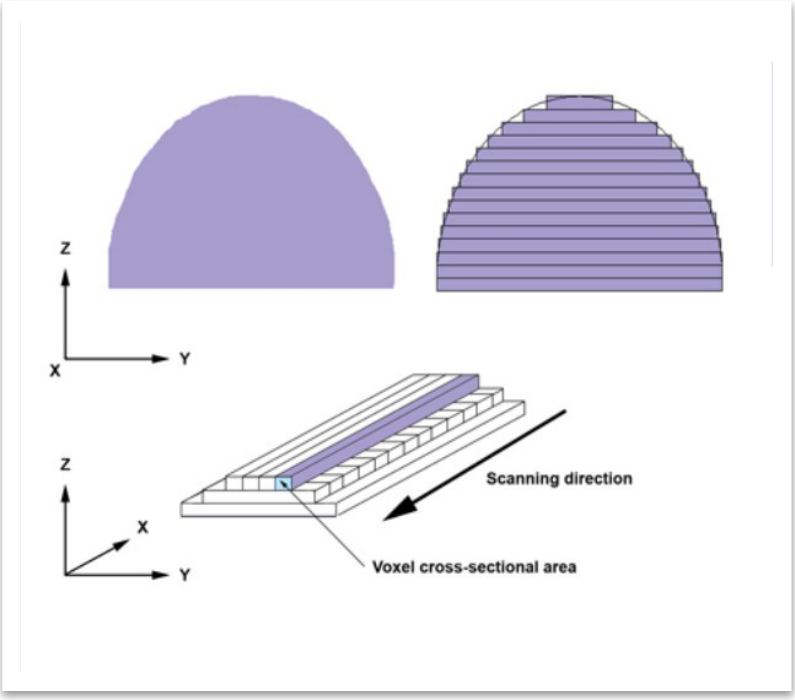
Отдел научных публикаций

Международный центр теоретической физки Абдуса Салама, Триесте, Италия

canessae@ictp.it

Дешёвая трёхмерная (3D) настольная печать, хотя ещё и в стадии младенчества, быстро взрослеет с помощью, по-видимому, безграничного потенциала. С её способностью воспроизводить 3D объекты – от археологических экспонатов, сложных математических поверхностей, до медицинских протезов – технология имеет многообещающие перспективы для науки, образования и устойчивого развития.

Индустрия 3D печати берёт своё начало в конце 1980-х (стартовала с редких начальных экспериментов в 1970-х), но эти дорогие машины ограничивались использованием профессионалами. Текущее распространение новой 3D технологии обусловлено появлением возможности использовать материалы утративших сроки действия патентов для FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование методом осаждения расплавленной нити), т.е. когда объект строится слой за слоем с помощью выдавливаемого расплавленного пластика (как изображено на рисунке справа). Новые технологии печати также получают пользу от проектов с открытыми исходными кодами (например, программный и аппаратный Arduino) и от свободного обмена цифровыми файлами через Интернет.



послойная печать 3D модели методом FDM (из Википедии)

Программное обеспечение с открытым исходным кодом позволяет нам разрабатывать трёхмерные объекты, а также управлять 3D принтерами для печати созданных объектов, существует множество доступных пособий и инструкций по использованию этих программ. Расходным материалом для большинства современных 3D принтеров служит биоразлагаемый пластик PLA (Polylactic acid – полимолочная кислота), экологически чистый материал, полученный из кукурузного крахмала, или ABS (Acrylonitrile butadiene styrene – акрилонитрил-бутадиен-стирол) полимер, полученный из ископаемого топлива. Последний обычно используют для производства автомобильных бамперов из-за его прочности и жесткости, а также из него делают детали ЛЕГО. Пластиковая нить плавится при температуре от 170 до 250 градусов Цельсия, что бы создать несколько слоёв, суммирующихся в цельный напечатанный 3D объект. Результатом может быть объект – математическая модель бутылки Клейна, или ансамбль подвижных звеньев, показанный на рисунке внизу. Некоторые из новых 3D принтеров могут печатать свои составные компоненты.

Бутылка Клейна, погружённая в 3D пространство

Единственным ограничением для этой "простой" альтернативной технологии является ограничение размеров печатаемого объекта (обычно 20x20x20см), что объясняется экономией на составных частях. Тем не менее, большой 3D объект может, в принципе, быть собран из нескольких маленьких пластиковых деталей. Ещё одно большое преимущество в том, что весь этот процесс производит гораздо меньше отходов, чем традиционные производства, где большое количество материала обрезается от используемой части.

Портативные 3D принтеры могут изготавливать на заказ продукты и запасные/заменяющиеся или уникальные элементы, подлежащие сборке по мере необходимости и достаточно быстро. Сложные небольшие 3D объекты (размером с брелок для ключей – *прим.ред.*) могут быть созданы быстрее чем за час и результат впечатляющий: прочные, крепкие, очень лёгкие (весят всего по несколько грамм) и достаточно дешёвые, так как цена PLA пластика сегодня около 30 долларов США за кг, а одного килограмма достаточно чтобы создать дюжину и более мелких объектов.

В самом деле, большое количество приложений и доступная цена делают 3D печать технологией, доступной для широкой аудитории. Стоимость нового поколения 3D принтеров, основанных на аппаратных средствах («железе» – *прим.ред.*) с открытым исходным кодом варьируется от 30 до 1500 долларов США, и они могут быть приобретены через Интернет. В масштабе, принтеры могут быть использованы для домашней печати объектов, для небольших исследовательских лабораторий в университетах и школах для создания учебного материала,

без необходимости вкладывать много денег. 3D печать открывает новые возможности, не осуществимые ранее для творческого производства.

Звенья без каких-либо соединений (очень напоминающие пластиковую кольчугу– прим.ред.)

Есть надежда, что эта передовая технология откроет новые перспективы для науки, образования и окажет заметное влияние в развивающихся странах. Доступная цена технологии плюс огромное количество 3D объектов для печатания в свободном доступе (как правило "*.STL" формат) уже в настоящее время делают новейшие 3D принтеры привлекательной технологией для стран с низким уровнем дохода.

Лаборатория 3D печати в Международном центре теоретической физики

В феврале 2013 Абдус Салам открыл лабораторию трёхмерной печати в Международном центре теоретической физики (International Centre for Theoretical Physics), Триест, Италия, в содействие, помощь и для подготовки учёных к использованию этой новой доступной технологии. Подчёркивая способность принтеров производить полезные объекты, директор МЦТФ (ICTP) Фернандо Кеведо перерезал ленточку через главный вход в лабораторию ножницами, созданными одним из лабораторных 3D принтеров.

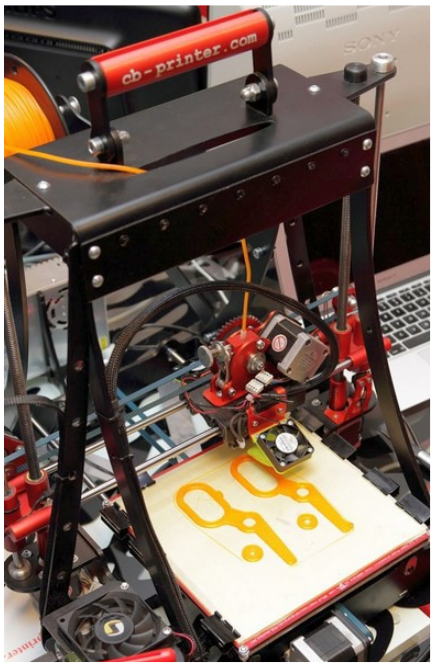
Открытие лаборатории 3D печати МЦТФ директором Ф. Кеведо с помощью реплицированных ножниц

Инновационная лаборатория МЦТФ спроектирована быть дружелюбным, современным местом, открытым для творчества. Она посвящена объяснить и показать, что для неспециалистов могут сделать недорогие 3D принтеры в области науки, образования и устойчивого развития. Ученые должны знать, какие 3D принтеры существуют и какие соответствуют их потребностям

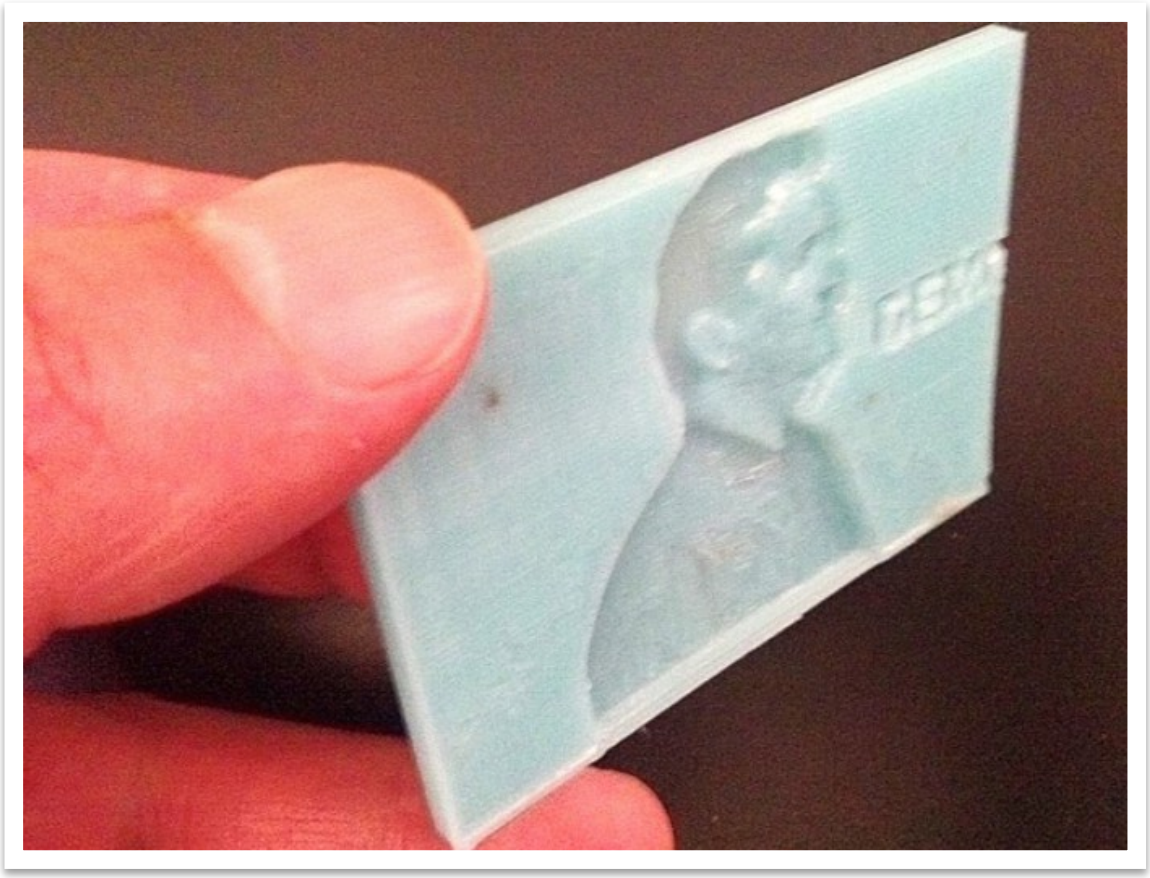
Формочки для печенья, напечатанные специально к открытию лаборатории

Лаборатория 3D печати МЦТФ стремится играть значительную роль в качестве координационного центра, чтобы помогать учёным и обучать целевые аудитории, включая студентов ВУЗов. Другая цель лаборатории заключается во вдохновении творческого потенциала, включая новые идеи в образовательной и научно-исследовательской деятельности, а также для создания нового сообщества вокруг 3D печати.

Сборка нового принтера в МЦТФ



Печать ножниц из биоразлагаемого пластика

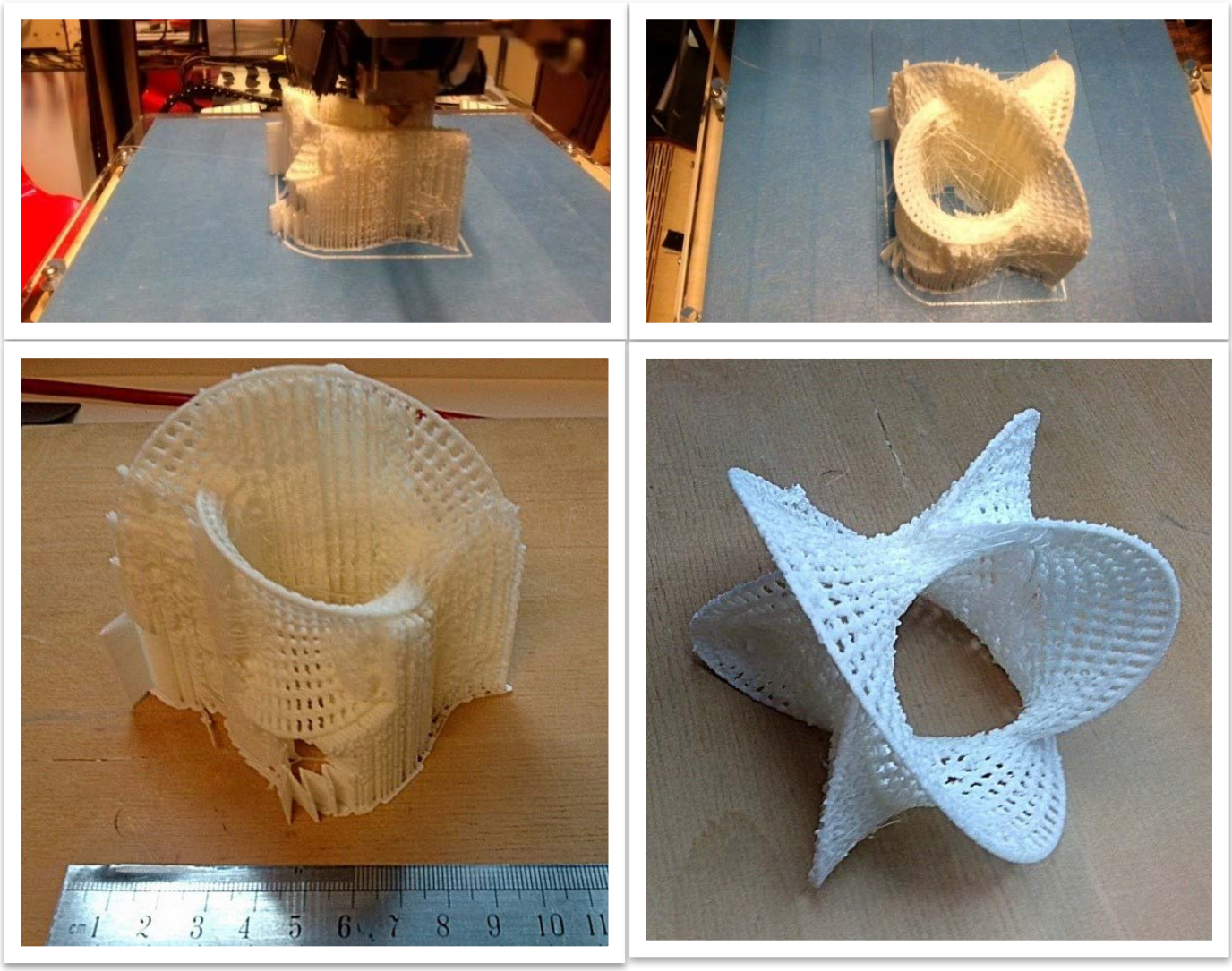


Экспериментируя с измерениями: двухмерное изображение преобразовано в 3D объект

Представьте и создайте свой собственный напечатанный 3D объект

Быстро продвигающаяся революционная 3D печать растет в глобальном масштабе благодаря многим преимуществам и доступным ценам. От образования до здравоохранения, от археологии до инженерного искусства, 3D принтеры уже оказывают практическое воздействие по всему миру. 3D печать распространяется от производства протезов, в любое время и в любом месте (сделанные на заказ ноги, руки, кисти и т.д. для изучения школьниками строения человеческого тела) до печати клеток кожи непосредственно для раны или печать оправ для очков (которые ломаются чаще, чем линзы).

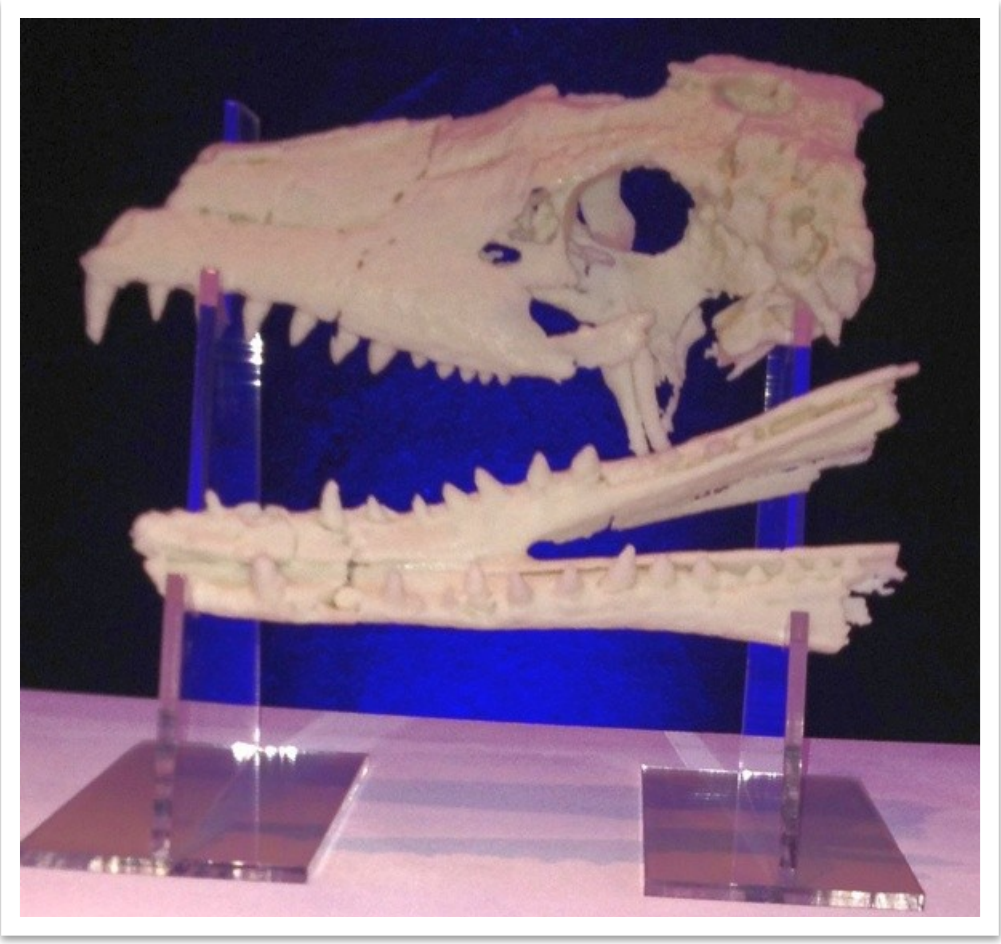
На образовательном фронте ученые могут напечатать 3D объекты, основанные на геометрических формулах для лучшей визуализации сложных структур. Концептуальное знание может получить преимущества от возможности технологии 3D печати изготавливать мягкие объекты, сокращая время, потраченное на разработку частного решения, а затем оценить результат. С 3D технологией можно обучаться быстрее посредством практики и быть более производительным, используя опыт.



Пространство Калаби-Яу из пластмассы. Последовательность печати в Лаборатории 3D МЦТФ (STL цифровой файл, предоставлен О. Ниллом, Университет Гарварда)

3D печать реконструирует археологию, обеспечивая возможность копировать, при необходимости, кости древних существ и окаменелостей. Другие объекты большой исторической ценности, такие как клинописные таблички и монеты, также могут быть скопированы. Это придает совершенно новое значение быстрому и точному (пере-) производству, инициировать распространение открытых археологических 3D приложений для музеев в мировом масштабе и т.д. Есть тенденция, не в далеком будущем, получить более крупные принтеры, которые могли бы производить что-либо, начиная от водных насосов до зданий, в контексте устойчивого развития. Стоимость отгрузки в некоторых развивающихся странах зачастую очень дорогая, однако, обычная посылка или загрузка маленьких файлов данных с необходимым программным кодом (таких как электронная почта, аудио, изображение или видео файлы) полезных для развивающихся стран 3D объектов, которые теперь можно напечатать по приемлемой стоимости в отдаленном районе. Например, запчасти швейных машин для производства одежды.

Ученые развивающихся стран могли бы легко приспособить эту новую, доступную 3D технологию в своих родных странах. 3D печать добивается важности, ценности. Она предлагает преобразовать пользователей из потребителей в активных создателей.



Точная 3D печатная копия ископаемого черепа

Переводчики: Woolpit, Ainuriel

3D печать – глоссарий

Источники:

http://www.reprap.org/wiki/Glossary

http://wiki.solidoodle.com/glossary

АБС (ABS – Acrylonitrile butadiene styrene)

Акрилонитрил-бутадиен-стирол. Термопластик, использующийся в качестве печатного материала 3D принтерами. Часто ABS используется как короткая форма, подразумевающая пластиковую нить (filament), выполненную из ABS.

Платформа/столик/кровать (bed)

Строительная платформа 3D принтера, на которой "выращиваются" трёхмерные объекты.

САПР (CAD – Computer-Aided Design)

Системы автоматизации проектных работ: программное обеспечение для 2D и 3D моделирования.

Каретка (Carriage)

Движущийся средний блок по оси X Менделя, на котором крепится экструдер. Часто упоминается как X-каретка (X-carriage).

Выдавливание/экструдирование (Extrude)

Действие по размещению печатного материала на строительной платформе принтера, обычно путём разогревания термопластика до жидкого состояния и выдавливания его через небольшое сопло.

Экструдер (Extruder)

Группа частей, которая выполняет подачу и вытеснение строительного материала. Состоит из двух сборок: холодной для вытягивания и подачи термопластика с катушки, и горячей для расплавления и выдавливания термопластика.

FDM (Fused deposition method)

Моделирование методом осаждения расплавленной нити, равноценна FFF.

FFF (Fused filament fabrication)

Когда капля одного расплавленного материала (пластика, воска, металла и т.д.) накладывается поверх или рядом с тем же материалом, совершая соединение (нагревом и прилипанием).

Нить (Filament)

два понятия:

1. Пластик в виде нити (часто 3 мм), которая будет использоваться как сырьё для 3D-принтеров.

2. Экструдированный (выдавленный через сопло) пластик (обычно <1 мм)

G-код (G-code)

Информация передаётся по проводу с ПК к ЧПУ (числовое программное управление) машине в G-коде. 3D принтер разновидность ЧПУ станка. Хотя человек может впечатывать команды принтеру напрямую, большинство людей предпочитают использование одного из многих CAM-инструментов, программы, которая читает *.STL файл и отправляет строки G-кода посредством проводов машине (3D принтеру).

Подогревающаяся платформа (Heated Bed)

Строительная поверхность, которая нагревается чтобы защитить "выращиваемые" части от преждевременного охлаждения и сжатия. Сжатие приводит к деформации и внутренним напряжениям в печатаемых деталях. Наиболее распространённый пример подобной деформации – отлипание углов детали от строительной поверхности. Платформы с подогревом, как правило, дают более высокое качество печати.

Горячая сборка/Хотэнд (Hot End)

Части экструдера, которые нагреваются до температуры плавления пластика, или других пригодных материалов. Части горячей сборки из материалов, которые выдерживают температуры до ~240˚ C (т.е. температуры, необходимой для выдавливания термопластика). Название "хотэнд"(hot end)/горячая сборка приписывают обычно наконечнику экструдера (соплу), поскольку он наиболее горячая часть сборки.

Заполнение (Infill)

Это внутренняя часть печатаемой детали. Заполнение может выполняться по различным шаблонам, обычно позволяет сэкономить деньги на пластиковой нити при уменьшении прочности детали (чем плотнее заполнение, тем прочнее деталь).

Величина заполнения (Infill Ratio)

Соотношение количества затраченного материала к заполнению. Оно определяет, насколько прочной будет ваша деталь.

Каптоновая лента (Kapton tape)

Термостойкая полиамидная клейкая лента. Используется для защиты греющихся элементов *ёмкости* экструдера. Так же используется для покрытия поверхности подогревающегося столика (печатной платформы 3D принтера).

.OBJ

Геометрически определяющий простой формат данных, который представляет исключительно 3D геометрию, а именно, позицию каждой вершины, связь координат текстуры с вершиной, нормаль для каждой вершины, а также параметры, которые создают полигоны.

Параметрический (Parametric)

Регулируемый во всех направлениях. Параметрическая та модель, у которой можно изменить размеры или другие параметры в соответствии с потребностями пользователя. В САПР программах, если в модели есть 1 см отверстие, вы без труда можете выбрать его и поменять на 5 мм в несколько кликов, с треугольными сетками (мешами) ситуация противоположная (смотри описание .STL), так как они более сложные для регулировки. Родной формат большинства программных пакетов может хранить параметрические модели.

ПЛА (PLA – Polylactic acid)

Полилактид. Биоразлагаемый термопластиковый полимер, использующийся при печати на 3D принтере (расходный материал). Зачастую ПЛА используется как короткая форма, подразумевающая пластиковую нить (filament), выполненную из ПЛА.

Подложка/Рафт (Raft)

Техника, использующаяся для предотвращения деформации. Объекты выращиваются на подложке из доступных материалов, которая в свою очередь располагается на строительной платформе. Изредка используется с подогревающимися платформами.

БП (RP – Rapid prototyping)

Быстрое прототипирование. Создание объекта в течении нескольких часов на 3D принтере, в противовес выпуску задания для мастерской моделирования, что может занять дни или даже недели.

РепРап (RepRap)

Машина для быстрого прототипирования, способная воссоздать значительную часть своих собственных деталей. Проект РепРап (RepRap project) это квест, выполнив который, вы получите персональный настольный 3D принтер.

Нарезка (Slicing)

Процесс конвертации 3D модели в формат, понимаемый 3D принтерами. Модель "нарезается" на слои, которые могут быть уложены экструдером.

SLS (Selective Laser Sintering)

Выборочное лазерное запекание. Аддитивное производство в процессе которого светочуствительные порошковые материалы плавятся лазером и образуют твёрдый объект. Привлекательна технология широким выбором материалов для печати (от керамики до металла).

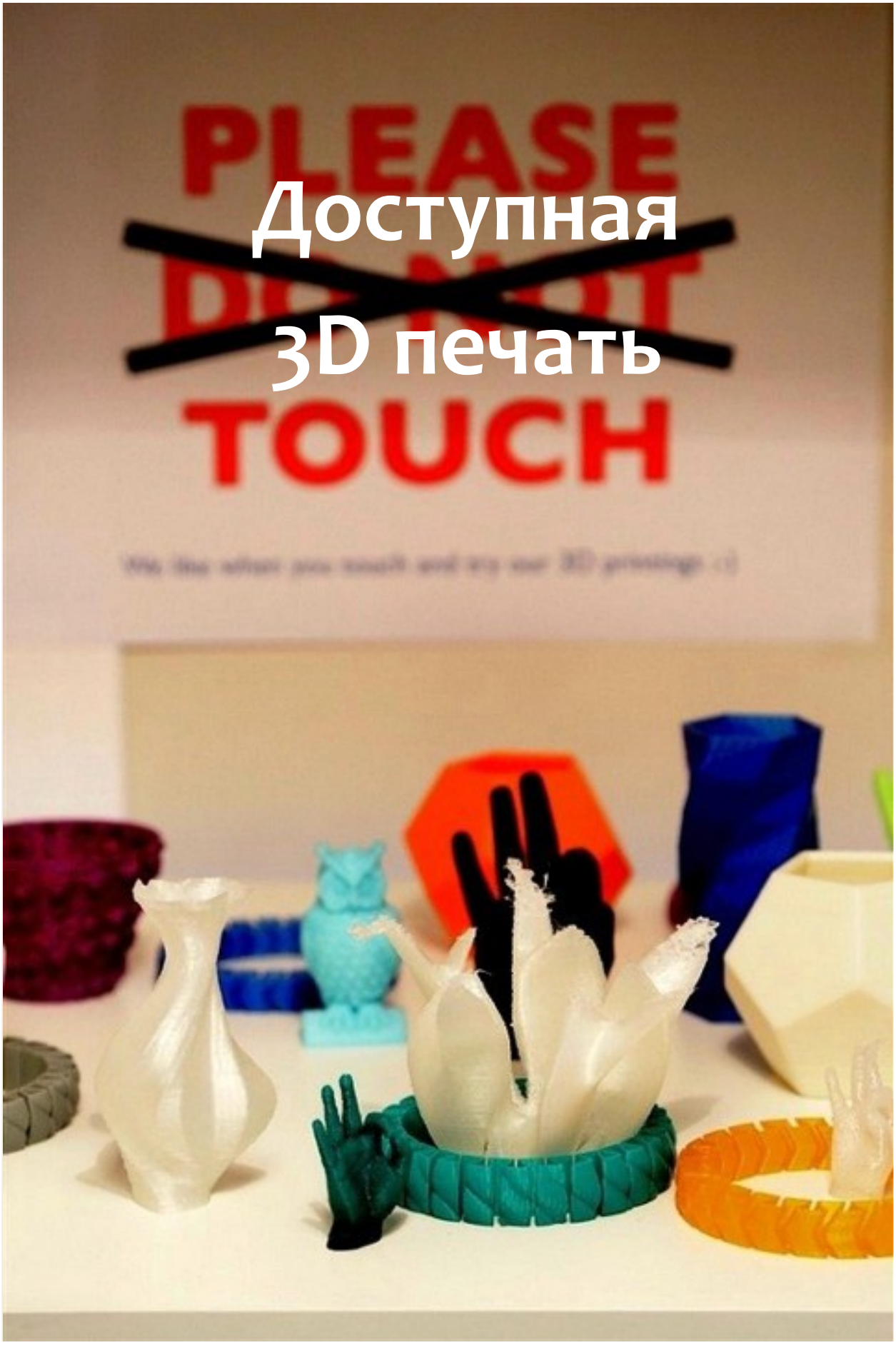
Шаговый двигатель (Stepper Motor)

Синхронный бесщёточный электродвигатель с несколькими обмотками, в котором ток, подаваемый на одну из обмоток статора, вызывает фиксацию ротора. Последовательная активация обмоток двигателя вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора. Шаговые двигатели – наиболее часто применяются в доступных по цене 3D принтерах (настольных или персональных наподобие РепРап).

.STL (Stereo Lithographic)

Формат – стереолитография. Рекомендуемый файловый формат используемый для описания 3D объекта. Программы проектирования (CAD/САПР) могут экспортировать файл в STL формат, который впоследствии можно отправить на 3D принтер или в программу 3D визуализации.

Переводчики: Woolpit



Доступная 3D печать

Практическое руководство по вашей первой 3D печати

Карло Фонда

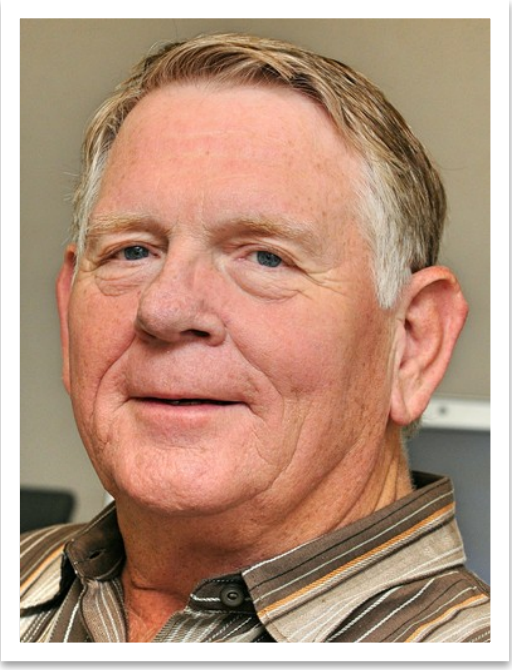
Отдел научных публикаций

Международный центр теоретической физки Абдуса Салама, Триесте, Италия

cfonda@ictp.it

Что такое доступная и дешёвая 3D-печать?

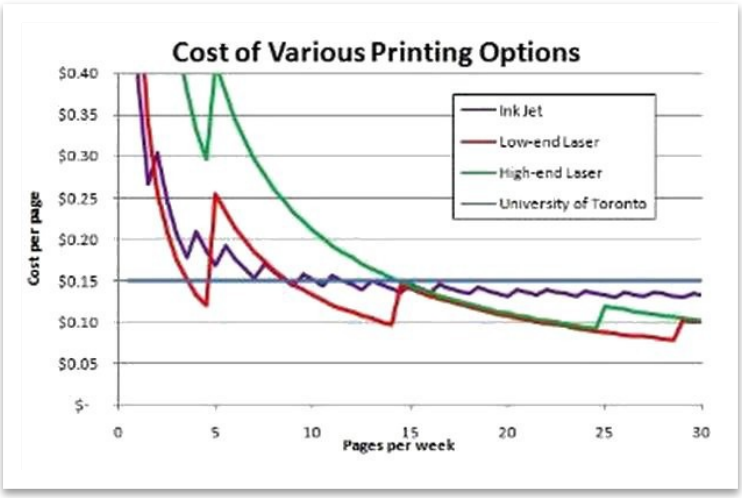
Краткая история: лазерный принтер



Эта история не о 3D-принтерах, она о приборе, который способен печатать тексты и изображения на листе бумаги и стал недорогим и широко распространённым офисным и домашним приспособлением, которое мы используем каждый день, порой даже не осознавая всей его важности: лазерный принтер.

Лазерный принтер был изобретён[1] в фирме Xerox в 1969 году исследователем Гэри Старквезером (Gary Starkweather, фото справа), который до 1971 года работал над улучшением принтера, а годом позже включил его в полнофункциональную сетевую систему печати.

Первый лазерный принтер для офисного использования был выпущен в 1981 году и назывался Xerox Star 8010. При всей своей инновационности Star была очень дорогой системой (17.000$), и её купило относительно небольшое число предприятий и учреждений.



Сегодня, спустя 30 лет, стоимость печати стала на два порядка ниже: небольшой цветной струйный принтер SOHO ("small-office, home-office") продаётся менее чем за 50$, в то же время чёрно-белые лазерные принтеры начального уровня стоят 100$ и меньше. Поэтому лазерные принтеры (в том числе цветные) теперь часто покупаются для

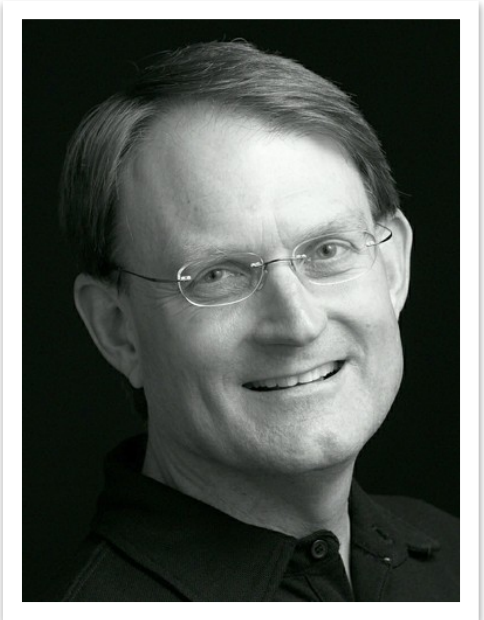
дома, их производительность, скорость и качество печати стали доступны каждому.

Некоторые думают, что 3D-принтеры следуют тем же путём, только быстрее.

Технологии 3D-печати и профессиональные 3D-принтеры

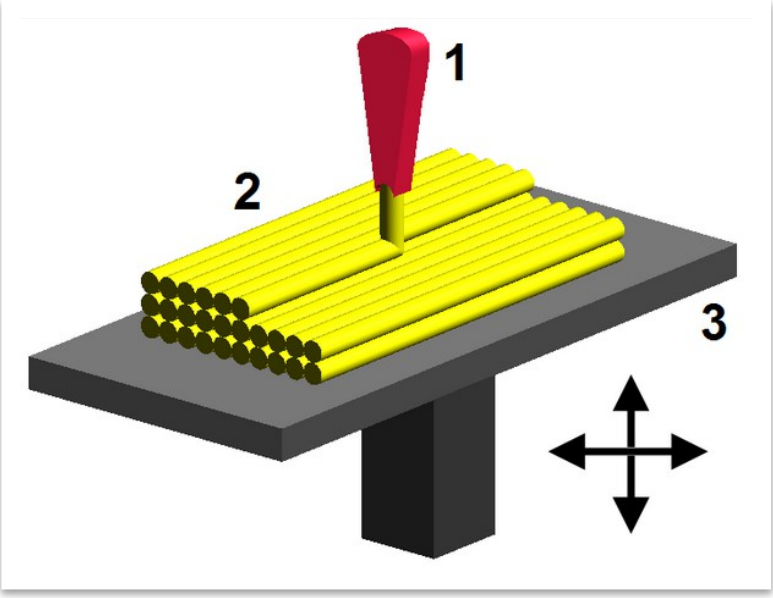
3D-печать[2] (также известная как аддитивное производство) – это **процесс создания твёрдых трёхмерных объектов любой формы из цифровой компьютерной модели**. 3D-печать достигается посредством так называемых аддитивных процессов, во время которых каждый слой материала кладётся в разной форме. Это отличает её от традиционных техник механической обработки, большинство которых основано на удалении материала путём его обрезания или сверления (субтрактивные процессы). Объекты, произведённые аддитивно, могут быть использованы на любой стадии жизненного цикла продукции, от создания предварительных образцов (например, в быстром прототипировании) до полноценного производства (например, в быстром производстве), в добавок к механической обработке и постпроизводственной доработке. Сегодня эта технология широко используется в ювелирном и обувном производстве, промышленном дизайне, архитектуре, инженерии и конструировании, автомобильной, космической, стоматологической и медицинской промышленности, образовании, геоинформационных системах, гражданском строительстве и многих других профессиональных сферах, и новые области применения добавляются в этот список каждый год.

С конца 1970-х было изобретено несколько различных способов 3D-печати, но сначала принтеры были большими, дорогими и весьма ограниченными в том, что они могли производить. Наиболее распространённая технология 3D-печати, называемая моделированием методом наплавления (FDM), была разработана и запатентована Скоттом Крампом (S. Scott Crump, фотография справа) в 1989 году. В 1990-м она была поставлена на промышленную основу компанией Stratasys[3] (http://www.stratasys.com), в которой Крамп был соучредителем. В 2012 году эта компания объединилась с другим лидером рынка, Objet, чтобы стать сегодня самым крупным производителем 3D-принтеров и материалов для 3D-печати.



Моделирование методом наплавления (FDM)

Существует много технологий 3D-печати, самая популярная называется моделированием методом наплавления[4] (FDM). Она очень проста: сложные объекты создаются из расплавленного пластика, выдавленного через сопло. Намотанная на катушку пластиковая нить (или даже металлический провод), разматываясь, подаётся в экструзионное сопло, при этом управляемый компьютером механизм перемещает само сопло или объект (или оба) вдоль трёх осей. После выдавливания (экструзии) материал моментально затвердевает. Для всех этих перемещений, также как и для подачи нити в экструдер, обычно используются шаговые двигатели или сервомоторы.



Моделирование методом наплавления: 1 – дюза подает расплавленный пластик, 2 – осажденный материал (часть модели), 3 – управляемый подвижный столик

Другой подход к 3D-печати – избирательное сплавление слоёв гранулированных материалов, известное как селективное лазерное спекание (SLS)[5]. При этой технике части слоя плавятся, затем рабочая зона опускается и добавляется новый слой гранул; процесс повторяется до тех пор, пока деталь не будет полностью готова. Нерасплавленный материал используется для поддержки нависающих частей и тонких стенок изготавливаемой детали, уменьшая тем самым необходимость создания временных поддерживающих структур. Для спекания гранулированного материала в твёрдый объект, как правило, используется лазер.

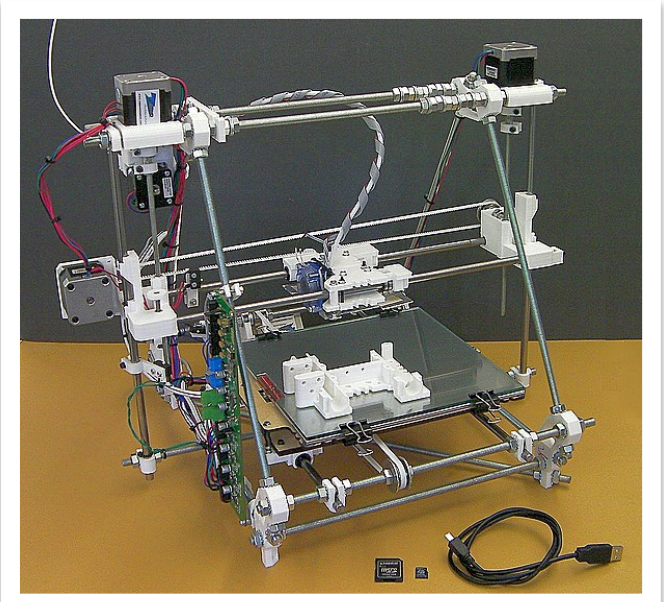
Ещё один метод похож на струйную 3D-печать[6]. Принтер создаёт модель послойно: сначала наносит слой порошка (гипса или смолы), затем, используя технологию, похожую на струйную, печатает в поперечном сечении детали связующее вещество. Это повторяется до тех пор, пока не будут напечатаны все слои. Данная технология позволяет печатать полноцветные прототипы, выступающие и эластомерные части (эластомеры — это каучукоподобные полимеры). Она была впервые разработана в **Массачусетском технологическом институте** и лицензирована **Z Corporation**.

Некоторые профессиональные 3D-принтеры могут печатать из металла, керамики и множества других материалов и цветов, производя достаточно большие объекты (размером до нескольких метров) с невероятно высоким разрешением, главным образом для промышленного и профессионального применения. Конечно, они достаточно дорогие и, в основном, недоступны для обычных людей.

Революция: персональный 3D-принтер

Мысль о том, что можно перейти от профессионального 3D-принтера к чему-то новому, меньшему и более доступному по цене, впервые[7] была высказана в докладе Адриана Боуйера[8] (Adrian Bowyer, фото справа) в 2004-м, когда он был академиком Батского университета в Великобритании. Он представил концепцию **самовоспроизводящихся** устройств, которые могли бы печатать свои собственные детали (или некоторые из них) и были бы настолько простыми, что их мог бы собрать кто угодно. Эта простая идея, при поддержке большого виртуального сообщества в интернете, дала начало движению увлечённых «создателей» – **проекту RepRap**[9].

Эти первые шаги к созданию недорогого «персонального» 3D-принтера стали возможны внутри так называемой **культуры творца**[10], которая является современным воплощением того сообщества энтузиастов, которое создавало первые персональные компьютеры в гаражах своих родителей. Действительно, эта культура представляет собой что-то вроде технического ответвления движения «Сделай сам» (DIY), с типичными интересами, такими как электроника, робототехника, 3D-печать и использование инструментов программного управления, а также с более традиционными занятиями: металлообработка, деревообработка, традиционные искусства и ремёсла. Философия этой культуры стимулирует новые, уникальные способы применения технологий, и поощряет изобретательность и создание новых образцов.



Пропитанный этой культурой проект RepRap был направлен на создание **свободного и доступного 3D-принтера**, вся техническая начинка которого была бы реализована в соответствии с открытой лицензией (они выбрали лицензию GNU). Этот принтер должен был быть способен копировать самого себя (по крайней мере частично), печатая свои собственные детали из пластика.

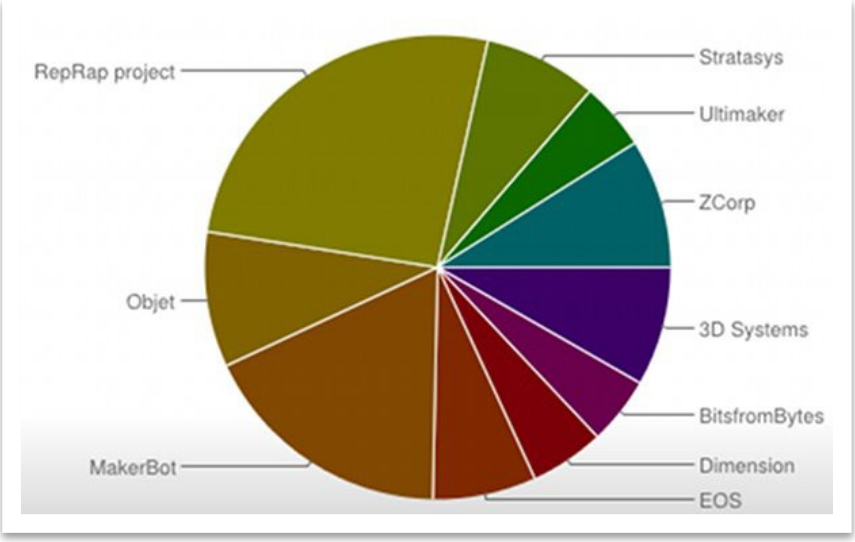
Так как RepRap – открытый и свободный проект, лежащая в его основе схема стала источником вдохновения для многих схожих проектов, таким образом была создана экосистема родственных и производных от RepRap 3D-принтеров, большинство из которых тоже имеют открытые лицензии. Доступность этих схем означает, что

изобрести 3D-принтер стало очень легко. В то же время качество и сложность схем принтера, так же как и качество его компонентов или готовых устройств, сильно отличаются в зависимости от проекта. С 2008 года было несколько проектов и компаний, которые пытались создать доступные по цене 3D-принтеры для домашнего использования. Большая часть этой работы велась сообществами DIY, энтузиастами и первопроходцами, имеющими связи в академических и хакерских кругах.

Поэтому цена 3D-принтеров где-то между 2010 и 2012 годом резко упала[11]*, и сегодня многие устройства стоят меньше 1.000 $ (а некоторые даже меньше 500 $).*

Большое изменение в общественном восприятии дешёвой 3D-печати произошло тогда же и было вызвано главным образом широким освещением этой темы в СМИ. Хороший пример – обложка журнала Wired за октябрь 2012 года[12] с заголовком «*Это устройство изменит мир*» и фотографией исполнительного директора и соучредителя Makerbot Бре Петтиса (Bre Pettis) с принтером Replicator 2 в руках.

Какие принтеры (каких производителей) вы использовали?



Moilanen, J. & Vadén, T.: Производство в движении: первый обзор сообщества 3D печати, статистические исследования Peer Production. http://surveys.peerproduction.net/2012/05/manufacturing-in-motion/*

** **Peer Production** – явление самоорганизации сообществ людей, так же известное как массовое сотрудничество, для совместной работы и получения общего результата или продукта*

В феврале 2013 года президент США Обама (Obama) упомянул эту технологию во время своего ежегодного обращения «О положении страны»[13], как если бы все уже знали, что это такое. Он выразил надежду, что благодаря этой технологии американское производство испытает новый подъём. «На месте закрытого склада теперь современная лаборатория, где новые работники осваивают 3D-печать, которая потенциально может в корне изменить способ создания практически чего угодно», – сказал Обама. Мы должны отметить, что он упомянул только саму 3D-печать, а не её дешёвое внедрение.

Профессиональный против персонального

Здесь мы хотим проанализировать несколько практических различий между профессиональным 3D-принтером и одним из его дешёвых собратьев:

- в то время как первый может использовать только один (или более) из специально изготовленных (и дорогостоящих) пластиковых порошков, разрешённых производителем, второй может использовать дешёвую пластиковую нить (АБС, ПЛА и т.д.) любого поставщика (диаметром 1,75 мм или 3 мм, в зависимости от типа печатающей головки);
- у профессионального принтера жёсткий, обычно металлический (иногда пластиковый) корпус, в то время как каркас дешёвого 3D-принтера часто изготавливается из вырезанной лазером фанеры или напечатанных пластиковых частей, реже алюминия или стали;
- для работы на профессиональных принтерах необходимы коммерческие программы (с закрытым программным кодом), и производитель часто организует специальные курсы для операторов таких устройств, в то время как программы для управления дешёвыми 3D-принтерами, как правило, бесплатны и имеют открытый код (они не всегда радуют разнообразием функций, зато обычно легко настраиваются под индивидуальные потребности, к тому же они быстро развиваются);
- профессиональные устройства управляются проприетарными промышленными компьютерами и операционными системами, а их дешёвые коллеги вовсю используют открытые аппаратные средства, такие как Arduino, Pololu, Sanguinololu и т.д. (т.е. маленькие и недорогие компьютерные платы, управляемые операционными системами с открытым исходным кодом).

К этому списку можно было бы добавить больше различий, но все они ведут в одном и том же направлении: профессиональные 3D-принтеры всегда будут гарантировать лучшую производительность и больше функций ценой отказа от свободной модификации механики, электроники и программного обеспечения, а также от возможности проводить эксперименты. И, конечно, эти принтеры намного дороже. Дешёвые 3D-принтеры, напротив, редко подходят для профессионального использования, но могут стать ценным и мощным персональным инструментом.

Возможно, по аналогии с персональным компьютером (ПК) мы станем называть этот новый персональный 3D-принтер просто П3П. Ну а поскольку мы заговорили о персональном компьютере, создание которого многие считают самой крупной революцией XX века, возможно, вам будет интересно узнать как все начиналось…

История персонального компьютера (всё повторяется вновь?)

История персонального 3D-принтера кажется похожей на историю персонального компьютера (ПК). Оба сначала продавались по высокой цене, были «только для профессионалов» и неудобны в использовании (для их эксплуатации часто требовался специальный техперсонал). По-настоящему доступными и простыми в использовании они стали лишь несколько десятилетий спустя. Когда ПК стал действительно персональным и широко распространённым (потому что массовое производство всё больше и больше снижало его стоимость), мы получили дешёвые настольные компьютеры, через несколько лет промышленность создала невероятно тонкие и мощные ноутбуки, а недавно мы получили сматрфоны (карманные ПК) и «волшебные» планшеты. Этот захватывающий рост был возможен только благодаря революции ПК, а множество мелких и крупных изобретений, которые пронизывают и формируют мир, в котором мы все живём, – это её детища.

Мы уже не можем представить себе жизнь без привычных современных информационных и телекоммуникационных технологий, большинство из которых (если не все) стали возможны благодаря персональному (т.е. доступному) компьютеру.

Пойдут ли 3D-принтеры тем же путём, чтобы скоро стать привычной бытовой техникой, которую можно будет встретить во всех домах и офисах, стоящей рядом с ПК? Проложит ли индустрия доступной 3D-печати, пока ещё находящаяся в колыбели, путь новой революции, сделав возможным невообразимое множество новых изобретений, которые снова изменят нашу жизнь?

Возможно, нас ждёт захватывающее время, и всем нам следовало бы понять это и подготовиться к нему. Так что давайте начнём изучать основы недорогой доступной 3D-печати.

3D-печать шаг за шагом

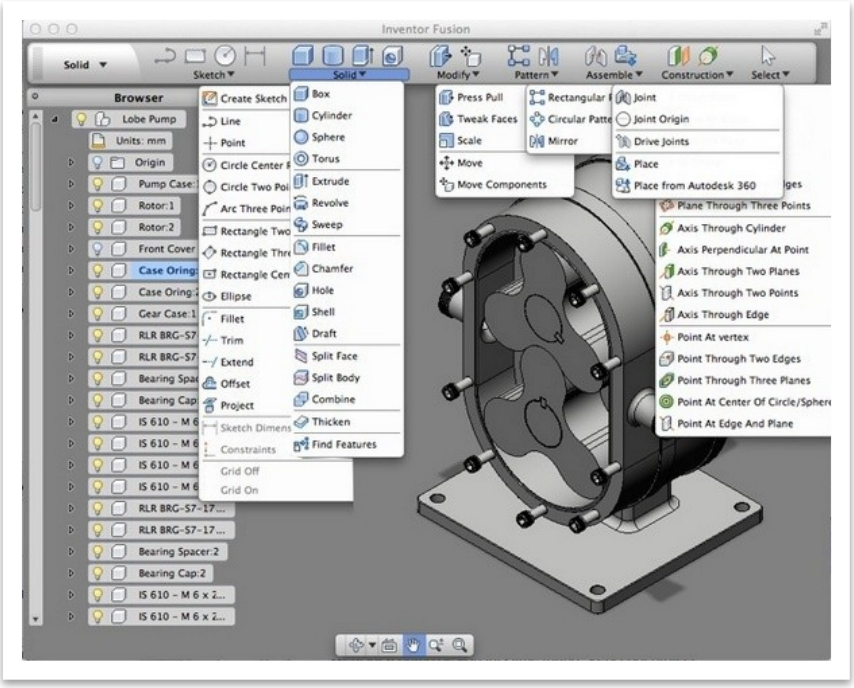
Процесс воплощения идеи в красочном пластиковом объекте, созданном при помощи нашего 3D-принтера, достаточно длинный и сложный. В него вовлечено много разных вещей, которые должны взаимодействовать и слаженно работать:

- Первый шаг – это создание 3D-модели нашей идеи, цифрового двойника объекта, который мы хотим напечатать (этап **цифрового моделирования**).
- Второй шаг – создание файла правильного формата (обычно «STL»), содержащего всю геометрическую информацию, необходимую для отображения нашей цифровой модели (этап **экспортирования**).
- Если мы ленивы, то два предыдущих шага можем пропустить: просто **загрузим** цифровую модель из интернета (например, из Thingiverse).
- Если наша модель была спроектирована не особо тщательно, в ней могут быть дефекты. Мы должны попытаться исправить их при помощи программы **(**этап **восстановления полигональной сетки** или "mesh repairing").
- Третий шаг – преобразование цифровой модели (технически это трёхмерный образ цельной поверхности (сетки), ячейками которой являются треугольники) в список команд, которые наш 3D-принтер может понять и выполнить, обычно это называется G-код **(**этап **нарезки** или "slicing").
- Четвёртый шаг – дать принтеру список инструкций, например, через USB соединение с ПК или скопировав файл на карту памяти, которая будет прочитана принтером самостоятельно (этап **соединения**).
- Пятый шаг – запустить 3D-принтер, начать печатать и ждать результата (**печать**).
- Шестой шаг – снять только что созданный объект с рабочей платформы, удалить вспомогательные части (т.е. поддерживающие опоры и/или подложку – если они есть), очистить его поверхности (этап **конечной обработки**).

Есть ещё несколько моментов, которые тоже нужно учесть, чтобы результат был успешным: **выбор 3D-принтера**, его **калибровка и установка**, тип и качество **пластиковой нити**, тип поверхности **печатной платформы**. Все эти и упомянутые раньше аспекты будут рассмотрены более детально, с практической точки зрения на следующих страницах.

3D-моделирование

Первый шаг к печати реального объекта – это создание виртуальной цифровой 3D-модели с помощью программы, часто называемой САПР (система автоматизированного проектирования, CAD). Есть много подобных программ для самых распространённых платформ (Windows, Mac OS X, Linux), некоторые из них бесплатны или даже имеют открытый программный код. Начать пользоваться программой САПР непросто, могут потребоваться недели или месяцы (и много терпения и практики) на то, чтобы выучить значение всех многочисленных пунктов меню и иконок. Даже простое понимание того, как двухмерное движение мыши переводится в трёхмерную среду программы, для некоторых может оказаться сложной задачей и затруднить манипуляции с моделью или изменение точки обзора, не говоря уже о более сложных вещах, таких как вращение объекта, пересечения и т.д.



Примеры *бесплатных программ для технического* 3D-моделирования:

- *SketchUp*[14] (простая, с обширным сообществом пользователей и обучающими видеопособиями, но так или иначе ограниченная; оптимальна для создания простых моделей).(*.прим. ред*.: как бонус – русский интерфейс)
- *FreeCAD*[15] (программа с открытым исходным кодом под Win/Mac/Linux для двухмерного и трёхмерного параметрического моделирования, достаточно сложная для изучения, но с хорошей документацией и всегда готовым помочь пользовательским сообществом).
- *Blender*[16] (мощное программное обеспечение с открытым исходным кодом под Win/Mac/Linux, оптимизированное для сложной анимации и рендеринга 3D-объектов и персонажей, неинтуитивное и сложное для изучения). (*прим. ред*.: с возможностью переключаться на русский интерфейс, с доступными пособиями в т.ч. и видео- на русском языке, с возможностью экспортирования в STL и инструментом для создания 3D скульптур)
- ~~*Autodesk™ Inventor Fusion*~~ [17] (профессиональное САПР приложение под Win/Mac, бесплатное для некоммерческого использования; был вытеснен более новой, "*облачной*" версией: Fusion 360)

- *OpenSCAD*[18] (не приложение, а язык программирования для создания 3D-моделей с помощью алгоритмов, очень мощный и многофункциональный, довольно сложный, но попробовать стоит).

Примеры *бесплатных программ для художественного* 3D-моделирования:

- *Sculptris*[19] (приложение под Win, Mac для создания виртуальных скульптур. Робота в программе очень напоминает процесс лепки из настоящей глины)
- *Autodesk 123D Design*[20] (Mac, Win, iPad, веб-приложение, простой интерфейс с множеством функций).

Иногда для создания несложной 3D-модели проще использовать один из множества специализированных сайтов, которые предлагают инструменты для быстрого создания и доработки объектов (такие инструменты называются веб-приложениями).

Примеры *веб-приложений для 3D-моделирования*:

- *TinkerCAD*[21] (сейчас закрыт). (*прим. ред.*: TinkerCAD поглощён корпорацией Autodesk, но проект на плаву, и после регистрации на сайте вы можете пройти несколько простых уроков и по их выполнении получить первые предметы для 3D печати)
- 3Dtin[22]
- ShapeSmith[23]
- Cubify[24]
- Autodesk 123D Design[20]

В качестве последнего пункта этого краткого обзора программ для 3D-моделирования стоит заметить, что в последнее время подобные приложения выпускаются и для планшетов с сенсорными экранами, таких как iPad фирмы Apple. Примеры таких приложений:

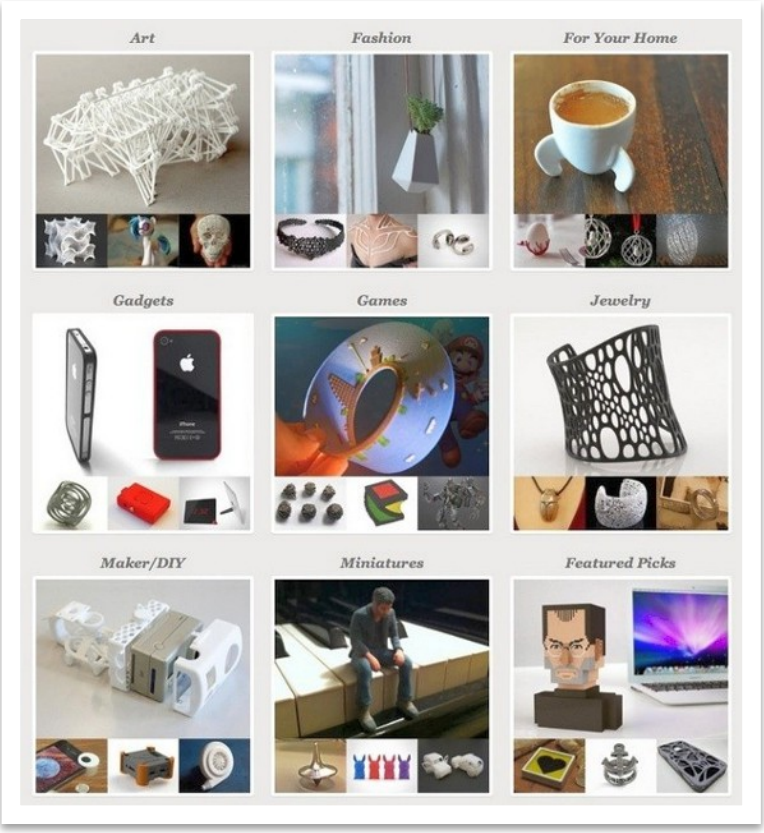
- *netfabb*, *3Dskope*, *KiwiViewer*, *vueCAD* и *MeshLab* (просмотрщики файлов STL, не способные создавать или изменять модели; все бесплатны)
- Приложения Autodesk из семейства 123D: *123D Sculpt* (создание моделей с натуралистично закруглёнными гранями, бесплатно), *123D Design* (создание геометрических, «квадратных» моделей, бесплатно) и *123D Creature* (создание персонажей, не бесплатно, но продаётся по минимальной цене)
- *Autodesk 123D Catch* (3D-сканирование камерой iPad или iPhone, бесплатно, но требуется регистрация).

Получение 3D-моделей из интернета

Хорошей идеей будет, прежде чем начать создавать свои собственные 3D-модели и начинать работать с более или менее сложными программами, обратить внимание на уже готовые модели, сделанные другими и любезно размещённые ими в Сети для бесплатного пользования. Окинем взглядом самые полезные веб-ресурсы 3D-моделей:

- *Thingiverse*[25]: ресурс используется большинством энтузиастов дешёвой 3D-печати как источник готовых моделей и для обмена своими творениями. Здесь предлагается более 50 000 пользовательских 3D-моделей. Большинство из них сделано для 3D-печати, но есть также модели для лазерной резки и других, более традиционных методов обработки. Всё содержимое можно скачать бесплатно. Большинство моделей легко напечатать, но лучше сначала проверить, была ли данная модель уже напечатана кем-нибудь из пользователей и с каким результатом (посмотрите раздел «who has made it» – «кто сделал это» в описании модели).
- Autodesk 123D[26]: сайт с большим количеством объектов, которые можно бесплатно скачать после регистрации. Файлы уже в формате STL.
- 3D CAD browser[27]: онлайн-ресурс обмена 3D-моделями для графических дизайнеров (CGI) и инженеров, работающих с CAD/CAM/CAE. Здесь много автомобилей, животных, архитектурных моделей и т.д. Как всегда, бесплатное скачивание в разных форматах после регистрации. Не все модели подходят для дешёвой 3D-печати.
- GrabCAD[28]: загрузка файлов в этом обширном онлайн-хранилище доступна без регистрации. Много разных трёхмерных цифровых объектов – от маленьких гаек и болтов до целиком гоночных автомобилей с тысячами превосходно сделанных механических деталей. Но для 3D-печати подходит только небольшая часть этих объектов, большинство же может служить лишь как замечательные сложные примеры в 3D фотореалистичном рендеринге.
- Shapeways[29]: Веб-сайт, предлагающий множество замечательных проектов, загруженных пользователями, но почти ничего нет в свободном доступе. Вы можете заплатить, чтобы загрузить некоторые модели или просто заказать у Shapeways распечатку их в пластмассе или металле (от алюминия до меди или стали, а также позолоченные или посеребренные) и доставить вам, за разумную цену, с гарантией прекрасного результата.
- 3D warehouse[30]: электронное хранилище SketchUp, с сотнями моделей самых разных типов объектов. Придётся, правда, внимательно поискать, чтобы найти пригодные для печати.
- 3D via[31]: небольшое хранилище 3D-моделей, которые можно бесплатно скачать после регистрации.

На большинстве этих сайтов доступные для скачивания файлы предлагаются в нескольких форматах, что позволяет легко изменить модели и подогнать их под свои требования. Они также могут служить источником упражнений для изучения возможностей современных программ для 3D-моделирования.



Но даже если на сайте есть только файлы STL, можно после скачивания импортировать их в программу 3D-дизайна (иногда для этого нужны специальные плагины) и таким образом получить возможность изменить их перед печатью. Многие скачивают и печатают модели самых известных разработчиков-любителей (например, Dizingof и Emmett на Thingiverse) или используют их в качестве основы и источника вдохновения при создании новых и более подходящих для печати (производных) моделей, не нарушая при этом авторские права, лицензии или моральные принципы. Это уже давно распространённая практика для работы с исходным программным кодом (являющаяся основой философии открытых источников), но она почти беспрецедентна в художественном и техническом мире, где люди намного чаще применяют авторское право на блокировку своей работы всеми юридическими и техническими средствами в попытке (чаще всего безуспешной) защитить их от копирования или изменения.

И даже если мы ещё не научились изменять чужие модели, тот факт, что огромное сообщество творческих людей имеет возможность сделать это, а также наличие нескольких сотен тысяч 3D-моделей, доступных для бесплатного скачивания, служит нам одновременно и стимулом, и вызовом для того, чтобы улучшать наши собственные навыки создания моделей, чтобы не отстать. Ведь возможно, приближается следующий тип цифрового неравенства – между теми, кто умеет создавать любые 3D-объекты, которые им нужны или просто нравятся, и теми, кто этого не умеет. Но даже если нам посчастливилось, и мы находимся на «творческой» стороне этого неравенства, нужно сделать ещё один шаг, чтобы стать настоящими создателями –

выбрать 3D-принтер (купить или собрать, а ещё лучше купить и собрать), устройство, которое воплотит наши виртуальные проекты в реальные 3D-объекты...

Оборудование для 3D-печати

Нам потребовалась бы сотня страниц, чтобы перечислить характеристики и функции всех дешёвых 3D-принтеров, имеющихся сейчас в продаже (готового оборудования или наборов для самостоятельной сборки), или тех, которые разрабатываются энтузиастами движения свободного аппаратного обеспечения, загружающими свои схемы и инструкции по сборке в интернет для бесплатного скачивания.

Действительно, сейчас, возможно, худшее (и в то же время лучшее) время для покупки 3D-принтера: слишком большой выбор; постоянно меняющийся рынок, на котором чуть ли не каждый день старые модели сменяются новыми; много важных и стремительных усовершенствований технологии, которые каждый месяц делают для нас доступными новые функции, новые материалы для печати, более быстрые и надёжные принтеры, более точные результаты, более низкие цены и т. д. Довольно сложно следить за всем этим развитием, размышлять, что будет дальше, и при этом всё ещё быть в состоянии решить, какой принтер стоит приобрести сегодня.

На данном этапе очевидно, что любой совет и любая информация, которым сегодня можно доверять, в скором времени станут устаревшими или просто ошибочными, и поэтому не стоит впадать в искушение и бежать за своим первым 3D-принтером с верой в то, что эта модель навсегда останется лучшей. Пожалуй, определить, какая из моделей лучшая, вообще невозможно, ведь всё зависит от наших потребностей, интересов и способностей. Может, лет этак через десять всё будет проще, и в этой сфере появится очевидный лидер, а может и нет. Но сейчас наш единственный вариант – следовать за этим стремительным развитием, если не меняя принтер каждый год, то, по крайней мере, следя за новостями, отслеживая изменения и – самое

важное – экспериментируя так часто, как это позволяют наши ресурсы (самым ценным из которых порой является время, а не деньги, особенно когда его недостаточно).

Идеальное решение при выборе нового принтера – купить модель, которую с течением времени можно будет без проблем обновить до усовершенствованной версии. У такой модели должно быть достаточно много пользователей, а её разработчики должны быть умными людьми, которые всегда стремятся к лучшему, устраняя недоработки и исследуя новые направления развития. Если вы спросите, как называется такой принтер, каждый ответит вам по-своему – просто потому, что единственно верного ответа нет. К счастью, у нас на выбор есть очень хорошие принтеры, интересные и даже великолепные модели, и все они разные, потому что мы тоже все разные.

Давайте рассмотрим некоторые наиболее распространённые дешёвые 3D-принтеры, на которые сегодня стоит обратить внимание. Нам следовало бы классифицировать их в соответствии с философией разработчиков, но иногда сложно найти границу между тремя главными категориями. Поэтому пришлось просто распределить их между двумя крайностями – от «абсолютно открытый, пользователю даётся полный контроль, для эксплуатации нужен большой опыт» до «полностью закрытый, пользователю даётся минимум контроля, подходит для неопытных пользователей», со всеми возможными промежуточными вариантами.

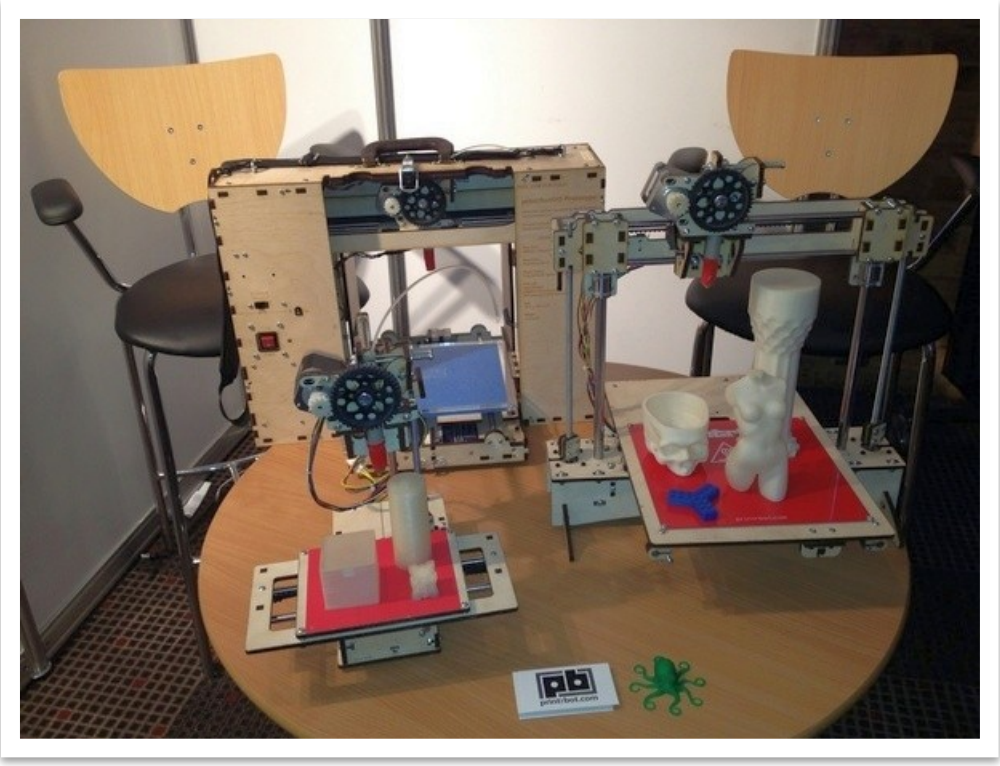
Авторский список лучших примеров для изучения (не обязательно лучших для печати) приведен здесь только как предложение и отправная точка, его нельзя назвать исчерпывающим.

1. **3D-принтеры в «хакерском» стиле**: «сделай сам», открытые аппаратные средства, полностью настраиваемые.(*прим. ред*. **Хакер** – человек, который врубается в дело, работает быстро и грубо, но эффективно)

- RepRap[32]: большое семейство, почти что *дерево эволюции* 3D-принтеров! Часто продаются под другими названиями и марками, оставаясь при этом, по большому счёту, модификациями одной из основных моделей RepRap:
  - - Darwin: исходная модель, сейчас заменена другими конструкциями;
  - - Mendel / Prusa Mendel / MendelMax: с характерным треугольным каркасом;

- - Wallace и Huxley: две модели меньшего размера и упрощённой конструкции;
- - Rostock: *дельта-принтер* с не-Декартовой конструкцией[33] (печатающая головка держится и управляется тремя манипуляторами, выстроенными в пирамидальной форме и прикреплёнными к вертикальным стойкам; основание зафиксировано), это очень интересная и уникальная модель.

- Ultimaker[34] (очень точный принтер из Нидерландов).
- Printrbot[35] (ряд дешёвых принтеров, включающий в себя несколько портативных моделей, из США).

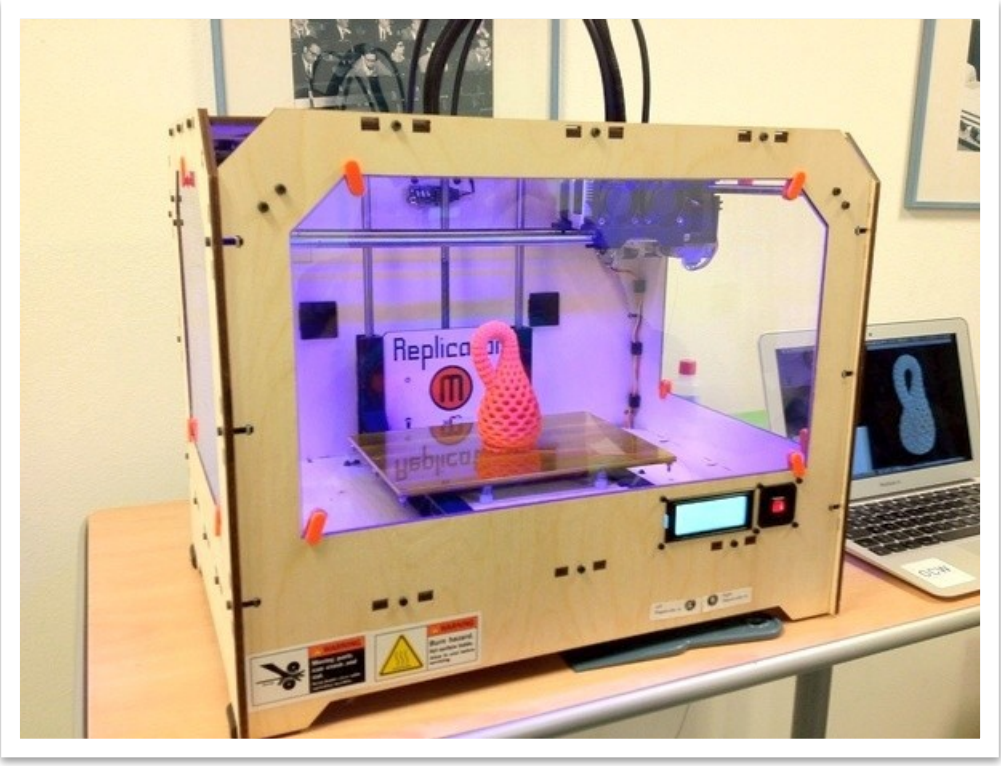


2. **Простые в обслуживании 3D принтеры**: хороший компромисс: заранее полностью собранный, однако частично настраиваемый, принтер с меньшей «открытостью», но более легкий в использовании и предсказуемый.

- Makerbot[36] – всемирно известная компания, которая популяризировала дешевые 3D принтеры. Две доступных в настоящее время модели – эволюция предыдущих популярных принтеров, которые были, вероятно, первыми, проданными большому количеству любителей создавать:
  - Replicator (с двойным экструдером, который может печатать двумя цветами, или двумя видами пластмассы одновременно), с фанерным каркасом и специальным общедоступным программным обеспечением. (*прим. ред*. – полноценные чертежи первого репликатора. а также детали для лазерной резки (фанерный каркас) и пластмассовые части для распечатки без труда можно найти и скачать на Thingiverse)
  - Replicator 2 (более новая копия с прочным металлическим каркасом, менее открытая, например, чертежи не доступны в онлайне, как это было для Replicator, но более надежная и удобная. Программное обеспечение было также

модернизировано (уже не с открытыми исходниками). Есть также версия 2X с двойным экструдером и подогреваемой платформой.

- Solidoodle[37], третье поколение доступных 3D принтеров, предлагающих различные размеры печати и интересные опции, такие как прочный алюминиевый корпус и подогреваемую платформу.
- Afinia Up![38] его «плюс» и «мини» версии универсальных принтеров «для остальных», тех кто не "махровый" хакер, но все еще требует немного свободы для экспериментов.



3. **3D принтеры включай-и-играй** (plug'n'play): закрытые «черные ящики», очень удобные, но с весьма ограниченным количеством настроек. Получаемый результат такой же, как у современных лазерных или струйных (2D) принтеров.

- Cube[39], первый и наиболее известный дешевый 3D принтер, *полностью* plug-n-play, с некоторыми компромиссами в управлении и универсальности, но легкий в обслуживании, разработанный и разрекламированный для использования непрофессионалами, и даже детьми. С собственным программным обеспечением (только для Windows), собственными картриджами пластмассовой нити и возможностями, такими как подключение посредством *Wi-Fi* и *прямая печать с USB накопителя.*

Хороший сравнительный анализ ряда принтеров различных категорий был опубликован в специальном выпуске журнала "**Make**:" зимой 2013, полностью посвященном 3D печати[40]. Для одних – это очень интересное чтение (стоит 6,99$ для цифровой загрузки как ebook или PDF, и 9,99$ для получения печатной версии) для других – подробные инструкции по 3D печати новичкам, программам моделирования и т.д.

Другой полный список 3D принтеров упорядоченных по цене (начиная от 400$ и почти до 25 000$) был составлен **3ders.org** – хороший источник мировых новостей о технологии 3D печати – в свободном доступе онлайн по адресу: *http://www.3ders.org/pricecompare/3dprinters/*

Определенно, правильно предположить, что к настоящему моменту доступно более ста различных моделей дешевых 3D принтеров как в виде коммерческих продуктов (те, что мы можем собрать, купив на местном рынке или за рубежом), так и сделанные по открытым проектам, доступным через интернет по открытой на аппаратные средства лицензии (которые мы можем собрать самостоятельно).

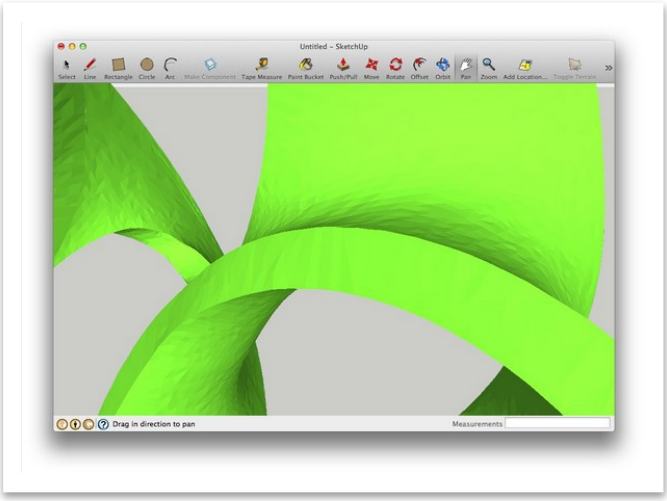
Исправление полигональной сетки (таким образом, избегаем ошибок печати!)

Файл STL, созданный нами (или другими) использующий некоторые программные средства моделирования, может быть еще не готов к печати, независимо от того насколько аккуратным был процесс создания. Даже лучшие бесплатные программы проектировщика-любителя мало что могут сделать, чтобы избежать некоторых ошибок, «загадочно» возникших на поверхности объектов таких дефектов как отверстия или вывернутая поверхность. Это типичные проблемы, которые почти неизбежны, когда мы создаем сложные модели, включающие впадины, пересечения поверхностей или просто изогнутые поверхности.

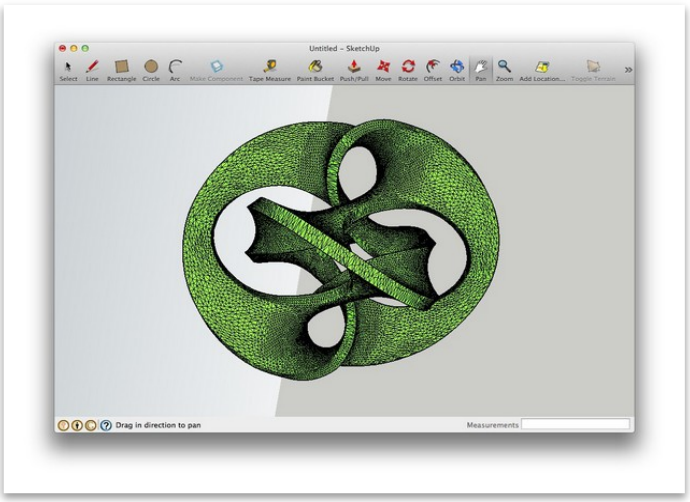
Идеальная 3D модель пригодная для печати должна быть герметичной (то есть коллектор) и монолитной(сплошной), не полой. Мы, конечно, можем проектировать такие объекты как вазы или «полые» объекты, но фактически они всегда имеют внутреннюю часть, которая твердая и цельная (даже если это просто тонкая «стенка»). Водонепроницаемость объекта – единственная ситуация, которая позволяет нашей программе нарезки (мы обсудим эту функцию на следующих страницах) должным образом идентифицировать внутреннюю и внешнюю часть объекта, для того чтобы определить где и когда выдавливать пластмассу. Но если даже есть невидимое микроскопическое отверстие в многоугольной аппроксимации его поверхности (называемой

ячейкой), целостность внешней поверхности объекта не гарантируется, так, же как и верный результат нарезки, а печать может завершиться беспорядочными сгустками пластмассы.

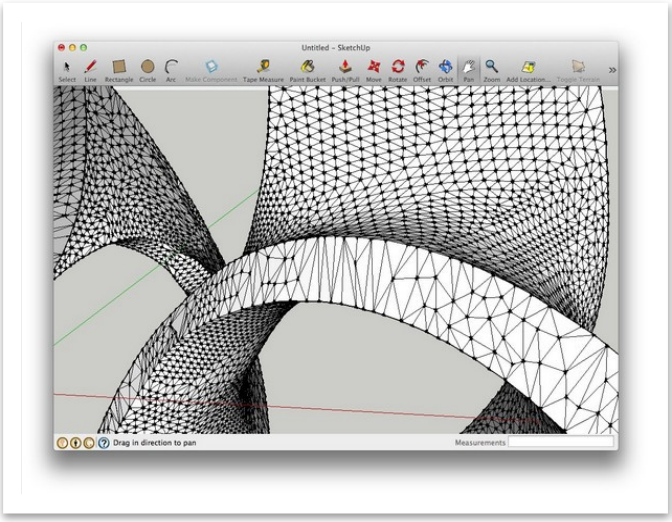
3D модель, фрагмент



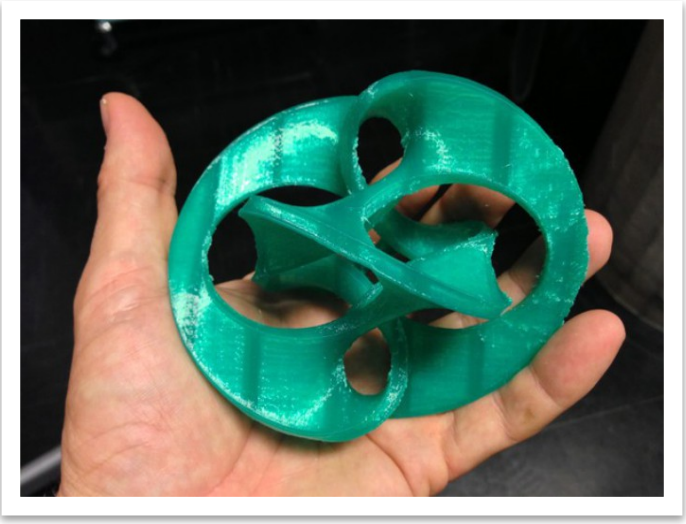
3D модель с сеткой



Фрагмент сетки

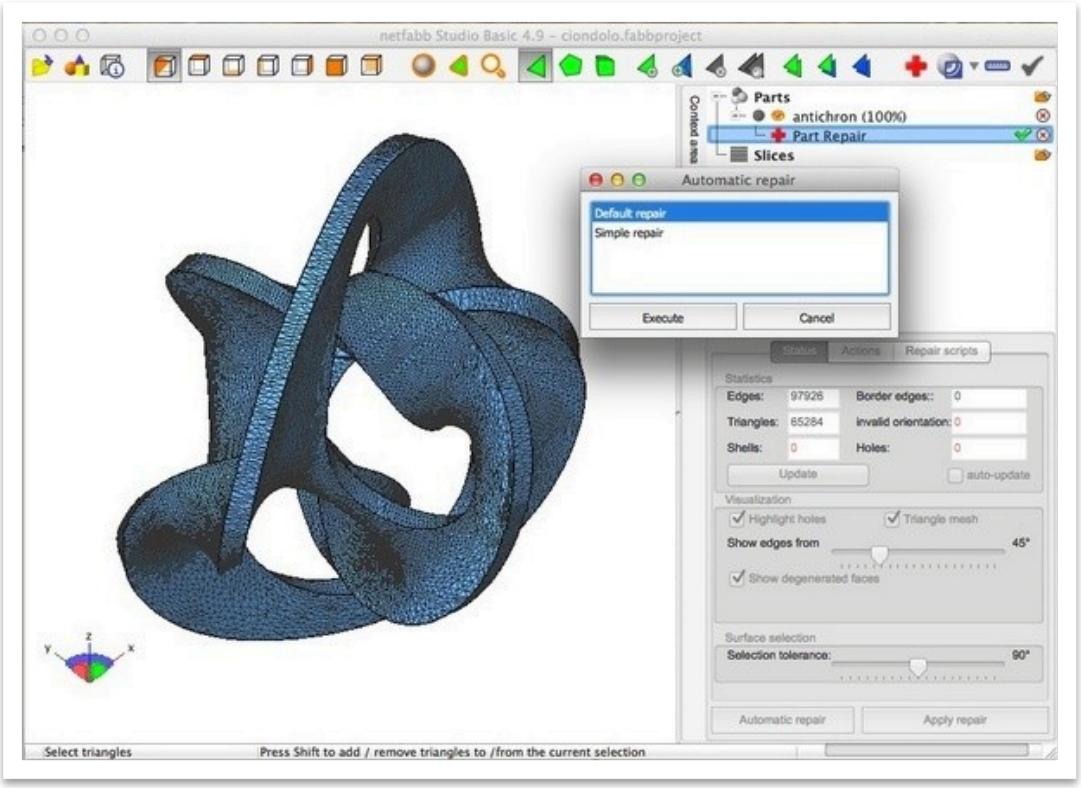


Напечатанный объект

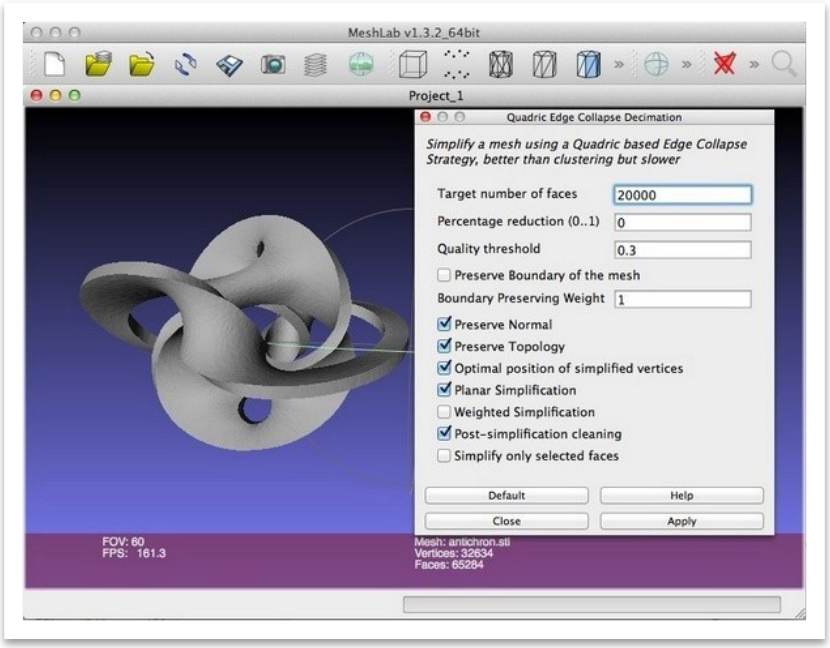


По этой причине, всегда лучше проверять наши модели на подобные проблемы перед нарезкой, и это может быть сделано с бесплатной программой **netfabb Studio Basic**[41], доступной для Windows, Mac и Linux.

Если обнаружились проблемы, они могут быть исправлены, если вернуться к программе моделирования или использовать netfabb, или при помощи автоматического[42] метода или вручную[43].



Другая очень полезная программа **MeshLab**[44], которую можно использовать для анализа и манипуляций с объектной сеткой (например, чтобы уменьшить ее сложность и число элементов[45]), а также преобразовывать STL-файлы в множество других форматов. Эта программа была разработана итальянским исследовательским институтом ISTI-CNR, совместно со студентами Университета Пизы в Италии и она доступна как открытое программное обеспечение для Windows, Mac и Linux.

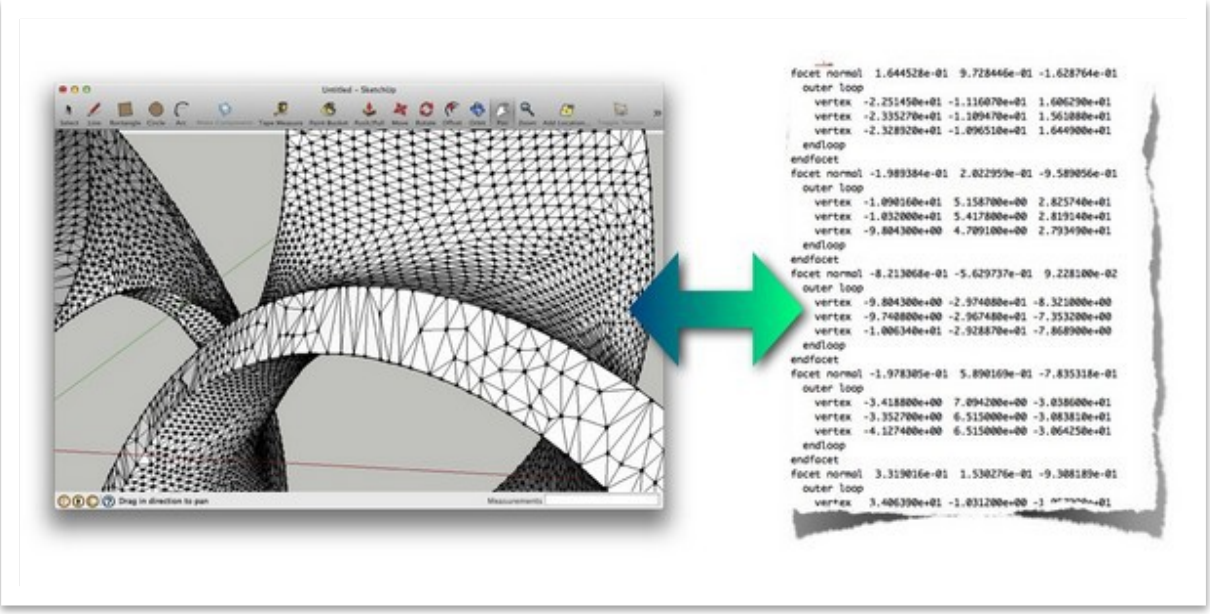


Программное обеспечение для нарезки

Этот шаг, возможно, самый интересный в долгом процессе движения от идеи к реальному трехмерному объекту, потому что он раскрывает в тончайших и глубочайших подробностях работу 3D принтера по преобразованию грубой пластиковой нити в наши красивые творения. Подготовка 3D модели к печати – это тонкая комбинация технических знаний, науки и искусства, и требуется много времени, чтобы освоить эту процедуру.

Перед печатью нашу модель (сохраненную или экспортированную в STL-файл) следует преобразовать в набор инструкций для принтера (стандартный формат, называемый *g-кодом*): это задача называется **нарезкой** (потому что модель «нарезается» на множество тонких горизонтальных слоев, которые будут последовательно напечатаны), выполняется с помощью комплекса программ, называемых *слайсерами*.

Фактически, информации, содержащейся в STL-файле, мало или она бесполезна для принтера потому, что она содержит лишь длинный список координат <X,Y,Z>, определяющих вершины, составляющие множество многоугольных поверхностей сетки объекта.



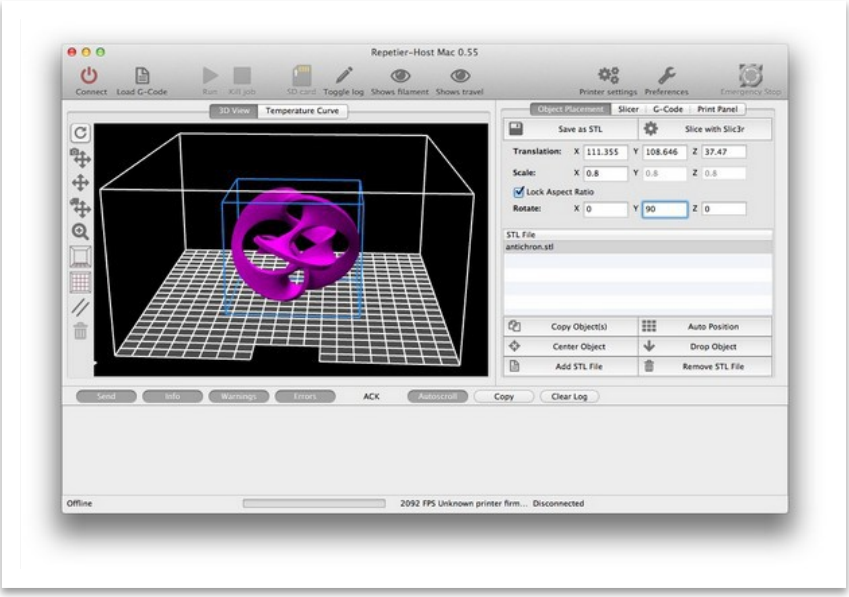
Принтеру нужна очень разная информация: движения печатающей головки и/или платформы в различных направлениях X, Y и Z, количество выдавливаемой пластмассы и точное время, когда необходимо начинать и прекращать выдавливание, температура сопла и печатной платформы, *и так далее*...

Это "преобразование" из координат вершин в команды печати – довольно тяжелая в вычислительном смысле задача, и не может обрабатываться в реальном времени ограниченным процессором самого принтера во время печати, поэтому это должно быть сделано заранее на внешнем компьютере. Другая причина поступать таким образом в том, что такой процесс

нарезки требует целого ряда дополнительных параметров, которые должны быть предоставлены пользователем (например, высота слоя – это лишь самый очевидный, но еще много других), и графический интерфейс реального компьютера делает эту задачу гораздо проще, чем любой из небольших буквенно-цифровых дисплеев с несколькими кнопками, которые обычно находятся на 3D принтерах, если они вообще есть (многих принтеров не имеют интерфейса с пользователем, за исключением USB-подключения к ведущему компьютеру и, может быть, кнопкой питания).

Стандартная процедура нарезки, исходя из вышеописанного, приблизительно такова:

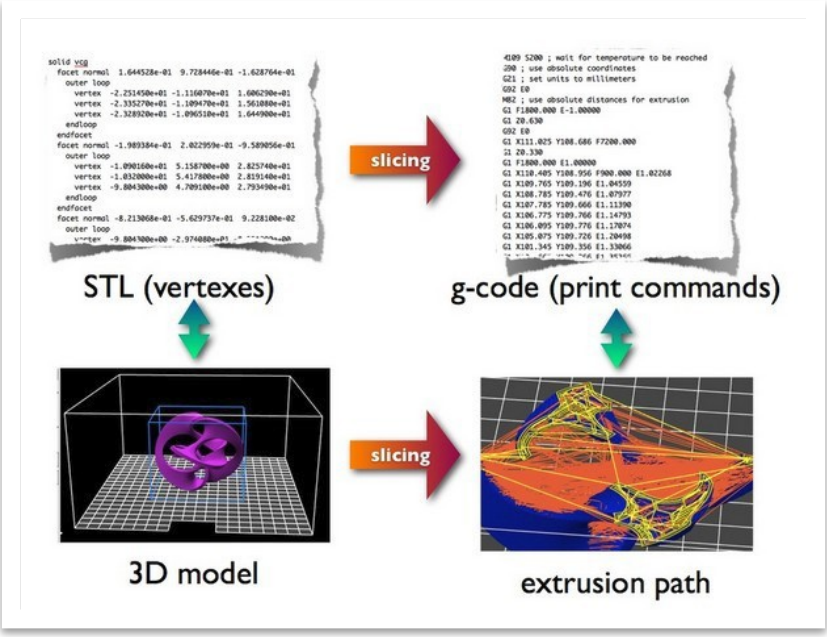
1. запустите программу слайсер на главном компьютере;
2. загрузите STL-файл модели;
3. преобразовывайте/масштабируйте/вращайте модель, пока она не будет правильно позиционирована на рабочей платформе;
4. введите все параметры необходимые для правильной печати;
5. начните процесс нарезки и ждите, пока не будет создан весь g-код;
6. отправьте g-код принтеру через USB соединение или скопируйте его на карту памяти (обычно SD или microSD карта), чтобы загрузить в принтер.



Первые два шага вполне очевидны, но третий может потребовать некоторой дополнительной информации. Программа нарезки сконфигурирована со всеми параметрами 3D принтера, которые могут понадобиться, поэтому она знает размеры печатной платформы и может продемонстрировать расположение модели относительно ее. Пользователь может переставлять модель в трех осях, пока она не будет центрирована, и не будет располагаться точно на поверхности основания (она не должна быть «подвешена в воздухе»), а также вращать ее, если нужно. Возможность масштабировать модель также очень полезна, потому что в файле STL единица длины никогда не определяется, поэтому может получиться так, что программа моделирования будет использовать сантиметры, в то время как слайсер ожидает миллиметры, и в результате получится модель в 10 раз меньше, поэтому необходимо учитывать этот фактор. Другая причина немного увеличить масштаб модели (примерно на 0.5 % для ABS, еще меньше для PLA) – это

сжатие пластмассы при остывании при комнатной температуре (тепловой коэффициент расширения ABS обычно[46] около 75×10−6 °K-1, при условии его затвердевания при 100°C и охлаждения до 25°C, которое дает фактор сжатия примерно 0.5%).

На пятом шаге наша 3D-модель "нарезается" на множество горизонтальных слоев, превращаясь в стопку тонких деталей, каждая из которых обрабатывается отдельно, чтобы рассчитать лучший путь сопла при укладке расплавленной пластмассы в нужных местах; повторяя этот маршрут, печатающая головка практически проделывает такую же работу (*m.e*. слой за слоем).



Это самая ответственная часть целого процесса печати, потому что заключительное качество напечатанного объекта определяется почти полностью правильным выбором значений для множества различных параметров нарезки. Поэтому четвертый шаг действительно важен, и мы должны изучить значение, по крайней мере, самых важных параметров нарезки. К сожалению, они по-разному названы и определены в различных доступных программах нарезки. Здесь мы обсудим пять наиболее используемых (свободных)программ: Skeinforge, *Slic3r*, *KISSlicer*, *Cura* и *MakerWare* (все доступны для Windows, Mac и Linux).

Лучший способ для экспериментов с параметрами нарезки, следование логической последовательности. Возможно, лучшая последовательность используется **Slic3r**: параметры, связанные с моделью принтера (они изменяются только когда изменяется принтер), другие связаны с использованием пластмассовой нити, и наконец, параметры, которые могут быть настроены для определенной печати.

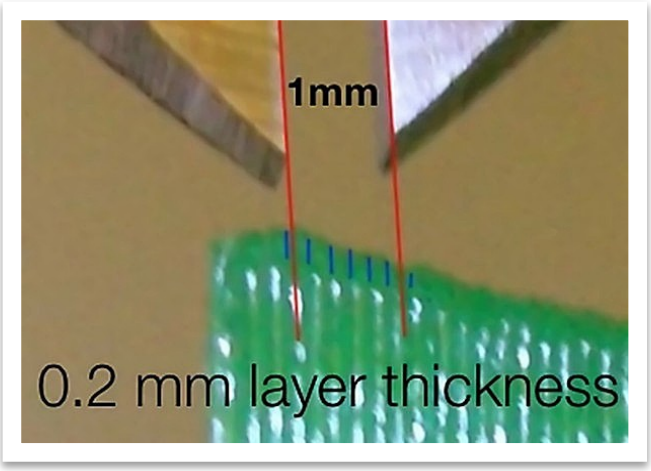
1. Настройка параметров принтера:

- тип принтера / прошивки;
- размер и смещение основания печати, макс. высоты Z: типичные размеры границ печати обычных принтеров 20x20x20 см;
- количество экструдеров, диаметры их сопел, другие параметры экструдирования.

2. Параметры нити:

- диаметр нити: должен быть точным фактическим измерением, номинальной величины не достаточно для правильного расчета длины пластмассы для экструдирования;
- коэффициент пропорциональности (или множитель или плотность укладки): используется, чтобы компенсировать расширение пластмассы при расплавлении, 1 для PLA и 0.9 или меньше для ABS;
- температура экструдера и платформы (может отличаться для первого слоя)
- вентилятор охлаждения.

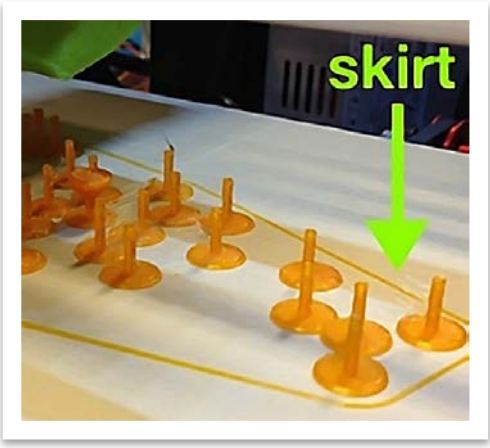
3. Параметры печати:



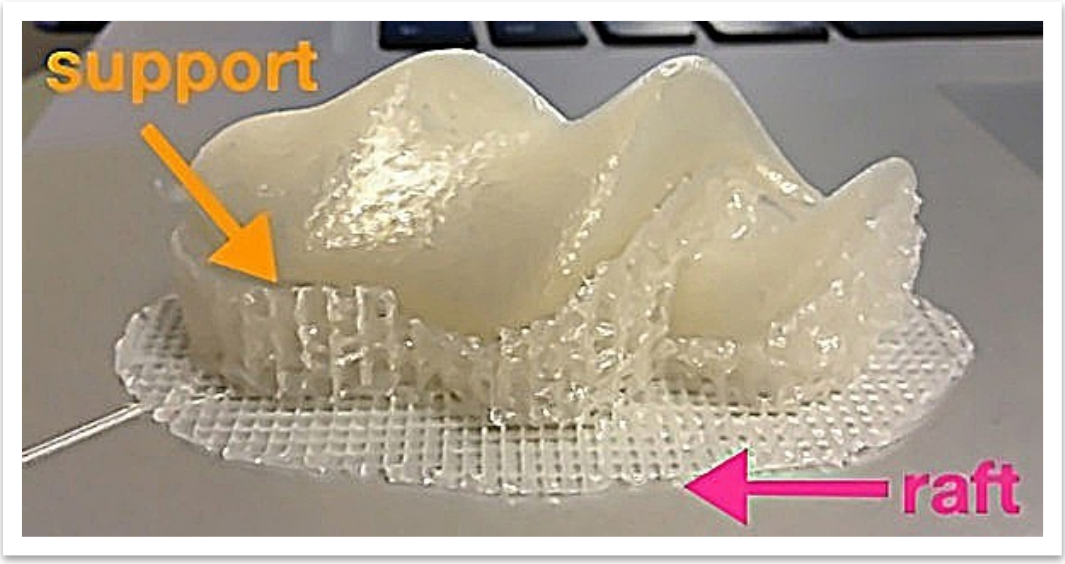
- **высота слоя** (может отличаться для первого слоя): обычно от 0.1 мм и до 80% размера сопла, типичное значение – 0.25 мм;
- количество оболочек/периметров или толщина стенок: увеличение этого значения делает объект более прочным;
- количество/толщина верних/нижних слоев: тоже влияет на прочность объекта;
- процентное соотношение **заполнения**: количество пластмассы, используемой для большей части объекта, обычно от 0% (полые объекты) до 50% (твердые, очень прочные части), более 50% редко используется, и обычное значение приблизительно 10-20%;

- шаблон заполнения (infill pattern): узор, используемый для заполнения детали, обычно используют квадраты (прямолинейные) или шестиугольники;

- скорость печати (printing speed) (для различных задач): этот параметр связан с температурой сопла, температурой нити, типом нити и качеством сборки принтера (в т.ч. количеством смазки, использованной для осей и механизмов), небольшая скорость позволяет добиться лучшего качества печати;
- **полоса** (skirt) и **край** (brim): полоса – дополнительное количество пластмассы, выдавливаемой перед основной печатью, чтобы избежать начала печати с пустым соплом, край – дополнительное утолщение нити в первом слое, для лучшего приклеивания объекта к основанию;



- **подложка** (raft) и **поддержка** (support): подложка – другой способ улучшения прилипания объекта к платформе, подразумевает под собой одно/двух- слойную сетку из пластиковой нити, тогда как поддержка – специальная пористая структура из пластика, наращиваемая под **нависающими** частями объекта, без которой эти части не могут быть корректно построенными;
- другие расширенные настройки.



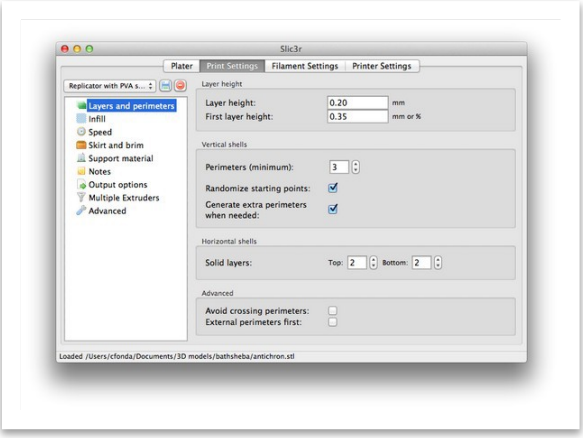
3D принтеры по технологии FDM обычно не могут производить сталактито-подобных структур так же, как и слишком выступающих, если они не будут иметь опоры во время постройки. Если есть необходимость, то можно добавить к объекту очень тонкие **опорные** конструкции, которые можно по завершении печати сломать или срезать. Большинство слайсеров могут создавать подобные поддерживающие конструкции автоматически. Большинство принтеров обычно нормально справляются со свесами до 45 *градусов* без специальных настроек.

3D-модель следует повернуть так, чтобы уменьшить число выступающих частей (перед нарезкой), и можно направить вентилятор на деталь при печати, чтобы охладить нить сразу, как только она выйдет из сопла, до того, как она "поплывет" и нарушит отпечаток. Наконец, в слайсере можно включить использование поддерживающего материала, если необходимо. Это хлопотно, потому что расходуется больше пластмассы, печать занимает больше времени, и впоследствии Вам придется счищать поддерживающий материал ножом.

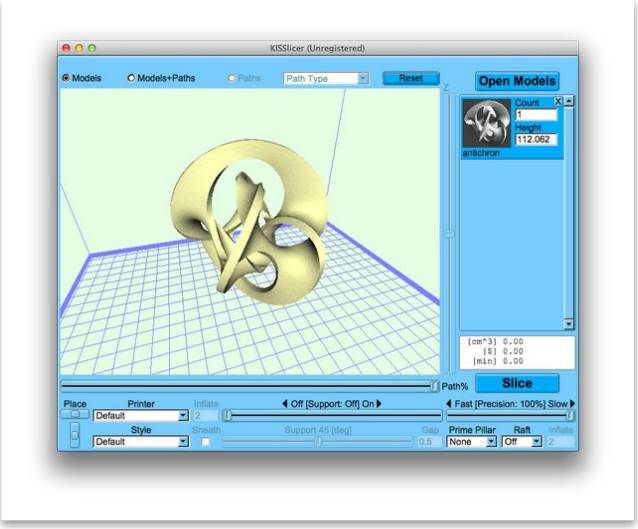
Как прежде упоминалось, различные программы нарезки могут иметь неодинаковые имена для схожих настроек, а иногда могут использовать параметры, которые определены совсем иначе (как число периметров/оболочек вместо толщины стенки и т.д.). Поэтому есть смысл разобраться в языке и определениях слайсера, который Вы собираетесь применять для своего принтера.

Теперь, давайте совершим краткий обзор пяти, наиболее используемых, бесплатных слайсеров (программ – генераторов G-кода):

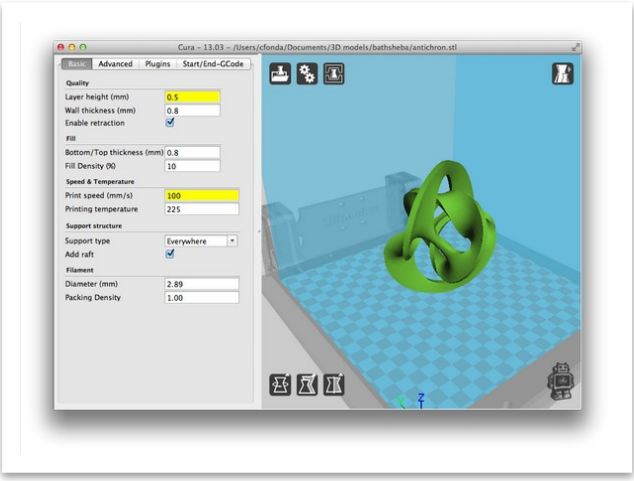
- **Skeinforge**[47]: вероятно, старейший слайсер, это набор скриптов, написанных на Python, и выпущенный по лицензии GPL, был инструментом нарезки по умолчанию в оригинальном Makerbot Replicator (в составе программного обеспечения ReplicatorG) и многих RepRap 3D принтеров, и он все еще присутствует в качестве опции в MakerWare (программе, занявшей место ReplicatorG, для управления Makerbot принтерами последних моделей) и в другой простой (бесплатной) программе Repetier-Host. Пользовательский интерфейс не является дружественным, а некоторые настройки сбивают с толку.
- **Slic3r**[48]: современный, законченный и активно развивающийся инструмент нарезки с открытым исходным кодом, он широко поддерживается производителями принтеров и представлен в качестве основного варианта в Repetier-Host. Он спасает пользователя от многих неприятностей в дальнейшем, благодаря возможности записи различных параметров нарезки в логически сгруппированные по различным предварительным настройкам.



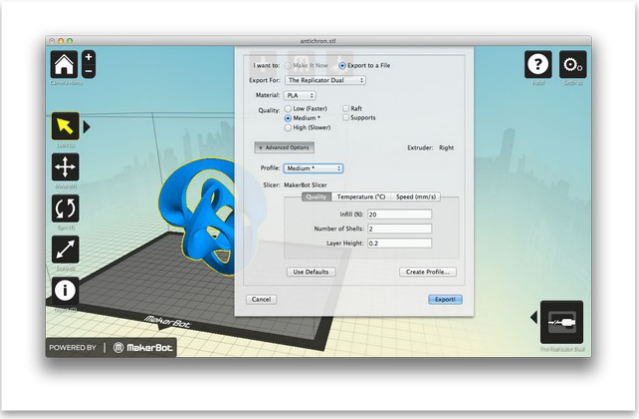
- **KISSlicer**[49]: имеет простой графический интерфейс, быстро работает и прост в эксплуатации, станет хорошим выбором для новичков 3D печати. Так же доступна "Про" версия, в которой имеется поддержка нескольких экструдеров и множества объектов (и еще несколько дополнительных полезных функций), по цене в $42 ($25 для использования в образовательных целях).



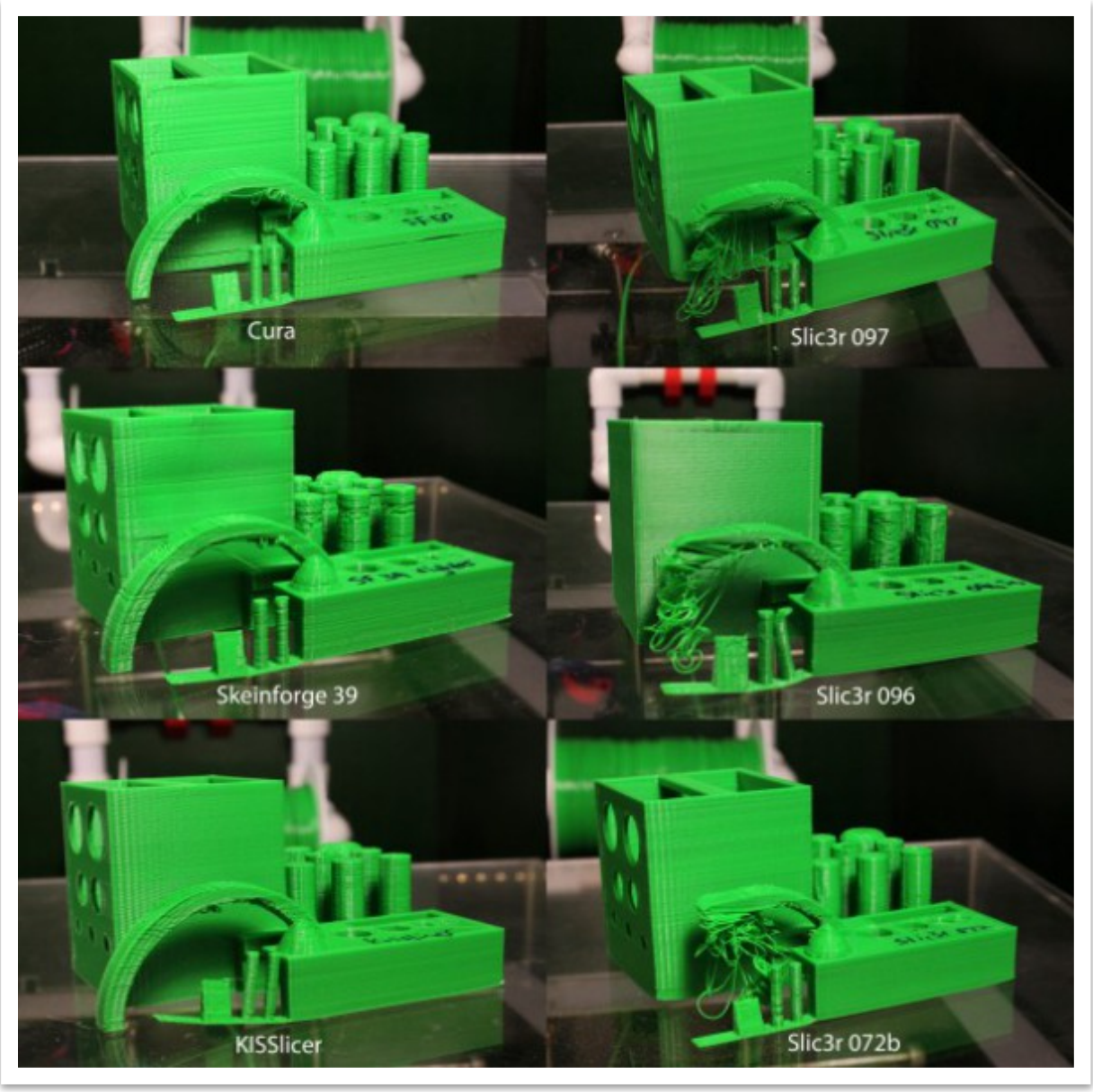
- **Cura**[50]: разработана в Ultimaker с целью сделать 3D печать такой простой и последовательной, насколько это возможно. Она включает в себя все необходимое для подготовки 3D файла к печати и непосредственной реализации, и полностью настроена для работы с 3D принтером Ultimaker.



- **MakerWare**[51]: приятная и простая в использовании программа для управления принтерами Makerbot Replicator и Replicator 2, она имеет собственный механизм нарезки, оптимизированный для более качественного, быстрого и надежного результата. Кроме того, Skeinforge может быть выбран как встроенный механизм нарезки.



Выбор среди различных программных инструментов нарезки не сводится лишь к личному предпочтению или списку возможностей различных вариантов: некоторые принтеры строго требуют использования определённых одного-двух слайсеров: например – Makerbot Replicator 2, его последнее ПО может использовать только новую и обратно-несовместимую версию g-кода, названного *.x3g* (*прим. ред*. специфичный G-код для двухэкструдерных принтеров). Таким образом, требуются MakerWare или ReplicatorG, только два слайсера, способные создавать такие файлы. В других случаях, производители принтеров могут давать строгую рекомендацию использовать определенный слайсер, как в случае с производителем принтеров Ultimaker и слайсером "Cura". Наконец, выбор слайсера может быть действительно свободным, и может вести к научным и тщательным сравнениям фактических результатов различных слайсеров, когда приходится иметь дело с некоторыми сложными моделями, называемыми усложненными тестами (*torture-tests*)[52].



Пластиковые расходные материалы (нить/пруток)

В настоящее время (весна 2013) существуют два вида пластика, широко используемых для недорогой 3D печати и несколько менее распространенных. Интересно то, что разрабатываются и тестируются многие виды пластика, имеющих куда более широкий диапазон физических, химических и механических характеристик, что открывает путь к использованию 3D печати в различных направлениях. Доступ к новым печатным материалам может круто изменить рынок прутков.

Пластиковые прутки производятся в двух стандартах: диаметром 1.75 мм и 3.0 мм. Трехмиллиметровый пруток – более старый стандарт, он постепенно вытесняется 1.75-мм, который выдавливается немного легче, управляется немного лучше и оставляет меньше висячих хвостов с боков вашего изделия. В любом случае, множество современных принтеров до сих пор используют 3 мм пруток, и он, иногда, немного дешевле чем 1.75 мм.

Полилактид (PLA)

Наиболее распространенная пластмассовая нить, сделанная из полимолочной кислоты (или полилактид (PolyLactide Acid) – сокращено PLA[53]), биоразлагаемый и экологичный пластик, получаемый из крахмала. Температура плавления в пределах 180–230 °C. Он не имеет неприятного запаха во время печати и его пары не опасны, поэтому не требуется специальных мер безопасности или принудительной вентиляции.

Он хорошо держится на печатном основании при комнатной температуре (не требуя более дорогого нагреваемого основания для принтера), но только если платформа покрывается синим скотчем (также недорогой продукт, который необходимо время от времени заменять – главным образом, потому что он иногда получает повреждения во время удаления объекта с платформы).

Объекты, напечатанные PLA, крепкие, но относительно хрупкие, и не могут использоваться при высоких температурах (как для некоторых частей самого 3D принтера).

Нить PLA довольно недорогая, ее стоимость в среднем 30$ за 1 кг, и она обычно продается в катушках по 0.5, 1 или 2.3 килограмма (но некоторые изготовители продают метрами)[54]. Она доступна в естественном (белый матовый) цвете или во множестве ярких цветов, чистых или полупрозрачных, отпечатанные объекты имеют красивую гладкую поверхность.

Специальный вариант PLA – мягкий или эластичный (soft/flexible) PLA, который выдавливается при низкой температуре и очень низкой скорости, может использоваться для печати гибких сочленений, лент, шин, и т.д. (П*рим.ред*. начинает появляться и у китайских производителей).

АБС (ABS)

Вторая наиболее распространенная нить, изготовленная из акрилонитрилбутадиенстирола (Acrylonitrile Butadiene Styrene), кратко ABS[55]. Основанная на нефтепродуктах пластмасса, используемая для различных целей, одна из хорошо известных – это детали конструктора LEGO™. Её пары имеют ужасный запах (прим. ред. как жжёные пластиковые бутылки) и даже считаются опасными для здоровья, поэтому рекомендуется использовать принудительную вентиляцию для отвода продуктов горения пластика, когда печать ABS длится долгое время. Температура плавления ABS 210–260 °C.

Нить ABS стоит приблизительно как PLA и является также довольно распространенным материалом для печати, несмотря на его более высокие требования. Объект ABS обычно печатается на нагреваемом основании (в пределах 100°C), покрытом каптоновой пленкой, чтобы он хорошо держался, плюс стоимость и сложность самого принтера (поэтому, не все принтеры идут с нагреваемым основанием, это как недостаток, и у некоторых нет этого как опции). Возможное решение – это печать ABS на холодном основании, покрытом несколькими слоями клея: цианоакрилат, лак для волос[56] или клей на водной основе такой как Vinavil® [57], продемонстрировали хороший результат для этой цели. Но рекомендуется использование нагреваемого основания, потому что это помогает уменьшить деформацию больших печатаемых объектов.

Преимущество ABS по отношению к PLA состоит в том, что получающиеся объекты более прочные и менее хрупкие, и могут выдерживать высокие температуры. Нить ABS обычно доступна во многих цветах, включая блестящий, светящийся в темноте, золотой, серебряный, и даже цвет, который изменяется под влиянием температуры[58] (например, синий/зеленый ниже 30°C и желтый/зеленый выше, делают объекты, напечатанные такой нитью, чувствительными к температуре тела).

Нейлон

Taulman[59] производит нить 618 Nylon®, которая имеет несколько интересных особенностей, среди них гибкость, легкость и устойчивость к химическому воздействию. Она должна выдавливаться при более высокой температуре по сравнению с PLA или ABS (приблизительно 245 °C), но она не имеет паров или запахов, и хорошо держится на синей ленте. Используется для печати механических деталей, которым необходима высокая устойчивость к повреждениям и очень низкое поверхностное трение. Другая очень интересная возможность – использование для печати заказных протезов и деталей, связанных с медициной, так как нейлон инертный по отношению телу (но официально не подтверждено FDA*, по крайней мере, пока).

Стоимость нейлоновой нити в два раза больше, чем стоимость PLA или ABS, единственный доступный цвет белый (естественный) и единственный источник – Taulman.

(**прим. ред*. – FDA – федеральная комиссия США по контролю качества пищевых продуктов, медикаментов и косметических средств, Food & Drug Administration)

Поликарбонат (PC)

Поликарбонат[60] (Polycarbonate – PC), очень прочный и долговечный пластмассовый материал с высокой оптической прозрачностью и высокой температурой плавления (приблизительно 270 – 300 °C). Несмотря на это используется во многих промышленных производствах (например, CD и DVD сделаны из поликарбоната). Первые тесты с дешевыми 3D принтерами начались только в 2012[61] и пока есть лишь несколько производителей PC нити, продающих ее достаточно дорого, примерно 90$ за килограмм.

ПВС (PVA)

Поливиниловый спирт (Polyvinyl Alcohol – PVA) – растворимый в воде пластмассовый полимер, который может использоваться для печати поддерживающих опор (для PLA и ABS объектов), легко растворяющихся в теплой воде, оставляя прекрасную поверхность объекта и упрощая процесс удаления опор (обычно довольно утомительный). Температура печати – приблизительно 170°C, никогда не должна превышать 200 °C. Нить PVA довольно дорогое удовольствие, продающаяся порядка 90$ за килограмм.

Ударопрочный полистирол (HIPS)

Ударопрочный полистирол (High-impact Polystyrene – HIPS)[62] – пластмассовая нить, растворяющаяся в лимонене, иногда используется для создания поддерживающих структур (особенно для ABS), которые могут быть легко удалены без механического воздействия. Лимонен – естественный растворитель, извлекаемый из корки лимонов и других цитрусовых. Температура печати HIPS приблизительно 230°C. Стоимость нити HIPS около 40$ за килограмм.

Другие виды пластмасс

LAYWOO-D3 – нить на древесной основе, созданная недавно[63] (технически, это соединение древесины и полимера, содержащее переработанную древесину и связующие полимеры), может использоваться для печати объектов, которые похожи на настоящие деревянные детали (даже с типичными годичными кольцами). Все особенности – те же что и у PLA, но его цена пока очень высока, около 100$ за кг, а также придётся прибегнуть к некоторым ухищрениям[64], чтобы изменить цвет колец.

Наконец, было проведено несколько экспериментов с токопроводящим пластиком[65], но сопротивление полученного продукта всё ещё довольно высокое, поэтому он не годится для коммерческого применения.

Печать

В этой части у нас должен быть тщательно подобранный принтер, готовый к торжественному запуску, нить подходящего для нашего принтера диаметра; типом и цветом, соответствующим нашему проекту, и файл g-кода, созданный программой-слайсером, должным образом сформированный согласно свойствам, которые мы хотели бы получить для нашего объекта. Теперь настало время включить принтер, соединить его с нашим компьютером и начать **процедуру калибровки**:

1. Первая проблема, которую надо решить, это определение правильных параметров соединения: большинство принтеров, несмотря на подключение через USB, внутри используют чип "*USB-to-serial*" для обеспечения последовательного потока данных (в стиле RS-232) к центральному процессору, и это значит, что скорость последовательного канала, количество бит старт/стоп и четности и процедура подтверждения связи должна соответствовать правильным значениям.
2. Когда, после нескольких проб и ошибок, связь установлена, мы можем начать посылать команды g-кода принтеру, чтобы проверить, работает ли все должным образом. Хорошая процедура калибровки должна включать проверку всех концевых датчиков, датчиков температуры (термисторов) и шаговых двигателей.
3. Когда все эти проверки пройдены, мы можем сделать выравнивание основания печати: в идеале – это платформа, которая является максимально плоской и параллельна осям, движущейся во всех направлениях печатающей головки. Чтобы добиться этого, пользователь должен двигать головку по всем направлениям, сравнивая ее вертикальное положение с платформой, и правильным уровнем последней, имеются в виду несколько винтов, поднимающих или опускающих четыре угла платформы.
4. После выравнивания, платформа должна быть тщательно очищена и покрыта необходимым видом поверхности: это может быть сделано одним или более слоями синей ленты (для PLA) или каптоновой лентой (для ABS), или подходящим материалом для других видов пластмассы.
5. Если мы собираемся использовать нить ABS, мы должны предварительно нагреть основание для печати (печатную платформу).
6. Следующий шаг требует загрузки нити: это потребует нагрева печатающей головки (т.е. сопла) и действия механизма экструдера: или вручную или путем активации шагового двигателя экструдера. После выдавливания небольшого количества пластмассы мы будем уверены, что сопло заполнено пластмассой, и готово к печати.
7. Теперь мы должны загрузить g-код для объекта, который мы хотим напечатать, отправив его посредством USB или сохранив файл на SD (или micro SD) карте, а затем загрузить его на принтере (если у него есть встроенное устройство считывания с карт – картридер).

8. Наконец, мы можем начать печать. Это был долгий путь, и мы заслужили отдых, и возможно даже кофе, пока мы ждем, когда принтер закончит, и из пластмассовой нити будет создан объект.

Время печати небольшого полого объекта, шириной несколько сантиметров может быть примерно 10-20 минут, в то время как для объекта размером с яблоко время ожидания может увеличить до одного часа и даже больше (это зависит от разрешающей способности, заполнения и скорости принтера). Печать больших объектов может занять 10 часов, а если они достаточно сложные или со сплошным заполнением, то процесс может длиться 50 и более часов…

В качестве предостережения. Оставлять 3D принтер без присмотра во время печати опасно, т.к. некоторые его детали будут постоянно оставаться при температуре 200°C или более, расплавленная пластмасса будет выдавливаться горячим соплом, в непосредственной близости от электричества, движущихся деталей, работающих двигателей и зачастую деревянной рамы, которая мало защищена от огня. Если что-то *пойдёт не так*, 3D принтер может быть столь же опасен, как лазерный принтер со всеми его горячими элементами.

Скорее всего, мы закончим лишь с большой кашей из пластмассы, которая мало похожа на нашу начальную модель[66] . И наконец, после нескольких попыток, наше вознаграждение – успешная распечатка нашей идеи, которая теперь стала реальным 3D объектом, после которого мы можем продолжить, ставя новые эксперименты с еще более лучшими результатами.

Идеальный результат / обычно получается /худший случай

Завершение

После того, как принтер закончил печатать объекта, стоит дать ему несколько минут, чтобы все его части остыли, а в случае с ABS будет намного легче отделить объект от основания. Затем, при помощи острого ножа или лезвия резака, вам придется удалить подложку и/или поддерживающие опоры.

В дополнение, хотелось бы отметить, если необходима глянцевая поверхность, то поверхность объекта можно отполировать при помощи наждачной бумаги (но осторожно, т.к. это может повредить гладкую поверхность), или химических растворителей (*т.е.* испаряющийся ацетон[67] для ABS и другие растворители[68] для PLA – осторожно, потому что некоторые химикаты очень ядовиты), нагреванием (имеется в виду горячая воздуходувка) или даже покрыть прозрачным или непрозрачным слоем краски.

Высота слоя 0.35 мм с обработкой в паровой ванночке

Высота слоя 0.1 мм

Высота слоя 0.35 мм

Заключение

Когда эта статья редактировалась, мне сказали, что неопытный человек, прочитав её до того, как успеет попробовать напечатать 3D-объект с помощью дешёвых технологий, придёт в уныние и уже не захочет пытаться. У него может сложиться впечатление, что это будет тяжёлый опыт, который скорее всего окончится полным провалом. Поэтому я чувствую необходимость внести поправку в это представление и ободрить всех читателей к тому, чтобы они приняли вызов. Я уверен, что всё пройдёт успешно, и они увидят истинное достоинство этой технологии — тот факт, что она доступна любому, у кого есть немного терпения и готовность узнать что-то новое.

3D печать в домашних условиях, при помощи недорогих машин, и возможно в будущем, с переработкой пластмассовых отходов[69] – действительно новинка даже для сегодняшнего технологического мира. Это также переворот в наших взглядах на самих себя: способность создать что-то новое, только при помощи нашего воображения и с помощью некоторых доступных и простых в использовании механических помощников (они наши друзья, потому что мы знаем все их внутренние механизмы). Мы знаем, что мы сможем открыть дверь в невероятное будущее индивидуально изготовленных устройств и новых приложений, которые сегодня мы не можем даже представить. Новый мир начнется с нас.

Примечание: Все цены и характеристики, упомянутые в этой статье, были проверены на момент написания (апрель 2013).

Благодарности

Автор хотел бы выразить благодарность Даниэлю Пьетроземоли (Daniel Pietrosemoli) за то, что открыл ему чудесный мир доступной дешевой 3D печати. Эрманно Пьетроземоли (Ermanno Pietrosemoli) за помощь в установлении канала связи между мной и Даниэлем. Энрике Канесса (Enrique Canessa) за его богатый поток идей, новых испытаний и его веры в силу научного подхода решить технические проблемы, возникающие во время 3D печати, некоторых довольно сложных математических объектов. Джонатана Гэтти (Jonathan Gatti) за его постоянную помощь и поддержку такой печати. И наконец, но не в конце, Гаю Фьйор (Gaya Fior), и её драгоценную поддержку и множество исправлений, которые она сделала к моему замысловатому итальянскому английскому, для того, чтобы собрать (вместе с Джонатаном и Эрманно) большинство моих принтеров, когда я был занят, готовя другой материал, а также исследования, которые она сделала по программам 3D моделирования и хранилищам моделей, которые я широко использовал для написания этой статьи.

Ссылки

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_printing
2. http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Stratasys
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering
6. http://en.wikipedia.org/wiki/Powder_bed_and_inkjet_head_3d_printing
7. https://archive.fosdem.org/2010/interview/adrian-bowyer
8. http://adrianbowyer.net
9. http://reprap.org
10. http://en.wikipedia.org/wiki/Maker_culture
11. http://bits.blogs.nytimes.com/2013/02/17/disruptions-3-d-printing-is-on-the-fast-track/
12. http://www.wired.com/design/2012/09/how-makerbots-replicator2-will-launch-era-of- desktop-manufacturing/all/
13. http://en.wikisource.org/wiki/Barack_Obama's_Fifth_State_of_the_Union_Address
14. http://www.sketchup.com
15. http://www.freecadweb.org
16. http://www.blender.org
17. http://labs.autodesk.com/technologies/fusion
18. http://www.openscad.org
19. http://pixologic.com/sculptris/
20. http://www.123dapp.com/design
21. https://tinkercad.com
22. http://www.3dtin.com
23. http://shapesmith.net
24. http://www.cubify.com/apps.aspx

25. http://www.thingiverse.com
26. http://www.123dapp.com/Gallery/
27. http://www.3dcadbrowser.com
28. http://grabcad.com/library
29. http://www.shapeways.com/gallery
30. http://sketchup.google.com/3dwarehouse/
31. http://www.3dvia.com/users/models
32. http://reprap.org/wiki/Build_A_RepRap
33. http://reprap.org/wiki/Rostock
34. http://www.ultimaker.com
35. http://printrbot.com
36. http://www.makerbot.com
37. http://www.solidoodle.com
38. http://www.pp3dp.com
39. http://cubify.com/cube/
40. http://blog.makezine.com/volume/make-ultimate-guide-to-3d-printing/
41. http://netfabb.com/basic.php
42. http://www.3daddfab.com/blog/index.php?/permalink/Automatically-Repair-STL-Files-in-2-Minutes-with-netfabb.html
43. http://3daddfab.com/blog/index.php?/permalink/Use-netfabb-to-Manually-Repair-STL- Holes-Edges-and-More.html
44. http://meshlab.sourceforge.net
45. http://www.shapeways.com/tutorials/polygon_reduction_with_meshlab
46. http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html
47. http://fabmetheus.crsndoo.com/wiki/index.php/Skeinforge
48. http://slic3r.org
49. http://kisslicer.com
50. http://wiki.ultimaker.com/Cura
51. http://www.makerbot.com/makerware/
52. http://solidoodletips.wordpress.com/2012/12/04/slicer-torture-test/
53. http://reprap.org/wiki/PLA
54. http://www.faberdashery.co.uk/products-page/
55. http://reprap.org/wiki/ABS
56. http://www.protoparadigm.com/blog/2013/03/testing-aqua-net-hair-spray-for-3d-printer- bed-adhesion/
57. http://www.ivanbortolin.it/?p=752 (in italian)
58. http://afinia.3dcartstores.com/ABS-175-mm-Filament--Color-Change-BlueGreen-to-YellowGreen_p_40.html
59. http://www.taulman3d.com/618-specifications.html
60. http://reprap.org/wiki/Polycarbonate
61. http://www.3ders.org/articles/20120101-experiment-polycarbonate-with-diy-3d- printer.html

62. http://www.filaco.com/product-info/
63. http://www.3ders.org/articles/20130204-wood-filament-laywoo-d3-suppliers-and-price-compare.html
64. http://www.tridimake.com/2012/10/shades-of-brown-with-wood-filament-via.html
65. http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0049365
66. http://www.thingiverse.com/thing:44267/copies
67. http://blog.reprap.org/2013/02/vapor-treating-abs-rp-parts.html
68. http://www.thingiverse.com/thing:74093
69. http://www.perpetualplasticproject.com/Perpetual_Plastic_Project/Project.html

Переводчики: Woolpit, fidller_fly, alex_itz, radical_dreamer, aks_id, Ainuriel

Роль свободного программного и аппаратного обеспечения в революции 3D печати

Марко Дзеннаро

Отдел научных публикаций,

Международный центр теоретической физики имени Абдуса Салама,

Триест, Италия

mzennaro@ictp.it

Сегодня ещё неизвестно, является ли настольная 3D-печать предвестником «Третьей промышленной революции», как предположили Джереми Рифкин[1] и Крис Андерсон[2]. Но это определённо одно из самых интересных направлений развития окружающих нас технологий. На следующих страницах мы хотим рассказать о роли открытого программного и аппаратного обеспечения в её успехе.

Открытые источники

Открытые источники (open source) – это подход к проектированию, разработке и распространению, предоставляющий реальный доступ к источникам продукта*

* (исходному коду, использованным материалам и т.д. – Прим. пер.).

Понятие открытые источники распространилось с появлением интернета, который дал доступ к разнообразным производственным моделям, каналам связи и интерактивным сообществам. Изначально это понятие применялось только по отношению к исходному коду компьютерных программ, но сейчас его используют и во многих других областях. Основа проекта с открытыми источниками – это сообщество.

Открытое программное обеспечение

Открытое программное обеспечение (Open Source Software)[3] можно определить как компьютерную программу с исходным кодом в понятном для человека виде; доступ к коду обеспечивается авторской лицензией (или, например, соглашением о переходе в общественное достояние), согласующейся с определением открытых источников[4]. Такие программы можно использовать, изменять, улучшать и распространять в исходной или изменённой форме.

Программное обеспечение с открытым исходным кодом — самый известный пример развития открытых источников, его часто сравнивают с пользовательским контентом.

Лицензирование

Лицензии на открытые источники определяют права и ограничения, которым должен следовать лицензедатель для использования, изменения и дальнейшего распространения открытого программного или аппаратного обеспечения.

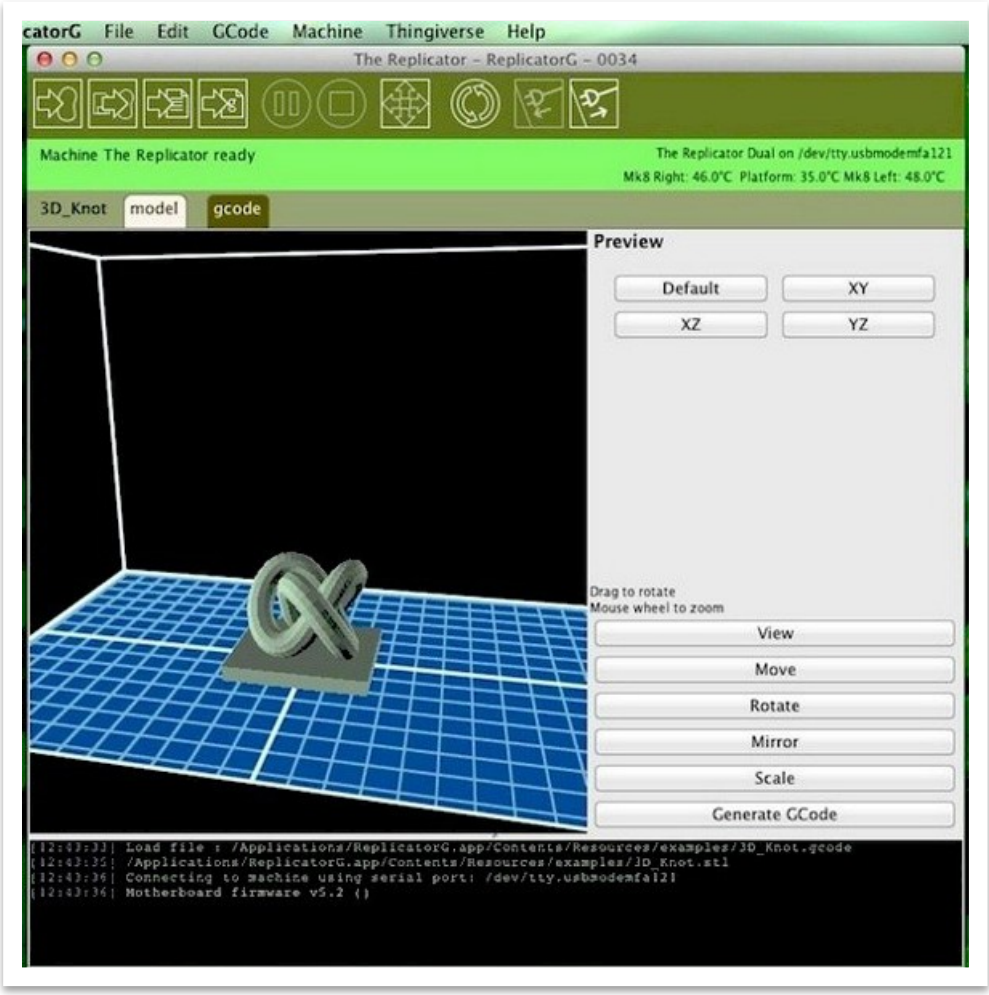
Универсальная общественная лицензия GNU (GNU GPL)[5] – самая распространённая лицензия для открытых источников. Самое известное ПО под этой лицензией – ядро Linux. В действительности под GPL вышло большинство программных модулей, вошедших в самые известные дистрибутивы Linux. Её широкая привлекательность в сообществе open source основана на том, что GPL относится к той категории лицензий для ПО с открытым исходным кодом, которая обязывает при распространении данного ПО в оригинальном или изменённом виде наделять его теми же условиями лицензионного соглашения, под которыми оно было получено. Таким образом, предоставляя право на использование, изменение и дальнейшее распространение программы, лицензия GPL требует от сторон расширить прописанные в ней права и условия на всех будущих пользователей программы.

Лицензия Creative Commons (CC)[6] используется в том случае, если автор хочет дать людям право делиться его работой, использовать её или даже пристраивать к своим собственным наработкам. Creative Commons предоставляет автору гибкие условия (к примеру, можно разрешить только некоммерческое использование своей работы) и защищает тех, кто распространяет авторскую работу, так что им не приходится волноваться о нарушении авторских прав до тех пор, пока они придерживаются указанных автором условий. Есть несколько видов лицензии CC, которые представляют собой разные комбинации условий распространения.

(Прим. ред. – В статье Википедии http://ru.wikipedia.org/wiki/Creative_Commons про эту лицензию обсуждаются варианты перевода, и упоминается что ни один из вариантов в нашей стране не прижился, поэтому читаем просто «крие́йтив ка́мэнс»)

Открытое программное обеспечение в 3D-печати на примере ReplicatorG

ReplicatorG[7] – простая программа 3D печати с открытым исходным кодом. Это – программное обеспечение может быть использовано на принтерах MakerBot Replicator, Thing-O-Matic, CupCake CNC, RepRap, или универсальном станке с ЧПУ (CNC). Программа способна обработать G-код или STL-файл; является кроссплатформенной (работает с Mac, Windows и Linux); легка в установке; в основе лежат знакомые среды разработки Arduino и Processing. ReplicatorG используется тысячами пользователей 3D принтеров MakerBot.



Интерфейс ReplicatorG частично позаимствован у Arduino

Благодаря открытой лицензии, ReplicatorG основывается на Arduino GUI (Graphical user interface) и предлагает простой в пользовании интерфейс для управления и работы RepRap-совместимых машин. Он подпадает под действие GNU GPL версии 2. Во вступительной части лицензии говорится:

> *Говоря о свободном программном обеспечении, мы имеем в виду именно свободу, а не безвозмездность. Наша универсальная общественная лицензия разработана, чтобы гарантировать вам право распространять копии свободного программного обеспечения (в том числе за деньги, если есть такое желание), получать исходный код, вносить изменения в программное обеспечение и использовать его части в новых свободных программах, а также право знать, что у вас есть все эти возможности.*
>
> *Чтобы защитить ваши права, нам приходится ввести ограничения, запрещающие кому бы то ни было лишать вас этих прав или просить вас отказаться от них. Эти ограничения налагают на вас определенные обязательства в том случае, если вы распространяете копии программного обеспечения или изменяете его.*
>
> *Например, если вы распространяете копии такой программы, будь то платно или бесплатно, вы обязаны передать новым пользователям все права, которыми сами обладаете. И убедиться, что они тоже, как и вы, получат исходный код или будут иметь возможность его получить. Вы также должны ознакомить их с данными условиями, чтобы они знали свои права.*

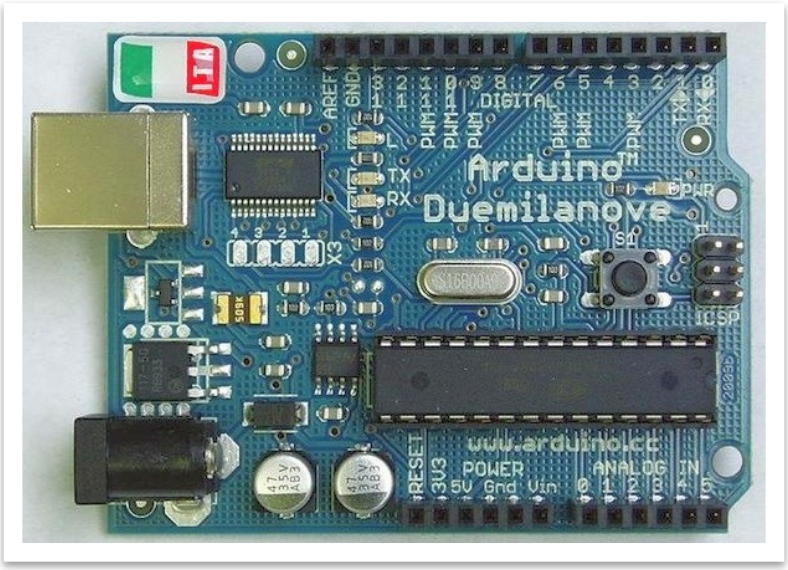
Открытое аппаратное обеспечение

Понятие открытое аппаратное обеспечение (Open Source Hardware)[8] относится к компьютерам и электронным устройствам, разработанным по тому же принципу, что и открытое программное обеспечение. Открытое аппаратное обеспечение – часть культуры открытых источников, которая переносит идею открытых источников в другие области, отличные от программного обеспечения. Это понятие начали использовалось для того, чтобы применить идею свободного доступа к информации в области разработки аппаратных средств, например, в отношении схем, перечней материалов и конфигураций печатной платы (часто для управления такими устройствами также используется открытое программное обеспечение). В дополнение к существующим лицензиям на ПО были предложены несколько новых, составленных с учётом специфики разработки оборудования. Один из примеров – лицензия на платы Baloon[9]. Лицензия даёт каждому право производить, продавать и распространять платы Baloon в неизменном виде или с какими-нибудь дополнениями и требовать за них любую цену.

Arduino

Самый известный пример открытого аппаратного обеспечения – это плата Arduino[10]. Arduino – детище международной группы из пяти инженеров: Массимо Банци и Джанлуки Мартино из Италии, Давида Картьеллеса Испании, а также Дэвида Меллиса и Тома Айго из США. Arduino была разработана Иврейским институтом интерактивного дизайна (Interactive Design Institute Ivrea – IDII) в Италии, чтобы помочь студентам создавать прототипы объектов, способных реагировать на входные сигналы.

Аппаратные средства Arduino полностью открыты (по лицензии CC), включая файлы разработки и спецификации, а также программы контроля (под GPL) и документацию (также под CC). Единственное, что не свободно в Arduino – это само название, которое является торговой маркой.



Плата Arduino

Плата Arduino, как видно на изображении слева, состоит из 8-битного микроконтроллера Atmel AVR с дополнительными компонентами, облегчающими программирование и внедрение в другие схемы. Важный элемент Arduino – это стандартизированные разъёмы, которые позволяют подключать к плате центрального процессора сменные модули расширения – так называемые *шилды*.

Одни шилды связываются с платой Arduino напрямую через контакты

разъёмов, другие могут получить индивидуальный адрес через последовательную шину I²C, что позволяет воткнуть в плату сразу несколько шилды и работать со всеми ними одновременно. Официальный Arduino использует микроконтроллеры серии megaAVR, а именно ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280, ATmega2560.

В аналогах Arduino используются и другие процессоры. Большинство плат содержат линейный регулятор на 5 В и кварцевый генератор на 16 МГц (в некоторых вариантах керамический резонатор), но некоторые устройства, такие как LilyPad, работают на 8 МГц и обходятся без встроенного стабилизатора напряжения благодаря определённым ограничениям форм-фактора. При этом на микроконтроллере Arduino предустановлен загрузчик, благодаря чему загрузка программ на чип флэш-памяти проходит проще, чем на других устройствах, требующих для себя внешнего программатора.

Открытые аппаратные средства и 3D-печать

Открытость Arduino означает, что эту микроконтроллерную плату можно найти во множестве устройств со свободными аппаратными средствами, включая 3D-принтеры.

Самый популярный сейчас (в 2013 году) настольный 3D-принтер — это оригинальный проект с открытыми источниками, основанный на принтере RepRap – Replicator фирмы MakerBot. В отличие от некоммерческого проекта RepRap, MakerBot (дата выхода – январь 2012 г.) не стремится к разработке самореплицирующегося принтера. Вместо этого технически усовершенствованный 3D-принтер получил в два с лишним раза больше пространства для печати, двойной экструдер, позволяющий создавать двухцветные модели, и дополнительную электронику, в том числе ЖК-дисплей и панель управления для прямого взаимодействия с пользователем без подключения к ПК. Replicator продаётся только в собранном виде. В сентябре 2012 года Makerbot Industries представила Replicator 2.

В новой версии 3D-принтера снова увеличилось пространство для печати, а ещё теперь он печатает слоями толщиной в 100 микрон. Двойного экструдера больше нет, но дополнительная электроника, ЖК-дисплей и панель управления остались теми же, что и у исходного Replicator. Встроенное ПО, программы рабочего стола и форматы файлов были в этой версии изменены для поддержки дополнительной точности и размера. В отличие от предыдущих моделей, Replicator 2 может печатать только полилактидом (ПЛА) и не включает в себя нагревательную платформу, специальный экструдер и настройки высокой температуры, необходимые для АБС-пластика. Replicator 2 продаётся только в собранном виде. Примерно в сентябре 2012 года компания заявила, что в новом Replicator 2 они «не будут делиться разработками аппаратной части и графического пользовательского интерфейса»[11]. Отход от модели открытых аппаратных средств вызвал критику части сообщества, включая соучредителя, а теперь бывшего сотрудника Закари Смита. Такое решение MakerBot объяснили реакцией на появление почти полного клона Replicator, названного Tangibot. MakerBot не стал полностью проприетарным (сохраняющим за собой монополию на использование, копирование и модификацию), поскольку исходники первого Replicator всё ещё открыты.

Общедоступное онлайн-хранилище MakerBot Thingiverse и сообщество хакеров остаются свободными и открытыми, в отличие от других розничных онлайн-магазинов для проектов 3D-печати.

Принтер LulzBot AO-100[12] от Aleph Objects был первым устройством, которое успешно прошло аттестацию «Respects Your Freedom» (англ. «Уважает вашу свободу») Фонда свободного программного обеспечения[13]. Эта программа аттестации аппаратных средств поощряет создание и продажу аппаратного обеспечения, которое не ограничивает вашу свободу, не вмешивается в личную жизнь и даёт гарантию того, что вы контролируете данное устройство. Aleph Objects была создана с мыслью, что люди должны свободно пользоваться устройствами, учиться на них, улучшать их и делиться своими улучшениями и новшествами с сообществом. Все их принтеры поставляются со схемами аппаратных средств, программным обеспечением и документацией под свободными лицензиями. Вы получаете всё: исходный код, документацию со схемами и спецификациями — всё, что нужно для контроля, наладки, ремонта и совершенствования любого аспекта работы принтера.

Ссылки

1. Jeremy Rifkin, The Third Industrial Revolution: How lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and World, Palgrave Macmillan, 2011
2. Chris Anderson, Makers: The New Industrial Revolution, Crown Business, 2012
3. http://ru.wikipedia.org/wiki/Открытое_программное_обеспечение
4. http://www.opensource.org/docs/definition.php
5. http://www.gnu.org/licenses/gpl.html
6. http://creativecommons.org/licenses/
7. http://replicat.org/
8. http://ru.wikipedia.org/wiki/Открытое_аппаратное_обеспечение
9. http://www.balloonboard.org/licence.html
10. http://www.arduino.cc
11. http://www.makerbot.com/blog/2012/09/24/lets-try-that-again/
12. http://www.lulzbot.com/company
13. http://www.fsf.org/resources/hw/endorsement/respects-your-freedom

Переводчики: aks_id, alex_itz, Woolpit

Plug and play, наборы для сборки и готовые 3D принтеры

Гая Фьор

Отдел научных публикаций

Международный центр теоретической физки Абдуса Салама, Триесте, Италия

сайт 32b.it

gfiorfior@gmail.com

На момент написания этой книги (апрель 2013 г.) производители дешёвых 3D-принтеров заполонили рынок несметным количеством товаров — буквально сотнями моделей разной функциональности и цены.

Определив, какая из них больше подходит для наших нужд, во многих случаях мы снова окажемся перед выбором: купить принтер полностью собранным или в виде набора для сборки, т.е. комплекта из двигателей, осей, приводов, гаек, болтов и других аппаратных средств с более или менее подробными инструкциями для монтажа всего этого в (будем надеяться) функционирующее устройство.

На рынке есть и третий тип дешёвых 3D-принтеров, который называется «Plug'n'play» (англ. «Подключил и работай»). Метка Plug'n'play раньше стояла только на очень дорогом «профессиональном» оборудовании, а сейчас появилась и в дешёвом сегменте, на 3D-принтерах стоимостью меньше 1000€. Такие принтеры обычно выглядят более усовершенствованными, они сконструированы так, чтобы свести к минимуму возможность ошибки пользователя... но вместе с тем и его свободу. Интерес к 3D-печати так велик, что многие проекты на *Kickstarter*[1] и *Indiegogo*[2] (т.е. общественно финансируемые проекты, размещённые на двух очень популярных веб-сайтах), каким-либо образом связанные с этой темой, собирают гораздо больше денег, чем хотели. 3D-принтер RoBo (410€) получил 1300% от запланированной суммы[3]. Его описали как «3D-принтер с открытыми исходниками, которым можно пользоваться независимо от

Набор для сборки и полностью собранный CB-printer

уровня знаний и навыков», «простой в использовании, лёгкий в сборке».

Cubify рекламирует[4] свой принтер Cube (1080€) так: «*Простота plug and play: оценен журналом MAKE как "самый простой в использовании" и "самый надёжный" 3D-принтер. Прямо из коробки — вы можете сразу начать настройку Cube. Просто включите его и вперёд. Единственный 3D-принтер, признанный безопасным для домашнего использования взрослыми и детьми*».

Up! PP3DP (Up! Mini 709€, Up! Plus 1183€) заявляет[5]:«*В основе Up! Mini — простота традиционного струйного принтера. У него всегда готовая к работе печатающая головка, выдвижная печатная платформа и пристёгивающаяся бобина с материалом. У вас есть всё, чтобы приступить к реализации своих великих замыслов в практичных трёхмерных моделях из прочного АБС+-пластика*».

Обратная сторона решений plug and play — ограниченные возможности изменения параметров печати объекта. На таких принтерах часто стоит фирменный софт, который делает их использование проще за счёт сокращения настраиваемых параметров. Например, клиентское ПО Cubify[6] регулирует заводской настройкой толщину слоя, скорость печати и расходные материал. И хотя эти значения могут быть идеальными для печати объектов, представленных на фирменном сайте, они выступят ограничениями, как только пользователь перейдёт от первых простых примеров к чему-то более сложному.

Некоторые принтеры типа plug-and-play работают только с фирменными картриджами пластиковой нити, которые гораздо дороже обычных бобин и предлагают на выбор намного меньше цветов.

Если не принимать во внимание принтеры типа plug-and-play (что я советую сделать, если вы видите в 3D-печати нечто большее, чем просто модное веяние), ассортимент устройств всё равно остаётся широким, к тому же у многих производителей можно выбрать между готовым принтером и набором для сборки.

В чём их главные отличия?

Цена

Очевидно, что готовый принтер будет стоить дороже, чем набор для сборки, уже просто потому, что сборка требует трудовых затрат.

Разница в цене может быть огромной. Судя по найденным нами примерам — от 13% до 42% для смонтированной и калиброванной версии. Купив набор для сборки, вы сэкономите приличную сумму денег.

	DIY kit	assembled and calibrated	difference	percentage difference
Airwolf 3d	€ 1.022	€ 1.337	€ 315	31%
Ultimaker	€ 1.194	€ 1.699	€ 505	42%
Portabee	€ 387	€ 505	€ 118	30%
rapidbot	€ 699	€ 829	€ 130	19%
cb printer	€ 1.550	€ 1.750	€ 200	13%
printrbot junior	€ 315	€ 394	€ 79	25%
MakerGear M2	€ 1.163	€ 1.400	€ 237	20%
Felix 2.0	€ 999	€ 1.399	€ 400	40%

Сравнение цен на готовые 3D-принтеры и наборы для сборки.
Цены взяты с сайтов производителей в апреле 2013 года.

Но дело не только в экономии пары сотен долларов. Сборка своего собственного принтера даст возможность глубже понять принцип его работы. Это пригодится нам, когда мы (рано или поздно) не сможем получить от него то, что хотим. К тому же даже превосходно работающие принтеры нуждаются в регулярных калибровках: возможно, потребуется подтянуть ремни или выровнять печатную платформу, чтобы объект надёжно держался на её поверхности и печать не искажалась.

Плюс множество настроек, которые придётся делать ещё чаще: потребуется калибровка осей, засорится экструдер или возникнет необходимость отрегулировать проталкивающий нить механизм, чтобы подача стала более плавной.

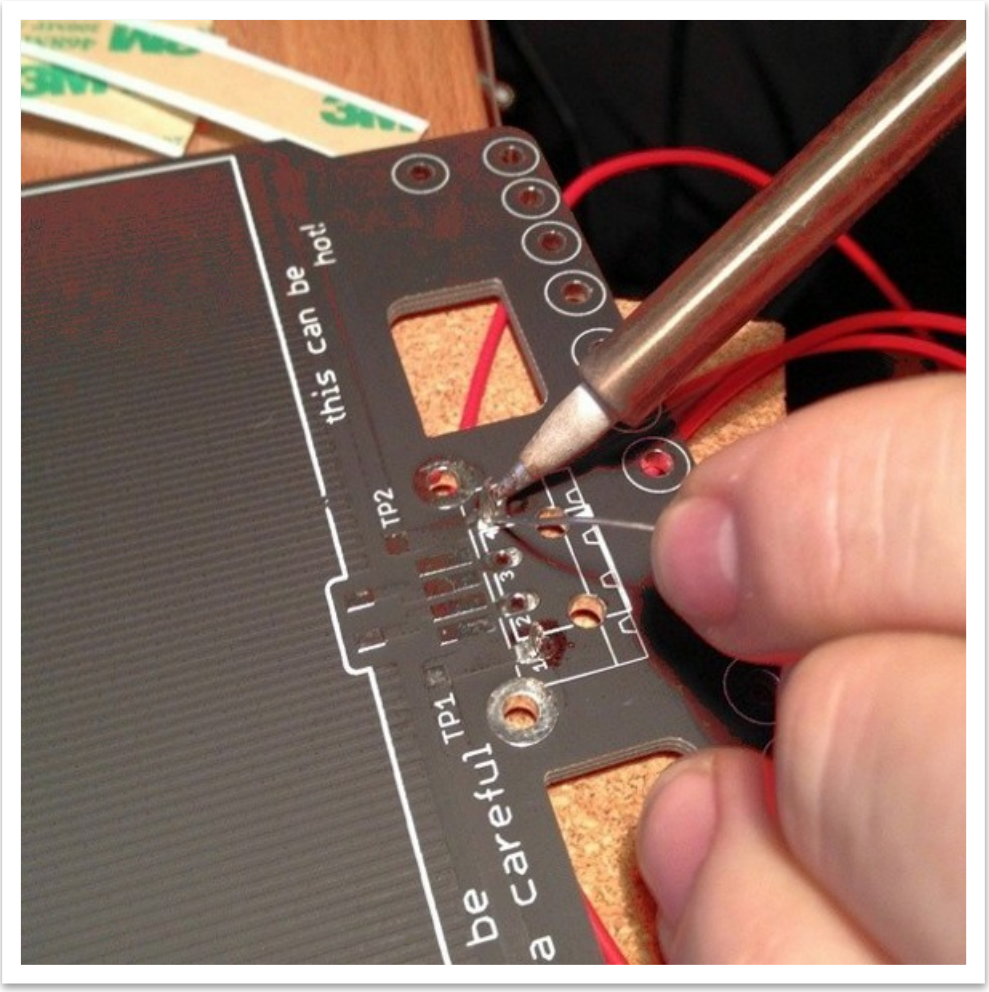
Всё это и многое другое — обычные вещи[7], которые могут случиться с принтерами любого класса, в том числе с теми, о которых заявляют: «...мы убираем барьеры на пути к 3D-печати, поставляя каждое устройство полностью собранным и готовым к печати прямо из коробки»[8].

Покупка собранного и калиброванного принтера не защищает пользователей от этих проблем, потому что они в равной степени могут произойти как с полностью готовым принтером, так и с его версией DIY (Do-It-Yourself т.е. "Сделай сам"). Анализируя информацию на форумах, которые производители создают для поддержки своих пользовательских сообществ, вы наверняка найдёте многие проблемы (и успешные решения), возникающие в ходе

использования принтера, и получите более полное представление о том, что следует ожидать от этой покупки.

Время сборки и технические сложности

Наборы обычно продаются с уже припаянными электронными деталями, нужно «всего лишь» собрать механические части. Для некоторых наборов понадобятся ручные и электрические инструменты, а иногда и навыки пайки. Это может вызвать сложности или, по крайней мере, привести к покупке новых инструментов. В большинстве наборов точно указано, что нужно для сборки. Часто к ним прилагается несколько отвёрток, шестигранников или гаечных ключей нужного размера.



Пайка нагреваемой платформы принтера PortaBee

У первых компаний ещё было время на то, чтобы доработать схему монтажа и тем самым упростить использование устройства. Так, для сборки Ultimaker[9] (продаётся с мая 2011 г.) нужно всего два шестигранника (один из них уже есть в наборе) и разводной гаечный ключ. Для более нового CB-printer[10] (первые прототипы появились в августе 2012 г.) уже потребуется широкий набор инструментов, в том числе молоток, плоскогубцы, полный набор отвёрток,

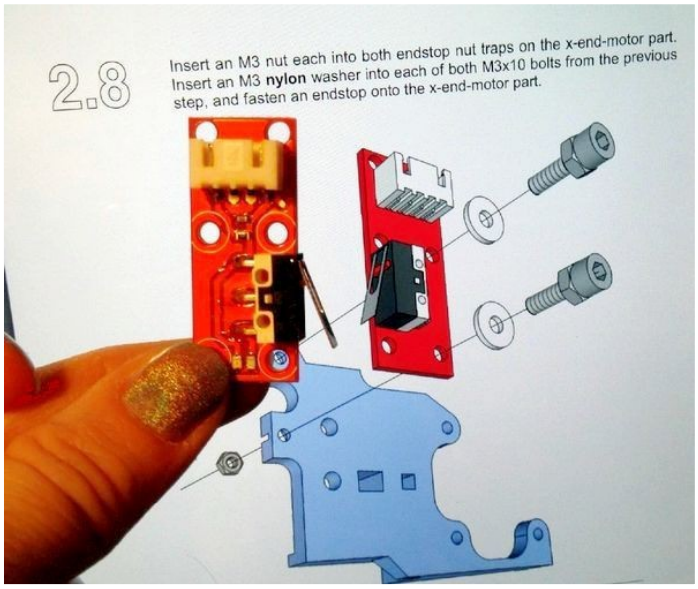
шестигранников и гаечных ключей, клепальный молоток, напильник, клей... и фантазия, чтобы понять скудные инструкции.

Как правило, для полного монтажа принтера надо сделать много мелких действий, описание которых часто оказывается разбросанным по разным частям руководства по сборке. В хороших руководствах указывается примерное время, необходимое на каждый этап сборки, а пользователей просят присылать отзывы, чтобы уточнить описание. Как правило, на полную сборку уходит от 6 до 20 часов, в зависимости от сложности принтера и технических навыков. Чтобы не прогадать, я рекомендую выделить на это дело целые выходные и учесть, что нужна большая чистая поверхность и полный порядок. Вам придётся монтировать огромное количество мелких деталей, и потеря важного компонента, с которым вдруг решит поиграть ваш кот, может привести к разочарованию во всей затее.

Документация

У некоторых относительно старых компаний, таких как Ultimaker, есть очень подробная вики-документация[11] с фотографиями и пошаговыми инструкциями для сборки. Также весьма полезны пользовательские комментарии и поиск видео процесса сборки — они помогают понять сложные моменты.

Часто бывает так, что к самым первым версиям принтера делают очень подробную документацию, но при выпуске новых наборов для сборки её не обновляют. Это ужасно сбивает с толку, потому что новые детали в наборе не совпадают с теми, которые описаны в руководстве. Пока разберёшься в проблеме, потеряешь кучу времени.



Разница между документацией и реальными компонентами

В то время как к самым распространённым моделям принтеров обычно можно найти много официальной и неофициальной документации, у развивающихся компаний иногда нет времени на что-то другое, кроме актуального проекта, и поэтому они предлагают только схематичные инструкции, не учитывающие проблемы, с которыми может столкнуться пользователь. Если обычный поиск по сети не даёт возможности понять, как происходит сборка, и если вы не можете найти пользовательские обзоры и отзывы об устройстве, это плохой признак, который стоит учесть при выборе принтера.

Рекомендации

Часто за новым 3D-принтером стоит довольно молодая и неопытная команда инженеров и программистов, у которых мало или совсем нет опыта в торговле. Поддержка пользователей может происходить с полным энтузиазмом или наоборот, приносить одно разочарование, но в любом случае очень важно внимательно проверить содержимое покупки, как только вы её получите. Сборка принтера, несомненно, будет трудоёмкой. В зависимости от того, сколько у вас свободного времени, на выполнение задачи может потребоваться целый месяц. В двух разных случаях мы выяснили, спустя почти месяц после прибытия коробки, что в ней чего-то не хватает. В первом случае, когда не оказалось инструкции и её нечем было заменить, поскольку не было никакой онлайн-документации, производитель отправил нам курьерской доставкой компакт-диск, а по электронной почте файл PDF. Во втором случае, когда не хватало нескольких деталей, компания ткнула нас носом в условия предоставления услуг, где было написано, что у пользователя 14 дней после даты доставки на то, чтобы сообщить о недостающих деталях, и вынудила нас заплатить за компоненты, пропавшие по её вине.

Проверка компонентов набора чрезвычайно важна и сохранит деньги и время, когда вы приметесь за его сборку.

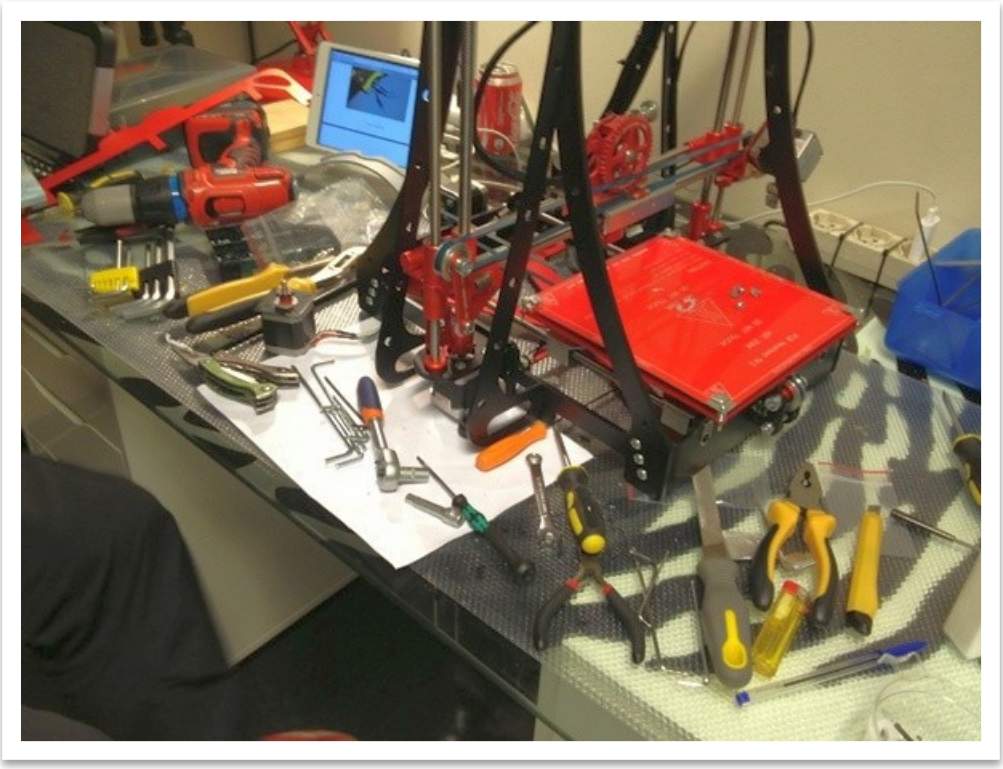
Сборка Ultimaker

Заключение

Когда волнение от распаковки угаснет и перед вами окажется огромная куча деталей, которые должны быть соединены в функционирующее устройство, безусловно, может

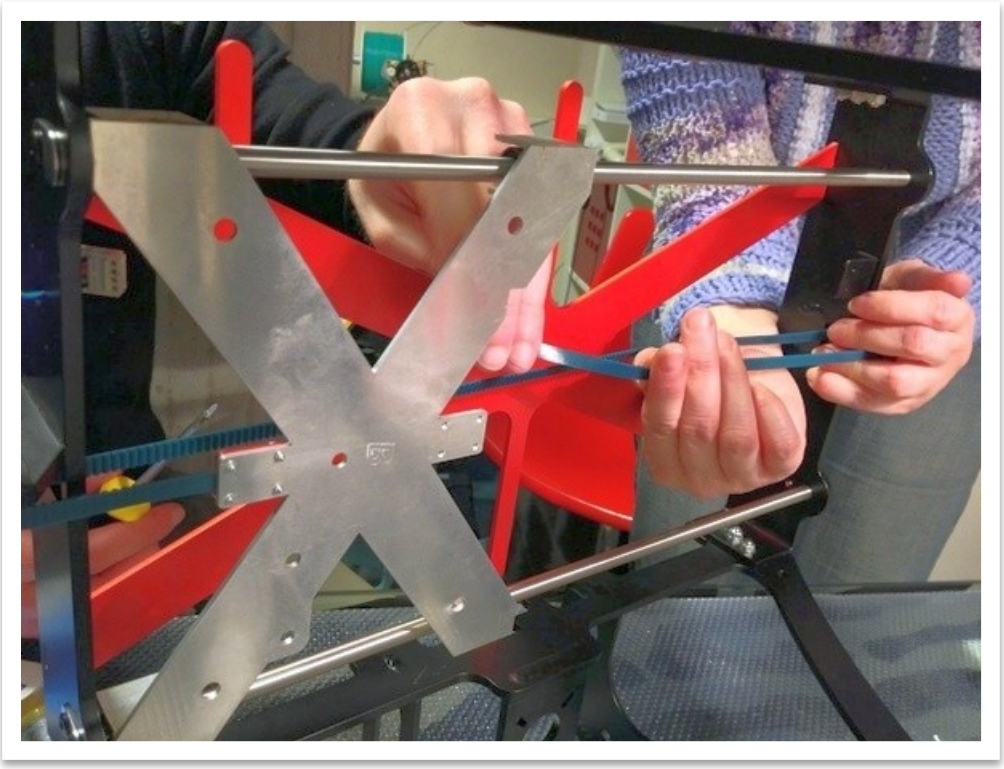
возникнуть чувство ужаса или, по крайней мере, собственной неполноценности. Но если у вас есть время и терпение собрать свой 3D-принтер, то это будет наилучшим выбором по сравнению с покупкой готовой модели. Принтер, скорее всего, придётся часто настраивать и корректировать и иногда покупать компоненты для замены или, быть может, усовершенствования каких-нибудь деталей. Собрав его своими руками, мы получим знания, которые будут необходимы для решения всех этих грядущих проблем и послужат нам подспорьем при усовершенствовании его функций.

Хотя покупка готового устройства, несомненно, приблизит тот момент, когда мы приступим к печати, и поначалу всё упростит, она не поможет решить все эти грядущие проблемы, которые всё равно возникнут.



Набор инструментов, использованный для сборки CB-printer

В качестве предостережения: если вы не уверены в своих навыках сборки, примите во внимание, что гарантия производителя на готовый принтер и на набор для сборки может отличаться. На сайте одного из поставщиков это сформулировано так [12]: «Пожалуйста, поймите, что мы не можем и не будет гарантировать исправную работу конечного продукта, собранного пользователем».



Когда двух рук недостаточно

Ссылки

1. http://www.kickstarter.com
2. http://www.indiegogo.com
3. http://www.kickstarter.com/projects/1682938109/robo-3d-printer
4. http://cubify.com/cube/
5. http://www.pp3dp.com
6. http://hothardware.com/Reviews/The-Definitive-3D-Printer-Roundup-Cubify-Up-Solidoodle/?page=2
7. http://therealtonystark.blogspot.ca/2013/04/solidoodle-2-review.html
8. http://www.solidoodle.com
9. http://wiki.ultimaker.com/Mechanics_build_guide
10. http://cb-printer.com/pl/
11. http://wiki.ultimaker.com/Mechanics_build_guide
12. ~~Ultimaker kit disclaimer: https://shop.ultimaker.com/en/ultimaker-kits/ultimaker-kitnew.html?options=cart~~ (ссылка устарела - Прим. пер.)

Переводчики: aks_id, kindra

RepRap, Slic3r и будущее 3D печати

Алессандро Ранеллуччи

RepRap/Slic3r, Италия

alessandro@unterwelt.it

Краткая хронология проекта RepRap

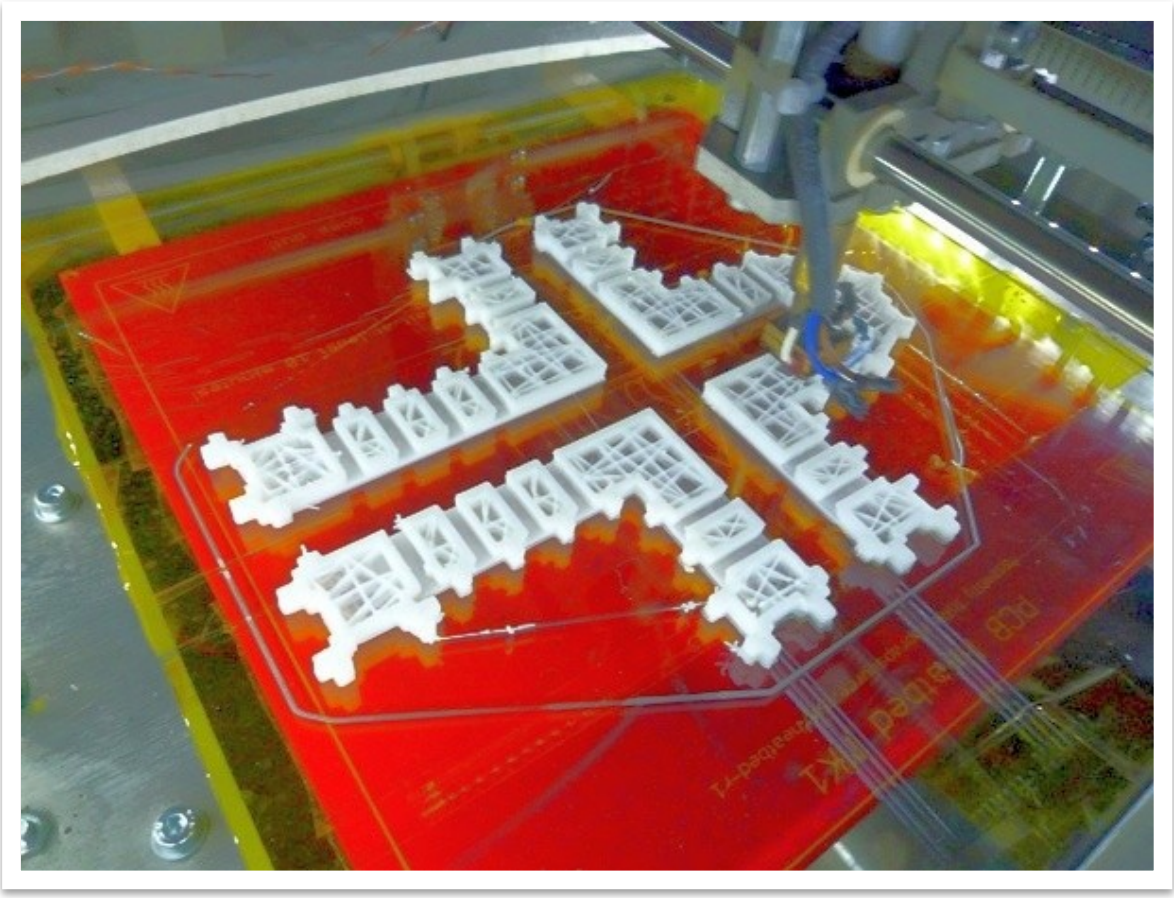
Проект RepRap стартовал в 2004-м, когда Адриан Боуйер (Adrian Bowyer), старший преподаватель Батского университета, предложил идею самовоспроизводящегося устройства, способного изготовить большинство деталей, необходимых для сборки точно такого же устройства. Основная задача состояла в том, чтобы найти технологию, подходящую для создания элементов механики и конструкции, а также электроники и ремней. Технология быстрого прототипирования к тому времени уже существовала много лет, для неё были нужны дорогие, патентованные профессиональные машины, которые использовали аддитивные техники создания цельных объектов. И всё же использование таких машин было единственным приемлемым способом создания частей для первого самовоспроизводящегося устройства. Значит, само устройство нуждалось в дешёвой и простой технологии, чтобы делать то же самое (что и дорогая машина прототипирования — Прим. пер) и производить «дочерние» устройства.

Идея Боуйера возымела большой успех, и небольшая команда начала работу над проектом. Физически они обычно располагались в Батском университете. Между 2006 и 2008 годом спроектировали первый опытный образец, способный печатать свои собственные детали: RepRap Darwin. За ним последовали другие версии (Mendel и Huxley), но ситуация стала меняться. В 2010-м вокруг проекта образовалось весьма обширное сообщество людей, которые обменивались своими моделями и отзывами через интернет. Проект RepRap начал развиваться независимо от основной команды. Люди стали экспериментировать с разными подкомпонентами машины: каркасом, электроникой, программным обеспечением, материалами и объектами, пригодными для печати. Проект уже не двигался в едином направлении, и первоначальная команда больше не выпустила ни одного официального устройства.

На самом деле это было второй, неофициальной целью доктора Боуйера — дать начало естественному, дарвиновскому процессу спонтанной и широко ветвящейся эволюции. Каждый индивидуум отобрал одни элементы, внедрённые в проект разными людьми, и отбраковал другие: это поистине эволюционный процесс. В современных 3D-принтерах мы могли бы различить вклады десятков людей в каждую из его частей: электронику, систему подачи нити и всё остальное — спонтанно выбранные за качество, удобство, простоту использования, прочность или универсальность.

Важное изменение произошло осенью 2011 года, когда молодой Йозеф Пруша (Josef Průša) пустил в обращение свой Prusa Mendel. Он сказал, что это Ford Model T (первый по-настоящему массовый автомобиль в истории — *Прим. ред.*) в 3D-печати, так как в нём были сильно упрощены

детали конструкции. Для Prusa Mendel по большей части были нужны детали, продающиеся в местных магазинах, поэтому он быстро стал самым известным принтером в мире.



Принтер RepRap печатает архитектурную модель из АБС-пластика

Проект RepRap сегодня

Последствия быстрого распространения проекта RepRap в мире огромны и затрагивают далеко не только ограниченное сообщество, вовлечённое в сам проект. Наличие столь недорогих устройств позволило реализовать другие проекты, вдохновило движение «творцов», способствовало распространению лабораторий fab lab (мастерских, участники которых могут изготавливать необходимые им детали на общих станках с ЧПУ – *Прим. ред.*) и разработке плат типа Arduino. Оно даже открыло новые экономические ниши: производство комплектующих и расходных материалов, продажа готовых принтеров и наборов для сборки, услуги печати по запросу, центры поддержки, обучающие курсы и даже магазины.

Сегодня существуют десятки или даже сотни принтеров. Они все произошли от проекта RepRap вышеописанной дарвиновской эволюцией. Одни из них продаются компаниями, другие полностью с открытыми исходниками, и значит, доступны любому, кто хочет держать исходники деталей у себя и производить их.

Проект RepRap очень активен, благодаря тысячам активных людей, но ему очень не хватает какой-нибудь формы централизации, генеральной линии, общих целей или официальных

проектов. Предпочтительные средства коммуникации — это IRC-чат (#reprap на FreeNode) и официальный форум, в то время как блог проекта фиксирует лишь некоторые важные новости сообщества. Даже вики, будучи одним из многих инструментов совместной работы, не содержит достаточно документации, чтобы отследить каждую разработку в области RepRap.

RepRap уже отождествляется не столько с проектом, сколько с экосистемой, в которой множество субъектов действуют в согласии с принципами открытого аппаратного обеспечения и используют для обмена знаниями свободные, открытые, сохраняющие права копирования, лицензии.

Характеристики 3D-принтеров RepRap

Принтеры RepRap основаны на технологии послойного наплавления, которая представляет собой процесс плавки пластиковой нити и нанесения расплавленного материала на уже готовые слои из того же материала. В том, что касается «железа», эти принтеры очень схожи: инструмент перемещается в пространстве в соответствии с декартовой или недекартовой системой и способен добраться до любой точки XYZ в области печати. Этот инструмент — экструдер, который расплавляет термопластики и проталкивает их через маленькую насадку (сопло), слой за слоем создавая объект. Такие устройства обычно работают с объёмами 20-30 куб.см, хотя не так уж и сложно построить принтеры большего масштаба для печати более крупных объектов. Тем не менее есть несколько проблем с крупномасштабной печатью: во время тепловой усадки большие объекты, особенно из АБС-пластика, могут растрескаться или деформироваться, а процесс печати может растянуться на несколько дней, что рискованно, поскольку любой сбой приведёт к перезапуску всей печати. Операторы обычно делят большие объекты на более удобные блоки, которые можно собрать вместе.

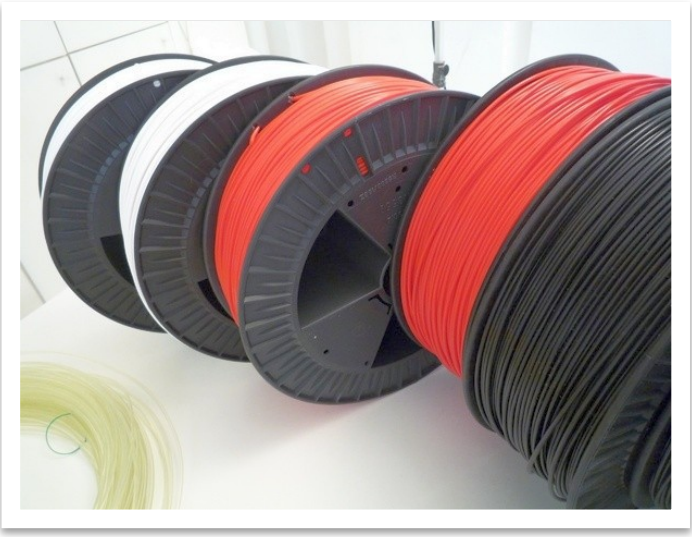
В то время как основной принцип у всех принтеров остаётся общим, механика развилась в соответствии с любой возможной комбинацией: печатная платформа зафиксирована или скользит по одной оси, или движется по двум и даже трём осям. Декартовы роботы с отдельным двигателем для каждой оси иногда заменяются недавно представленной новой концепцией дельта-робота, в котором три манипулятора на 120° соединены универсальными шарнирами.

Доступна и разнообразная электроника, есть много продуманных вариантов, в том числе решения на основе Arduino и узкоспециализированные платы на базе микроконтроллеров Atmel или ARM. Исследования, связанные с электроникой, до сих пор имели несколько основных целей: стоимость, тепловая оптимизация, простота самопроизводства, поддержка ЖК-экранов или устройств для чтения SD-карт, поддержка нескольких экструдеров, модульное построение, вычислительные мощности.

Большинство доступных плат имеют открытые источники, и их разработка обычно поддерживается компаниями, которые их продают. Материалы, используемые в технологии послойного наплавления, тоже постоянно эволюционируют. Доступны несколько термопластиков, включая ПЛА (производится из кукурузного крахмала или сахарного тростника), АБС-пластик (широко известный пластик, используемый в большинстве промышленных изделий), нейлон, поликарбонат. «Деревянная» нить тоже есть. У этих

материалов разные физические и механические свойства, их температура плавления охватывает диапазон от 170°C до 300°C, в зависимости от материала, цвета, производителя.

Обратите внимание, что развитие пригодных для печати материалов контролируется промышленными инвестициями коммерческих компаний, обслуживающих рынок 3D-печати. Сообщество не вовлечено в такого рода эксперименты, а к производству материала почти никогда не применяется философия открытых источников.



Катушки PLA-пластика на 3 мм для принтеров RepRap

Появление Slic3r

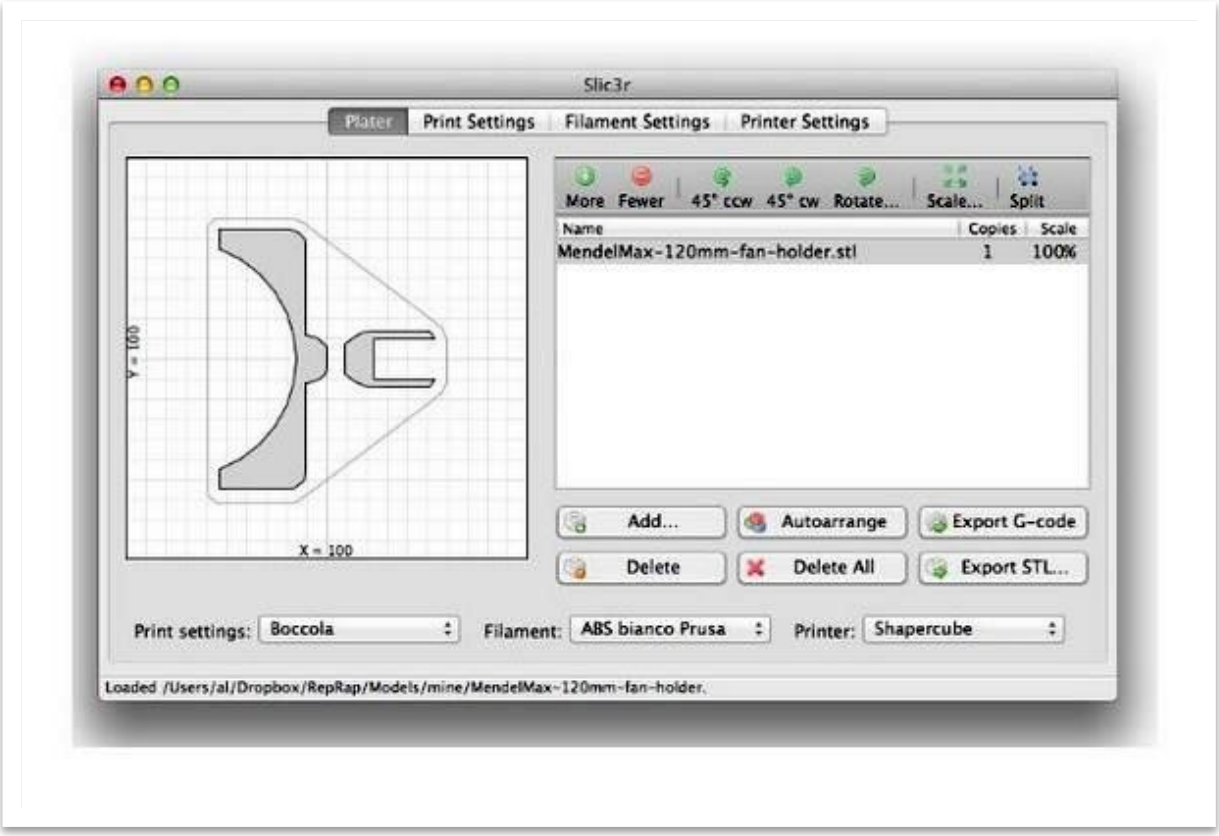
Если механика и электроника — непременные составляющие 3D-печати, воздействующие на её скорость, возможности и точность, то программное обеспечение — незаменимое дополнение. Без программ такие механизмы не могли бы ничего двигать или создавать. Машинная логика находится в программном обеспечении, именно оно определяет стратегию координации приводов, экструдера и вентиляторов, необходимую для получения заданного результата. Программное обеспечение отвечает за то, чтобы конечный результат соответствовал ожиданиям оператора.

Slic3r появился в конце 2011, как попытка заменить существующее программное обеспечение, не подходящее больше для стремительно развивающегося проекта RepRap. Возникла необходимость в улучшенном инструменте, сочетающем в себе простоту использования и реального применения основной частью пользователей, которая объединяет множество людей, не принадлежащих к определенному сообществу, а так же соответствовать скорости развития механики и электроники. Программное обеспечение было критическим элементом, так как не позволяло извлекать из новых разработок наибольшую пользу.

Одним из примеров является быстродействие: в то время как развитие других компонентов (ремней, двигателей, приводного механизма шагового двигателя, втулок) уже привели к высокой точности, а хорошая пластиковая нить была доступна для регулярного приобретения, но программная обработка сложной детали (например, при высоте уровня 0,1мм) занимало несколько часов. Много времени поэтому уходило на ожидания между тестированиями, препятствущими хорошей калибровке. Нехватка хорошего программного обеспечения послужило причиной отставания в развитии со стороны 3D печати с высоким разрешением.

Обратите внимание, что быстродействие, фактически, не было одной из основных целей Slic3r, тем не менее, он (Слайсер) обеспечил достаточное быстродействие (примерно 100x

предыдущей), и сообщество получило возможность тестировать свои принтеры с высоким разрешением печати, таким образом, поднимая планку качества.



Графический интерфейс Slic3r. После размещения модели на компоновочной плоскости, оператор выбирает совокупность параметров, необходимых для работы слайсера

Основная цель, управляющая разработкой Slic3r, была в получении хорошо написанного программного обеспечения, а не результата многократных исправлений; чистого прокомментированного кода, также инструмента тестирования, который был бы основой для более стремительного развития и тестирования новых идей, таким образом отражая развитие со стороны аппаратного обеспечения. Простота использования также была среди исходных целей, так как пользователям был необходим простой интерфейс с ограниченным количеством опций, обеспечивающих хорошую печать, независимо от большого разнообразия аппаратных настроек.

Slic3r достиг этих целей, сделав 3D печать простой и доступной для большинства пользователей: хорошие результаты были получены, как раз установкой некоторых значений, которые было легко понять и измерить. . Тем не менее, позже возникла необходимость в большем количестве параметров конфигурации, чтобы поддерживать новые функции и соответствовать растущим ожиданиям пользователей (вызванные появлением Slic3r).

Влияние Slic3r в мире 3D печати зашло дальше сокращения времени обработки. Несколько новых опций сподвигли сообщество работать над новыми идеями, такими как оснащение машин двумя или более экструдерами. Этот прием позволил делать многоцветные объекты или объекты из разных материалов; использование разных материалов в одной печати позволяет

использовать больше удаляемых поддерживающих материалов. Еще одно применение возможностей мультиэкструдера – это использование сопла с маленьким отверстием для внешних видимых деталей и сопла с большим отверстием для быстрого внутреннего заполнения.

В более новые опции Slic3r включена возможность экономить время и материал. Время печати можно сократить, используя более толстые слои для внутреннего заполнения, но для видимых деталей использовать слои потоньше. Сократить расход материала можно, если настроить Silc3r для печати заполнением только в местах, где требуется поддержка перекрытий объекта. Позже была добавлена опция, позволяющая сочетать слои разной толщины в одном объекте.

Напоследок, но не менее важное, в Slic3r включена методика охлаждения, которая регулирует как охлаждающие вентиляторы (их скорость вычисляется в соответствии с потребностями) так и динамику скорости печати (автоматически понижается в небольших участках).

Как Slic3r работает

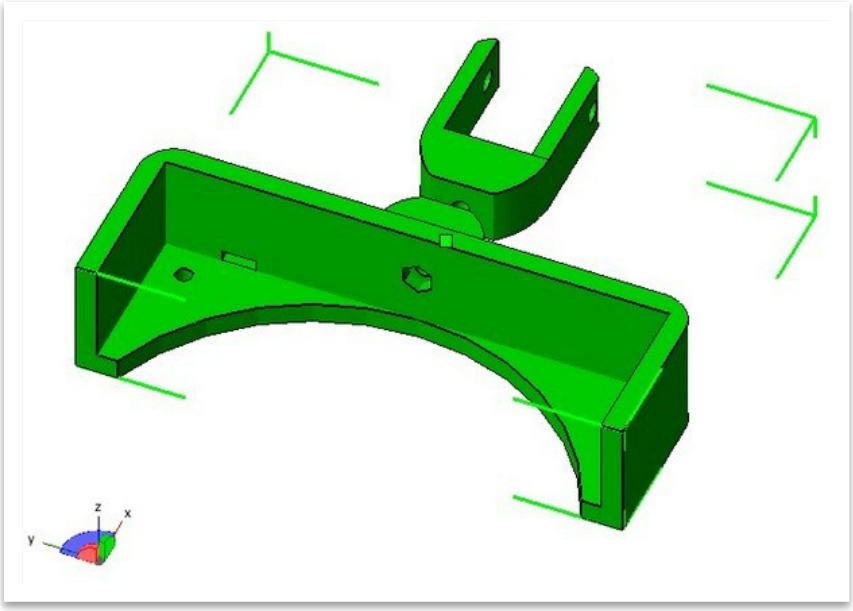
Slic3r принадлежит к категории программ CAM (Computer-aided manufacturing – автоматизированная система управления производством), которая является дополнением к CAD. Объект, спроектированный в CAD, затем обрабатывается в CAM для формирования машинных инструкций. CAM-программа знает параметры отдельной машины и используемого материала. Каждой производственной технологии требуется своя система CAM: фрезеры, токарные станки, 3D принтеры, и т.д.

Основное понятие технологии быстрого прототипирования, включая наше изготовление расплавленной нитью, – это слой. Объект разделяется на горизонтальные слои согласно указанной толщины. Более тонкие слои допускают большую разрешающую способность (подумайте о менее заметных ступеньках на наклонной поверхности), но потребуется больше времени для печати. Понятие слоя дает возможность аддитивной технологии сделать любую форму, включая вогнутые формы или даже замкнутые объемы, содержащие внутри твердые тела. Субтрактивные ЧПУ станки не способны делать такие объекты.

После формирования слоев объекта, как совокупности горизонтальных сечений, Slic3r генерирует траекторию движения инструмента для каждого слоя. Также, для каждой траектории движения Slic3r рассчитывает, сколько материала потребуется и какую скорость нужно использовать, а также насколько сильное охлаждение требуется.

Траектории настраиваются несколькими способами, от этого зависит толщина стенок и внутренняя плотность, выражаемая коэффициентом плотности (плотность 40% дает очень

хорошую механическую прочность, при этом 60% объема заполнено воздухом,). Есть и другие способы повлиять на заполнение, характеристики поддерживающего материала, температуру.



STL модель механической детали, подготовленная к печати.

Slic3r понимает форматы STL, OBJ и AMF, в которых описаны сплошные треугольные сетки. Важно, чтобы входные модели были пригодными и двумерно многообразными (это значит, что их топология должна быть правильной, однозначно сплошной, без отверстий и самопересечений). Slic3r выгружает файл с G-кодом, который будет управлять машинными компонентами.

Сообщество и финансирование моделей.

Проект Slic3r – открытый ресурс и основан на лицензии AGPLv3. Разработка открыта и она пользуется совместными платформами, такими как IRC канал обмена информацией и репозиторий на платформе GitHub, где прослеживается каждая проблема или задача. Сообщество обеспечивает хорошо распространенную систему испытания smoke-testing (прим. перевод.: smoke test – в тестировании программного обеспечения означает минимальный набор тестов на явные ошибки. Дымовой тест обычно выполняется самим программистом; не проходящую этот тест программу не имеет смысла отдавать на более глубокое тестирование.), таким образом, сотни людей проверяют все изменения и сообщают свои результаты с подробными описаниями и картинками. Ошибки могут быть выявлены и быстро исправлены.

Проект извлекает выгоду из массового финансирования, идущего из двух явных направлений: с одной стороны это добровольные взносы пользователей, а с другой, это официальные спонсорские соглашения.

Поставщики принтеров и производители нити (прежде всего LulzBot, который оказывает ежемесячное финансирование, а также TrinityLabs, SeeMeCNC, RepRapDiscount, Wasp и другие), способствуют финансированию проекта. Такие компании считают существование проекта Slic3r критичным пунктом своего бизнеса и поддерживают его, как открытый ресурс – это способ понизить финансовое напряжение, так как разработка решений собственными усилиями была бы дороже и не разделялась бы среди нескольких субъектов. Кроме того, открытый проект получает выгоду от добровольных взносов сообщества

Нерешенные вопросы и будущие разработки

Опорные материалы являются одним из самых важных приоритетов проекта Slic3r, с тех пор как в профессиональной и коммерческой области 3D принтеры стали демонстрировать лучшие результаты. Опорные материалы – это каркас, который автоматически создается, чтобы поддерживать нависающие формы, которые не будут напечатаны без какой-либо поддержки под ними. Например, балконы здания или человеческий нос нуждаются в опорном материале. Машина с двойным экструдером позволяет печатать опору из другого материала (например, растворимая в воде нить PVA или деревянная нить, которая является хрупкой и легко удаляется). Однако очень часто опорный материал это тот же самый материал, из которого состоит объект: в этом случае программное обеспечение должно найти лучший компромисс между эффективностью опоры и ее устраняемостью. Цель – возможность вручную удалить опору без инструментов, без следов и без видимых швов на напечатанном объекте.

Говоря о более далеких целях, Slic3r нуждается в оптимизации для более высокой производительности во встроенных платформах. В планах еще есть приличная и законченная графическая среда (IDE) где оператор может наглядно менять и пересматривать маршрут инструмента. Среди целей есть поддержка как дуг и NURBS (обобщение кривых Безье), так и более скоростных технологий прототипирования, например, DLP и SLS (пока мало изучены в мире открытых ресурсов, в том числе из-за отсутствия программ для них). Запланированы эксперименты по увеличению однородности объектов путем улучшения скрепляемости слоев и снижения проблем деформации. Еще один открытый вопрос заключается в точности линейных размеров: из-за нескольких факторов, в том числе неравномерности термической усадки используемых материалов, размерные ошибки часто значительны, особенно для отверстий, имеющих маленький диаметр. Необходимы более совершенные модели для компенсации теплового поведения.

Переводчики: alex_itz, Woolpit, aks_id, kindra

3D моделирование с OpenSCAD – Часть_1

Себастьян Бюттрих

IT лаборатория, Университет Информационных Технологий Копенгагена, Дания

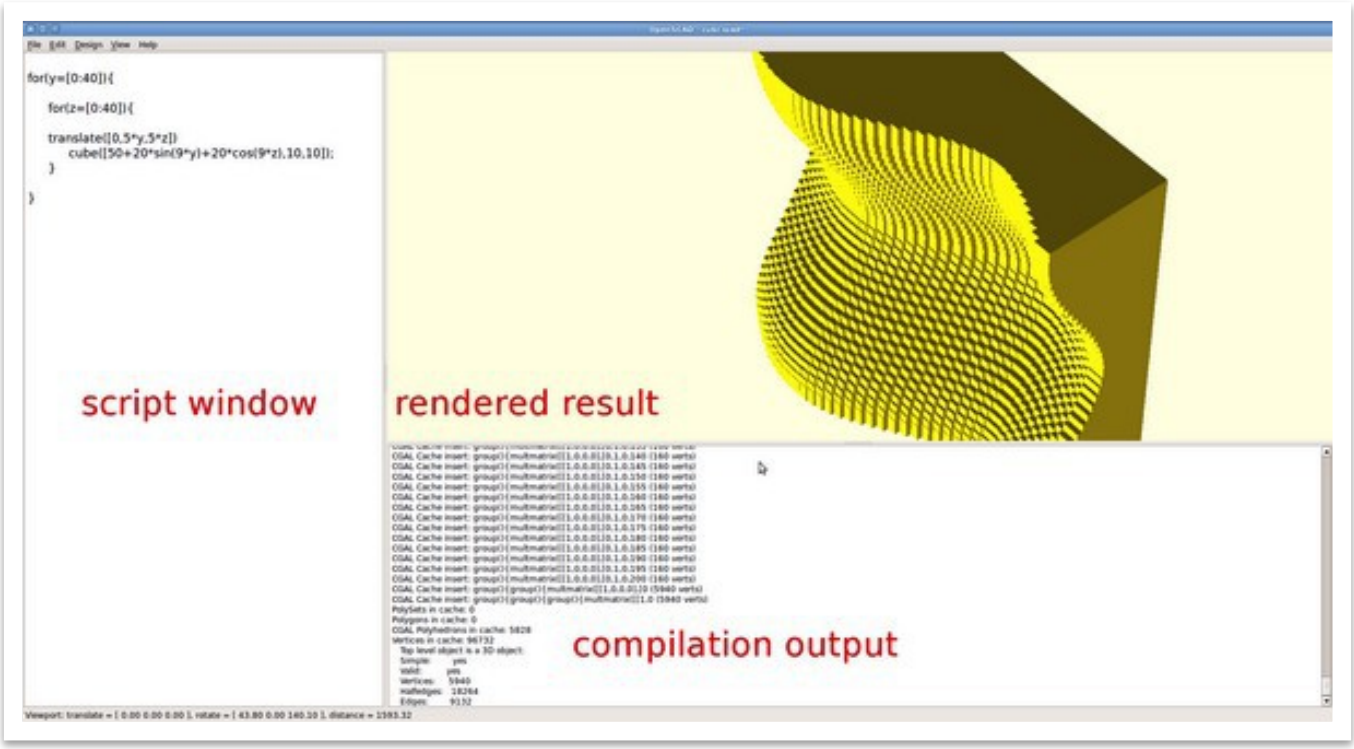
sebastian@itu.dk

На пути от идеи к законченному 3D отпечатку, нужно совершить несколько шагов. Начать с проекта в CAD файле или сканирования уже существующего объекта, затем преобразовать в файл STL, возможно потребуется пост-обработка/восстановление, и наконец, преобразовать в исполняемый принтером файл g-кода.

Ваши первые шаги в 3D печати могут основываться на 3D проектах, найденных в Интернете, но став серьезнее, Вы захотите разработать свой собственный проект или улучшить существующие проекты, вместо того, чтобы просто копировать работу других. Здесь мы сосредоточимся на этапах разработки, т.е. создание 3D моделей и экспорт STL файлов.

Есть много доступных программных средств, и следующие два адреса – хорошие отправные точки, чтобы освоить их:

- http://www.reprap.org/wiki/Useful_Software_Packages
- https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_3D_computer_graphics_software



Разработка в OpenSCAD

Наиболее популярными бесплатными и открытыми программами являются Blender, POV-Ray, Wings3d и OpenSCAD. OpenSCAD подходит для всего, что легче рассчитать и генерировать программно нежели изобразить от руки, мышью или светокопированием (трассировкой лучей). Что касается последних, то Blender или POV-Ray могут стать Вашим выбором.

Таким образом, когда стоит задача конструирования объектов, все размеры которых точно заданы или объектов, отрисовка которых обременительна или даже невозможна, но легко описываемых формулами, параметрами или числовой последовательностью, OpenSCAD – Ваш инструмент. Его подход к 3D проекту основывается на математике и программировании.

Цитата с веб-сайта http://openscad.org:

> *«В отличие от большей части бесплатного программного обеспечения для создания 3D моделей (такое как известное приложение Blender), оно не фокусироется на художественных аспектах 3D моделирования, а вместо этого фокусируется на аспектах CAD. Таким образом, это приложение может быть тем, что Вы ищете, когда планируете создать 3D модели деталей машины, но со значительной степенью уверенности это не, то, что Вы ищете, если Вас большее интересует создание компьютерных анимационных фильмов».*

OpenSCAD – бесплатное программное обеспечение, доступное под Linux/UNIX, MS Windows и Mac OS X, по лицензии GNU GPL v.2

В OpenSCAD два основных способа моделирования:

1. Конструктивная блочная геометрия (CSG) – сборка из цельных трехмерных объектов, элемент за элементом, из скрипта.
2. Экструзия 2D контуров – берутся готовые 2-мерные фигуры, например, из файла DXF или просто 2-мерные формы и из этого производится 3D объект, например, поворотом или подъемом.

Затем, получившийся 3D файл может быть экспортирован в файл формата STL или OFF.

STL значит СТереоЛитография. Большинство программ САПР поддерживают экспорт в этот формат. Файл STL представляет объект, который можно назвать «водонепроницаемым»: объект без отверстий или искажений. Можно, конечно, вообразить и зарисовать и более смелые объекты, но только «водонепроницаемый» объект – объект, который может быть заполнен материалом – может в действительности быть распечатан.

Нужно отметить, что в процессе экспорта в STL могут возникнуть проблемы, и всегда лучше проверить результаты при помощи инструмента пост-обработки и "ремонта", такого как Meshlab.

Основные элементы синтаксиса OpenSCAD – переменные, модули, функции, включения и требования.

Переменные описываются так

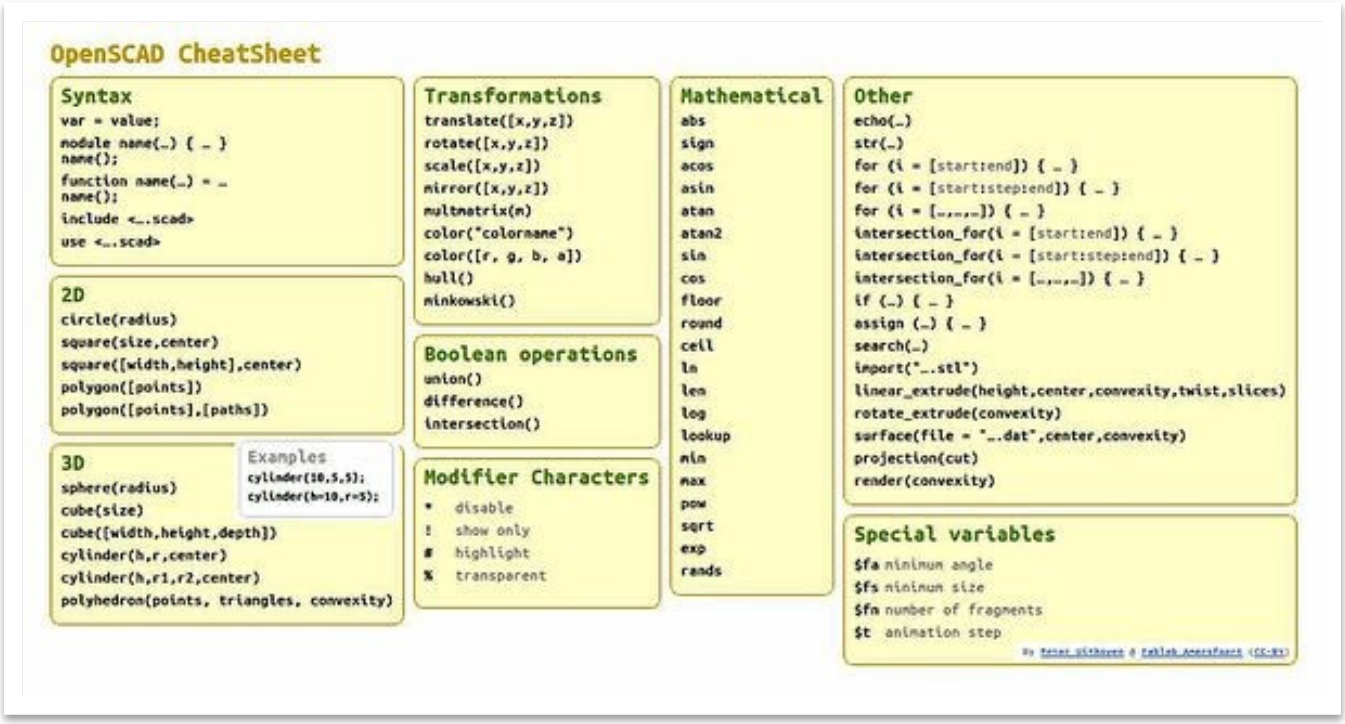
myVar = 5+4

и могут быть сгруппированы в вектора/точки как:

myVector = [5,4,8]

Переменные задаются один раз во время компиляции, не изменяются в течение всего периода исполнения.

OpenSCAD понимает скалярные арифметические операторы, операторы сравнения, операторы булевой логики и длинный список общеупотребимых математических функций. Вы можете создать 2D (круг, квадрат, многоугольник) и 3D (кубы, сферы, цилиндры) примитивы, каждый из которых принимает в качестве входных аргументов такие параметры как упомянутые выше точки, зачастую дополняемые разрешающей способностью, параметрами поверхности и дополнительными инструкциями.



Шпаргалка по OpenSCAD на http://www.openscad.org/cheatsheet/ дает хорошее краткое изложение всех элементов языка OpenSCAD

Следующий пример кода демонстрирует перевод преобразования и трех основных булевых логических операций:

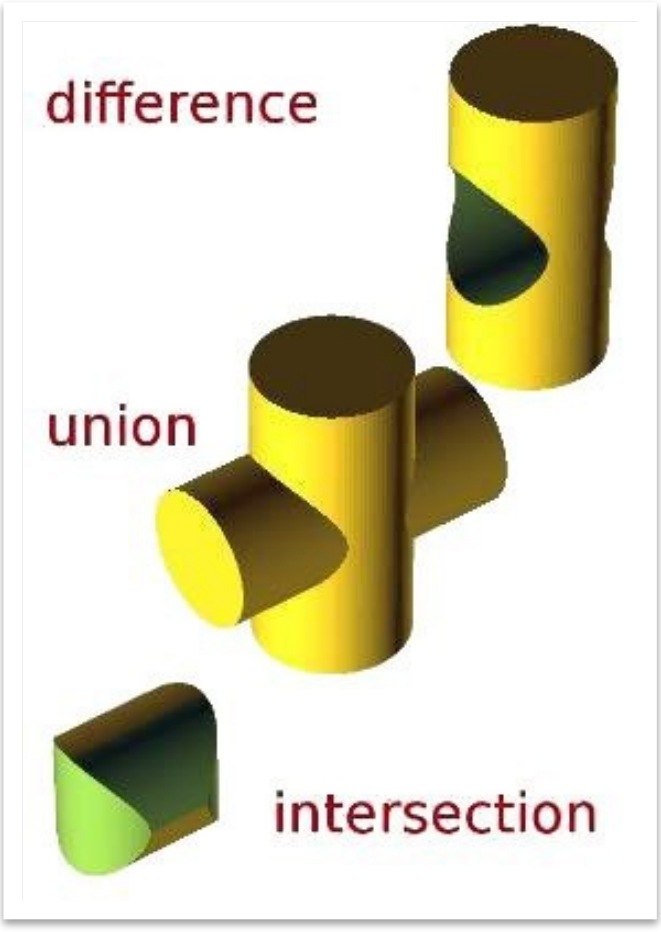
union (objects joined together),
difference (cutting one object out of the other);
intersection (the shared space of two objects).

Пример кода трех основных преобразований:

```
union() {
  cylinder (h = 4, r=1, center = true, $fn=100);
  rotate ([90,0,0]) cylinder (h = 4, r=0.9, center = true, $fn=100);
}

translate([0,3,3])
difference() {
  cylinder (h = 4, r=1, center = true, $fn=100);
  rotate ([90,0,0]) cylinder (h = 4, r=0.9, center = true, $fn=100);
}

translate([0,-3,-3])
intersection() {
  cylinder (h = 4, r=1, center = true, $fn=100);
  rotate ([90,0,0]) cylinder (h = 4, r=0.9, center = true, $fn=100);
}
```



Основные булевы операции

Подробности OpenSCAD User Manual на wikibooks:

http://en.wikibooks.org/wiki/OpenSCAD_User_Manual и этот сайт предоставит Вам всю необходимую информацию для разработки сложных объектов.

Примечание: Все ссылки в этой статье были проверены в апреле 2013.

Переводчики: Woolpit, mishavolkin, alex_itz

3D моделирование с OpenSCAD – Часть 2

Мариус Кинтел

Разработчик OpenSCAD, Австрия

marius@kintel.net

Пара слов от автора

OpenSCAD вырос из сообщества RepRap, точнее из деятельности в области 3D печати в Metalab (http://metalab.at), клубе программистов-энтузиастов в Вене, Австрия.

Идея OpenSCAD возникла, потому что мы нуждались в свободном программном инструменте разработки для быстрого и многократно повторяющегося создания механических деталей.

Использование существовавших в то время инструментов было слишком трудозатратным и изменение детали, часто требовало её полной переделки. Коммерческие САПР, решавшие эти проблемы, существовали, однако помимо запредельной стоимости, они не были открытым ПО, и мы чувствовали, что мир нуждается в лучшем инструменте проектирования с открытым исходным кодом. Основная идея OpenSCAD состояла в том, чтобы позволить людям описывать свои 3D модели, начав с основных строительных блоков, и затем многократно их повторяя, строить с их помощью. Дополнительно мы хотели, чтобы программа была подходящей для описания параметрических форм и положений для того, чтобы упростить настройки и адаптацию, без необходимости проходить через трудоемкие и скучные задачи реконструирования.

Вначале мы поняли, что OpenSCAD будет иметь серьезные ограничения в плане создания геометрических фигур, поэтому мы решили дать пользователям возможность выбрать программу моделирования более сложных строительных блоков. Затем OpenSCAD может импортировать эти файлы для дальнейшего моделирования, в то же время вы в любой момент можете вернуться назад и изменить основную геометрию без необходимости переделывать работу, уже проделанную в OpenSCAD. Сохранение исходного кода в качестве пользовательского интерфейса также обладает важным свойством, заключающимся в том, что люди захотят поделиться своими проектами, а также конструктивными идеями. Это также делает возможным менять, повторно использовать, или другими способами базироваться на существующих идеях и проектах других людей.

Параметрические разработки

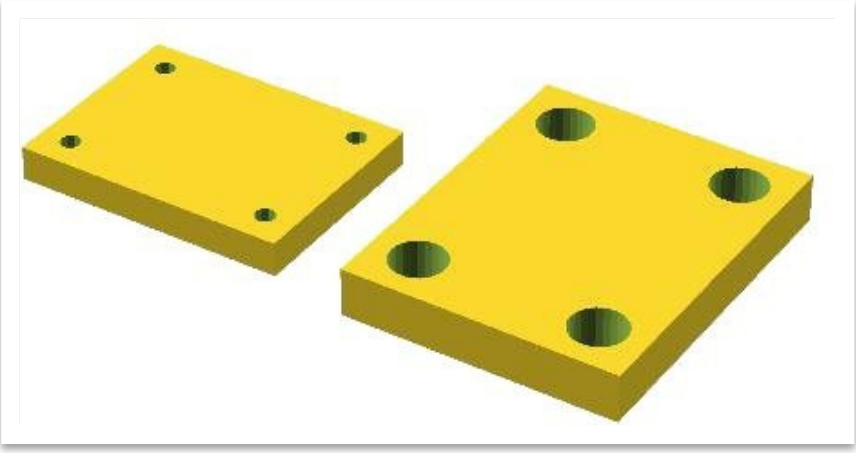
Одно из сильных мест OpenSCAD – поддержка параметрических разработок. Параметрический в данном контексте означает, что Вы можете создать логические строительные блоки, которые принимают определенные параметры, а возвращают созданный 3D компонент, отвечающий этим параметрам. Примерами таких параметров могут быть размеры

объекта, отверстия гайки и болта, описания объекта (например, число зубчиков шестеренки) или элементы проекта (текст штамповки на разработке).

В OpenSCAD стандартные блоки называются модулями. Модуль – тип шаблона, который задается один раз и может использоваться многократно с различными параметрами. Следующий код определяет модуль TopPlate, который описывает параметрическую пластину с четырьмя резьбовыми отверстиями. Параметры модуля – это размеры пластины и размеры винтов. Затем вызываются два экземпляра модуля TopPlate :

```
module TopPlate(size, screwsize)
{
 margin = 3;
 offset = screwsize/2 + margin;
 difference() {
  cube(size);
  for (xoffset = [offset, size[0] - offset], yoffset = [offset, size[1] - offset]) {
   translate([xoffset, yoffset, -0.5]) cylinder(r=screwsize/2, h=size[2]+1);
  }
 }
}

TopPlate(size=[40,50,3], screwsize=8);
translate([50,0,0]) TopPlate(size=[40,30,5], screwsize=3);
```



Библиотеки

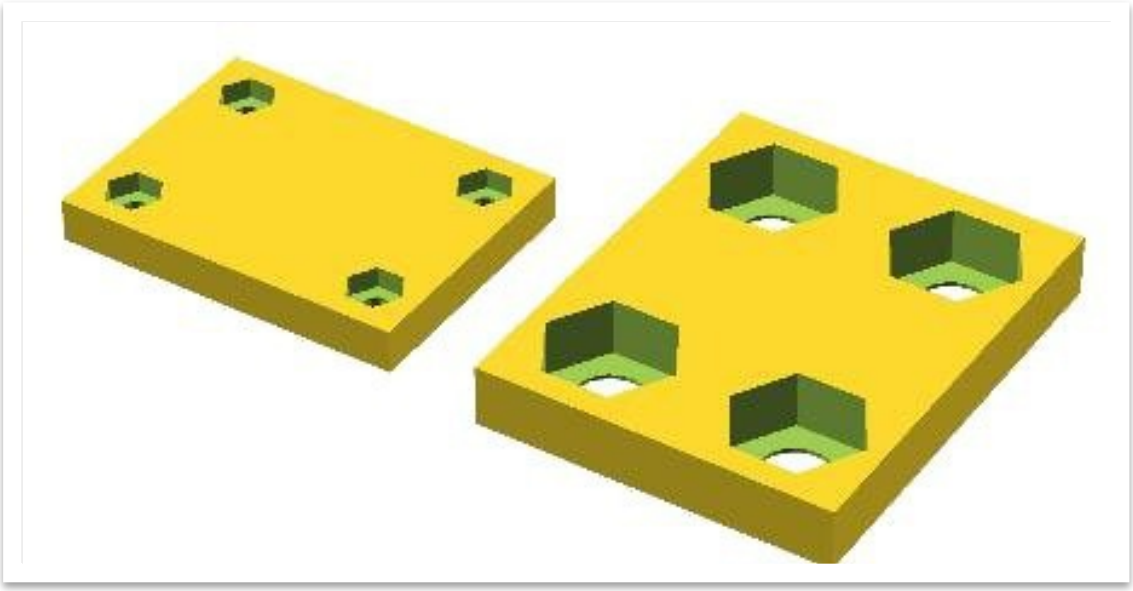
Множество задач моделирования, особенно при создании механических деталей или комплектующих, состоит из повторного использования стандартных элементов таких как крепежи, отверстия, прорези и т.д. В дополнение к определяющим модулям, которые упрощают повторное использование компонента в одном проекте, также возможно использование внешних библиотек. OpenSCAD включает набор общих компонентов в библиотеке названной MCAD.

Следующий пример основывается на предыдущем, но с добавлением накидных гаек под винт к существующим отверстиям и использование модуля библиотеки MCAD nuts_and_bolts, чтобы получить верные размеры гайки, соответствующей размеру винта:

```
include<MCAD/nuts_and_bolts.scad>
module screwhole(screw, depth)
{
 translate([0,0,-0.5]) cylinder(r=screw/2, h=depth+1);
 translate([0,0,-0.01]) nutHole(size=screw);
}

module TopPlate(size, screwsize)
{
 margin = 2;
 offset = METRIC_NUT_AC_WIDTHS[screwsize]/2 + margin;
 difference() {
  cube(size);
  for (xoffset = [offset, size[0] - offset], yoffset = [offset, size[1] - offset]) {
   translate([xoffset, yoffset, 0]) screwhole(screwsize, size[2]);
  }
 }
}


TopPlate(size=[40,50,7], screwsize=8);
translate([50,0,0]) TopPlate(size=[40,30,5], screwsize=3);
```



По причине открытой природы OpenSCAD совместное использование библиотек реализуется простым расшариванием исходного кода модулей. Множество разработчиков моделей создали свои библиотеки компонентов и выложили их онлайн. На Thingiverse есть много библиотек OpenSCAD:

http://www.thingiverse.com/search?q=openscad+library

Примеры использования

Так как OpenSCAD произошел от ранней 3D печати и движения RepRap, пользовательская база является все еще самой сильной среди этих сообществ. В результате, некоторые из самых выдающихся примеров использования OpenSCAD – это разработка самих 3D принтеров.

Некоторые примеры:

- RepRap Prusa версия 3:

https://github.com/josefprusa/Prusa3

- AO Lulzbot 100 (частично):

http://download.lulzbot.com/AO-100/hardware/printed_parts/source/

- Lulzbot TK-0:

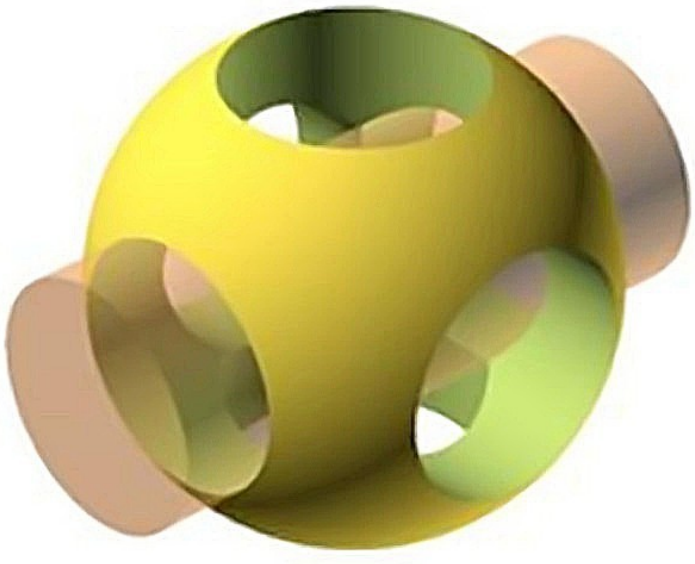
https://github.com/mswillia/TK-0

- RepRap Mendel90:

http://hydraraptor.blogspot.co.uk/2012/12/mendel90-updates.html

Найти разработки OpenSCAD можно в самом большом репозитарии Thingiverse:

http://www.thingiverse.com/tag:openscad



Переводчики: Woolpit, mishavolkin, alex_itz

Доступная
3D печать для
науки
40ml

Визуализируем математику, используя 3D принтеры

Оливер Нил, Элизабет Славковски

Математическое отделение, Университет Гарварда, Кембридж, Массачусетс, США

knill@math.harvard.edu, writetoliz@yahoo.com

Визуализация

В математике визуализация всегда была важным компонентом обмена информацией. Фигуры и модели помогли выразить идеи раньше, чем официальный математический язык смог описать структуры. Числа были записаны как метки на костях, оставленные камешком, затем высечены на камне, надписаны на глине, вплетенные в разговор узелки, написанные на папирусе или бумаге, затем распечатанные на бумаге или представлены на экране компьютера. В то время как числа расширяют язык, изображения позволяют визуализировать понятия, представление объекта в пространстве сохраняет его значимость. Уже в древней Греции, использовались деревянные модели конусов Аполлона, чтобы преподавать коническое сечение. Ранние исследования в математике часто были визуальными: фигуры на Вавилонских глиняных табличках иллюстрируют пифагоровы тройки, московский математический папирус изображает рисунки, которые помогли вывести формулу объема для усеченного конуса. Аль Хорезми чертил фигуры, чтобы решить квадратное уравнение. Визуализация не только пояснительная, образовательная или эвристическая, она имеет практическое значение: Пифагоровы треугольники, представленные веревками, помогли измерению и разделению земель в Вавилонии. Линейка и циркуль, добавленные к конструкторской математике на бумаге, могут использоваться для создания проекта механизмов. Греческие математики, такие как Аполлоний, Аристарх, Евклид или Архимед осваивали искусство через представление математических фигур[1].

Хотя картинки не заменяют доказательств – Клайн[2] дает убедительное наглядное доказательство что все треугольники являются равносторонними, – они помогают передать догадки о результатах и идеях[3] [4]. Визуализация особенно важна в образовании и может подвести к новому пониманию. Много примеров механических свойств можно найти в учебнике "Математическая механика"(“The Mathematical Mechanic”)[5]. Как педагогический инструмент она помогает учителям на разных уровнях математики, от начальной и средней школы, через высшее образование к современным исследованиям[6] [7] [8]. В диссертации Славковского[9] исследована осуществимость технологии в классе. Мы взглянули на работу Архимеда[10], используя эту технологию.

Визуализация помогает демонстрировать красоту математики и продвигаться к более многочисленной публике. Фигуры могут вдохновить на новые идеи, создать новые теоремы или помочь в вычислениях; например – диаграммы Фейнмана или Динкина или таблицы Янга. Большинство математиков описывают творческие идеи и догадку исходя из изображений, даже если эти фигуры не появятся на бумаге или в учебнике. Художники, архитекторы, режиссеры, инженеры и дизайнеры черпают вдохновение в визуальной математике. Хорошо проиллюстрированные книги, как[11] [12] [13] [14] [15] [16] – реклама математики с фигурами и иллюстрациями. Такие публикации помогают уравновесить впечатление, что математику трудно передать не математикам. Математические выставки, такие как в Музее науки и техники в Бостоне или Музей математики в Нью-Йорке играют важную роль в создании доступной математики. Они все визуально изображают или даже практически реализуют математику. В то время как возникли различные технологии, которые позволяют выводить на экран пространственный и динамический контент в сети, такие как Javascript, Java, Flash, WRML, SVG или WebGl, возможности **управлять объектом руками** все еще несопоставимы. 3D принтеры позволяют нам создать это с относительно небольшим усилием.

3D печать

Индустрия быстрого прототипирования и 3D печати, в частности, появились около 30 лет назад[17] [18] [19] [20] [21] и некоторыми считается частью **промышленной революции**, в которой производство становится цифровым, личным и доступным[22] [23] [24] . Впервые реализованная в 1994 году с печатью восковым материалом, технология перешла на другие материалы, такие как акрилатные фотополимеры или металлы и в настоящее время входит в ранг потребительских технологий.

Центры печати могут печатать в цвете, различными материалами и в высоком качестве. Развитие 3D-печати является последним звеном в цепочке методов визуализации. Мы живем в захватывающее время, потому что мы переживаем не одну, но две революции одновременно: информационную революцию и промышленную революцию. Эти изменения также влияют на математическое образование[25]. 3D печать в настоящее время используется в медицине, авиапромышленности, для создания прототипов роботов, в создании произведений искусства и ювелирный изделий, чтобы построить нано-структуры, велосипеды, корабли, схемы, для производства художественных работ, роботов, оружия, домов и даже используется для украшения тортов. Его использование в сфере образования была исследована в[9]. Поскольку физические модели важны для практического активного обучения . Технология 3D печати в образовании использовалась с некоторого времени[26] и рассмотрена для[27] устойчивого развития для получения образования K-12 в проектах STEM[28] (science, technology, engineering and mathematics – наука, технология, инженерия, математика – прим. ред.), а также начального математического образования[29] . Нет никаких сомнений, что это будет иметь огромное влияние в сфере образования[30] [31] .

Распечатанные модели позволяют иллюстрировать понятия в различных математических областях, таких как вычисления, геометрия или топология. Это уже привело к новым перспективам в математическом образовании. Литература о 3D печати сметается, так же как литература о компьютерах, когда ПК вышли на потребительский рынок. Например, книги [32] [33] [34]. Что касается любой появляющейся технологии, её публикации могут быстро устареть, но они останутся ценным свидетельством захватывающего времени, в котором мы живем.

Реализация математики в жизнь

Чтобы проиллюстрировать визуализацию, используя 3D принтеры, сфокусируемся на математических моделях, созданных при помощи **систем компьютерной алгебры** . В отличие от средств **3D моделирования**, у математических приложений есть преимущество – исходный код краток, и программы, использованные для иллюстрирования математики в исследованиях или в классе, могут быть повторно использованы. Многие примеры, данные здесь, были разработаны для классов или проектов и перерисованы так, чтобы они могли быть распечатаны. В отличие от «средств моделирования», приложений, которые создают большой список треугольников, системы компьютерной алгебры описывают и выводят на экран трехмерные объекты математически. Хотя мы также экспериментировали с другими приложениями, такими как «123D Design» от Autodesk, «Sketchup» от Trimble, средство моделирования «Free CAD», «Blender» или «Rhinoceros» от McNeel Accociates, в основном, мы работали с системами компьютерной алгебры и, в частности, с Mathematica[35] [36] [37] [38] [39]. Для объяснения на конкретном примере давайте рассмотрим **теорему Ньютона по «числу касаний» сферы**, где говорится, что **число соприкасающихся сфер в трехмерном пространстве равняется 12**. Теорема гласит, что максимальное число сфер, которые могут быть размещены вокруг данной сферы, равняется двенадцати, если все сферы имеют такие же радиусы, касаются центральной сферы и не перекрываются.

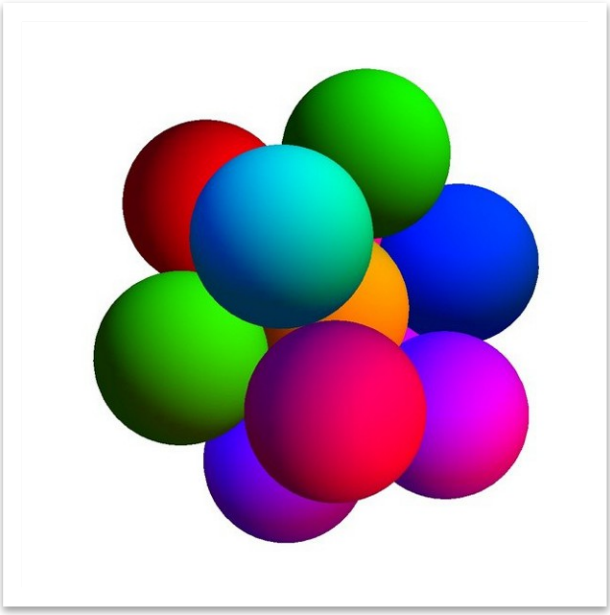
В то время, как современник Ньютона Грегори думал, что можно поместить тринадцатую сферу, Ньютон считал что число касаний лишь 12. Теорема была доказана только в 1953 году[40]. Для доказательства этой теоремы, возьмите икосаэдр с длиной стороны 2 и поместите единичные сферы на каждую из 12 вершин и они соприкоснутся с единичной сферой, помещенной в центре. Доказательство невозможности поместить 13 сфер[41] использует элементарный расчет[42] для площади сферического треугольника, Эйлерову формулу многогранника, дискретную теорему Гаусса-Бонне, утверждающую, что сумма кривизны равна 2, и немного комбинаторики для проверки всех вариантов многогранника, подходящих под ограничения. Для визуализации использовалась Mathematica, мы изобразили 12 сфер, касающихся центральной сферы. Хотя объект состоит только из 13 сфер, весь массив сделан из 8640 треугольников. Код Mathematica очень короткий, так как нам нужно вычислить только координаты вершин икосаэдра, сгенерировать объект и экспортировать в файл STL. Отобразив на экране исходный код, мы показали визуализацию, такую же как устное доказательство. Если код ввести в компьютер, тот сгенерирует печатаемый файл STL.

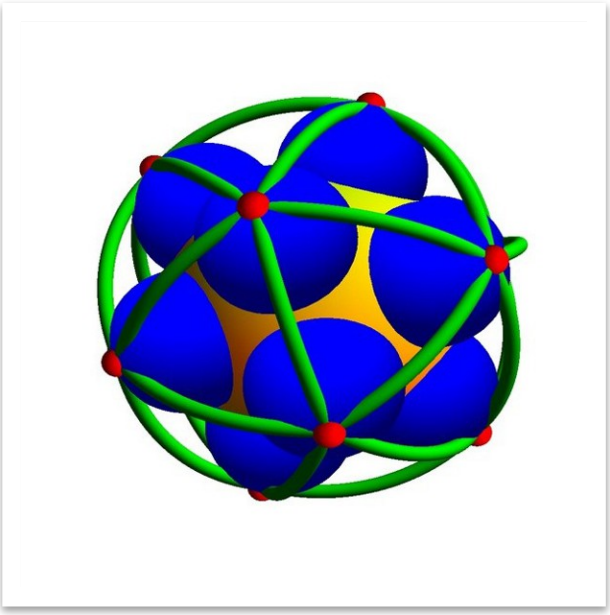
Анализ жизнеспособности

Физические модели важны для практического активного изучения. Возникло хранилище печатаемых для образования 3D моделей[26]. Технология 3D печати использовалась для образования K-12 в проектах STEM[28] и начального математического образования[29]. Есть надежда, что это окажет большое влияние на образование[30]. Новая технология позволяет каждому создавать модели для класса. Но чтобы сделать это более доступным, есть еще много препятствий. Есть и хорошие новости: файлы STL могут быть легко сгенерированы, потому что формат прост и доступен. Файлы STL могут экспортироватся в другие форматы. Mathematica, например, позволяет импортировать и преобразовывать его в другие формы. Программы, такие как «Meshlab», позволяют манипулировать им. Программы заключительных преобразований, как «admesh», позволяют работать с файлами STL из командной строки. Другие автономные программы, «stl2pov», позволяют преобразовывать его в форму, которая может быть представлена в трассировщике лучей, таком как Povray. Один из важных аспектов заключается в том, что хорошее программное обеспечение для создания объектов не дешево. Использование коммерческой системы компьютерной алгебры такой, как Mathematica, может быть очень дорогостоящим, особенно если требуется корпоративная лицензия. Сейчас нет ни одного бесплатного приложения компьютерной алгебры, которое в состоянии экспортировать STL или 3DS или файлы WRL встроенными модулями. Система компьютерной алгебры SAGE, которая является самой сложной из систем с открытым кодом, имеет возможность экспорта только на экспериментальном уровне[43]. Кажется, что предстоит большая работа, чтобы закончить это.

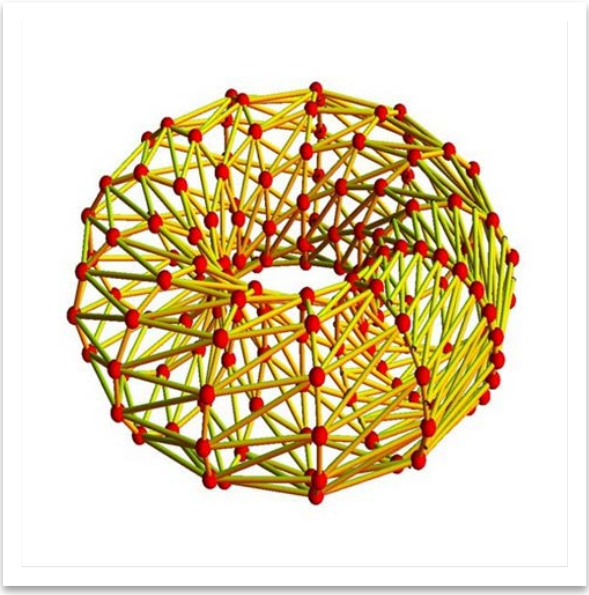
Тем не менее, доступны множество ресурсов[44] [45]. Следующие иллюстрации состоят из графиков Mathematica, которые можно распечатать. Зачастую требуется адаптация, потому что принтер не может распечатать объекты нулевой толщины.

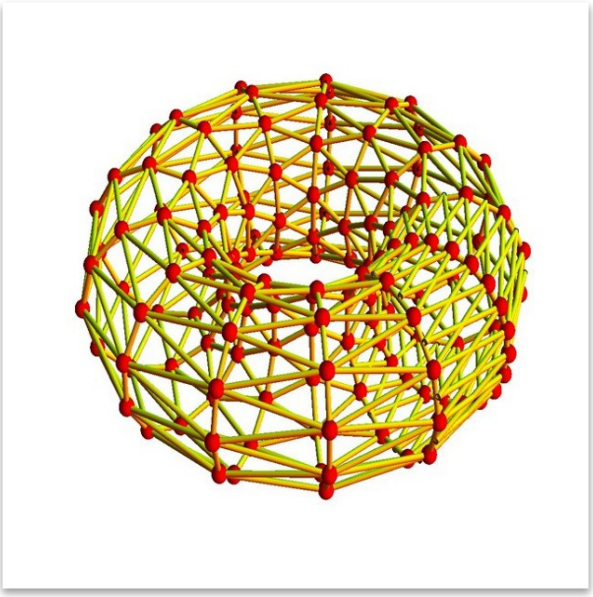
Иллюстрации



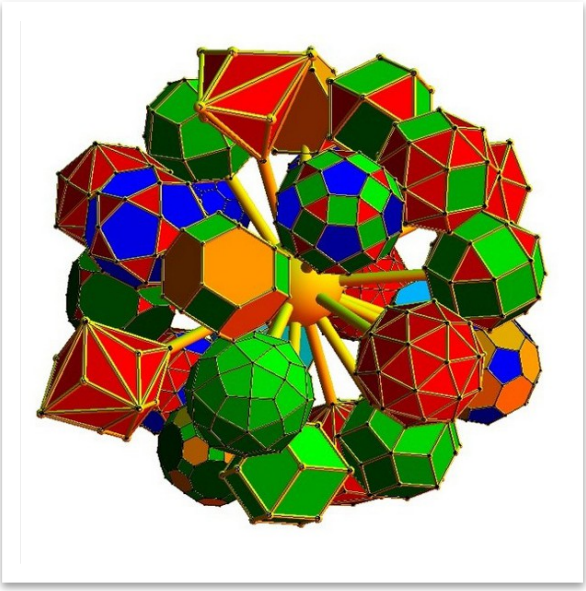


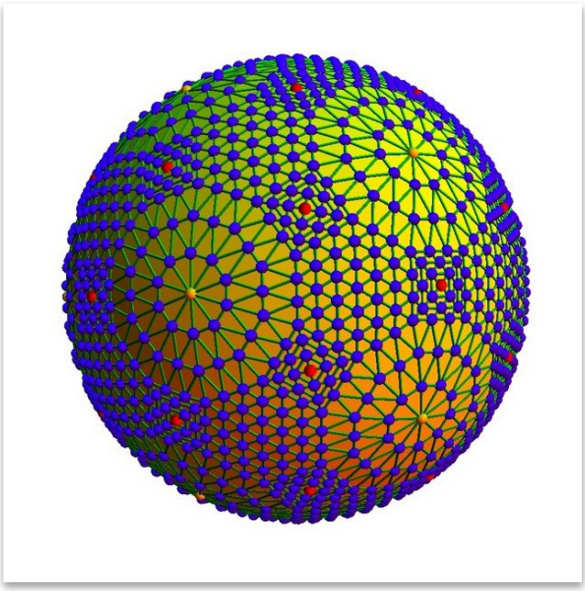
Цель данной иллюстрации показать, что число соприкасающихся сфер – ≥ 12. Код Mathematica создавший этот объект, дан в тексте. Он создает файл, содержащий десятки тысяч треугольников, которые 3D принтер поймёт и сможет воплотить в физический объект. Распечатанный объект визуализирует, что на сфере остается очень мало свободного пространства. Ньютон и его современник Грегори имели разногласия по поводу того, достаточно ли этого места для размещения тринадцатой сферы.



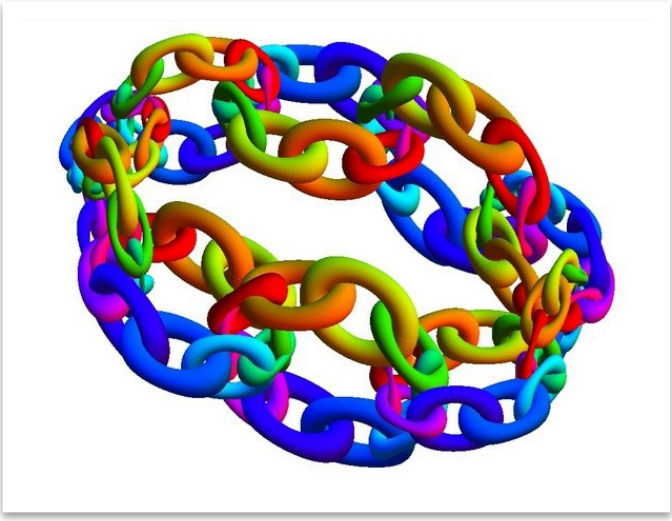


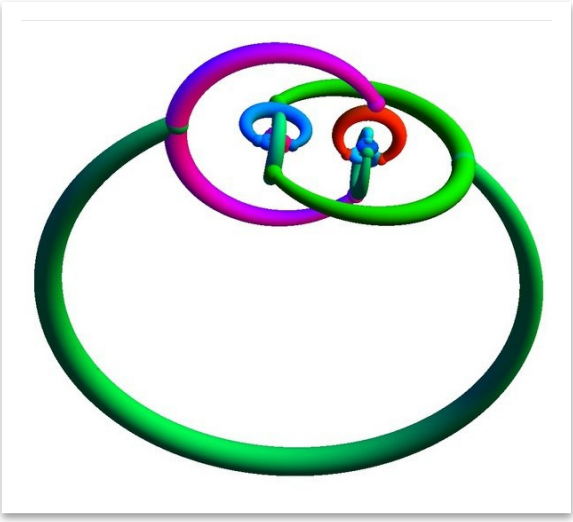
Скручивание Дена в торе и раскрученный тор. Левое и правое изображения показывают два неизоморфных графа, но они имеют те же топологические и изоспектральные свойства для оператора Лапласа, что и для оператора Дирака. Это простейший пример пары неизометрических, но изоспектральных графов Дирака.



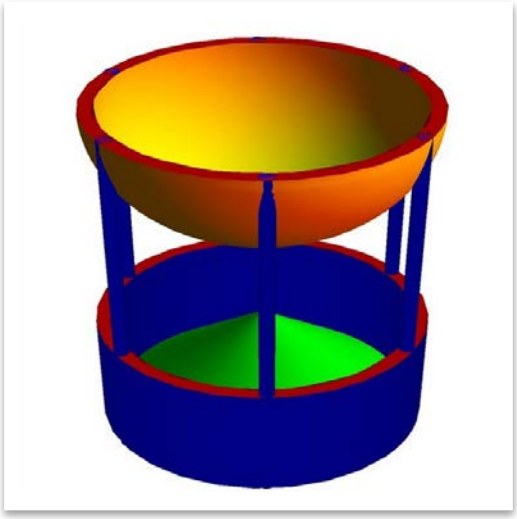


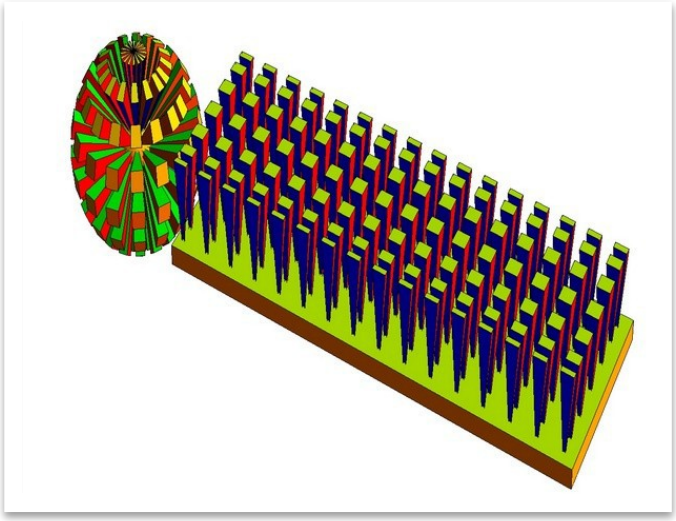
Все 26 Архимедовых и каталонских твердых частиц, соединенных с «драгоценным камнем» в форме двенадцатигранника Disdyakis. Правильная фигура, демонстрирующая большой ромбовидный двенадцатигранник с 30 точками искривления ⅓ и 12 точками искривления -⅔. Полное искривление равняется 2 и согласуется с Эйлеровой характеристикой. Это демонстрирует дискретную теорему Гаусса-Бонне[46].



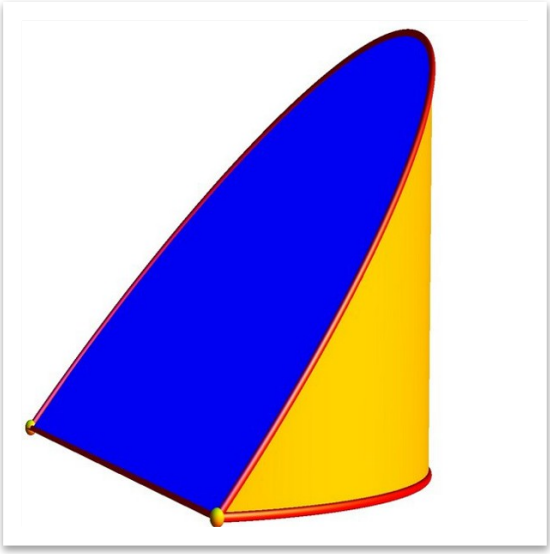


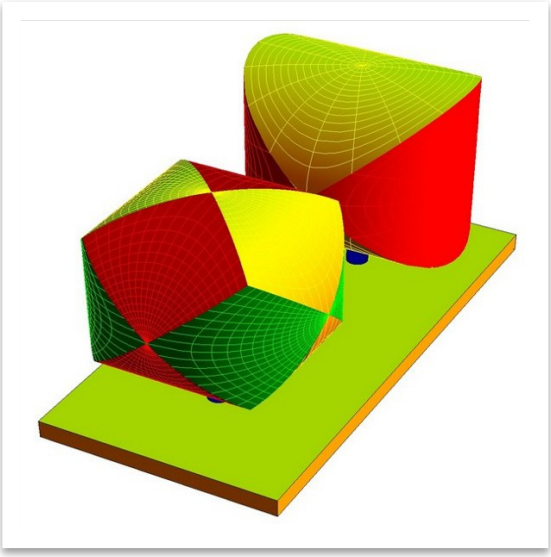
Ожерелье Антуана – совокупность Кантора в пространстве, чье дополнение неодносвязно. Сфера Александра, справа, является топологическими 3 шарами, которые являются односвязными, но у которых есть множество внешних точек, которые неодносвязны. Из сфер Александра получатся красивые серьги, если их распечатать.



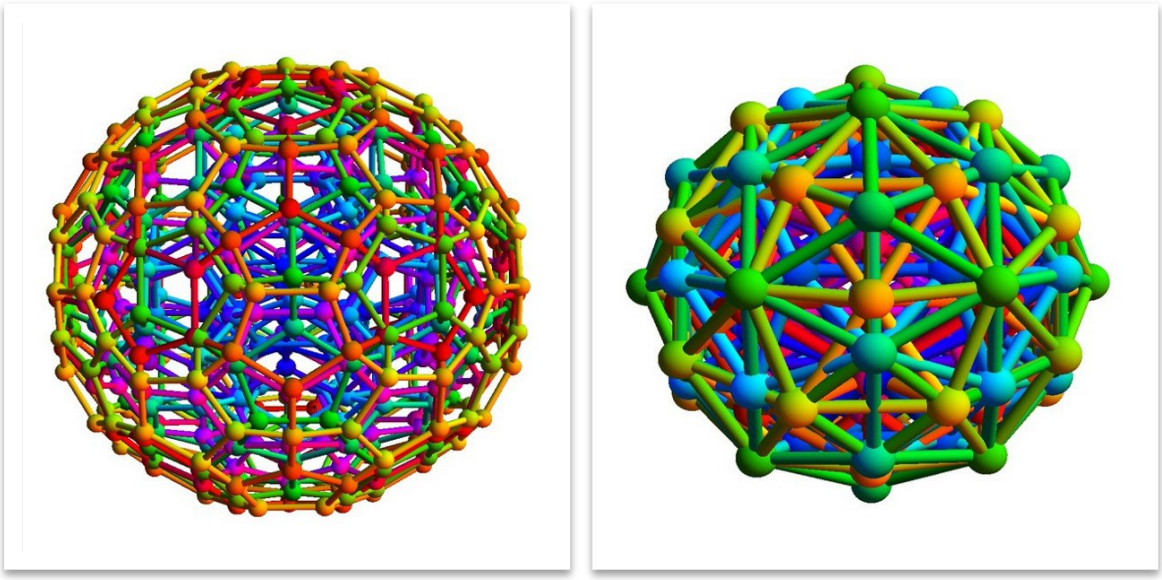


Два типа доказательств Архимеда, что объем сферы – $4\pi/3$ [47] [48] [49]. Первое предполагает, что площадь поверхности A известна. Формула $V = Ar/3$ может быть представлена путем разрезания сферы на множество маленьких четырехгранников объемом $dAr/3$. При подведении итогов по сфере, мы получаем $Ar/3$. Второе доказательство сравнивает половину объема сферы с дополнением конуса в цилиндре.

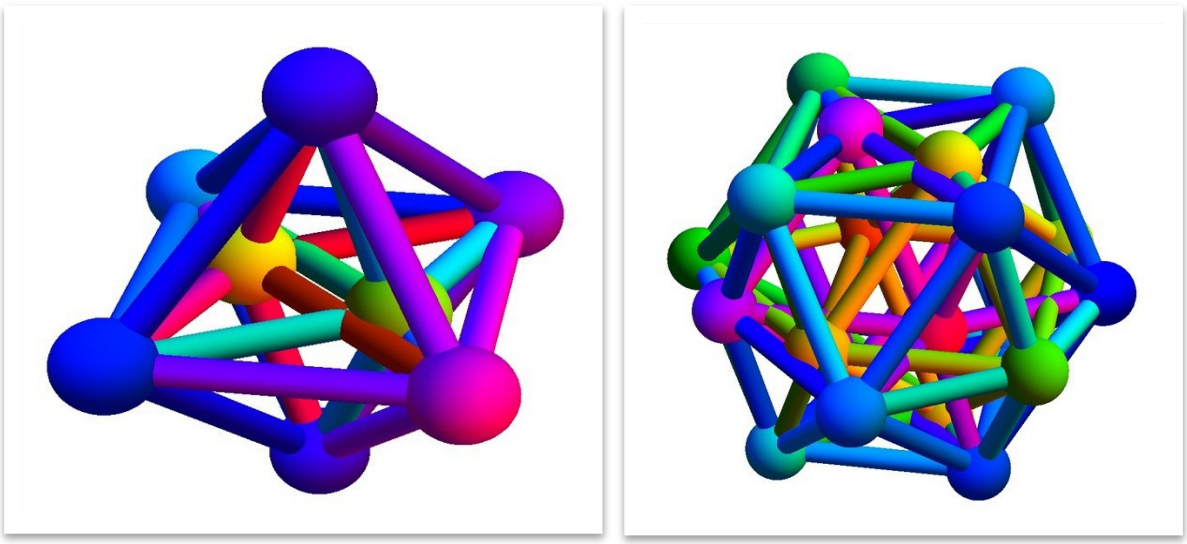




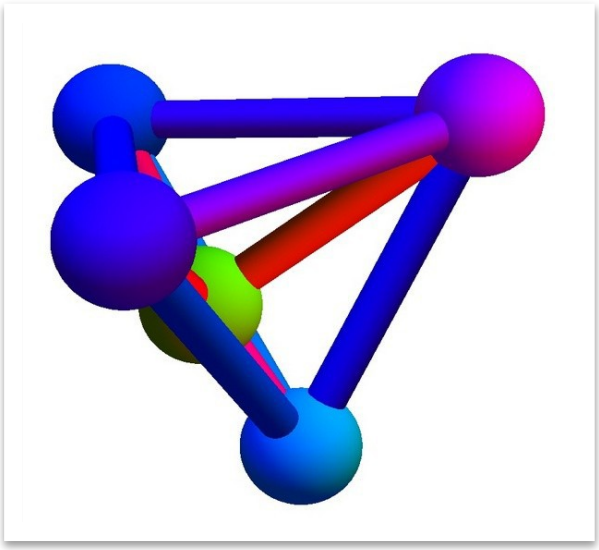
Копыто Архимеда, Архимедов купол (диэдр), пересечение цилиндров – твердые частицы, для которых Архимед мог вычислить объем с помощью сравнительных интеграционных методов[50]. Копыто – также объект, где Архимед должен был использовать предельную сумму, вероятно первую в истории человечества[51].

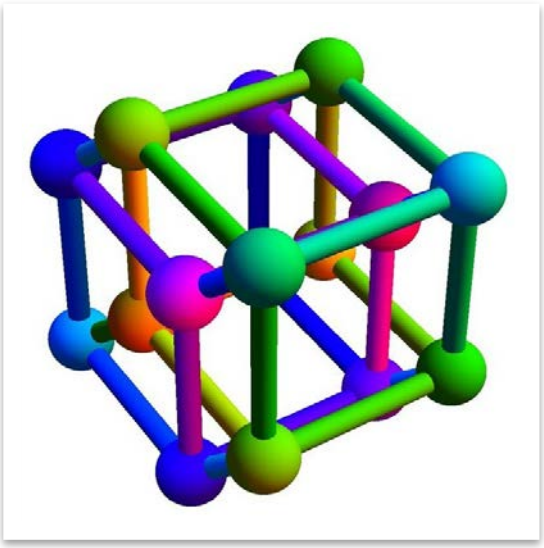


Два из 6 регулярных выпуклых четырехмерных многогранников. Цвет – вершина в четырехмерном пространстве. Мы видим 120 ячеек и 600 ячеек.

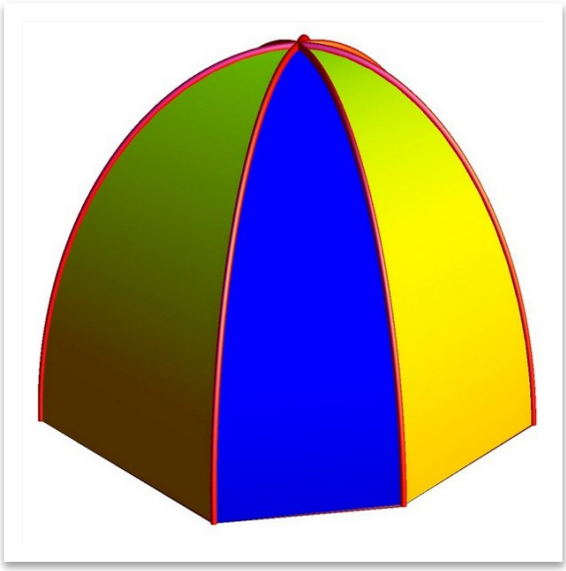


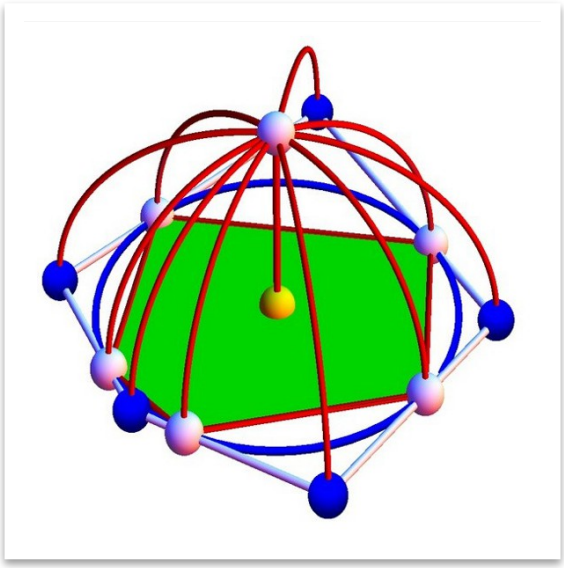
Другая пара 6 регулярных выпуклых четырехмерных многогранников. Цвет – высота в четырехмерном пространстве. Мы видим 16 ячеек (аналог октаэдра) и 24 ячейки. Позже позволит составлять мозаику четырехмерного Евклидова пространства.



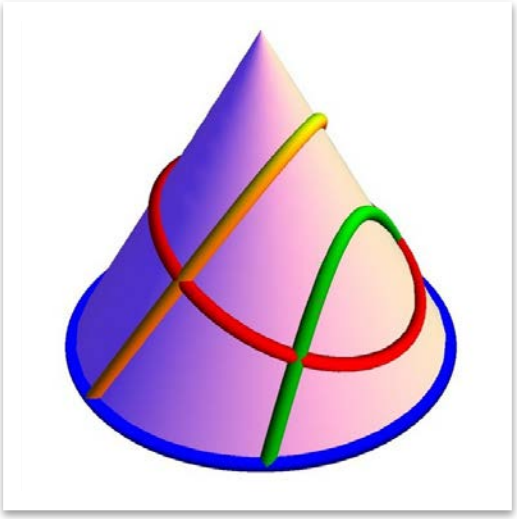


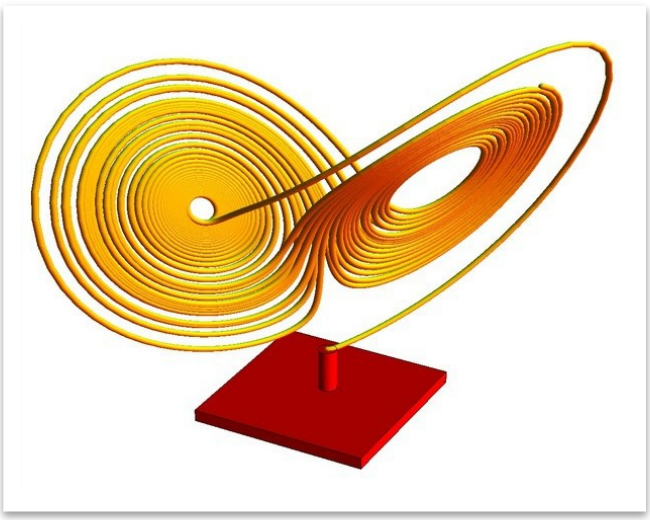
5 ячеек – полный граф с 5 вершинами и самый простой четырехмерный полиэдр. 8 ячеек, справа, также вызываются ячейкой. Это – четырехмерный аналог куба.



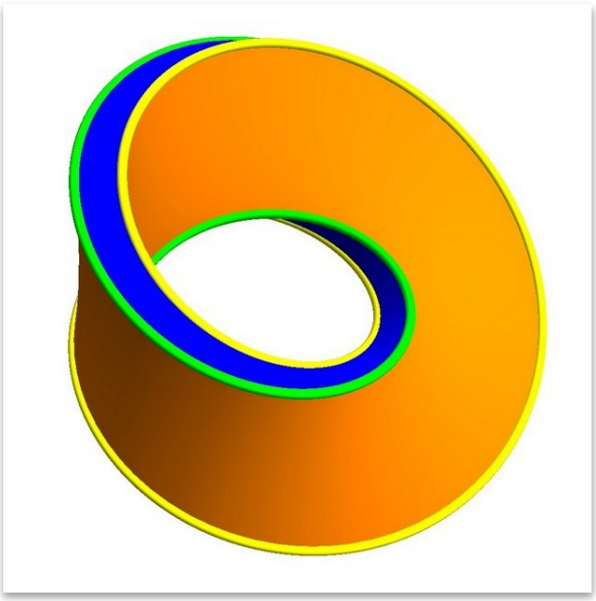


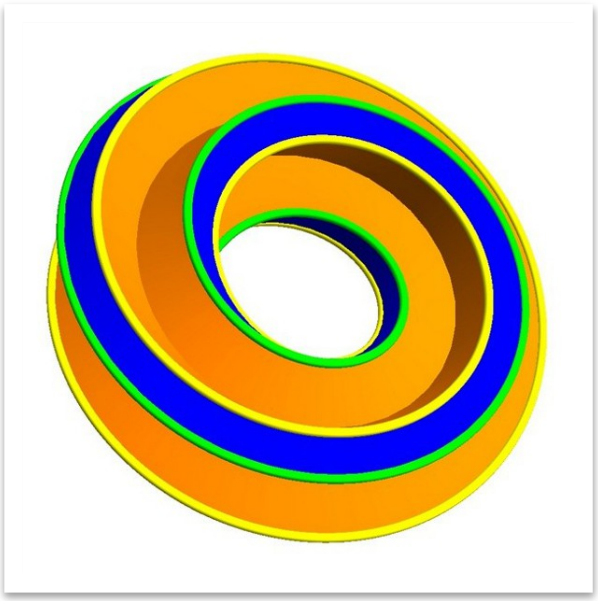
Архимедовы купола – половина Архимедовых сфер. У них есть объем, равный ⅔ призмы, в которую они вписаны. Это было обнаружено только после Архимедовых шаров, площадь поверхности ⅔ от площади поверхности ограниченной призмы [50].



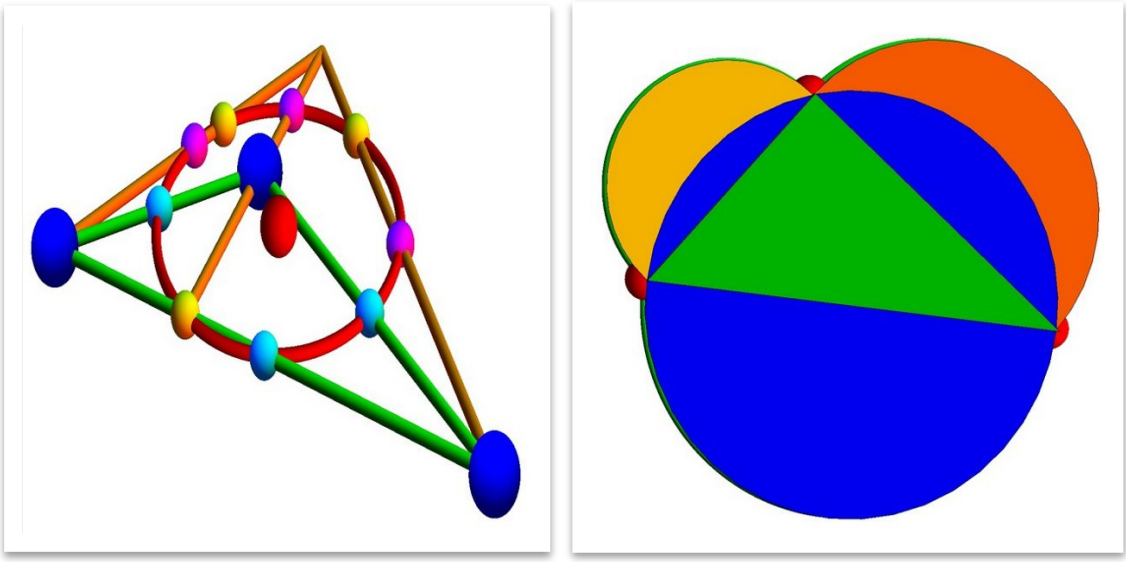


Аполлонов конус, названный в честь Аполлона из Перги, использует визуализацию конического сечения. Деревянные модели используются в школах. Правильная фигура демонстрирует образ Хаоса, точка притяжения Лоренца [52]. Как полагают – это фрактал. Динамика этой совокупности хаотическая для различных параметров.

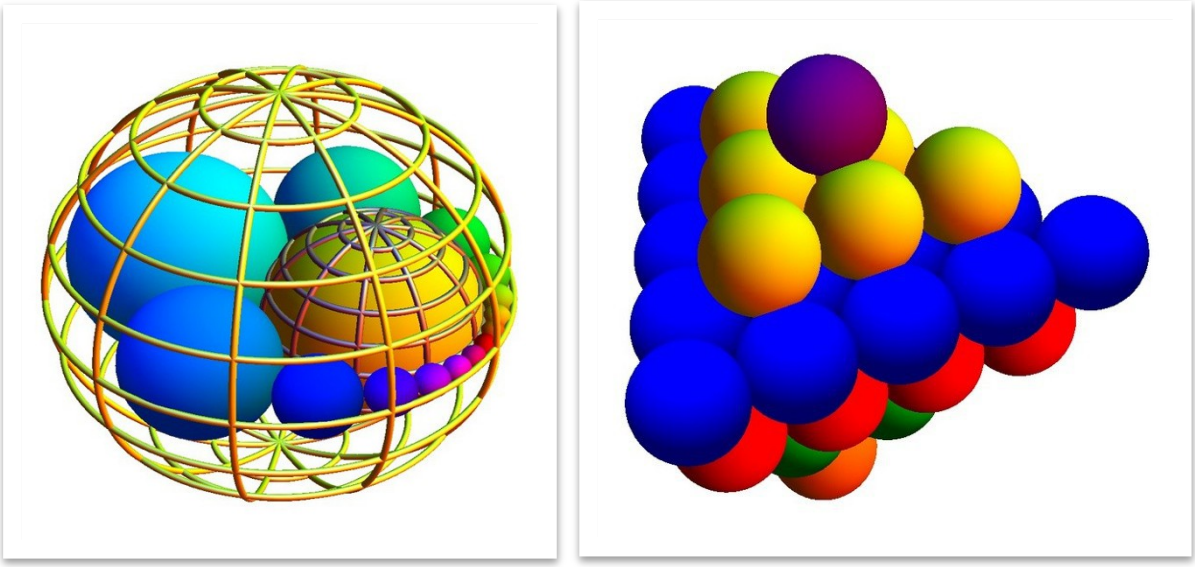




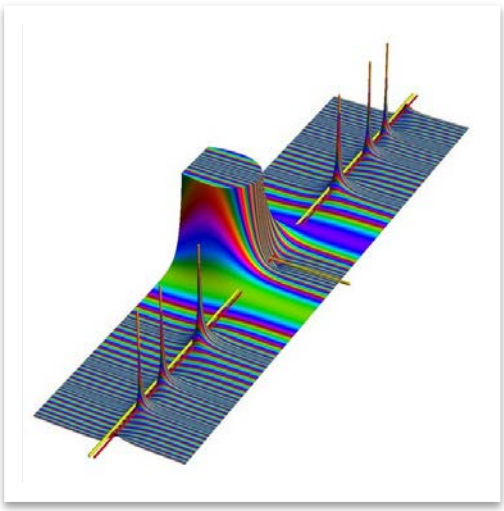
Лента Мёбиуса была утолщена, чтобы ее можно было напечатать. Правое изображение показывает ленту Мёбиуса с самопересечением. Это пример, где система компьютерной алгебры блистает. Чтобы сделать поверхность более толстой, нам нужно вычислить нормальный вектор в каждой точке поверхности.

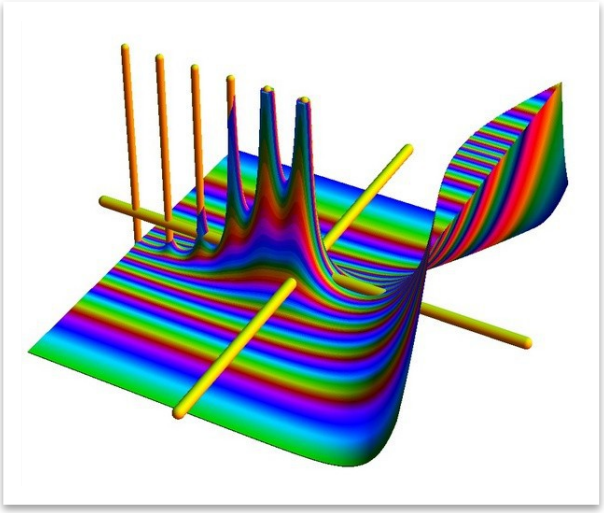


Теорема девяти точек Фейербаха (слева), реализованная в 3D (прим. пер.: сама теорема гласит – окружность девяти точек касается вписанной и всех вневписанных окружностей треугольника). Правая фигура иллюстрирует теорему Гиппократа, попытка квадратуры круга (прим. пер.: построение с помощью линейки и циркуля квадрата, равного по площади кругу с радиусом R=1). Треугольник имеет такую же площадь, как «луночки» – серповидные фигуры, ограниченные дугами двух окружностей.

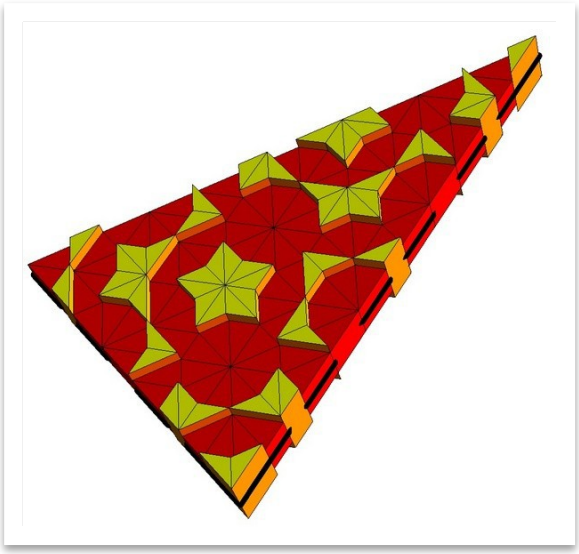


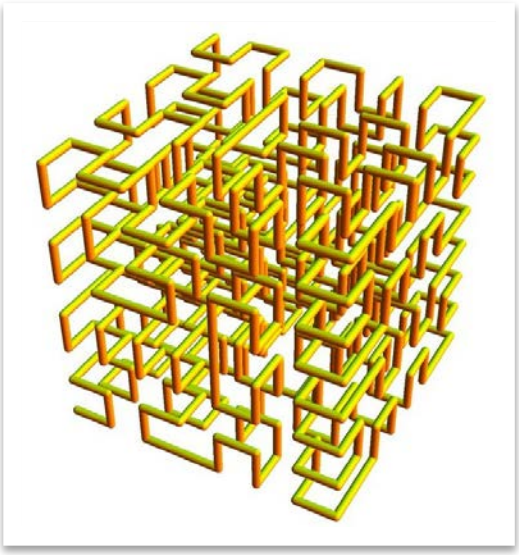
Слева изображен гекслет Содди. Чтобы построить этот массив, потребуется провести соответствующие преобразования, например, преобразования Мёбиуса. Иллюстрация справа показывает существование бесконечного множества плотных объединений в пространстве. Если существует множество близко расположенных кубов и множество близко расположенных шестиугольников, то эти множества можно объединить.



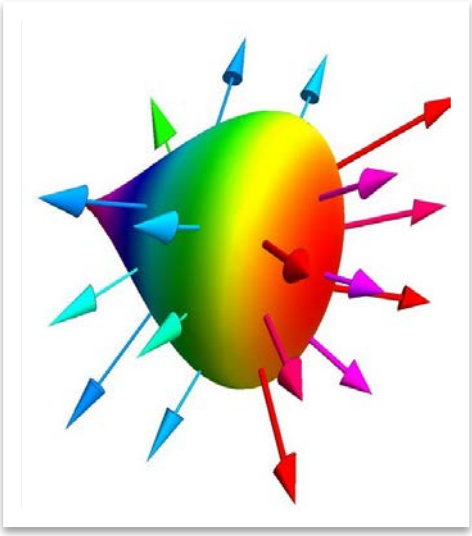


Граф 1/|ζ(x+iy)| показывает нули зета-функции ζ (z) как вершины. Догадка Римана в том, что все эти корни находятся на строке x = ½. Справа изображена Гамма функция, которая расширяет функцию факториала от положительных целых чисел до комплексной плоскости Γ (x) = (x – 1)! для положительного x. Эти графы создаются для последующей печати.





Две фигуры из различных областей геометрии. Первое изображение позволяет распечатывать апериодическую черепицу Пенроуза, состоящую из фигур, называемых "дротик" и "воздушный змей". Чтобы создать мозаичное размещение сначала в 2D, мы использовали код из [37] раздел 10.2. Вторая фигура – это третья стадия рекурсивно определенной кривой Пеано, кривая заполнения пространства.



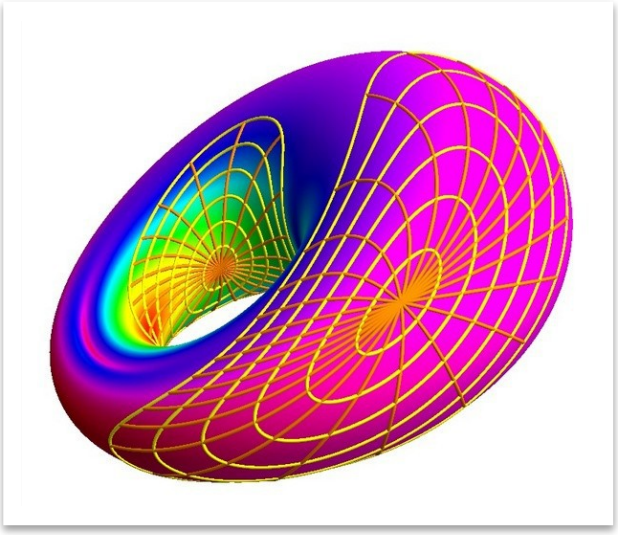
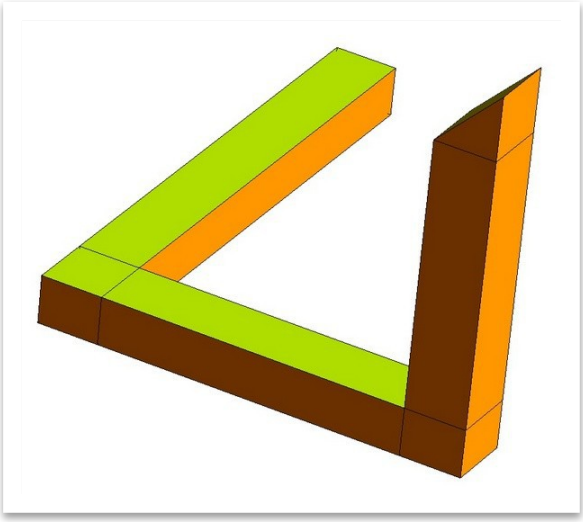
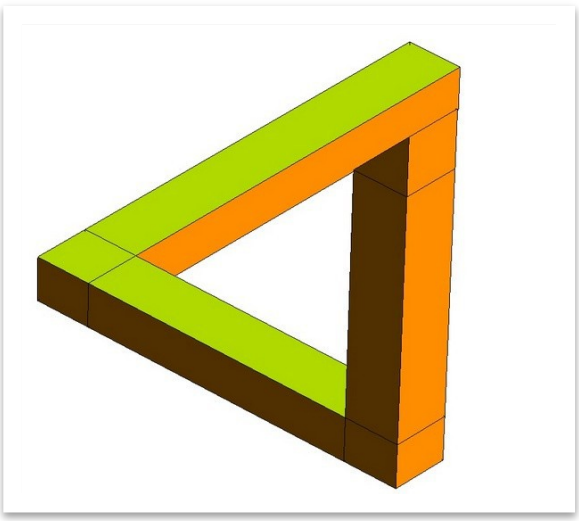
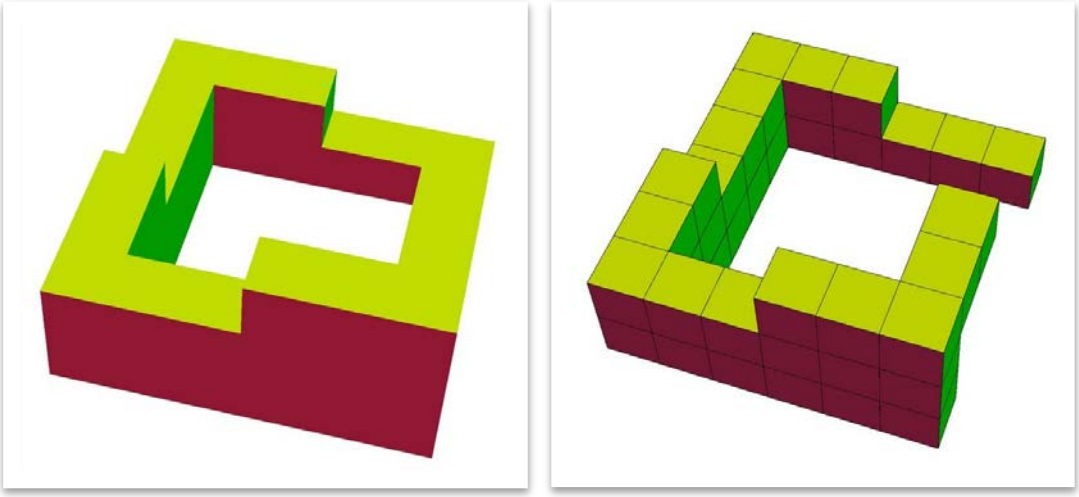


Иллюстрация теоремы в многовариантном исчислении, градиент перпендикулярен уровню поверхности. Второе изображение иллюстрирует экспоненциальное отображение в Римановой геометрии, где мы видим волновые фронты в точке положительного искривления и в точке отрицательного искривления. Дифференциальные уравнения сложны, но Mathematica заботится об этом.

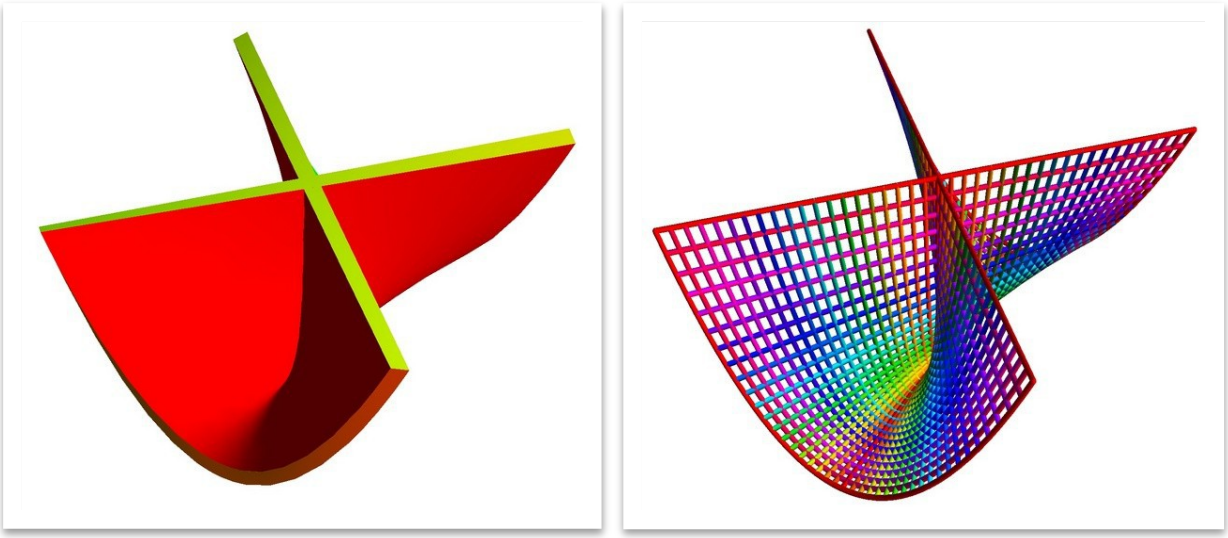




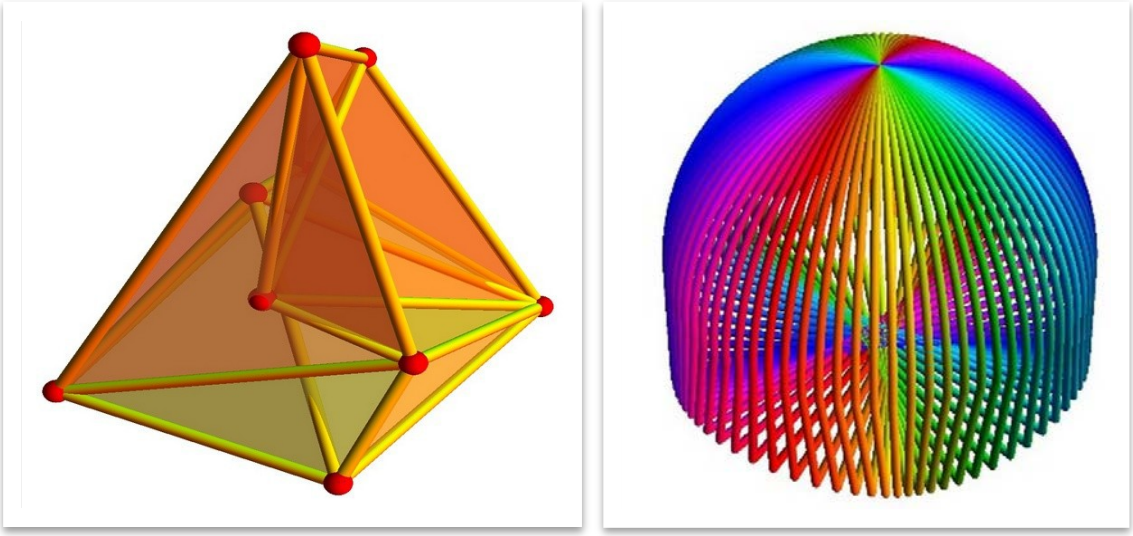
Отпечаток треугольника Пенроуза. Фигура была создана Оскаром Рёйтерсвердом и популяризирована Роджером Пенроузом[53]. С помощью Mathematica впервые реализована в [36].



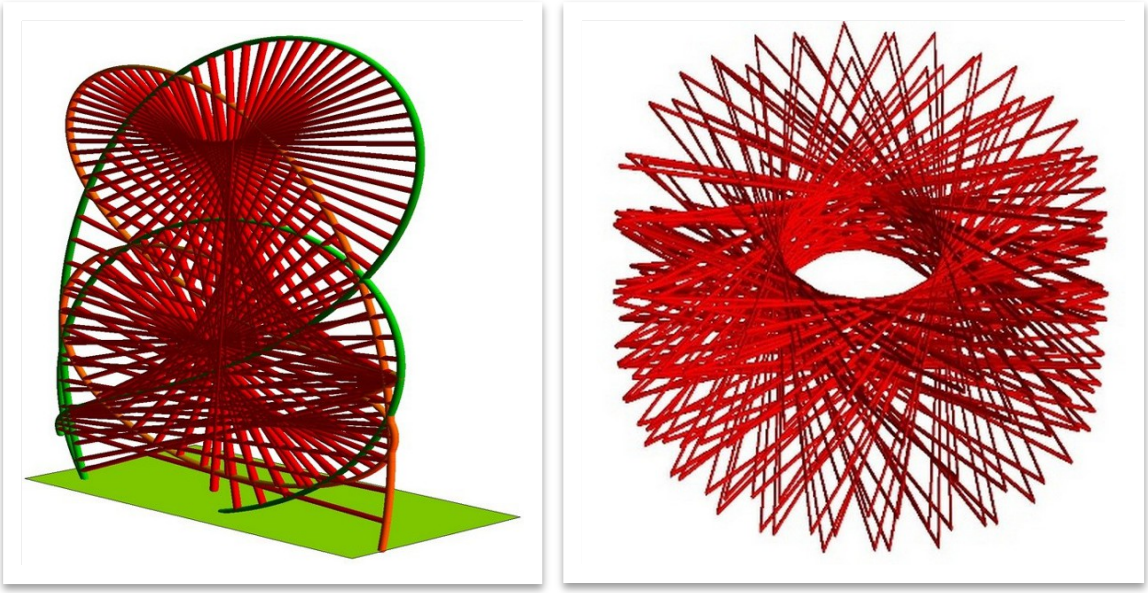
Отпечаток упрощенной версии лестницы Эшера. Если объект повернуть под правильным углом, то становится видна невозможная лестница. В напечатанном виде объект может демонстрировать геометрию невозможных фигур.



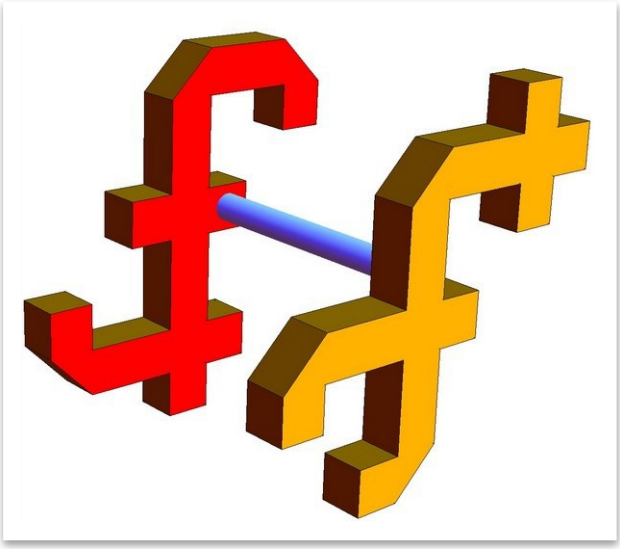
Зонтик Уитни – символ теории катастроф. Это типичная форма каустики волнового фронта, движущегося в пространстве. Слева мы видим, как поверхность была утолщена, что делает фигуру пригодной для печати. Справа, искривления сетки представлены как трубки. Это так же способ сделать объект пригодным для печати.

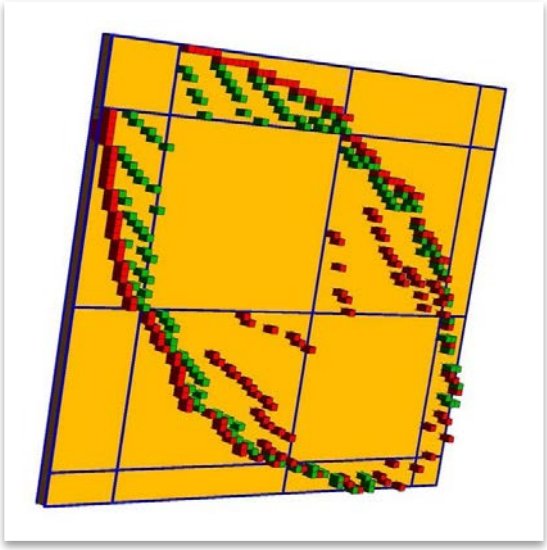


Фигура слева демонстрирует многогранник Штеффена, или "изгибаемая поверхность". Можно менять его форму, при этом расстояния между точками будут неизменны. Это удивительно, потому что теорема Коши гласит, что такое невозможно для выпуклых тел[54]. Изображение справа показывает как построить каустику на поверхности заданной формы.

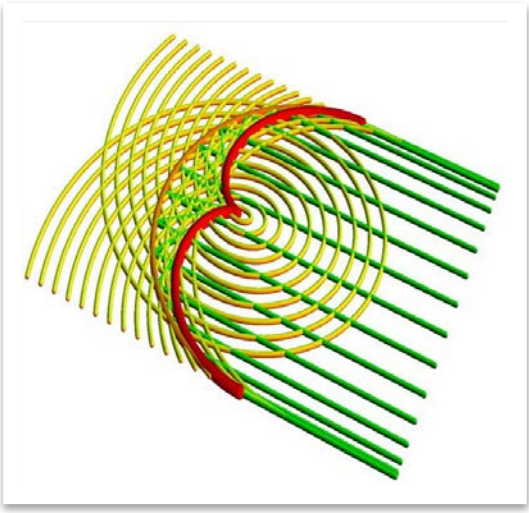


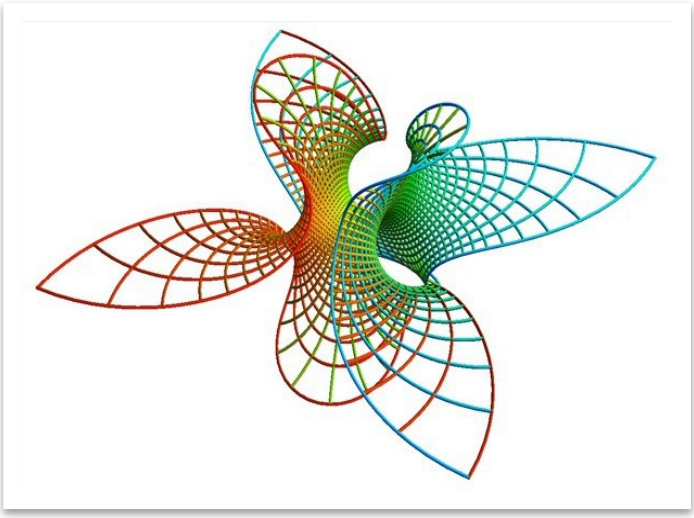
Первое изображение иллюстрирует падающую палку, отталкивающуюся рикошетом от стола. Мы видим стробоскопический снимок траектории. Второе изображение, иллюстрирует орбиту бильярда на трехмерном бильярдном столе[55].



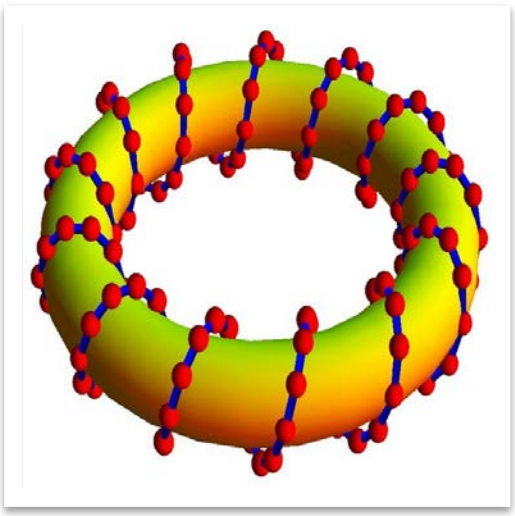


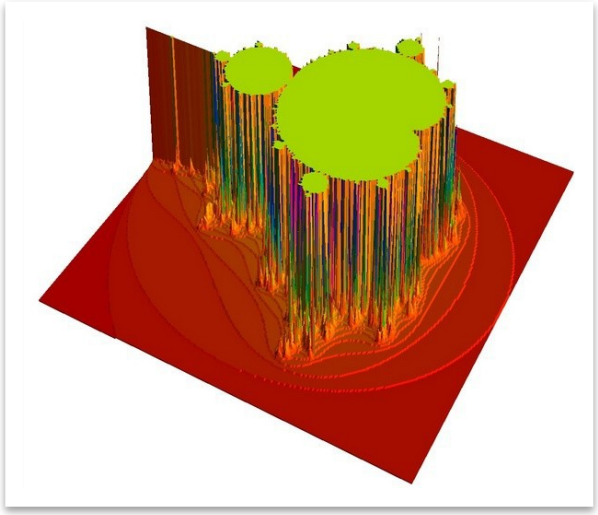
Левое изображение показывает два изоспектральных цилиндра, созданные Гордоном-Веббом. Правое изображение показывает выполненную распечатку графика оператора Дирака[56].



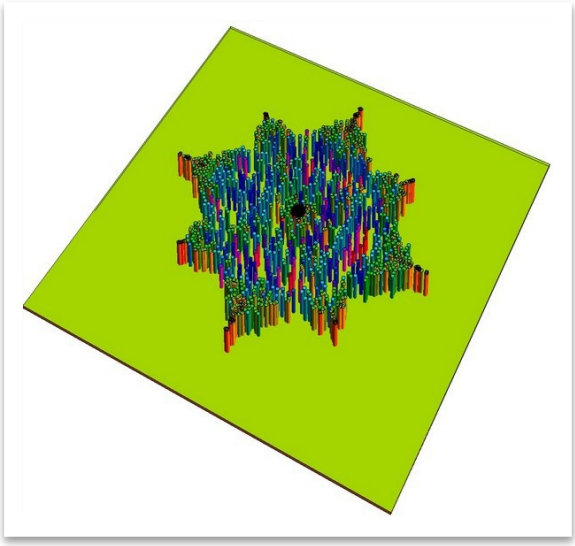


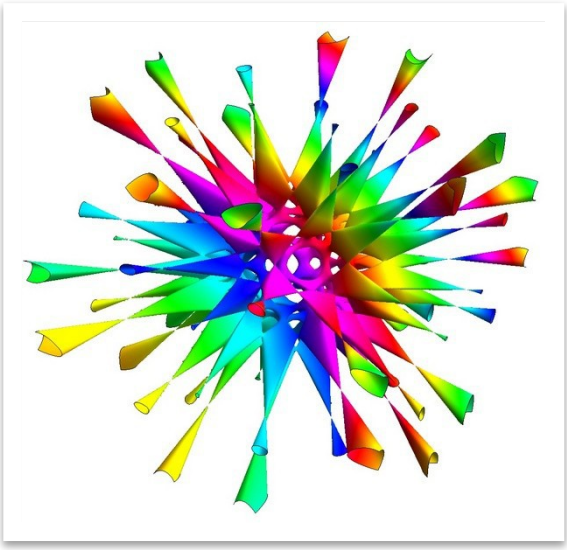
Левое изображение показывает каустику кофейной чашки. Это знак теории катастроф. Правое изображение показывает минимальную поверхность Косте, использующую параметризацию, открытую Греем[57].



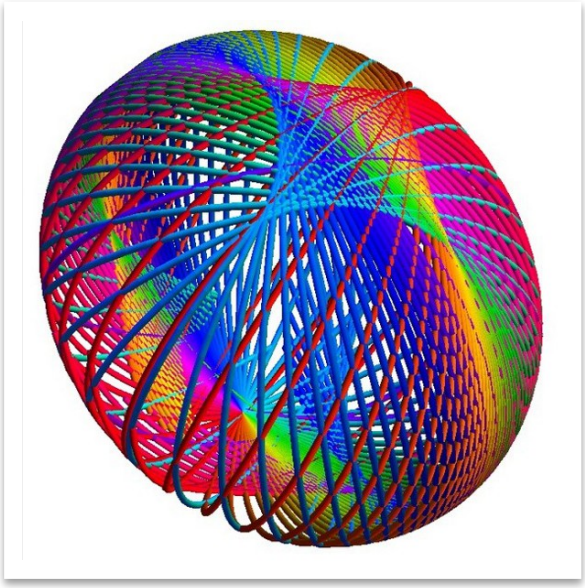


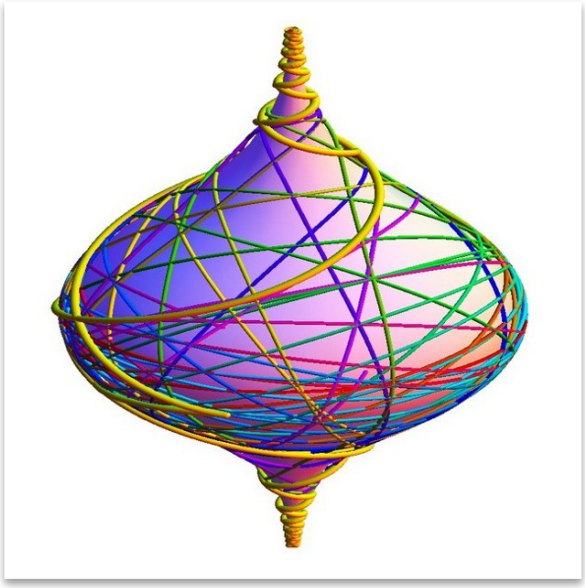
Левое изображение демонстрирует граф торуса, правое изображение показывает множество Мандельброта в 3D. Фантастические компьютерные изображения фрактальных пейзажей были получены еще 25 лет назад[58].



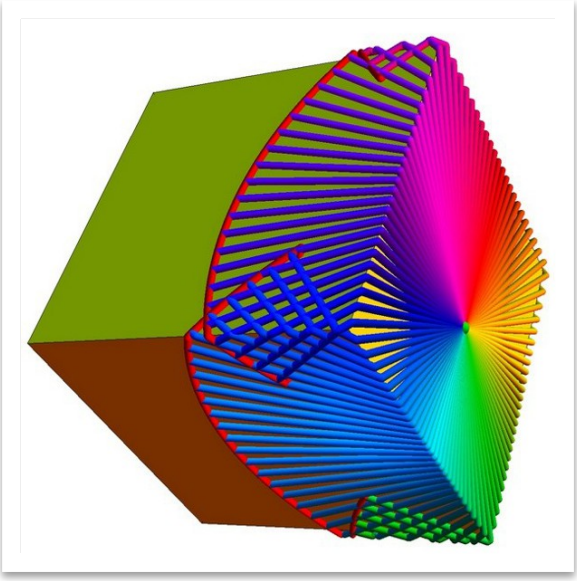


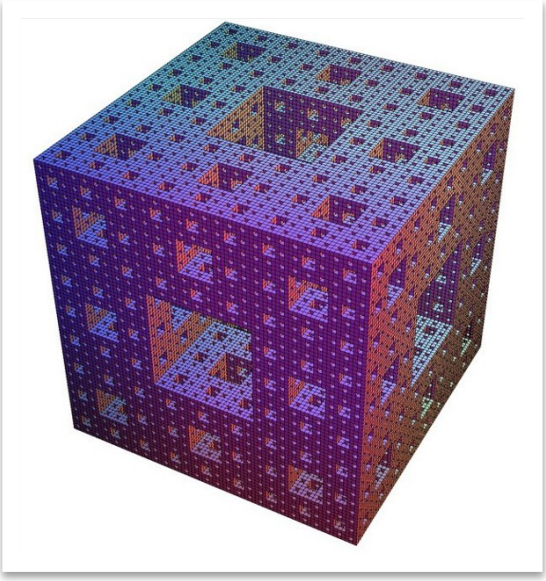
Левое изображение иллюстрирует спектр матрицы, где элементы беспорядочны, но соотнесены. Элементы даны значениями квазипериодической функции. Мы уже наблюдали экспериментально, что график спектральной функции имеет фрактальную природу в комплексной плоскости. Изображение может быть распечатано. Справа пример decic поверхности, нулевое геометрическое место точек f (x, y, z) = 0 многочлена десятого порядка в трех переменных. Мы показываем область определения f (x, y, z) ≤ 0.



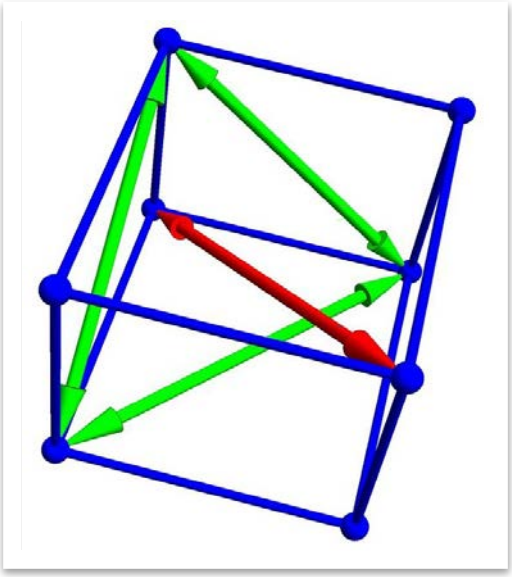


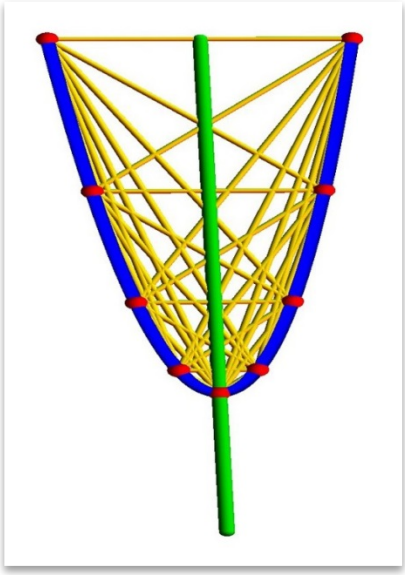
Левая фигура изображает геодезический поток на эллипсоиде без осевой симметрии. Последняя теорема Якоби, все еще нерешенная задача, утверждает, что у всех каустических поверхностей есть 4 точки возврата. Правое изображение показывает некоторую геодезию, начинающуюся в точке поверхности вращения.



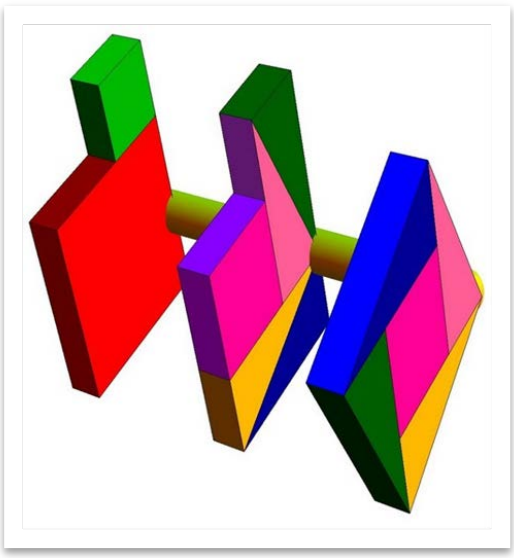


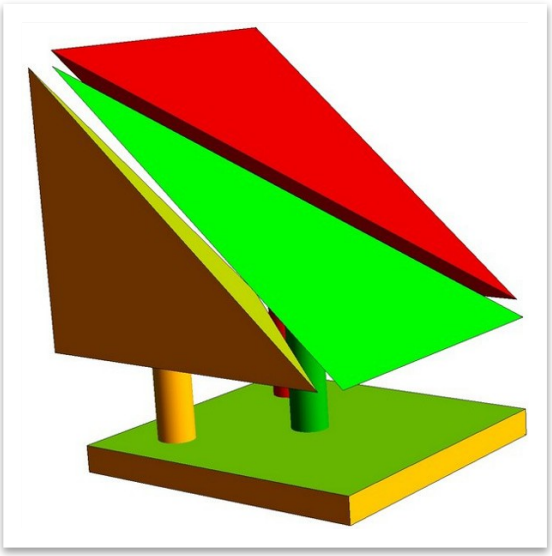
Волновой импульс на кубе. Несмотря на простоту установки, волновые импульсы становятся очень сложными. Правая фигура показывает аппроксимацию губки Менджера, фрактал в трехмерном пространстве. Это важно для топологии, потому что это содержит очень компактное метрическое пространство топологической размерности 1.



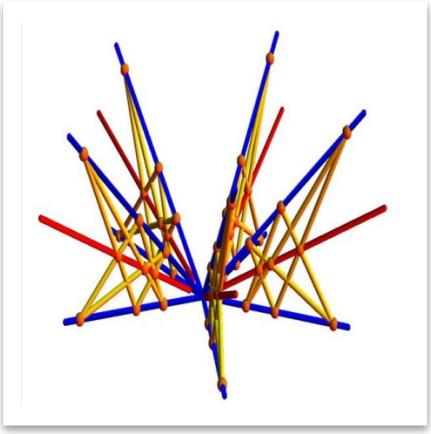


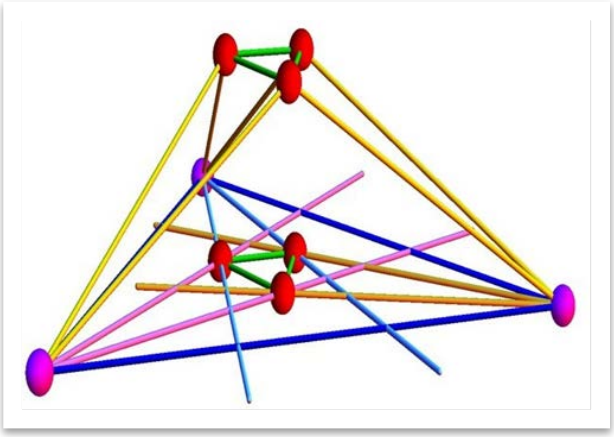
Фигура слева иллюстрирует Эйлеров кирпич. Неизвестно, существует ли кубоид, для которого все длины сторон, все поверхностные и пространственная диагонали – целые числа. Если все поверхностные диагонали целочисленные, то кубоид зовется Эйлеровым кирпичом. Если, вдобавок к этому, пространственная диагональ – целое число, то это совершенный Эйлеров кирпич. Правая фигура показывает, как можно выполнить умножение чисел, используя параболу.



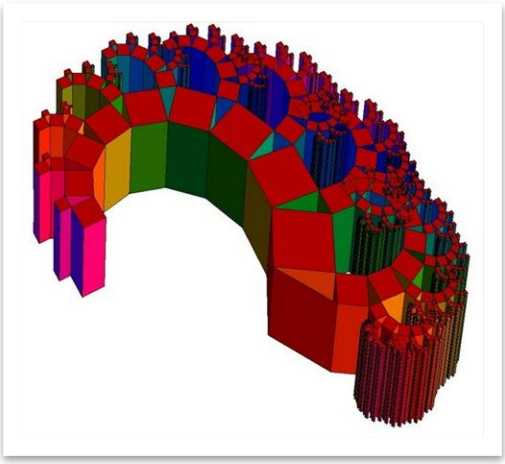


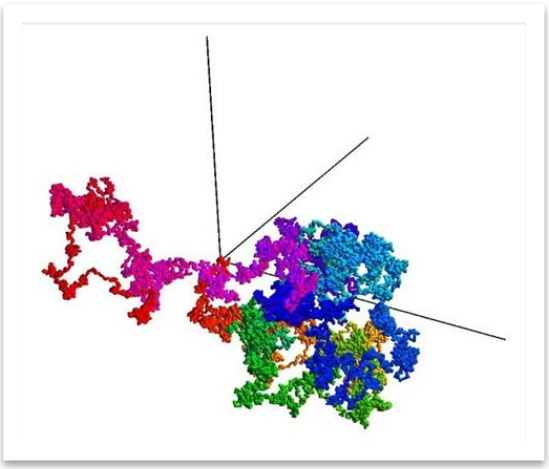
Фигура слева иллюстрирует доказательство теоремы Пифагора[59]. Правая фигура – это доказательство того, что объем пирамиды равен одной трети от площади основания, умноженной на высоту.





Слева предмет по теореме Паппа – Гюльдена слева, и представление теоремы Морли которая гласит, что угол трисектрис произвольного треугольника встречаются в равностороннем треугольнике.





Фигура слева показывает фрактал названный «дерево Пифагора». Правое изображение показывает случайное блуждание в трех измерениях. В отличие от одного или двух измерений, случайные блуждания в трех измерениях не возвращаются с вероятностью 1 [60].

Таблицы и фрагменты кода

A) Революции. Первая таблица объединяет информационную и промышленную революции.

Информационные революции		Промышленные революции	
Печатный пресс Гутенберга	1439	Паровой двигатель, сталь и текстиль	1780
Механический вычислитель	1642	Автомобили, Химия	1850
Персональный компьютер, сот. телефон	1973	Персональный компьютер, быстрое прототипирование	1969

По промышленным революциям см. [61] страницу 3, по второй промышленной революции [62] страница 2, по третьей см.[21] страницы 34, 23.

B) Изменения в сообщении, восприятии и учебных кабинетах. В таблице приведены примеры прорывных открытий в сообщениях и вариантах применения в школах. Среднее число указывает, сколько лет назад это произошло.

Сообщение			Восприятие			Учебный кабинет		
Алфавит	20K	Кость Ишанго	Проекция	1K	Камера обскура	Модели	2K	Греки
Фигуры	6K	Таблички из глины	Очки	730	Салвино Д'Артмате	Счеты	1.5K	Абак
Модели	2K	Апполон	Микроскоп	420	Янссен	Классная доска	1K	Тарих аль-Хинд
Книги	560	Гутенберг	Телескоп	400	Кеплер	Компьютерная алгебра	50	Schoonship
Фото	170	Фотография	Рентген	110	Рентген	Калькулятор	40	Busicom
Фильмы	130	Кинематограф	МРТ	60	Катскан	Powerpoint	30	Presenter
3D печать	30	Стереолитография	3D сканирование	25	Cyberware	3D модели	15	Makerbot

Ранние системы компьютерной алгебры (computer algebra system – CAS) в1960-х были Mathlab (не путать с MATLAB – *прим. ред.*), Cayley, Schoonship, Reduce, Axiom and Macsyma[63]. Как студенту, первому автору были предоставлены Macsyma, Cayley (который позже стал Magma) и Reduce. Мы живем во время, когда начинают размываться границы трех категорий: сотовые телефоны с видео и аудио датчиками, их можно носить как очки и подключать к Паутине. В аудитории учителя уже сегодня фотографируют доклады студентов через сотовый телефон и могут автоматически поставить оценку. Студенты пишут на "умной" бумаге, а программа связывает записанное аудио с написанным текстом. Настанет время, когда студенты смогут распечатать эксперимент по физике и работать с ним.

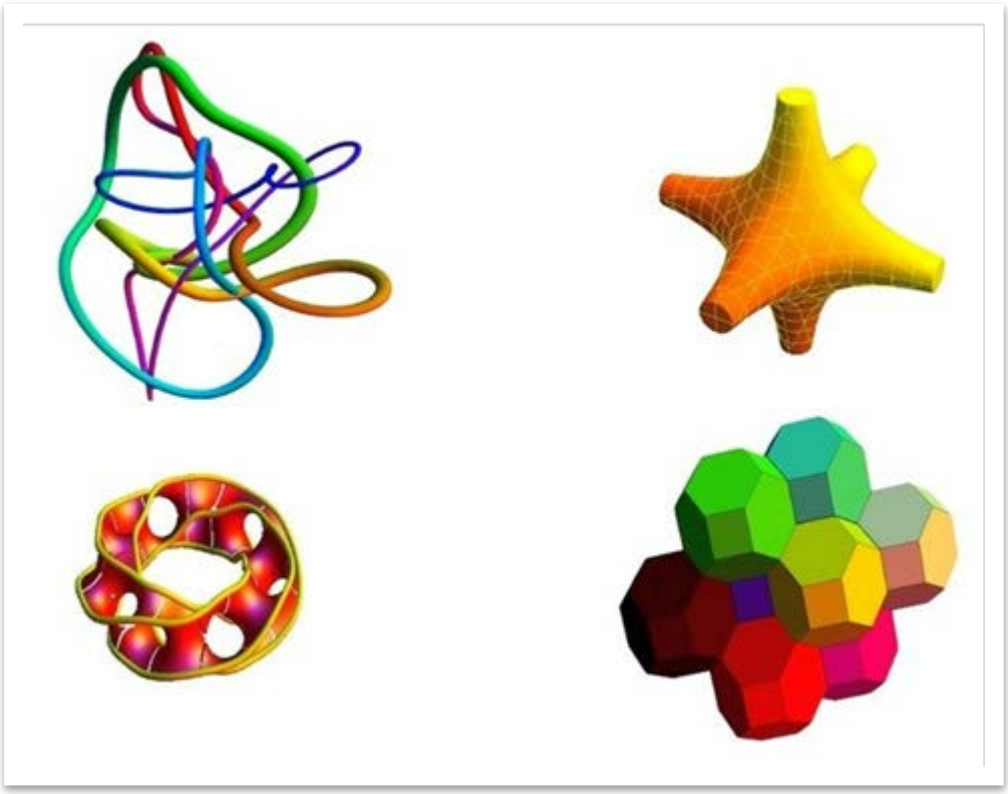
C) Исходный код для экспорта в файл STL. Следующие строки Mathematica создают объект с 13 соприкасающимися сферами.

```
s=Table[{0,n,m*GoldenRatio},{n,-1,1,2},{m,-1,1,2}];
s=Partition[Flatten[s],3];  s=Append[s,{0,0,0}];
s=Union[s,Map[RotateRight,s],Map[RotateLeft,s]];
S=Graphics3D[Table[{Hue[Random[]],Sphere[s[[k]]]},{k,12}]]
Export["kissing.stl",S,"STL"]
```

D) Формат STL. Приведен верх файла kissing.stl, преобразованного с использованием «admesh» в читаемый человеком формат ASCII. Весь файл имеет 104'000 строк и содержит 14'640 граней. Строка с «normal» содержит вектор, указывающий ориентацию треугольной грани.

```
solid  Processed by ADMesh version 0.95
  facet normal  2.45300293E-01 -3.88517678E-02  9.68668342E-01
    outer loop
      vertex   1.64594591E-01  0.00000000E+00  9.86361325E-01
      vertex   1.56538755E-01 -5.08625247E-02  9.86361325E-01
      vertex   3.08807552E-01 -1.00337654E-01  9.45817232E-01
    endloop
  endfacet
```

E) Примеры Mathematica. Вот примеры основных «миниатюрных программ», которые могут использоваться для создания форм:



- E1) Дополнение некоторых «узлов»:

```
u = KnotData[{"PretzelKnot",{3, 5, 2}}, "SpaceCurve"];
v = KnotData[{"TorusKnot", {5, 11}}, "SpaceCurve"];
Graphics3D[Tube[Table[3u[t]-4v[t],{t,0,2 Pi,0.001}],0.3]]
```

- E2) График области:

```
RegionPlot3D[
 x^2 y^2+z^2 y^2+x^2 z^2<1 && x^2<6 && y^2<6 && z^2<6,
 {x,-3,3},{y,-3,3},{z,-3, 3}]
```

- E3) Поверхность Шерк-Коллинз [64], которая близка к минимальной поверхности:

```
T[{x_,y_,z_},t_]:={x Cos[t]-y*Sin[t],x Sin[t]+y*Cos[t],z};
W[{x_,y_,z_},t_]:={(x+3)Cos[t],(x+3)Sin[t],y}; A=ArcTan; L=Log;
f[z_]:=Module[{p=Sqrt[2Cot[z]],q=Cot[z]+1,r=Re[z]/3},
W[T[Re[{u(L[p-q]-L[p+q])/Sqrt[8],v*I(A[1-p]-A[1+p])/Sqrt[2],z}],r],r]];
Show[Table[ParametricPlot3D[f[x+I*y],{x,0,6Pi},{y,0,6}],{u,-1,1,2},{v,-1,1,2}]]
```

- E4) Многогранная мозаика: Сейчас команды Mathematica "Транслировать" и "Повернуть" или "Масштабировать" производят STL-файлы, непригодные для печати. Требуется взять части объекта и собрать их вместе. Приведен пример наглядно доказывающий, что возможно заполнить пространство мозаикой из усеченных восьмигранников.

```
T[s_, scale_, trans_] := Module[{P,E},
   P = Table[scale*s[[1,k]] + trans,{k,Length[s[[1]]]}];
   E = s[[2,1]]; Graphics3D[Table[{Polygon[Table[P[[E[[k,1]]]],
   {l,Length[E[[k]]]}]},{k,Length[E]}]]];
P=PolyhedronData["TruncatedOctahedron","Faces"];
Show[Table[T[P,1,{k+l+2m,k-l,3m/2}],{k,-1,1,2},{l,-1,1,2},{m,0,1}]]
```

Ссылки

1. R. Netz. The Shaping of Deduction in Greek Mathematics: A study in Cognitive History. Cambridge University Press, 1999.
2. M. Kline. Mathematical thought from ancient to modern times. The Clarendon Press, New York, 2. edition, 1990.
3. E. R. Tufte. Visual Explanations. Graphics Press, Cheshire, 1997.
4. P. Bender. Noch einmal: Zur Rolle der Anschauung in formalen Beweisen. Studia Leibnitiana, 21(1):98-100, 1989.
5. M. Levi. The Mathematical Mechanic. Princeton University Press, 2009.
6. G. Hanna and N. Sidoli. Visualisation and proof: a brief survey of philosophical perspectives. Math. Education, 39:73-78, 2007.
7. A. S. Posamentier. Math Wonders, to inspire Teachers and Students. ASCD, 2003.

8. R. S. Palais. The visualization of mathematics: Towards a mathematical exploratorium. Notices of the AMS, June/July 1999, 1999.
9. E. Slavkovsky. Feasability study for teaching geometry and other topics using threedimensional printers. Harvard University, 2012. A thesis in the field of mathematics for teaching for the degree of Master of Liberal Arts in Extension Studies.
10. O. Knill and E. Slavkovsky. Thinking like Archimedes with a 3D printer. http://arxiv.org/abs/1301.5027, 2013.
11. J. H. Conway and R. K. Guy. The book of numbers. Copernicus, 1996.
12. C. Goodman-Strauss J. H. Conway, H. Burgiel. The Symmetries of Things. A.K. Peterse, Ltd., 2008.
13. Clifford A. Pickover. The Math book, From Pythagoras to the 57th dimension. 250 Milestones in the History of Mathematics. Sterling, New York, 2009.
14. T. Jackson. An illustrated History of Numbers. Shelter Harbor Press, 2012.
15. A. Fomenko. Visual Geometry and Topology. Springer-Verlag, Berlin, 1994. From the Russian by Marianna V. Tsaplina.
16. M. Berger. A Panoramic View of Riemannian Geometry. Springer Verlag, Berlin, 2003.
17. K. G. Cooper. Rapid Prototyping Technology, Selection and Application. Marcel Dekker, Inc, 2001.
18. C. S. Lim C. K. Chua, K. F. Leong. Rapid Prototyping. World Scientific, second edition, 2003.
19. A. Kamrani and E. A. Nasr. Rapid Prototyping, Theory and Practice. Springer Verlag, 2006.
20. M.Brain. How Stereolithography 3-D layering works. http://computer.howstuffworks.com/stereolith.htm/printable, 2012.
21. D. Rosen I. Gibson and B. Stucker. Additive Manufacturing Technologies. Springer, 2010.
22. J. Rifkin. The third industrial revolution. Palgrave Macmillan, 2011.
23. J. Rifkin. The third industrial revolution: How the internet, green electricity and 3d printing are ushering in a sustainable era of distributed capitalism. World Financial Review, 2012.
24. Economist. The third industrial revolution. Economist, Apr 21, 2012, 2012.
25. E. M. Rocha J. M. Borwein and J. F. Rodrigues. Communicating Mathematics in the Digital Era. A. K. Peters, 2008.
26. H. Lipson. Printable 3d models for customized hands-on education. Paper presented at Mass Customization and Personalization (MCPC) 2007, Cambridge, Massachusetts, United States of America, 2007.
27. J. M. Pearce, C.M. Blair, K. J. Kaciak, R. Andrews, A. Nosrat, and I. Zelenika-Zovko. 3-d printing of open source appropriate technologies for self-directed sustainable development. Journal of Sustainable Development, 3 (4):17-28, 2010.
28. G. Lacey. 3d printing brings designs to life. techdirections.com, 70 (2):17-19, 2010.
29. R. Q. Berry, G. Bull, C. Browning, D. D. Thomas, K. Starkweather, and J. H. Aylor. Preliminary considerations regarding use of digital fabrication to incorporate engineering design principles in elementary mathematics education. Contemporary Issues in Technology and Teacher Education, 10(2):167-172, 2010.

30. D. Cliff, C. O'Malley, and J. Taylor. Future issues in socio-technical change for uk education. Beyond Current Horizons, pages 1-25, 2008. Briefing paper.
31. G. Bull and J. Groves. The democratization of production. Learning and Leading with Technology, 37:36-37, 2009.
32. B. Evans. Practical 3D Printers. Technology in Action. Apress, 2012.
33. S. Singh. Beginning Google SketchUp for 3D printing. Apress, 2010.
34. J. F. Kelly and P. Hood-Daniel. Printing in Plastic, build your own 3D printer. Technology in Action. Apress, 2011.
35. M. P. Skerritt J. M. Borwein. An Introduction to Modern Mathematical Computing. With Mathematica. SUMAT. Springer, 2012.
36. M. Trott. The Mathematica Guide book. Springer Verlag, 2004.
37. S. Wagon. Mathematica in Action. Springer, third edition edition, 2010.
38. R. E. Maeder. Computer Science with Mathematica. Cambridge University Press, 2000.
39. S. Kamin P. Wellin and R. Gaylord. An Introduction to Programming with Mathematica. Cambridge University Press, 2005.
40. J. H. Conway and N. J. A. Sloane. Sphere packings, Lattices and Groups, volume 290 of A series of Comprehensive Studies in Mathematics. Springer Verlag, New York, 2.nd edition edition, 1993.
41. J. Leech. The problem of the thirteen spheres. Math., Gazette, 40:22-23, 1956.
42. A. Van Oosterom and J. Strackee. The solid angle of a plane triangle. IEEE Trans. Biom. Eng., 30(2):125-126, 1983.
43. C. Olah. STL suppport in SAGE. Discussion in Google groups in 2009.
44. G. Hart. Geometric sculptures by George Hart. http://www.georgehart.com
45. Makerbot. Thingiverse. http://www.thingiverse.com.
46. O. Knill. A discrete Gauss-Bonnet type theorem. Elemente der Mathematik, 67:1-17, 2012.
47. T. L. Heath. A history of Greek Mathematics, Volume II, From Aristarchus to Diophantus. Dover, New York, 1981.
48. T. L. Heath. A Manual of Greek Mathematics. Dover, 2003 (republished).
49. I. Thomas. Selections illustrating the history of Greek Mathematics. Harvard University Press, third edition, 1957.
50. T. M. Apostol and M. A. Mnatsakanian. A fresh look at the method of Archimedes. American Math. Monthly, 111:496-508, 2004.
51. R. Netz and W. Noel. The Archimedes Codex. Da Capo Press, 2007.
52. C. Sparrow. The Lorenz equations: bifurcations, chaos, and strange attractors, volume 41 of Applied Mathematical Sciences. Springer-Verlag, New York, 1982.
53. G. Francis. A topological picture book. Springer Verlag, 2007.
54. M. Aigner and G.M. Ziegler. Proofs from the book. Springer Verlag, Berlin, 2. edition edition, 2010. Chapter 29.
55. O. Knill. On nonconvex caustics of convex billiards. Elemente der Mathematik, 53:89-106, 1998.
56. O.Knill. The McKean-Singer Formula in Graph Theory. http://arxiv.org/abs/1301.1408,2012.

57. A. Gray. Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica. CRC Press, 2 edition, 1997.
58. H-O. Peitgen and D. Saupe. The Science of Fractal Images. Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg, 1988.
59. H. Eves. Great moments in mathematics (I and II). The Dolciani Mathematical Expositions. Mathematical Association of America, Washington, D.C., 1981.
60. W. Feller. An introduction to probability theory and its applications. John Wiley and Sons, 1968.
61. P. Deane. The first industrial revolution. Cambridge University Press, second edition, 1979.
62. M. Levin, S. Forgan, M. Hessler, R. Hargon, and M. Low. Urban Modernity, Cultural Innovation in the Second Industrial Revolution. MIT Press, 2010.
63. S. Weinzierl. Computer algebra in particle physics. http://www.arxiv.org/hep-ph/0209234, 2002
64. B. Collins. Sculptures of mathematical surfaces. http://www.cs.berkeley.edu/sequin/SCULPTS/collins.html.

Переводчики: Woolpit, alex_itz

Наука и искусство – периодические мозаики

Джанкарло Джирарди

Международный центр теоретической физики им. Абдуса Салама, Триест, Италия

ghirardi@ictp.it

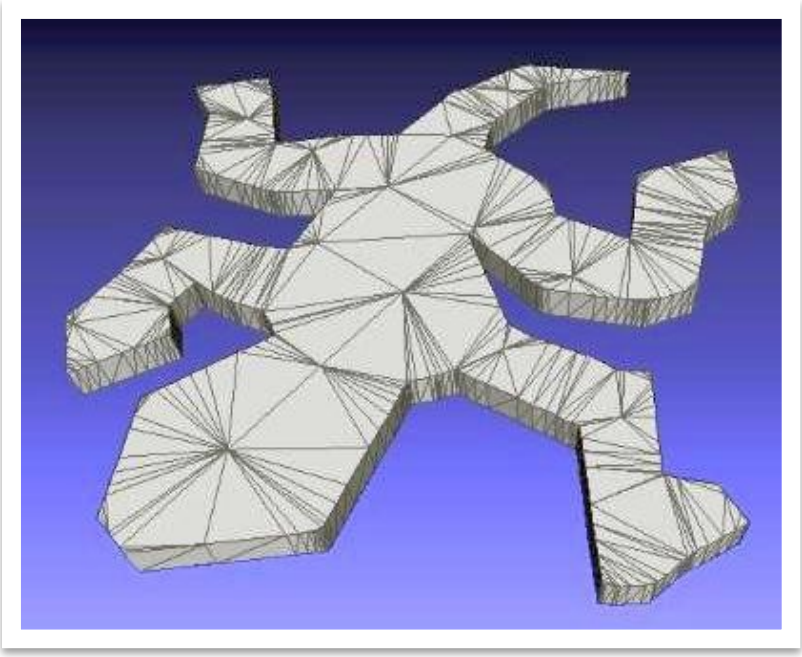
Между наукой и искусством есть чёткие взаимоотношения. Это естественно: с одной стороны, множество живых организмов проявляет бесчисленные, поразительные формы симметрии, которые, в свою очередь, значительно повлияли на художественную практику; с другой стороны, учёные поняли, что один из самых рациональных способов раскрыть законы вселенной — это обратиться к анализу симметрии.

Мозаичное разбиение плоскости Эшера, воспроизведённое на дешёвом 3D-принтере

Итак, во-первых, многие художники обратили особое внимание на симметрию, в ряде случаев даже сделали её ведущим каноном своих художественных произведений. Типичный пример — музыка, которая, в общем-то, вся пронизана и регулируется принципами симметрии и порой делает требования симметрии основным правилом создания произведения. Самые

характерные и впечатляющие примеры этого представляют нам поздние работы И.С. Баха «Искусство фуги» и «Музыкальное приношение».

Аналогичный процесс характерен для многих произведений изобразительного искусства, от архитектуры (в западноевропейской традиции она тоже относится к изобразительным искусствам — прим. пер.) до скульптуры и живописи. Можно составить подробный список случаев, когда условие симметрии стало основополагающим структурным элементом визуальных композиций, но, безусловно, самый образцовый пример представлен в графических работах великого нидерландского художника М.К. Эшера (M.C. Escher). Действительно, он систематически обращался к вопросу составления мозаики на плоскости, т.е., выявления простых элементов мозаики, которые, если разложить их рядом, позволяют сплошь покрыть всю плоскость.



13D-модель предыдущей мозаики М.К.Эшера

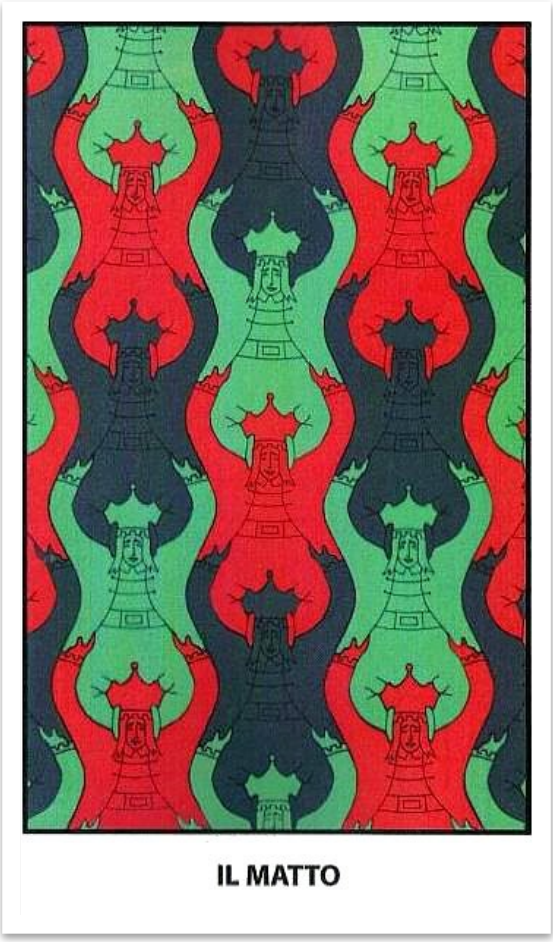
Тот же вопрос представлял собой серьёзную задачу для математических исследований. На самом деле это было просто уточнением теории групп, одного из основных формальных инструментов этой дисциплины. Это уточнение позволило доказать, что если рассматривать проблему с точки зрения симметрий, описывающих элементы вышеописанной мозаики (очевидно, что разные изображения могут проявлять одну и ту же форму симметрии), то найдётся лишь 17 способов достичь нужного результата.

Цель данной лекции — разъяснить, как так получается, что соображения симметрии подразумевают очень строгие условия, которым должны соответствовать все возможные элементы мозаики, и, как следствие, они чрезмерно ограничивают их количество.

Несмотря на то, что эта книга имеет дело с основополагающим и очень многообещающим предметом — доступной 3D-печатью, и несмотря на то, что трёхмерная симметричная структура

кристаллов очень тесно связана с проблемой мозаичного представления трёхмерного пространства, я ограничусь рассмотрением почти исключительно одномерных и двухмерных случаев, то есть создания повторяющихся орнаментальных фризов и мозаичного разбиения плоскости на идентичные фрагменты. Как мы видели в случае двухмерной плоскости, определить все возможные способы фрагментации — уже предельно сложная задача. При переходе к трём измерениям сложность увеличивается ещё сильнее. Фактически, в то время как есть всего семь типов упорядоченных линейных структур и, как уже упоминалось, 17 типов мозаичного разбиения двухмерного пространства, в трёхмерном случае возможных разбиений (мы говорим о разбиениях с симметричной структурой) оказывается 230.

Несколько примечаний в заключение. Меня пригласили прочитать лекцию для широкой публики, не имеющей никакого определённого отношения к научным проблемам. Что ж, так получилось, что много лет назад я занимался, просто ради развлечения, той же самой проблемой, которая вдохновила Эшера, т. е. выполнением мозаичного разбиения плоскости. А поскольку я считаю, что полученные мною рисунки могут показаться интересными, я завершу своё выступление упоминанием причин, по которым я взялся за претенциозную задачу создания более 30 мозаик. На самом деле я был движим странным замыслом создания колоды Таро, в которой все обычные рисунки, которые можно найти в большинстве карточных колод, имели бы форму, позволяющую составить мозаику. Мне кажется уместным добавить несколько слов о том, как я пришёл к тому, что я сделал.



Со школьных времён я интересовался представлениями Фрейда о нашем психологическом развитии. Много позже я прочёл увлекательную книгу известного итальянского писателя Итало Кальвино (Italo Calvino) «Замок скрещённых судеб». Идея Кальвино очень проста: проверить, зависит ли символическая ценность рисунка от контекста, в который он помещён. В романе множество людей, пережив ужасные события, потеряли способность говорить. Поэтому, когда они приезжают в Замок и находят на столе Колоду Таро, один из них начинает раскладывать последовательность карт, которая вкратце передаёт его историю. Игру продолжают другие, до тех пор пока один из них не оказывается перед большой прямоугольной площадью, замощённой всеми картами. Любая последовательность, которая образуется при перемещении по прямоугольнику карт в разных направлениях (по горизонтали, вертикали, диагонали и т. д.), складывается в захватывающую историю (Гамлет, Эдип и т. д.), и эти истории, то есть судьбы их героев, в буквальном смысле пересекают друг друга.

Таким образом я начал интересоваться картами Таро. И обнаружил, что есть разные возможности их интерпретации, от самых глупых, таких как их использование для предсказания будущего, до исследований серьёзных учёных, например Юнга (Jung) и Райхенбаха (Reichenbach). Мне стало очевидно, что с позиции фрейдизма у любого изображения таро есть определённое значение (обычно Император — это образ отца, Императрица — требовательной матери, Верховная Жрица — хорошей, отзывчивой матери, Влюблённые символизируют выбор между принципом удовольствия и реальности и т. д.). Если смотреть с этой точки зрения, то естественным образом приходишь к следующей мысли: каждое изображение показывает ключевой момент личного психологического развития. Но если кто-то является жертвой какого-нибудь «комплекса», давайте вспомним, к примеру, эдипов комплекс, то этот комплекс пропитывает собой весь его мир.

Для тех, кто знал и любил Эшера, предположение было очевидным и интеллектуально заманчивым: так как мир карт двухмерен, то для того, чтобы показать всеобъемлющую роль отображённых в картах ключевых психологических моментов, связанные с ними образы должны заполнить двухмерный мир самих карт. Таким образом и родилась идея периодической колоды Таро.

Переводчики: aks_id

Печатная модель детектора ALICE из CERN

Штефан Россеггер

CERN — Европейская организация по ядерным исследованиям, Швейцария

Stefan.Rossegger@cern.ch

Понимание принципа — это начало понимания науки. Без концептуального осмысления невозможно донести до широкой публики идею того, чего вы хотите достичь. Без заинтересованности широкой публики вы никогда не вдохновите следующее поколение учёных и исследователей, от которых будет зависеть грядущая наука.

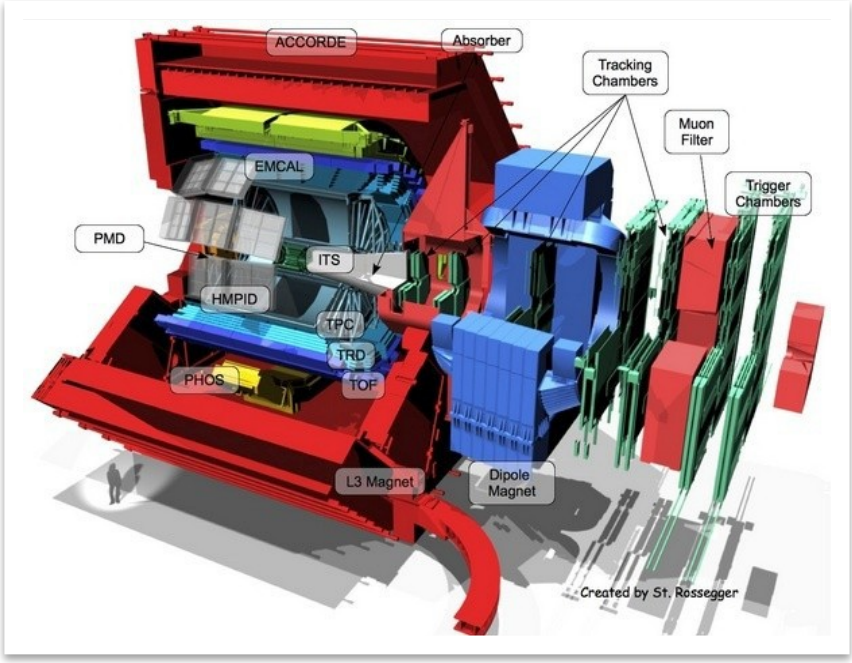
Когда принципы можно легко продемонстрировать, как, например, в химии или биологии, тогда научные результаты можно без проблем показать широкой публике, которая может ничего не знать о происходящей реакции. Эффектные результаты притягивают взгляд, моментально вызывают интерес и удерживают внимание людей, позволяя объяснить стоящую за ними науку.

В случае с физикой элементарных частиц, которую изучают и испытывают в ЦЕРН, трудность состоит в том, что мы имеем дело с реакциями, которые невозможно увидеть напрямую. Частицы образуются при столкновениях в Большом адронном коллайдере (БАК), самом большом ускорителе частиц в мире. Их траектории и свойства определяются на основе их взаимодействий в детекторах, компьютерного мониторинга и последующего математического моделирования. Из-за запутанности научных экспериментов и их концептуально сложной природы — как относящихся к физике элементарных частиц — объяснить по-простому, чем занимается БАК, становится огромной проблемой. Эти реакции практически за гранью воображения широкой публики.

Поэтому приходится искать другие концептуальные методы привлечения людей. 3D-модели и являются такими попытками объяснить, как выглядят детекторы частиц, как они работают и что происходит во время столкновения. Сначала немного об истории ЦЕРН и эксперимента ALICE и наших усилиях по подержанию интереса у людей.

ЦЕРН возникла в 1950-е годы как Европейская организация по ядерным исследованиям. Сегодня она также известна под названием Европейская лаборатория физики элементарных частиц. Это один из самых авторитетных мировых исследовательских центров с главным офисом в Женеве, Швейцария. Здесь занимаются фундаментальной физикой — изучают, что приводит в движение нашу Вселенную. Несколько самых больших и самых сложных в мире механизмов используются в ЦЕРН для изучения самых крошечных строительных блоков природы — элементарных частиц. Сталкивая эти сверхмалые частицы материи, физики выявляют базовые законы природы. Лаборатория предоставляет исследователям самое передовое научное оборудование. Это ускорители, которые разгоняют крошечные частицы почти до скорости света, и детекторы, которые выполняют роль электронных глаз, делая частицы видимыми.

Сейчас ЦЕРН использует новый ускоритель частиц, который называется Большим адронным коллайдером (БАК). Этот механизм — современный инструмент мировых физиков, с которым они могут проникнуть глубже, чем в сердце материи. На БАК проводится множество экспериментов, в которых сотрудничают физики со всего мира. Эти физики создают детекторы частиц в своих домашних институтах и привозят их в ЦЕРН, чтобы записать результаты столкновения частиц. БАК позволяет провести четыре разных эксперимента со столкновениями. Они называются ATLAS, CMS, LHCb и ALICE.



ALICE – это «Эксперимент большого ионного коллайдера»

Экспериментальная установка ALICE, на которой я работаю, это акроним «A Large Ion Collider Experiment», что переводится как «Эксперимент большого ионного коллайдера». В отличие от других опытов на БАК, здесь изучаются столкновения тяжёлых ядер, что позволяет нам приблизится к самой ранней стадии существования Вселенной — Большому взрыву. ALICE была разработана и создана для измерения — самым доскональным из возможных способов — частиц, возникающих при столкновениях в её центре. Таким образом мы можем реконструировать и изучить развитие Вселенной в пространстве и времени. Чтобы сделать это, приходится использовать много разных детекторов, каждый из которых предоставляет физикам свою часть данных. Чтобы понять такую сложную систему, нужно наблюдать это необыкновенное явление с различных точек зрения, используя несколько инструментов одновременно.

Группа цилиндрических детекторов (от центра наружу: внутренняя трековая система (ITS), время-проекционная камера (TPC), детектор переходного излучения (TRD)) делает измерения во множестве точек (более 100 только в TPC), через которые проходит каждая несущая электрический заряд частица, и таким образом её траектория становится досконально известна. Следящие детекторы ALICE встроены в магнитное поле, изгибающее траектории частиц, и по кривизне дорожек можно определить их импульс. Внутренняя трековая система (ITS) настолько точна, что частицы, которые порождаются при распаде других частиц с очень коротким временем жизни, можно распознать по тому, что они возникли не в той точке, в которой происходило взаимодействие (т.е. не в «вершине» события), а в другой, расположенной на расстоянии одной десятой миллиметра от первой.

Кроме этого ALICE стремится узнать индивидуальные параметры каждой частицы, будь то электрон, протон, каон или пион. В дополнение к информации, получаемой от ITS и TPC,

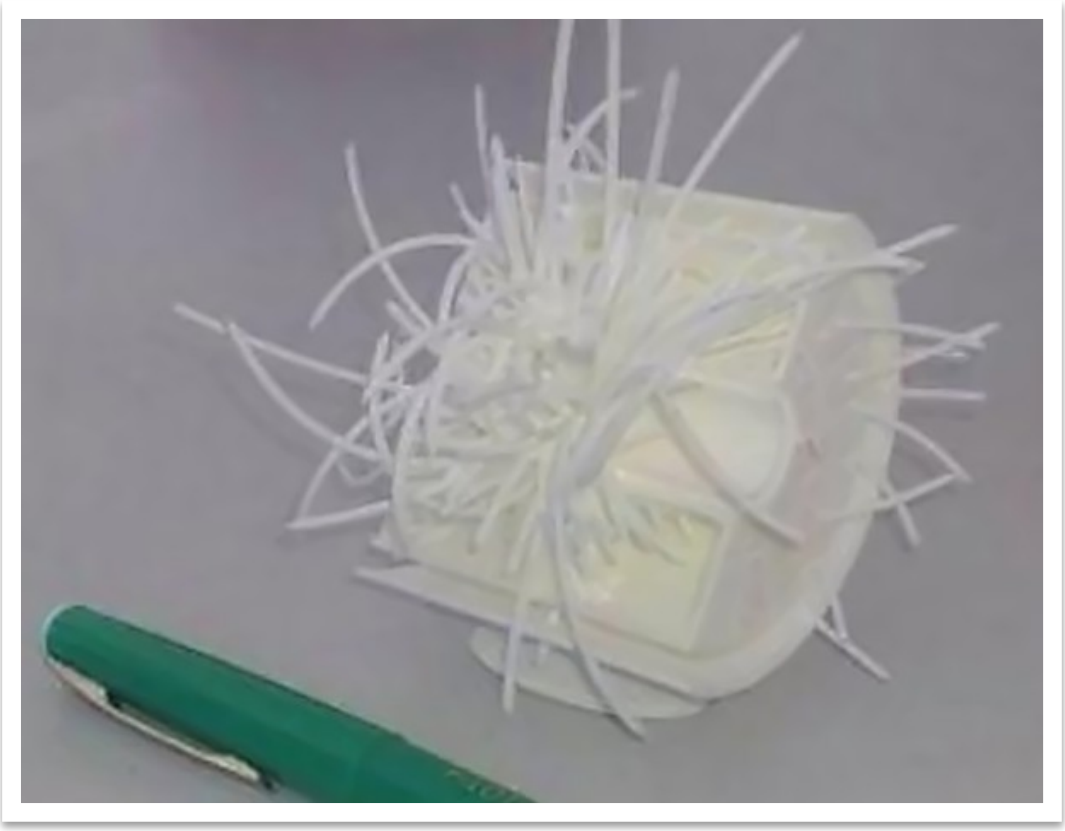
требуется больше специализированных детекторов. Детектор времени полёта (TOF) с точностью более чем в одну десятую одной миллиардной доли секунды определяет время, затрачиваемое каждой частицей на перемещение к нему из «вершины» события. Таким образом можно измерить её скорость. А детектор переходного излучения (TRD) измеряет особое излучение, испускаемое очень быстрыми частицами при прохождении через различные материалы, делая таким образом возможной идентификацию электронов. Мюоны можно измерить благодаря тому факту, что им проще проникнуть в материю, чем большинству других частиц: расположенный в передней части толстый комбинированный фильтр останавливает все другие частицы, и тогда мюоны подвергаются измерению специальным набором детекторов, мюонным спектрометром.

Из-за уже упомянутой концептуальной сложности объяснения науки, стоящей за БАК и его экспериментами, ЦЕРН приходится использовать множество способов для того, чтобы сделать скрытую часть экспериментов ближе к жизни. Один из способов ЦЕРН — это визуализация на компьютерном экране дорожек созданных при столкновениях частиц. Для непрофессионала столкновение похоже на фейерверк. Визуализация показывает дорожки частиц, которые отслеживаются детекторами после того, как происходит столкновение. Мы делаем это с помощью AliROOT, специально разработанного пакета программного обеспечения, который не только визуализирует дорожки, но и может считывать необработанные данные детекторов, отслеживает и распознаёт структуры и используется для итогового анализа данных. Вдобавок этот дисплей – главный элемент нашего посетительского центра Globe и выставки ALICE.

3D-модель первого столкновения тяжёлого иона

3D-модель, которую мы напечатали методами быстрого моделирования, это абсолютно статичная визуализация одного из первых столкновений тяжёлого иона, измеренного одним из наших детекторов — время-проекционной камерой (TPC) в 2010 году, что стало событием исторического масштаба. 3D-модель TPC, как и дорожек, была создана в свободной программе для моделирования Blender. Мы использовали дополнительный программный модуль на языке Python, чтобы загрузить реконструкцию свойств частицы из вышеупомянутого пакета AliRoot. Позже Shapeways, обычная коммерческая компания, распечатала всё это, и результат можно увидеть на рисунке на следующей странице.

Создание этой 3D-модели позволяет нам продемонстрировать реакции таким образом, чтобы они оставались интересными визуально, не будучи слишком концептуальными. Например, линии/дорожки с сильным изгибами выступают в роли частиц с низким импульсом. Самые длинные линии/дорожки показывают частицы, которые в основном движутся со скоростью света; более короткие — это более тяжёлые и оттого более медленные частицы, и так далее.



3D-распечатка первого столкновения тяжёлого иона

Эта модель — только первый шаг к выставке, на которой мы попытаемся показать наш детектор и объяснить стоящую за ним науку широкой публике.

Переводчики: aks_id

Крупномасштабная 3D-печать – от океанских глубин до Луны

Валентина Колла, Энрико Дини

Высшая школа Св. Анны, институт TeCIP, лаборатория PERCRO, Пиза, Италия,

colla@sssup.it

Компания Monolite UK, 101 Wardour Street W1F oUN, Лондон, Великобритания

enrico.dini@d-shape.com

Введение

Интерес научного и технического сообщества к крупномасштабным трёхмерным печатным технологиям в последние годы не перестаёт расти. Это происходит благодаря широкому спектру потенциальных применений при строительстве как частей зданий, так и целых домов и других сложных конструкций практически любой формы. Со времени своего появления, которое датируется 90-ми годами, техники быстрого производства в строительных масштабах достигли весьма зрелого уровня, сегодня они используются при производстве стен, крупных скульптур и дизайнерских объектов, в первую очередь для уличного использования. На рисунке 1 изображены три примера объектов, а на рисунке 2 — целый дом небольшого размера.

Рисунок 1 Уличная скульптура, скульптура «Радиолярия» и «шезлонг» для сада

Рисунок 2 Готовый дом

Все предметы, представленные на рисунках 1 и 2, были созданы при помощи технологии **D-Shape**, изобретённой и запатентованной инженером Энрико Дини (Enrico Dini) из Monolite UK. Эта технология отличается от самых известных участников рынка (например, Freeform Construction[1], разработанной в Научно-исследовательской группе быстрого производства Университета Лафборо и Contour Crafting[2]).особой функцией выборочного катализа веществ в пласте подготовленного песчаного грунта путём точечного впрыска жидких «чернил»; другие техники основаны на экструзии строительного материала, предварительно смешанного со связующим веществом или катализатором. Эта особенность позволяет печатать с D-Shape очень крупногабаритные сооружения, ведь единственное, что ограничивает объём — это размер области печати. Самая новая версия принтера (гигантский плоттер с длинной распыляющей головкой, движущейся вдоль двух рам по осям X-Y), изображённая на рисунке 3, имеет область печати 6×6 м и достигает 3 м в высоту.

Создание строительных блоков для лунного поселения

За свои уникальные свойства технология D-Shape была избрана для участия в проекте «3D-печать строительных блоков с использованием лунного грунта», субсидированного Европейским космическим агентством (ЕКА) и направленного на развитие концепций строительства поселений для постоянного обитания человека на Луне[3].

Создание человеческих колоний на Луне очень интересно с точки зрения ведения научных

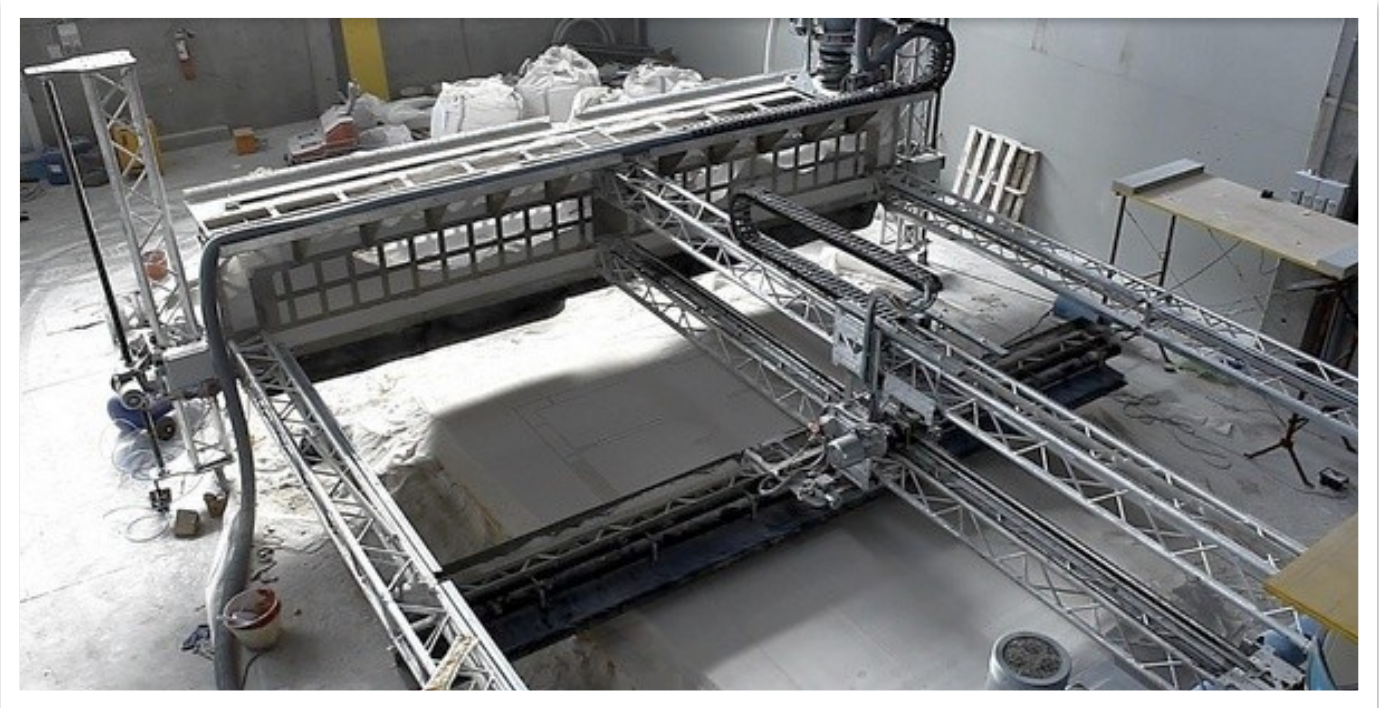


Рисунок 3 Принтер D-Shape

экспериментов, наблюдения за какой-нибудь отдалённой частью космоса без помех атмосферного щита, а также как основа для миссий по изучению глубокого космоса. Как и любая другая колонизация в человеческой истории, даже лунная должна использовать местный материал для базовой конструкции «домов». Но на Луне только песчаный грунт и немного ледяной воды. Лунный песок называют реголитом. Первая часть вышеупомянутого проекта была посвящена поиску подходящего вещества, воспроизводящего основные свойства реголита. Затем проводились тесты в вакууме, чтобы доказать, что технология D-Shape применима в отсутствие атмосферы и при пониженной гравитации, то есть в условиях, приближённых к лунным.

Эти эксперименты проходили в одной из вакуумных камер Alta SpA. Технология D-Shape к тому же была модифицирована для эксплуатации суровой лунной окружающей среды при очень ограниченной поддержке со стороны людей-операторов (возможность дистанционного управления без человеческого контроля тоже рассматривалась). Высшая школа Св. Анны провела исследования в этом направлении: принтер оснастили камерой, фотографирующей каждый напечатанный слой, и алгоритмами обработки изображений, способными сравнивать

напечатанную поверхность с её идеальной формой и находить возможные дефекты. Логические схемы управления тоже были модифицированы, чтобы в автономном режиме выявлять и исправлять сбои в работе и дефекты печати. В заключение вся конструкция принтера была перепроектирована таким образом, чтобы она могла быть — в будущем — более гибкой, приспосабливаемой к неровному лунному грунту и, прежде всего, способной двигаться и взаимодействовать с другими автономными и полуавтономными вспомогательными аппаратами, например с теми, которые будут собирать реголит для печати.

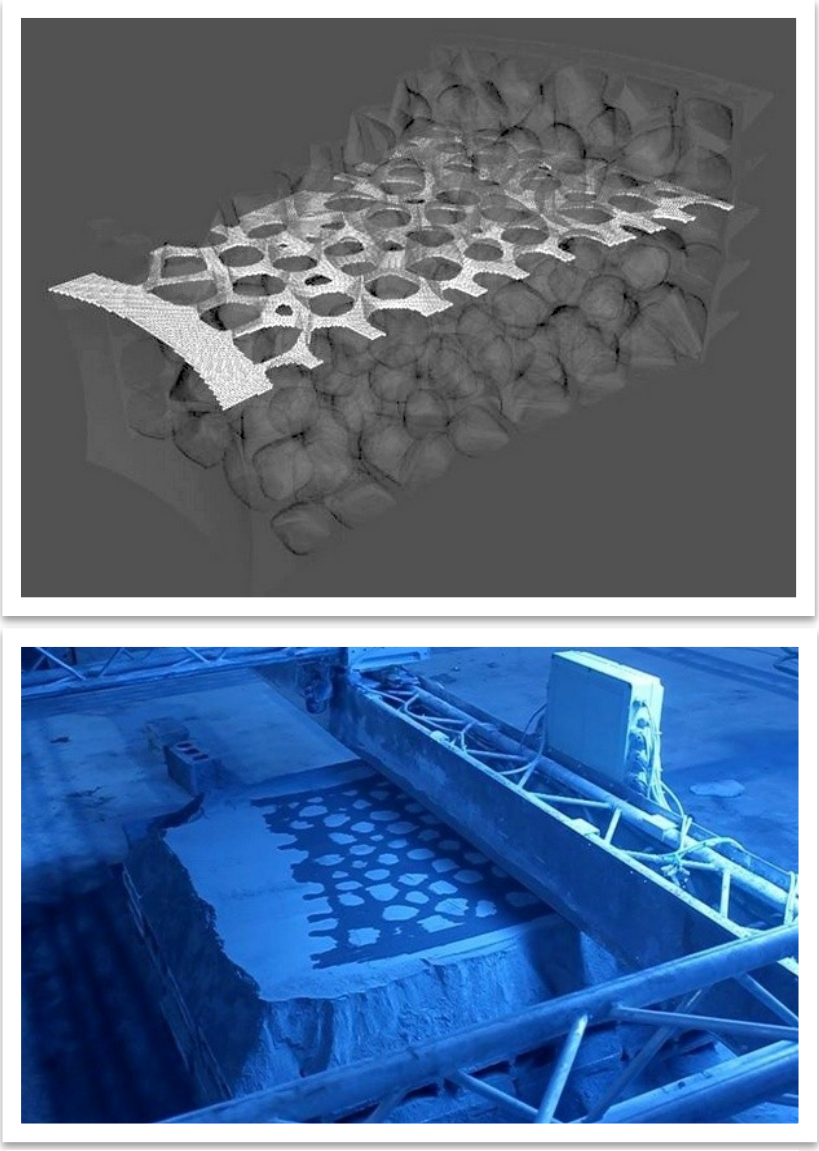


Рисунок 4 Строительный блок внешнего купола лунного поселения и процесс его печати

Модель конструкции лунного поселения и строительных блоков была разработана известной лондонской дизайнерской компанией Fosters+Partners, которая тоже участвовала в проекте. Лунные «дома» должны быть похожи на иглу с толстым внешним куполом из реголита. Внутренняя конструкция купола будет скомпонована по принципу замкнутых ячеек (то есть запертых внутри полых пузырьков), что обеспечит приемлемую теплоизоляцию и защиту от микрометеоров, не требуя чрезмерного количества связующего вещества. Ну а самую глубокую «внутренность» образует воздухоопорная герметичная конструкция. Диаметр нижнего слоя будет около 10 м, а общая высота — около 5 м. На рисунке 4 показан опытный образец строительного блока (общим объёмом около 1,5 м3) с демонстрацией одного из слоёв в разрезе, а также процесс печати этого образца, чтобы было понятно, насколько технология D-Shape эффективна для создания подобной конструкции.

На рисунке 5 изображён макет укомплектованного лунного поселения.

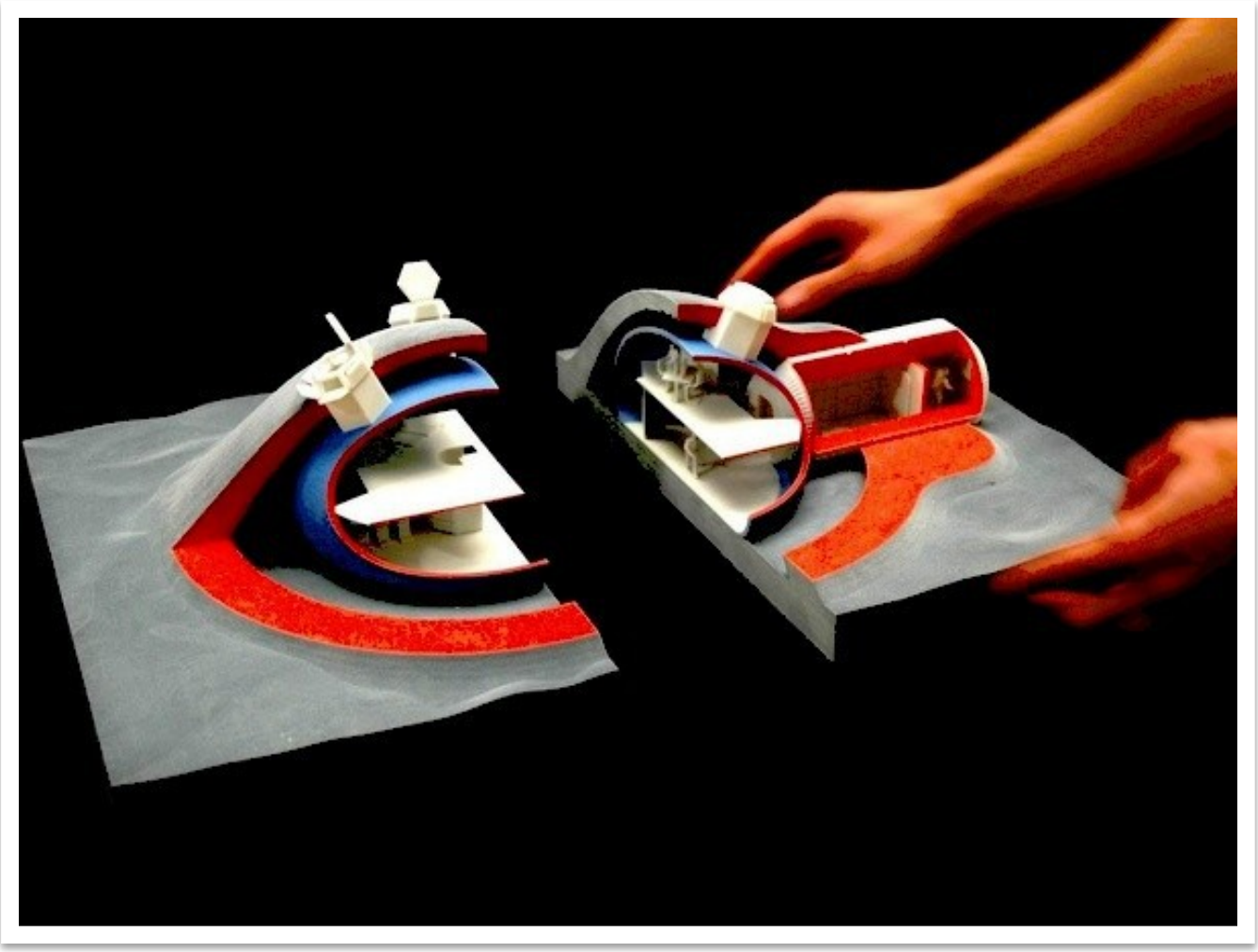


Рисунок 5 Макет лунного поселения (с любезного разрешения Fosters+Partners, участвовавших в проекте, профинансированном ЕКА)

D-Shape для морской среды

Пористость объектов, напечатанных по технологии D-Shape, делает их пригодными для внедрения в естественную среду. Например, на этих конструкциях могут легко укрепиться вьющиеся растения, постепенно покрывая их и порождая уникальные и неожиданные формы, в полном согласии с природным ходом вещей. По тому же принципу подводная растительность и представители мелкой морской фауны могут использовать этот вид конструкции (при условии подходящего дизайна) как благоприятное место для жизни и размножения. Поэтому данные предметы можно с успехом использовать для быстрого восстановления морского дна, повреждённого природными явлениями или человеческим вмешательством (например, при авариях или из-за вредящих окружающей среде сооружений).

Заключение

D-Shape — одна из самых крупномасштабных технологий 3D-печати, использующая в качестве сырья песок, соединённый особым связующим веществом. Она позволяет распечатывать сооружения самой разнообразной формы и для самых разных нужд, от архитектуры до искусства, подходящих для самых разных сред, таких как сады, парки, здания и океанское дно. Ближайшие работы будут посвящены, с одной стороны, дальнейшему развитию принтера, тому, чтобы сделать его более быстрым и способным к самодиагностике в случае сбоя; с другой стороны, сейчас изучаются и разрабатываются новые сферы применения, главным образом связанные с экологически безопасной архитектурой и конструкциями для восстановления природной среды.

Благодарности

Сооружения для строительных блоков лунного поселения были разработаны в рамках проекта «3D-печать строительных блоков с использованием лунного грунта», профинансированного Европейским космическим агентством по плану субсидирования «Программы общих исследований» (GSP). Авторы хотели бы поблагодарить за ценный вклад всех участников проекта, в особенности команду под руководством Джованни Чезаретти (Giovanni Cesaretti) из Alta S.p.A., команду Ксавье де Кестелье (Xavier De Kestelier) из Fosters+Partners, а также Лорана Памбагиана (Laurent Pambaguian) и Скотта Ховленда (Scott Hovland) из EKA, которые снабдили всю команду проекта своими обширными знаниями об условиях космических исследований.

Ссылки

1. Buswell et al.: "Freeform Construction: mega-scale rapid manufacturing for construction",Automat. Construct., 16 (2), pp. 224-231, 2007.
2. B. Khoshnevis, D. Hwang: "Contour Crafting, a mega scale fabrication technology", Manufact. Sys. Eng. Series, 6 (II), pp. 221-251, 2006.
3. F. Ceccanti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, L. Pambaguian: "3D printing tecnology for a moon outpost exploiting lunar soil", Proceedings of the 61th International Astronautical Congress IAC 2010, Prague, Czech Republic, September 27- October 1 2010.

Переводчики: aks_id, kindra, Zayac316

Моделирование губчатой костной ткани посредством 3D печати физических копий

Валдир Л. Роке

Программа магистратуры по прикладной математике, Федеральный университет Риу-Гранди-ду-Сул, Порто Алегре, Бразилия

roque@mat.ufrgs.br

Введение

Остеопороз известен, как бессимптомная болезнь, для которой характерна потеря веса костей и ухудшение губчатой микроархитектуры, кости становятся хрупкими и увеличивается риск переломов[1,2]. С нынешним увеличением продолжительности жизни, остеопороз стал общей проблемой здоровья, с глубоким социальным и экономическим влиянием[3]. Несмотря на то, что масса кости является весомым источником информации по её механическому сопротивлению нагрузке, на сегодняшний день известно, что есть и другие факторы также важные для установления качества кости, прогнозирования риска переломов. В мировой практике потеря массы определяется измерением плотности минералов кости (BMD) – золотой стандарт диагностики остеопороза. Однако, BMD оценивает поверхностную плотность кости, а это лишь один аспект качества кости. Существует ряд других факторов, также играющих существенную роль в формировании качества кости, в частности – губчатая микроархитектура кости[4].

Кость – это орган, состоящий, в основном, из костной ткани, которая является сочетанием органических клеток и костного матрикса – на ⅔ это гидроксиапатит и на ⅓ коллагеновые волокна, клетки составляют 2-3% от костной ткани. Кости бывают двух типов, компактные или пластинчатые, и пористые, еще называемые губчатыми или трабекулярными костями. Пористый вид трабекулярной кости напоминает пористую двухфазную среду, где лучи (трабекулы) соответствуют твердой фазе, а мозговые полости – мягкой фазе. Таким образом, следуя терминологии пористых сред, трабекулы это структура, а мозговые полости – поры.

Качество костной ткани зависит от нескольких биологических, химических, микроструктурных и механических процессов, которые составляют прочность и хрупкость кости. В настоящее время нет ни инвазивного, ни неинвазивного проверенного способа, чтобы обеспечить полностью достоверный прогноз факторов риска in vivo (в организме). Были изучены несколько подходов, главным образом, основанных на данных, полученных ex vivo (т.е. вне

организма). С развитием таких технологий формирования изображений, как двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (DXA), компьютерная томография (CT), компьютерная микротомография (μCT), магнитно-резонансное сканирование (MRI), периферийная количественная компьютерная томография высокого разрешения (HR-pQCT) и количественное ультразвуковое исследование (QUS), данные in vivo (полученные из тканей в естественной среде организма) становятся более и более доступными как инструмент сбора информации о структуре кости.

Чтобы попытаться лучше понять особенности костной ткани на микро- и макроуровне[5] были разработаны несколько методов. На микроуровне, как показали недавние исследования, костные клетки, остеоциты, очень важны в управлении восстановлением костной ткани[6] и регулировании клеточной активности остеокластов и остеобластов. На этом уровне начинается процесс восстановления, и понимание микроструктуры имеет основное значение для биологии и инженерии костной ткани[7]. С другой стороны, на макроуровне важную роль в восстановлении механической прочности костной ткани[8] играют несколько морфологических и физических характеристик. Математическое и компьютерное моделирование губчатой структуры, а также экспериментальные механические тесты на растяжение-сжатие[9] обеспечили хорошие результаты поддерживающей биомеханике и разработке устройств костного протезирования.

Для компьютерной визуализации на обоих масштабных уровнях используются не только числовые и имитационные модели, но, кроме того, много внимания было уделено созданию актуальных объемных физических копий, в точности повторяющих костный матрикс [10 11 12], для реализации свойств и механических экспериментов[13 14 15 16], для регенерации ткани[17 18] и в восстановительной хирургии для планирования и обучения [19 20 21 22 23].

Стремительное развитие устройств медицинской визуализации и усовершенствование способов обработки изображений сделали возможными 3D реконструкцию и визуализацию. Тем не менее, во многих смыслах мы ограничены плоскими экранами при просмотре 3D объектов. Производство 3D копий костной и других тканей превращаются в реальность[24 25] вместе с постоянно ускоряющейся разработкой дополнительных методов аддитивного производства (AM – additive manufacturing) для 3D печати [26].

Данная публикация не претендует на обзор, скорее ее цель – обозначить некоторые аспекты исследований костной ткани, которые используются и дают преимущество в 3D печати физических копий. Конечно, статья не завершена, и много соответствующих и интересных исследований не вошли в список ссылок, но приведенные здесь уже являются хорошей начальной точкой для наблюдения быстрой интеграции между биомедицинской инженерией костной ткани и технологией 3D печати.

Стереология

Стереология – это ряд математических и статистических методов, применяемых для описания геометрических характеристик и свойств 3D объектов, отличающихся от измерений,

полученных при 2D рассечении структуры объекта[27]. Названия стереология происходит от греческого слова stereos, означающие тело. Одно из первых применений стереологии было в геологии в течение первой половины 19 столетия, но лишь совсем недавно, вначале 1960-х, она твердо утвердилась как новая дисциплина.

С тех пор стереология применяется во многих различных областях, но более плодородную почву для применения она нашла в биомедицинских науках. Один из способов исследования микроархитектуры костной ткани – определение некоторых гистоморфометрических (гистоморфометрия – оценка строения ткани – прим.ред.) показателей[28] при помощи методов стереологии. Несколько параметров вычисляются на основе измерений двумерного сечения, такие как трабекулярная толщина, трабекулярная плотность, трабекулярное разделение и трабекулярная скелетная длина. С другой стороны, другие показатели, такие как трабекулярная костная связь или кривизна[29], требуют анализа двух смежных срезов, чтобы иметь возможность определить геометрические и топологические изменения, которые могут встретиться в промежутках. В стереологии есть четыре основных типа зондов, которые используются для сбора структурных характеристик в срезах, а именно: точки – нульмерные зонды, линии – одномерные зонды, области – двумерные зонды и диссектор, трехмерный зонд, созданный при помощи двух тонких смежных срезов с малым расстоянием[30].

Диссектор

Поток информации в виде изображений, полученных, например, от кости, складывается в фиксированный последовательный набор из двумерных параллельных срезов с малым разделением между ними и каждая пара смежных изображений формирует зонд диссектора. Объем диссектора определяется площадью срезов (умноженной) на расстояние между ними.

Диссекторы изображений могут применяться при наблюдении очертаний одной доли и сравнении ее с очертаниями следующей доли. При помощи этих наблюдений возможно рассчитать, например, изменения кривизны, которые встречаются в трабекуле внутри диссектора.

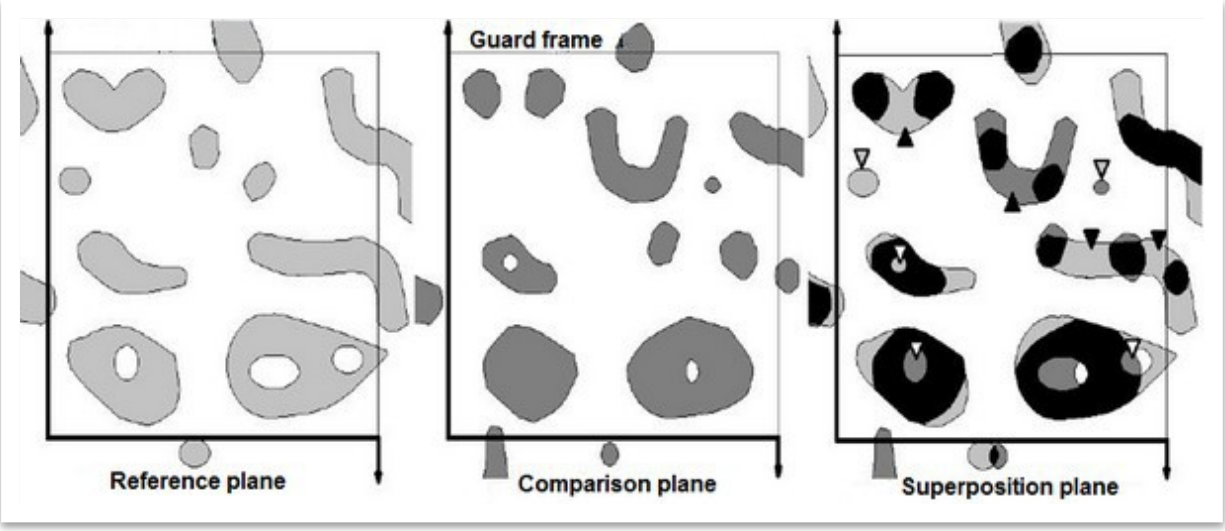


Рисунок 1 Поперечные срезы и признаки, наблюдаемые внутри диссектора. Серая стрелка указывает островки (I), белая стрелка – отверстие (H) и черная стрелка – разветвление (B).

На рисунке 1 проиллюстрировано, как признаки, такие как островки (I), отверстия (H) и разветвления (B) могут быть подсчитаны в диссекторе. Серые стрелки показывают, что объект или появился или исчез в диссекторе, они считаются, как островки (I); белые стрелки показывают, что есть отверстия (H) внутри объекта в пределе диссектора, и наконец, черные стрелки указывают, что произошло разветвление (B) объекта в пределах диссектора.

Моделирование трабекулы

Золотой стандарт диагностики остеопороза – минеральная плотность костной ткани (BMD). Это измерение может указать, сколько массы кости было потеряно по сравнению с нормальным значением (T-шкала). Проще говоря, когда наблюдается потеря массы свыше 25% от нормальной массы, состояние пациента классифицируется как остеопороз. Когда это значение между 10-25%, состояние пациента называют остеопенией. BMD – очень важный индикатор качества кости и отвечает за 70% изменений прочности кости. Однако недавние исследования показали, что только лишь BMD не в состоянии различить риск перелома между остеопорозными субъектами. Научные разработки показали, что губчатая микроструктура кости также очень важна для установления ее механической способности[31] и качество ее микроархитектуры может влиять на предрасположенность костной ткани к хрупкости и последующего риска перелома. Рисунок 2 показывает три образца губчатой костной ткани дистального отдела лучевой кости, где трабекулярные структуры нормальные, остеопенические, остеопоротические, соответственно.

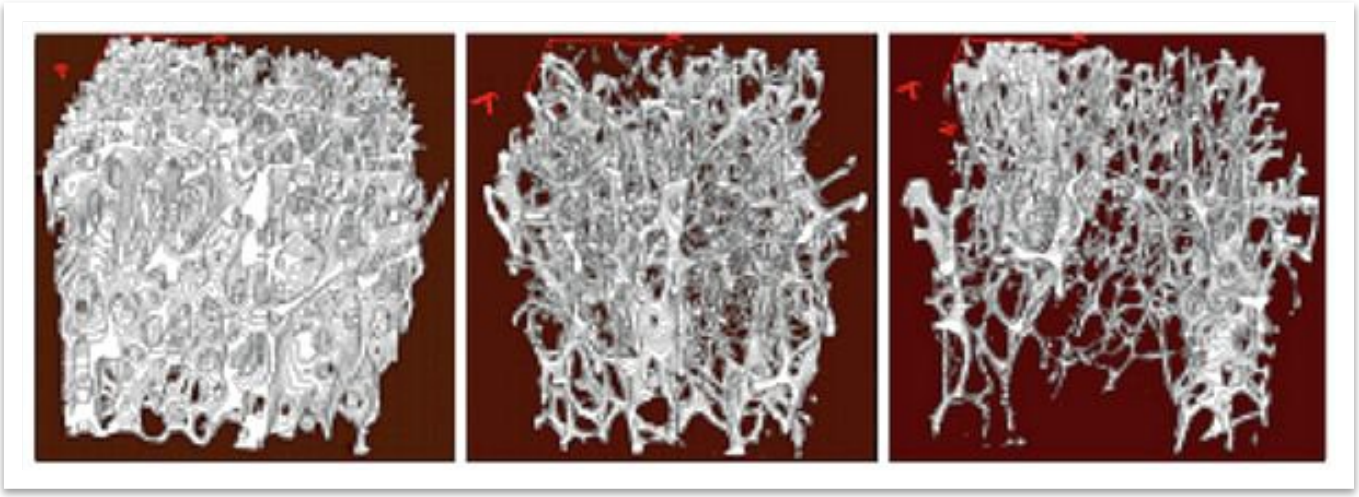


Рисунок 2 Трабекулярная структура: Нормальная (слева), Остеопеническая (в центре) и Остеопоротическая (справа).

В недавней статье[32] для классификации хрупкости губчатой костной ткани был предложен параметр механической способности (MCP), основанный на четырех величинах, которые могут

быть вычислены из ряда изображений диссекторов. Это базовые величины для описания реакции губчатой кости на нагрузку, а именно: трабекулярная доля объема кости, которая дает объемное содержание костного матрикса в образце; связность структуры; кривизна, которая оценивает степень извилистости трабекулярной сети и модуль Янга, который обеспечивает поведение линейной эластичности структуры под воздействием нагрузки.

Доля трабекулярного объема[33] расчитывается отношением BV/TV, где BV трабекулярный объем кости, полученный подсчетом вокселов, соответствующих трабекулам и TV – общий объем ткани в образце.

С помощью набора изображений диссекторов установлено, что число разрозненных частей трабекулы соответствует числу изолированных объектов #I (островков), связь выражается числом туннелей #B (ветвлений) и числом закрытых полостей #H [34]. Число соединений соответствует максимальному числу пересечений через объект, которые не создают два разъединенных объекта. Характеристика Эйлера-Пуанкаре (EPC) – это интегральное геометрическое измерение, которое может обеспечить оценку связи трабекулярной структуры [34 35]. Важный аспект EPC заключается в том, что он не изменяется от деформации или масштаба объекта. Другими словами, топологически неизменный. По существу, EPC для 3D структуры определяется как число изолированных частей без связи. EPC – величина нулевой размерности и как таковая, она должна быть оценена 3D зондом, уравнением EPC=½(#I+#H−#B). На рисунке 2 отчетливая потеря связи в образцах остеопении и остеопороза.

В простых математических терминах извилистость τ трабекулы определяется как τ = LG/LE, где LG – геодезическая длина между двумя соединенными точками в трабекулярной сети и LE – Евклидово расстояние между этими точками. Рассчитываем извилистость трабекулярной сети на основе 3D двухуровневого изображения с помощью алгоритма геодезической реконструкции[32]. В соответствии с наблюдаемыми результатами, исследования извилистости образцов губчатой кости показали, что трабекулярная сеть имеет тенденцию к выравниванию в направлении, в котором структура чаще подвергается нагрузке[29].

Чтобы получить модуль эластичности Янга для образцов, 3D структура губчатой кости была представлена в виде ячеек, при использовании оптимизированного алгоритма[36], выполненного в Matlab R2011a (MathWorks Inc., Natick, MA), который преобразовывает каждый элемент трёхмерного изображения в шестигранник (элемент-кирпичик). Тест зависимости деформации от напряжений при сжатии в каждом направлении был численно моделирован конечным элементом (FE) линейно-эластичного изотропного анализа, выполняемый в Ansys v11.0 (Ansys

Inc., Southpointe, PA). Характеристики основного объема материала были установлены Ebulk=10 GPa (компактная кость) [37] [38] и коэффициент Пуассона ν=0.3.Деформация 1% граничной кромки была приложена ко всем моделям сжатия. После приложения теории гомогенизации[39], выражение результатов модуля Юнга (Ex,Ey,Ez) были получены в каждом направлении. Рисунок 3 иллюстрирует параметрические реконструкции узловых распределений напряжения, полученного по направлению оси z, тест на сжатие.

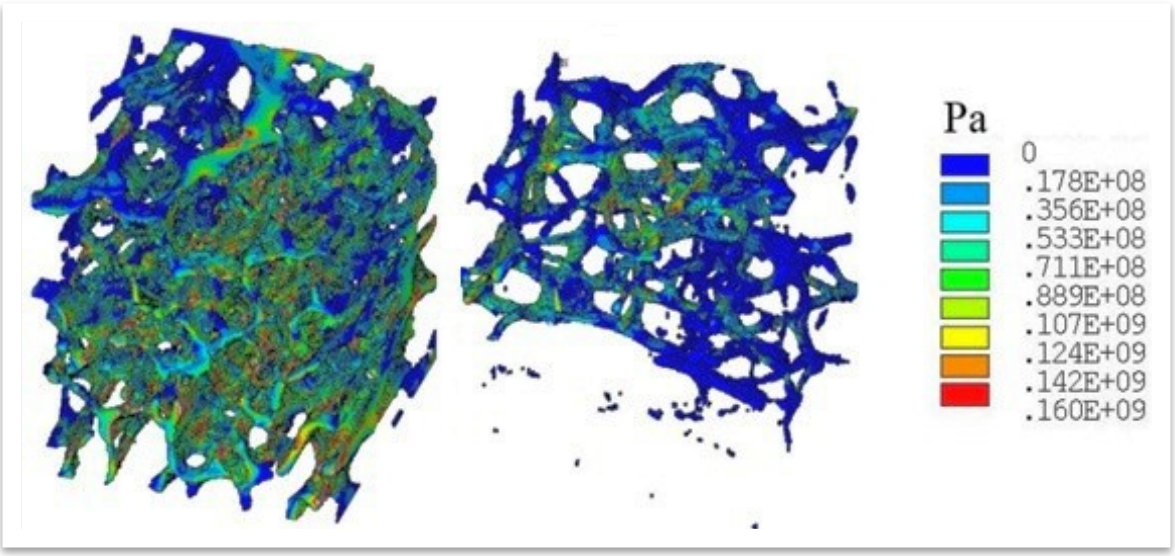


Рисунок 3 Карты параметрического напряжения – результаты смоделированных тестов сдавливания по оси z для нормального и остеопоротического образцов.

Данные для ряда изображенных образцов μCT губчатого вещества дистальной лучевой кости показали, что структура с низкой долей объема, со слабой связностью, высокой извилистостью и низким модулем Янга имеют нормализованный MCP очень близкий к нулю, другими словами, структура хрупкая, в то время как нормализованный MCP близкий к единице соответствует структурам с большей жесткостью (см. Рисунок 4). Результаты, предоставленные MCP, были получены просто вычислительными способами, однако, экспериментальные тесты оказали бы дополнительное содействие, чтобы лучше понять, как де-факто структура ведет себя в условиях механических нагрузок, моделировании возможных падений[40]. Приблизительно 40% затрат на физиотерапевтическое лечение связано с остеопорозными переломами, связанными с лечением дистального отдела предплечья. Таким образом, довольно важно добиться лучших результатов, повышающих всеобщее понимание.

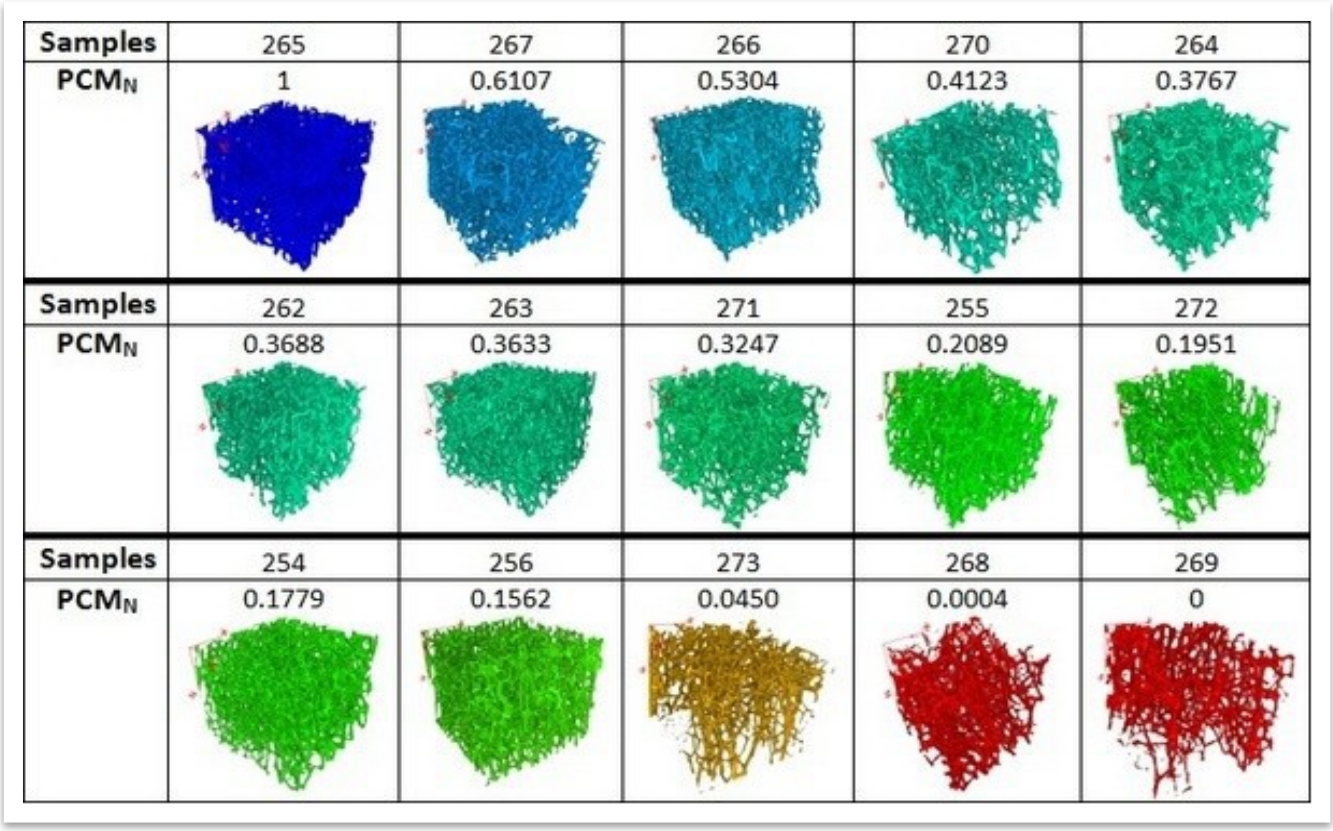


Рисунок 4 Цветной спектр нормализированных MCP для 15 образцов дистальной лучевой трабекулярной кости

Конечно, выполнить экспериментальные тесты с настоящими костями не простая задача, как и получение образцов кости или у трупов или у пациентов, которым провели биопсию кости. Рассмотренный случай не очень прост, поскольку есть несколько правил и этических протоколов, которым нужно следовать, чтобы получить разрешение на извлечение кости из трупа донора, и поздние инвазивные процедуры в организме, которые неудобны и дают лишь небольшие образцы кости. Чтобы обойти эти трудности были предложены несколько способов, чтобы имитировать механическое воздействие, большинство из них используют анализ конечного элемента [9 41] моделирование на основе 3D реконструкций изображения.

При разработке ткани, пористые клеточные каркасы должны быть разработаны с достаточной механической прочностью, чтобы сохранить их начальные структуры после имплантации, особенно, когда имеют дело с твердой, высоко нагруженной костной тканью, такой как бедренная кость. Механическая и биологическая устойчивость имплантов зависит от факторов, таких как прочность, эластичность, ударопоглощение в суставах и биохимический распад. В этом отношении, 3D печать костной ткани является очень полезным инструментом для производства высокоточных копий кости из образцов изображений, а затем эти копии могут быть подвергнуты тестам механической нагрузки и другим исследованиям [14 42 43].

Аддитивное производство

Конструирование физических 3D объектов из ряда смежных 2D изображений срезов ограниченной толщины – это новая технология известна как аддитивное производство (AM – additive manufacturing)[26]. В отличие от субтрактивных методов, которые строят законченный 3D объект, срезая материал с начального блока, машинам AM скармливают поперечные срезы таким образом, чтобы они могли складывать слой за слоем, составляя форму физического объекта. Действительно, более тонкие слои будут лучше приближены к настоящему объекту. Доступные сегодня машины AM используют послойный подход, однако они могут отличаться в зависимости от типа используемого материала, как слои формируются и склеиваются между собой.

В промышленности, для успешного продукта необходимо конструирование прототипов. Несмотря на то, что компьютерные системы CAD/CAM очень полезны для разработки и развития модели продукта, множество аспектов не осязаемы так, как в объемной модели объекта. С другой стороны, в потоке промышленной конкуренции за инновации, есть высокий спрос на быстрое макетирование моделей продукта. Поэтому, технологии быстрого макетирования возникли для обеспечения более быстрого пути для разработки продукта, путем интеграции четыре основных аспектов: ввод, метод, материал и приложения (как утверждается в книге[44]).

Стереолитография и 3D печать

Стереолитография[45] – метод AM, который использует луч лазера, чтобы выборочно создавать соответствующее 2D изображение на светочувствительной смоле, делая ее твердой. Результат стереолитографии – это физическая 3D копия объекта, другими словами это понимается, как результат 3D печати, по примеру 2D печати. Фактически, стереолитография и 3D печать были первоначальными названиями, которые были даны американской компанией "3D Systems" и исследователями MIT, которые создали технологию струйной печати. Как и повсеместно известная технология тиражирования, идея печати объемного физического объекта получает общественное признание, и технология AM теперь становится более известной как 3D печать.

3D биопечать

Технология 3D печати вызвала интерес биологов и врачей как альтернативный способ создания искусственных тканей и жизненных органов из чьих-нибудь клеток, чтобы быть генетически совместимыми для дальнейшей трансплантации. Идея уже запущена на экспериментальном уровне с помощью компьютерного биоаддитивного производства[46], в процессе которого живые клетки помещаются в соответствующий каркас, чтобы генерировать 3D ткани и органы. Эта технология клеточной печати была определена как 3D биопечать.

Биопечать предвидит много различных приложений, как, например, распыление клеток на месте, чтобы регенерировать ткани. Это, конечно, будет очень важно для лечения ожогов кожи. В [47] читатель может найти очень хорошее актуальное обсуждение 3D биопечати с нынешними проблемами и перспективами.

Заключение

Разработка новых медикаментов, связанных с улучшением образа жизни, помогла повысить продолжительность жизни во всем мире. Напротив, старение мирового населения принесло подверженность остеопорозу большего числа людей, из-за последствий которого уменьшается качество жизни населения. Один из основных результатов остеопороза – перелом кости, поэтому этой проблеме посвящены обширные исследования в этой области, чтобы прогнозировать риск перелома.

Качество кости – результат большого количества биологических и биомеханических процессов и понимание их – основной принцип к верному диагнозу, и раннему предотвращению переломов. С другой стороны, как только случаются переломы, необходимо быстро прореагировать, чтобы восстановить костную ткань или имплантировать протез. Обычно переломы у пожилых людей приносят ряд проблем мобильности, заболеваемости и во многих случаях является косвенной причиной, которая приводит к смерти пациента. Нынешние усовершенствования в 3D печати, точнее в 3D биопечати, открывают новые перспективы в инженерии костной ткани[48] и возможность построения точных физических копий губчатого вещества кости, которые могут упростить исследования механических свойств при экспериментальных тестах. Кроме того, 3D биопечать уже благоприятствует разработке биологически активных смесей и нано-материалов [49 50].

3D печать привлекла внимание исследовательских и промышленных сообществ, особенно благодаря возможности быстрого макетирования твердых объектов, но ее стоимость все еще высока. Однако, следующее поколение дешевых экологичных 3D принтеров сделает их доступными для школ и больниц, улучшая качество обучения. К сожалению, все в жизни имеет За и Против, и 3D печать уже считалась технологией для разработки нового оружия, но это не дефект технологии самой по себе, а скорее человеческая слабость. Вместо этого было бы намного лучше применить технологию 3D печати для создания протезов, чтобы бесплатно распространять их в бедных странах среди людей с физическими дефектами.

Есть множество веб-сайтов, посвященных 3D печати[51]. Как сказал Джозеф Шумпетер, австрийский экономист: «Технология – это созидательное разрушение, а 3D печать, несомненно, разрушит предшествующие технологии, но её преимущества кажутся очень многообещающими».

Благодарность

Я бы хотел поблагодарить доктора Энрике Канесса за стимул и Международный Центр Теоретической физики Абдус Салам за поддержку и оказанное внимание к разделу.

Ссылки

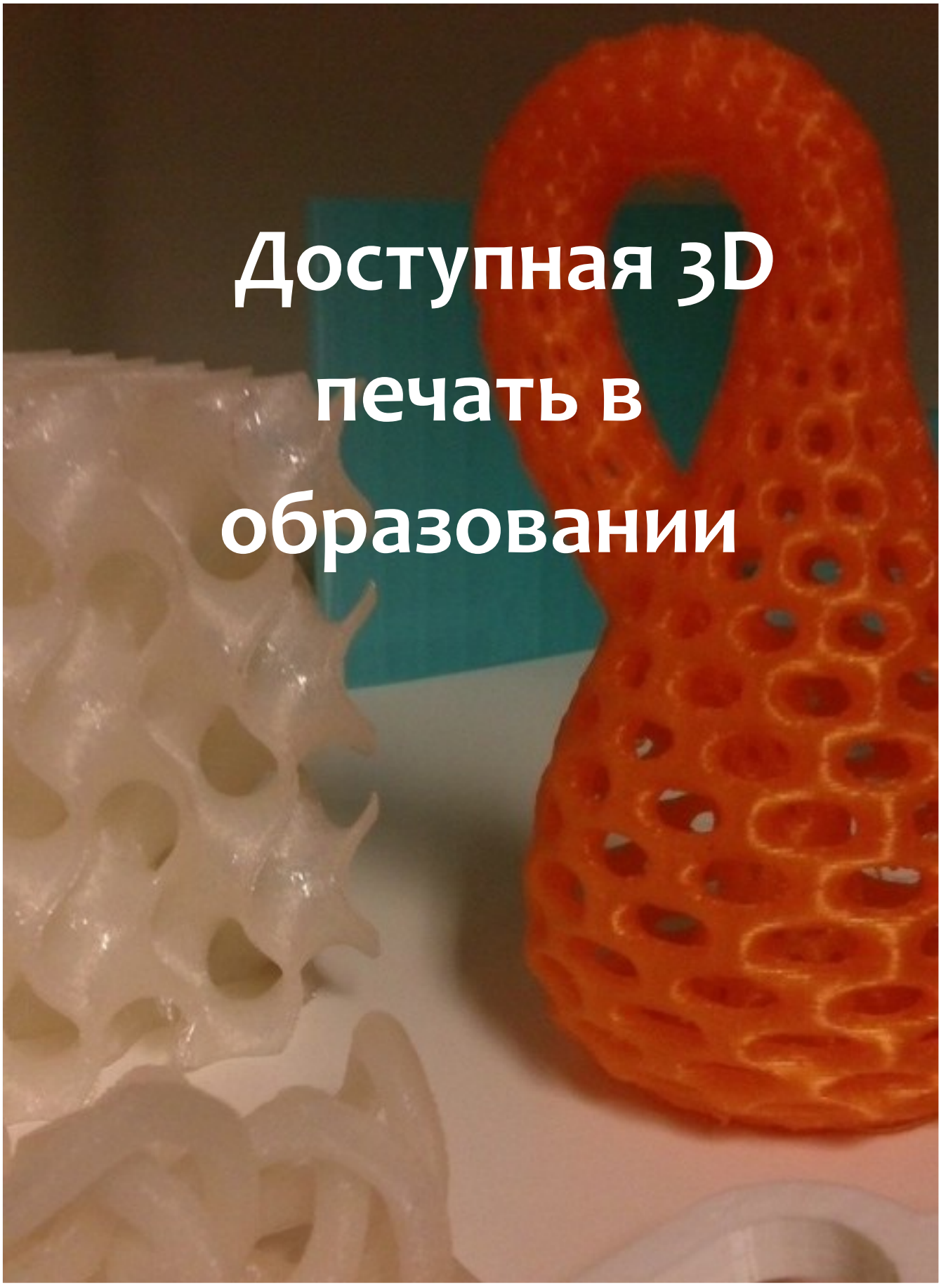
1. M. L. Bouxsein, Bone quality: where do we go from here? , Osteoporos. Int., 14 (Suppl 5), S118-S127, 2003.
2. J. A. Kanis, H. Johansson, A. Oden, E. V. McCloskeya, Assessment of fracture risk, European Journal of Radiology, 71, 392-397, 2009.
3. R. Burge, B. Dawson-Hughes, D. H. Solomon, J. B. Wong, A. Kin and A. Tosteson, Incidence and economic burden of osteoporosis-related fractures in the United States: 2005-2025. Journal of Bone and Mineral Research, 22, 465-75, 2007.
4. B. Cortet and X. Marchandise, Bone microarchitecture and mechanical resistence, Joint Bone Spine, 68, 297-305, 2001.
5. Principles of Bone Biology, Eds. J. P. Bilezikian, L. G. Raisz and G. A. Rodan, vols. 1 and 2, 2nd edition, Academic Press, 2002.
6. L. F. Bonewald, The amazing osteocyte, Journal of Bone and Mineral Research, 26, 229-238, 2011.
7. N. L. Fazzalari, Bone remodeling: A review of the bone microenvironment perspective for fragility fracture (osteoporosis) of the hip, Seminars in Cell & Developmental Biology, 19, 467-472, 2008.
8. B. Helgason, E. Perilli, E. Schileo, F. Taddei, S. Brynjólfsson and M. Viceconti, Mathematical relationships between bone density and mechanical properties: A literature review, Clinical Biomechanics, 23, 135-146, 2008.
9. L. Cristofolini, E. Schileo, M. Juszczyk, F. Taddei, S. Martelli and M. Viceconti, Mechanical testing of bones: the positive synergy of finite-element models and in vitro experiments, Phil. Trans. R. Soc. A, 368, 2725-2763, 2010.

10. S. A. Park, S. H. Lee and W. D. Kim, Fabrication of porous polycaprolactone-hydroxyapatite (PCLHA) blend scaffolds using a 3D plotting system for bone tissue engineering, Bioprocess Biosyst. Eng., 34, 505-513, 2011.
11. R. Tolouei, A. Behnamghader, S. K. Sadrnezhaad and M. Daliri, Manufacturing porous BCP body by negative polymer replica as a bone tissue engineering scaffold, ICBME 2008, Proceedings 23, Eds. C. T. Lim and J. C. H. Goh, pp. 1305-1308, 2009.
12. A. Armillotta and R. Pelzer, Modeling of porous structures for rapid prototyping of tissue engineering scaffolds, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 39, 501-511, 2008.
13. D. G. Woo, C. H. Kim, H. S. Kim and D. Lim, An Experimental-numerical methodology for a rapid prototyped application combined with finite element models in vertebral trabecular bone, Experimental Mechanics, 48, 657-664, 2008.
14. K. Attenborough, H. -C. Shin, Q. Qin and M. J. Fagan, Measurements of tortuosity in stereolithographical bone, replicas using audiofrequency pulses (L), J. Acoust. Soc. Am., 118, 2779-2782, 2005.
15. H. Aygün, K. Attenborough, W. Lauriks, P. A. Rubini and C. M. Langton, Wave propagation in stereo-lithographical (STL) bone replicas at oblique incidence, Applied Acoustics, 72, 458-463, 2011.
16. J. P. Little, T. J.Horn, D. J. Marcellin-Little, O. L. A. Harrysson and H. A. West II, Development and validation of a canine radius replica for mechanical testing of orthopedic implants, Am. J. Vet. Research, 73, 27-33, 2012.
17. S. Bose, M. Roy and A. Bandyopadhyay, Recent advances in bone tissue engineering scaffolds, Trends in Biotechnology, 30, 546-554, 2012.
18. S. Tarafder, V. K. Balla, N. M. Davies, A. Bandyopadhyay1 and S. Bose, Microwave-sintered 3D printed tricalcium phosphate scaffolds for bone tissue engineering, J. Tissue Eng. Regen. Med., doi: 10.1002/term.555, 2012.
19. The Application of 3D Printing in reconstructive surgery, J. R. Honiball, MSc Dissertation, University of Stellenbosch, South Africa, 2010.
20. H. Saijo,K. Igawa, Y. Kanno, Y. Mori, K. Kondo, K. Shimizu, S. Suzuki, D. Chikazu, M. Iino, M. Anzai, N. Sasaki, U. Chung and T. Takato, Maxillofacial reconstruction using custommade artificial bones fabricated by inkjet printing technology, J. Artif. Organs, 12, 200-205, 2009.
21. M. C. Leu, Q. Niu and X. Chi Virtual Bone Surgery, In: Virtual Prototyping and Bio Manufacturing in Medical Applications, Eds. B. Bidanda and P. J. Bártolo, 21-44, 2008.
22. A. M. Christensen, S. M. Humphries, K. Y. C. Goh and D. Swift, Advanced "tactile" medical imaging for separation surgeries of conjoined twins, Childs Nerv. Syst., 20, 547-553, 2004.
23. M. Frame and J. S. Huntley, Rapid prototyping in orthopaedic surgery: A user's guide, The ScientificWorld Journal Volume 2012, Article ID 838575, doi:10.1100/2012/838575.
24. S. Lohfeld, V. Barron and P. E. Mchugh, Biomodels of bone: A review, Annals of Biomedical Engineering, 33, 1295-1311, 2005.
25. F. Rengier, A. Mehndiratta, H. von Tengg-Kobligk, C. M. Zechmann, R. Unterhinninghofen, H. -U. Kauczor and F. L. Giesel, 3D printing based on imaging data: review of medical applications, Int. J. CARS, 5, 335-341, 2010.

26. I.Gibson, D. W. Rosen and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, 2010.
27. Practical Stereology, J. C. Russ and R. T. Dehoff, 2nd Edition, Plenum Press, New York, NY, 1999.
28. L. Dalle Carbonare, M. Valenti,F. Bertoldo, M. Zanatta, S. Zenari, G. Realdi, V. L. Cascio and S. Giannini, Bone microarchitecture evaluated by histomorphometry, Micron, 36, 609-616, 2005.
29. W. L. Roque, K. Arcaro and R. B. Lanfredi, Tortuosidade e conectividade da rede trabecular do rádio distal a partir de imagens microtomográficas, Braz. J. Biom. Eng., 28, 116-123, 2012.
30. M. J. West, Introduction to stereology, Cold Spring Harb Protoc, doi:10.1101/pdb.top070623, 843-851, 2012.
31. L. Dalle Carbonare and S. Giannini, Bone microarchitecture as an important determinant of bone strength, J. Endocrinol. Invest., 27, 99-104, 2004.
32. W. L. Roque, K. Arcaro and A. Alberich-Bayarri, Mechanical competence of bone: A new parameter to grade trabecular bone fragility from tortuosity and elasticity, IEEE Trans. Biomed. Eng., 2013 (in press).
33. D. Chappard, E. Legrand, C. Pascaretti, M. F. Baslé and M. Audran, Comparison of eight histomorphometric methods for measuring trabecular bone architecture by image analysis on histological sections, Microscopy Research and Technique, 45, 303-312, 1999.
34. W. L. Roque, A. C. A. Souza and D. X. Barbieri, The Euler-Poincaré characteristic applied to identify low bone density from vertebral tomographic images. Brazilian Journal of Rheumatology, 49, 140-152, 2009.
35. H. J. Vogel and A. Kretzshmar, Topological characterization of pore space in soil – sample preparation and digital image processing, Geoderma, 73, 23-38, 1996.
36. A. Alberich-Bayarri, L. Marti-Bonmati, M. A. Perez, J. J. Lerma and D. Moratal, Finite element modeling for a morphometric and mechanical characterization of trabecular bone from high resolution magnetic resonance imaging, In: Finite Element Analysis, Ed. David Moratal, SCYIO Publishing, 195-208, 2010.
37. A. Alberich-Bayarri, L. Marti-Bonmati, R. Sanz-Requena, E. Belloch and D. Moratal , In vivo trabecular bone morphological and mechanical relationship using high resolution 3T MRI, American Journal of Roentgenology, 191 , 721-726, 2008.
38. Y. C. Fung, Biomechanics: Mechanical properties of living tissues, Springer, 2nd Ed., New York, 500-518, 1993.
39. S. J. Hollister, D. P. Fyhrie, K. J. Jepsen and S. A. Goldstein, Application of homogenization theory to the study of trabecular bone mechanics, Journal of Biomechanics, vol. 24, no. 9 p. 825-839, 1991.
40. W. B. Edwards and K. L. Troy, Finite element prediction of surface strain and fracture strength at the distal radius, Medical Engineering & Physics, 34, 290-298, 2012.
41. Z. Yosibash, D. Tal and N. Trabelsi, Predicting the yield of the proximal femur using highorder finite-element analysis with inhomogeneous orthotropic material properties, Phil. Trans. R. Soc. A, 368, 2707-2723, 2010.

42. D. W. Hutmacher, M. E. Hoque and Y. S. Wong, Design, fabrication and physical characterization of scaffolds made from biodegradable synthetic polymers in combination with RP systems based on melt extrusion, In: Virtual Prototyping and Bio Manufacturing in Medical Applications, Eds. B. Bidanda and P. J. Bártolo, 261-291, 2008.
43. R. Sua, G. M. Campbell, S. K. Boyda, Establishment of an architecture-specific experimental validation approach for finite element modeling of bone by rapid prototyping and high resolution computed tomography, Medical Engineering & Physics, 29, 480-490, 2007.
44. C. K. Chua, K. F. Leong and C. S. Lim, Rapid Prototyping: Principles And Applications, World Scientific Publishing, Singapore, 2nd Edition, 2003.
45. P. J. Bártolo and I. Gibson, History of stereolithographic processes, IN: Stereolitography Materials, Processes and Applications, Ed. P. J. Bártalo,Springer, pp. 37-56, 2011.
46. P. J. Bártolo, H. A. Almeida, R. A. Rezende, T. Laoui and B. Bidanda, Advanced processes to fabricate scaffolds for tissue engineering, In: Virtual Prototyping and Bio Manufacturing in Medical Applications, Eds. B. Bidanda and P. J. Bártolo, 149-170, 2008.
47. I. T. Ozbolat and Y. Yu, Bioprinting toward organ fabrication: Challenges and future trends, IEEE Trans. Biomed. Eng., 60, 691-699, 2013.
48. Y. Zhang, C. Tse, D. Rouholamin and P. J. Smith, Scaffolds for tissue engineering produced by inkjet printing, Cent. Eur. J. Eng., 2, 325-335, 2012.
49. Q. Chen, J. A. Roether and A. R. Boccaccini, Tissue engineering scaffolds from bioactive glass and composite materials, In: Topics in Tissue Engineering, Vol. 4, Chapter 6, Eds. N. Ashammakhi, R. Reis and F. Chiellini, EXPERTISSUES E-book, 2008.
50. X. C. Qiao, X. B. Yang and D. J. Wood, NanoHydroxyapatiteCollagen composite for bone replacement, In: Topics in Tissue Engineering, Vol. 5, Chapter 5, Ed. N. Ashammakhi, EXPERTISSUES E-book, 2009.
51. ExplainingTheFuture.com, by Christopher Barnatt, http://www.explainingthefuture.com/index.html

Переводчики: alex_itz, Woolpit



Доступная 3D печать в образовании

Использование 3D принтеров в школе-эксперимент 3drucken.ch

Грегор Лютолф

ПедагогическийУниверситет Берна (PHBern), Швейцария

gluetolf@gmail.com

3D печать в школе

Недорогие 3D принтеры, внедренные в школьную среду, приводят к возможностям нестандартного обучения. Модели, разработанные на компьютерах, можно напечатать и получить макет в трех измерениях (3D). Теория быстро предстает в виде физических объектов, которые можно потрогать. Ученики имеют возможность заниматься с современными и трендовыми инструментами.

Применение 3D печати в различных школьных предметах, например:

- Математика: Разработка, печать и расчет 3D объектов.
- География: Рельефы [1].
- Искусство: Разработка различных объектов и их печать.
- Естественные науки: Печать моделей молекул.
- Музыка: Печать простых инструментов.

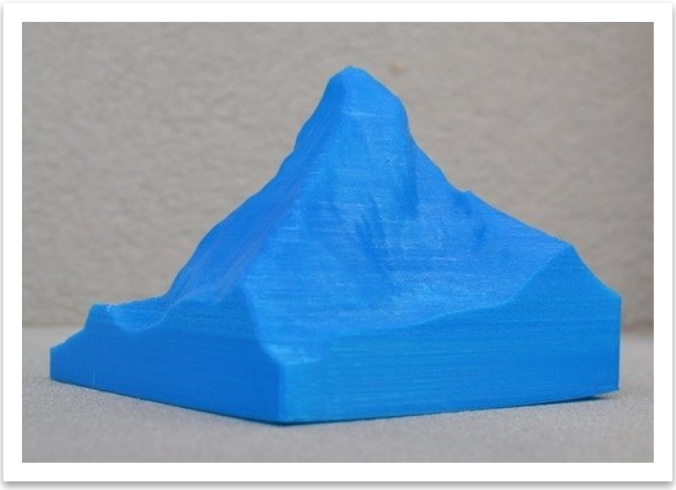


Рисунок 1 Рельеф Мэттерхорна, созданный по данным цифровой модели рельефа, распечатан в 3D

Доступно множество дополнительных опций, ограниченных скорее воображением, чем техническими возможностями. Большое количество 3D моделей можно найти онлайн на Thingiverse [2] или в 3D Warehouse [3].

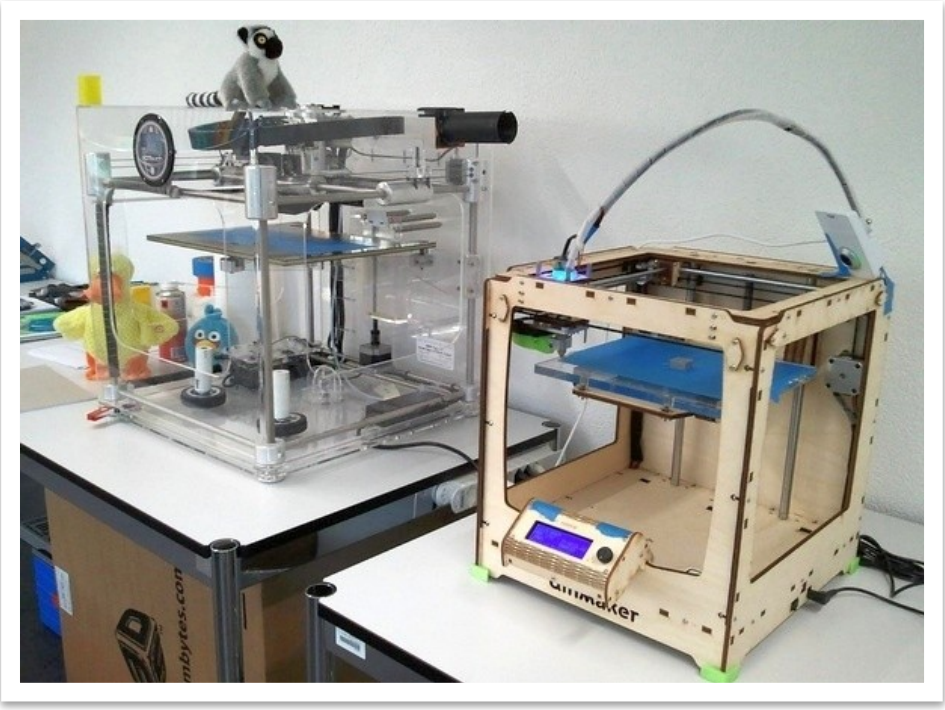
Описание проекта «Гюгельтаун: ученики распечатывают свой собственный город» [4]

Подготовка проекта

Проект реализовывался с августа 2012 по январь 2013 в течение 16 уроков (каждый по 90 минут) в техническом черчении [5] в 8-х и 9-х классах в Стеффистбурге с учениками 14-15 лет. Под руководством Курта Майстера, школа Стеффисбурга, и Грегора Лютолфома, Педагогический Университет Берна (PHBern).

Перед запуском проекта была сделана оценка 3D принтеров. Первоначальный вариант, принтер BfB 3DTouch, был ограничен различными факторами. Он был большим, тяжелым, работал слишком медленно, имел плохую точность и основывался на закрытых аппаратных и программных средствах. Будучи активными в социальных сообществах, таких как Google +, и ведя блог на http://3drucken.ch о нашем исследовании, мы решили купить два комплекта для сборки Ultimaker [6]. Этот принтер был признан лучшим продуктом в категории, «Самый точный», «Самый быстрый» и «Лучшее открытое аппаратное обеспечение» в ноябрьском выпуске журнала Make в 2012 [7].

Для 3D моделирования требовалось программное обеспечение CAD. После оценки нескольких продуктов, было решено использовать программное обеспечение Tinkercad [8]. Оно было использовано в сочетании с бесплатным инструментом SketchUp [9] с дополнительным программным модулем [10], чтобы экспортировать данные в 3D принтер.

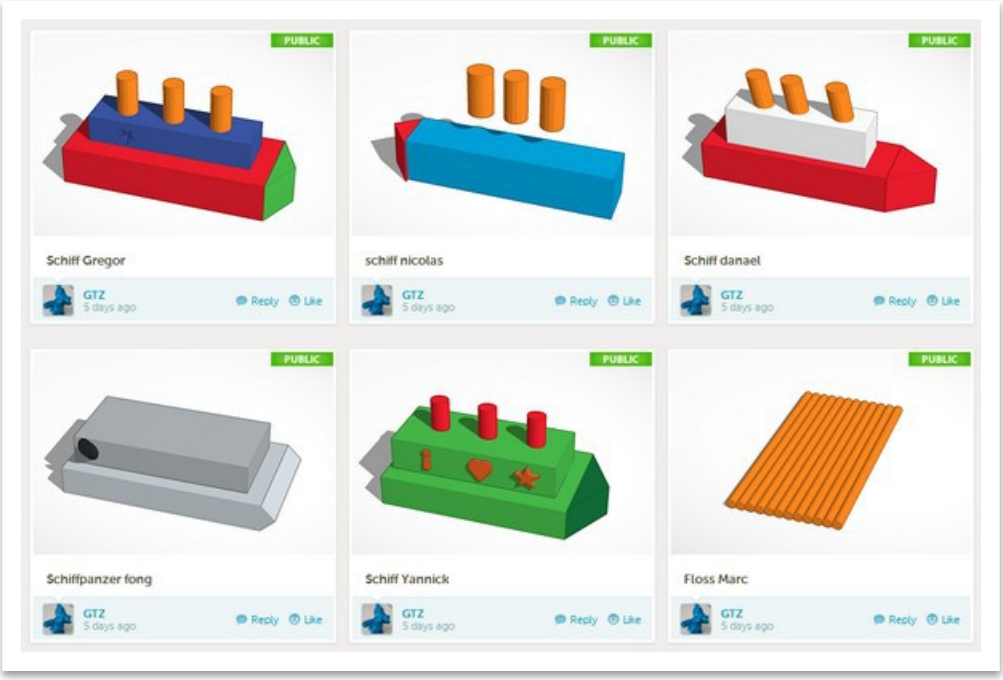


BfB 3DTouch слева, Ultimaker справа

Запуск проекта

Внедрение Tinkercad

Чтобы познакомить учеников с процессом моделирования, им была дана задача сделать эскиз корабля. Все, что у них было в качестве материалов – учебное пособие по Tinkercad. Никаких дополнительных инструкций со стороны учителя.



Эскизы кораблей в Tinkercad, выполненные учениками.

Внедрение SketchUp

Во время последующих уроков, при помощи учебного пособия, ученики были ознакомлены со SketchUp [11].

Первый опыт работы с принтером

Ученики были ознакомлены и постепенно вовлечены в работу с 3D принтером, такую как моделирование, нарезка и печать.

Ожидание первого печатного объекта

Гюгельтаун растет

Вдохновленный проектом kide[12], каждый студент сделал набросок здания для их небольшого городка названного Гюгельтаун. Участки земли (лоты) на карте города имели различные размеры и формировались по отдельности.

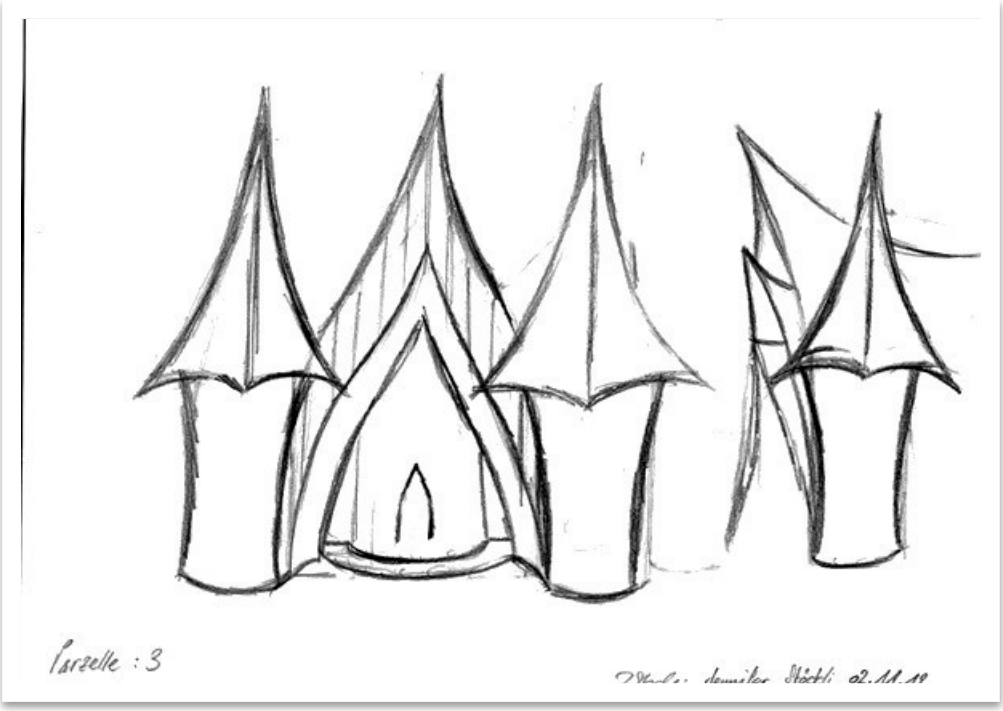
Ограничения

Размер объекта был ограничен:

- Смежные лоты (участки со зданиями) не должны перекрываться
- Каждая сторона имеет максимум 20 см
- Трехмерная область – не больше чем 600 cm3

Идеи

Ученики рисуют несколько эскизов на бумаге.



Первый набросок идеи ученика

Размеры

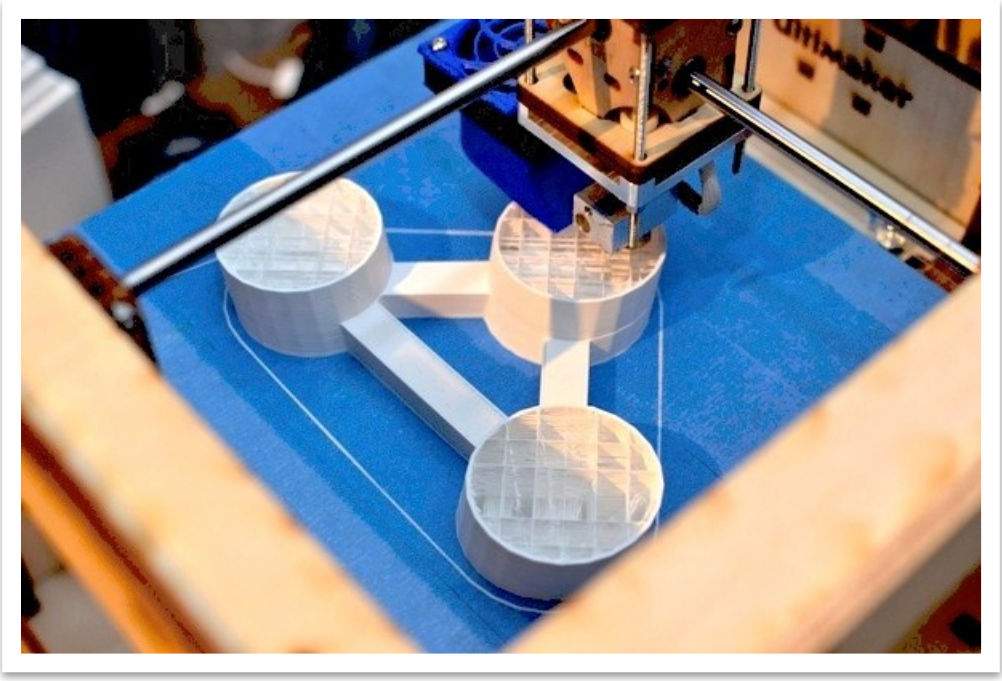
Каждый ученик выбрал один набросок и нарисовал его на предпечатном документе в общем виде. Также они определили размеры для чертежа CAD.

Моделирование при помощи CAD [13]

Используя один из представленных инструментов, Tinkercad или SketchUp ученики шаг за шагом смоделировали свои здания.

Печать

Объекты были напечатаны. Несмотря на оптимальные настройки (заполнение всего 5%) Ultimaker понадобилось порядка 120 часов для печати всех строений. Поэтому большинство из них были завершены в течение ночи.



Печать одного из зданий

Итоговая презентация

Презентация Гюгельтауна родителям и другим интересующимся людям была организована на последнем уроке. Ученики представили рабочий процесс 3D принтера непосредственно на Ultimaker. Результаты проекта Гюгельтаун и их получение было представлено в нескольких небольших информационных статьях.

Гюгельтаун, представлен на итоговой презентации

Событию было уделено внимание, и кроме того местная пресса[14] заинтересовалась проектом Гюгельтаун.

Заключение – Что мы узнали из этого проекта?

Мы были удивлены высокой мотивацией учеников на протяжении всего проекта. Они почти не пропускали уроки, даже если имели другие важные дела. На основе наших наблюдений и отзывов учеников, доля мотивации появилась благодаря наличию 3D принтера, который дал им возможность превратить свои идеи и модели в реальные объекты. Мотивацию придавали и простота использования свободных программных инструментов, возможность использования ПК лишь два часа в неделю в школе и тот факт, что они были вольны спроектировать здание своей мечты. Некоторые ученики имели больший опыт использования САПР, другие даже дома тратили часы на проектирование. В конце концов, все ученики представили готовые к печати собственные проекты. Так же мы призывали более опытных учеников помогать своим коллегам.

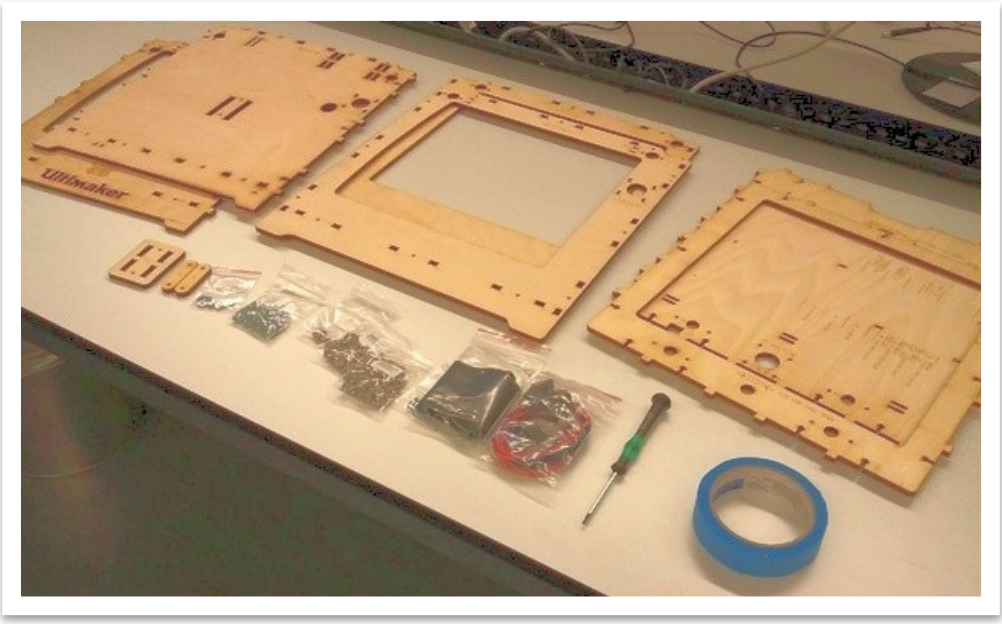
Расходы и временные затраты

3D печать в школе предполагает большие временные затраты. Приобретение и сборка принтера достаточно длительны. Кроме того, необходимо ознакомиться с управлением принтера. Было бы неплохо еще наладить сотрудничество между школой и центром консультаций и обучения. В таком предприятии центр может оказать техническую поддержку, а школа запланировать образовательную подготовку.

Для сборки Ultimaker в Педагогическом Университете Берна, потребовалось приблизительно два дня (сборка осуществлялась в рабочее время). Работа потребовала много времени от учителей, но это оказалось удачной инвестицией, ведь они разобрались в технике 3D принтера, что пригодится для устранения неисправностей в будущем.

Общие расходы составили 3500€. Большинство затрат были оплачены Педагогическим Университетом Берна, в том числе часы работы Грегора Лютолфа. Расходы на каждый комплект сборки Ultimaker составили примерно 1500€. Позже были куплены инструменты и пруток для печати (PLA) еще за 200€. Пруток для печати стоит около 30€/кг. Школа Штеффисбурга оплатила около 150€ для печати карты города и финансировала итоговую презентацию.

В этом подсчете не учитываются многие часы работы, проведенные за сборкой Ultimaker, освоением управления 3D принтером и изучением всего процесса от идеи до конечной печати.



Некоторые детали комплекта для сборки Ultimaker

Дидактическая концепция

Независимое обучение возможно в течение всего процесса. Начиная от идеи и заканчивая напечатанным объектом. 3D принтер – безопасное устройство и абсолютно не представляет угрозы для учеников при использовании. Итеративный процесс удобен для занятий, потому что эскизы могут быть изменены и перепечатаны в любое время. Следовательно, продукт может быть разработан шаг за шагом. Кроме того, это хорошая альтернатива стандартному обучению «чтением и письмом», ведь эта работа скорее «учись действуя».

Печатные 3D модели

Цифровые 3D модели могут быть реализованы тремя различными способами:

- с помощью программного обеспечения CAD на компьютере,

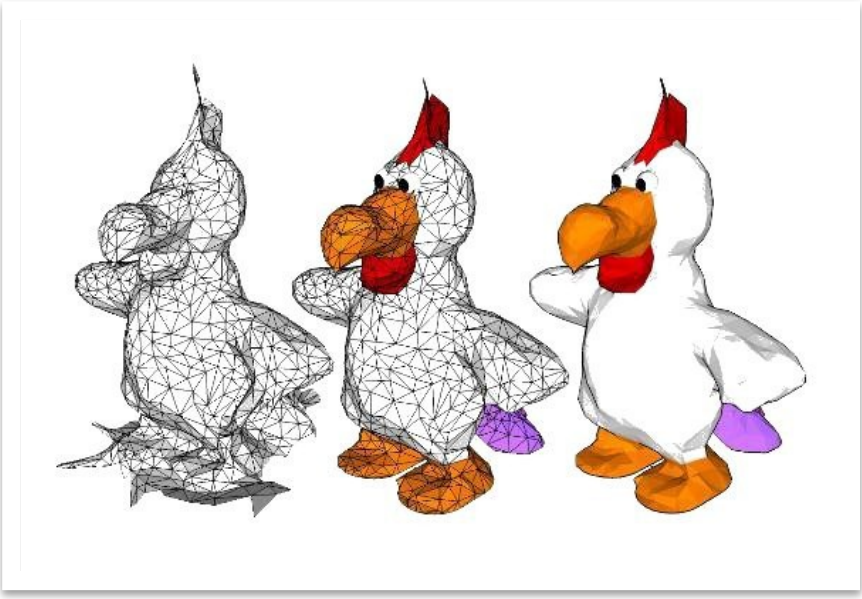
- получены в результате сканирования реального 3D объекта, или

- сгенерированы кодами.

Чтобы быть печатаемыми, цифровые модели должны соответствовать каждому заданному критерию по сравнению с только выведенными на экран. Необходимо обратить внимание на недопустимость пробелов (дыр) в моделях, поверхности должны быть выровнены. Элементы, которые являются филигранной работой, могут потеряться в процессе нарезки. Также необходимо избегать сильного удлинения нависающих краев, они должны быть дополнены автоматически сгенерированными опорами.

Долгосрочная цель: Fab Lab в школе

Fab Lab – высокотехнологичная мастерская, где можно найти оборудование, такое как 3D принтеры, станок для лазерной резки и CNC машины. Первая Fab Lab была инициирована в 2002 году Нилом Гершенфелдом в Массачусетском Технологическом Институте (MIT). В настоящее время множество таких же Fab Lab широко распространены в мире[15]. Fab Lab в школе обеспечивает доступ к этим современным производственным процессам всем заинтересовавшимся ученикам.



Ссылки

1. http://www.3drucken.ch/p/reliefs.html
2. http://www.thingiverse.com/
3. http://sketchup.google.com/3dwarehouse/?hl=en&ct=lc
4. http://www.3drucken.ch/p/gueggeltown.html
5. http://www.3dgeometrie.com/
6. http://ultimaker.com/
7. http://www.makershed.com/Make_Ultimate_Guide_to_3D_Printing_p/1449357377 .htm
8. https://tinkercad.com/ (closed March 26th, 2013)
9. http://www.sketchup.com/
10. http://www.guitar-list.com/download-software/convert-sketchup-skp-files-dxf-or-stl
11. http://www.3dgeometrie.com/2011/03/sketchup-grundlagen-der-bedienung.html
12. http://www.playkide.com/
13. http://www.3dgeometrie.com/2012/11/gueggeltown-von-der-2d-skizze-zum-3d.html
14. http://tt.bernerzeitung.ch/region/thun/Schueler-drucken-ihre-eigene-Stadt/story/ 24268666
15. http://fab.cba.mit.edu/about/labs/

Переводчики: Woolpit, radical_dreamer, alex_itz

Доисторические коллекции и 3D печать для образования

Луиза Лики, Татьяна Дзамбазова

Институт Бассейна Туркана, Кения

louise@turkanabasin.org

Autodesk Inc., США

tatjana.dzambazova@autodesk.com

История вопроса – Бассейн Туркана и проект Африканские ископаемые

Палеонтологические экспедиции начались в бассейн озера Туркана Северной Кении в 1968, и с тех пор было обнаружено множество важных образцов гоминидов и другой фауны [1]. В настоящее время они хранятся в Национальных музеях Кении или в Институте бассейна Туркана на озере Туркана. С новой технологией и программным обеспечением, особенно в сфере фотограмметрии, представилась возможность получить в цифровом формате многие из этих впечатляющих коллекций. Эти цифровые модели могут быть доступны онлайн и, используя интерактивные средства просмотра онлайн, предоставить уникальную возможность учителям и ученикам, исследовать наше прошлое.

Цифровое сканирование и программное обеспечение

В проекте «Африканские ископаемые» применялись несколько методов получения цифровой информации, несмотря на то, что фотограмметрия была основным методом. В дополнение, ручной сканер FARO, а с недавнего времени сканер 3D3solutions (метод структурного света – SLS), с присоединенным макро-объективом, использовались для получения самых больших и самых маленьких экземпляров, и это дало хорошие результаты.

Модели сканировались с использованием цифровой камеры SLR с увеличивающими линзами. Изображения были сделаны в формате JPEG и RAW. Приблизительно было сделано 90 снимков неподвижного объекта сверху, а затем еще 90 снимков снизу. Эти изображения импортированы в Autodesk® ReCap Photo и в несколько других программ, включая Autodesk® Maya, Geomagic Wrap, Meshmixer и Adobe Photoshop для создания интерактивных цифровых моделей. Файлы текстур также могут быть объединены с "облаком" точек лазерного сканирования, если они получены для того же образца.

В дополнение к моделям отдельных образцов, были отсканированы участки рабочих полей, с использованием комбинации фотограмметрии и лазерного сканера, такого как ZFS (Zoeller и Froelich) или FARO Focus3D. Фотографии были получены как с земли так и с камеры Sony Nex 7, с управляемым инфракрасным затвором, прикрепленной к раме воздушного змея. Этот метод

оказался эффективным при реконструкции полевых раскопок. Использовалось программное обеспечение Scantime, чтобы опубликовать их для интерактивного веб-просмотра.

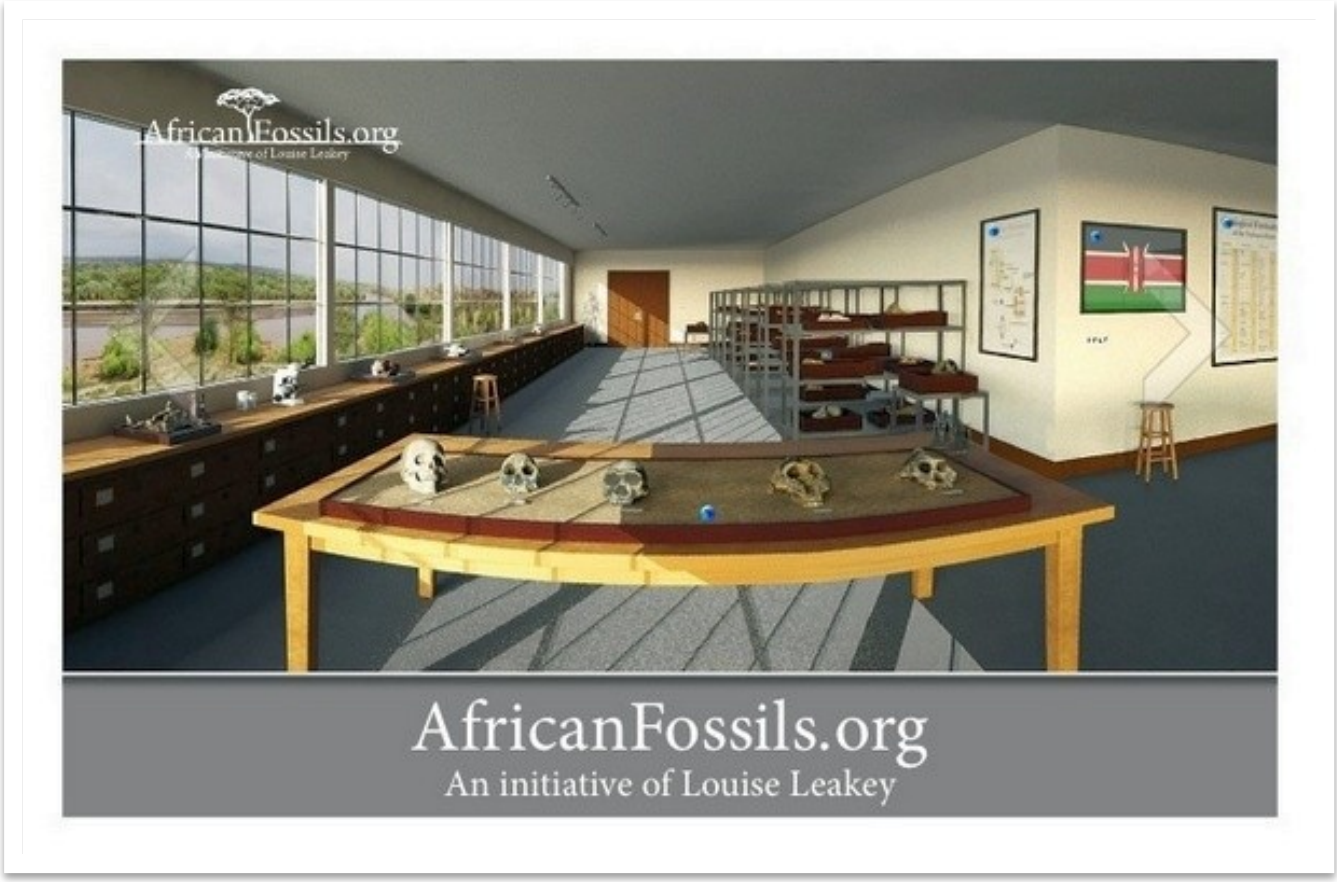
Печать цифровых моделей для образования

Разрешение цифровых моделей, которые мы получили, используя фотограмметрию, все еще не достаточно высокое, как разрешение которое получается в результате CT сканирования или при традиционных высококачественных методах литья. Поэтому 3D печать таких моделей еще нельзя считать заменой этих методов, которые так важны для подробного научного исследования. Однако, с образовательной точки зрения, доступность и взаимодействие с образцами, цифровые модели, полученные при использовании фотограмметрии, превосходны.

Другие приложения цифровых файлов для образования

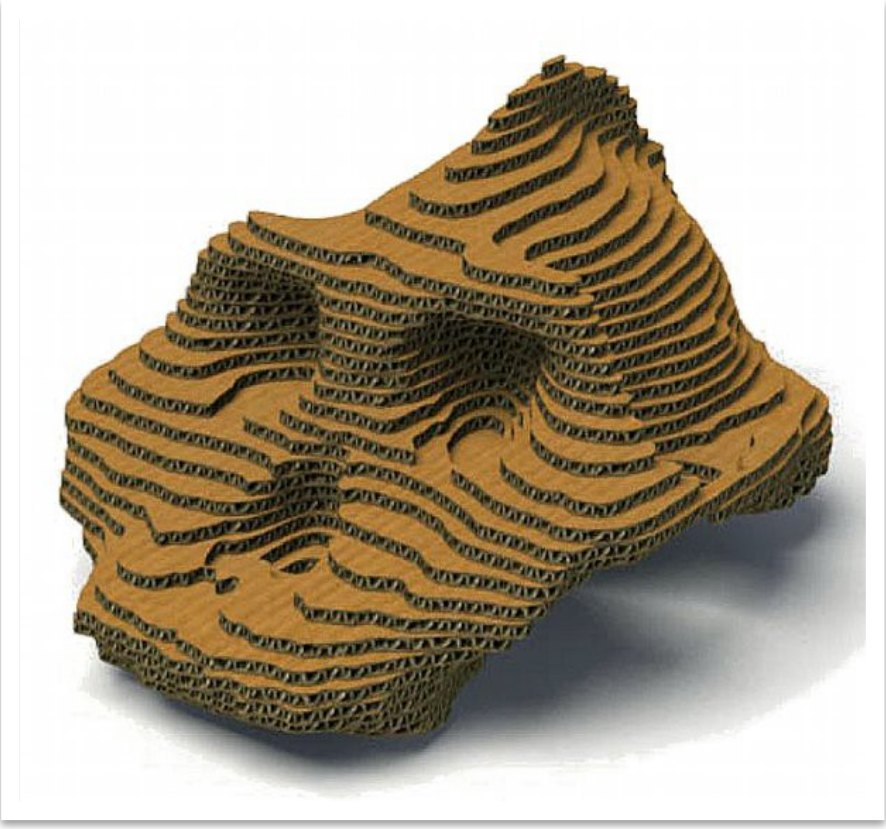
Разработка веб-сайта

Была разработана виртуальная онлайн лаборатория *http://www.africanfossils.org*, чтобы выводить на экран цифровые модели и обеспечивать место для их детального рассмотрения. Сайт в ближайшие месяцы, претерпит некоторые дополнительные изменения, чтобы внедрить поиск, сравнение, карту и средства социального общения, а также возможность загрузки файлов низкого разрешения для домашних 3D принтеров. Он обеспечивает цифровую историю и окно в прошлое.



Картонные модели для сборки

В проекте«Африканские окаменелости» использовалось бесплатное приложение Autodesk® 123D® Make, для вырезания серии шаблонов из гофрированного картона, используя ЧПУ-станок для лазерной резки. Это дает возможность собрать грубые модели черепов при помощи склеивания одного слоя с другим. Эти практичные проекты на скорую руку идеальны для занятий в классе и вовлечения детей в создание картонных реконструкций, поощряют их исследования многообразия в летописях окаменелостей.



Авторское право и интеллектуальная собственность

В цифровой век авторское право и права интеллектуальной собственности остаются поводом для беспокойства у музеев с большим количеством артефактов. Высококачественные файлы, которые сгенерированы от данных CT, а также высококачественные образцы, в большинстве случаев остаются интеллектуальной собственностью академических и научных учреждений. Они остаются ценными и являются источником очень необходимого дохода для учреждений, таких как Национальные музеи Кении. Файлы с более низким разрешением, полученные при помощи фотограмметрии и лазерного сканирования, возможно, наиболее ценны, если они широко распространены и общедоступны,поскольку они оказывают максимальное влияние на образование. Эта область, где музеи могут оказать значительное влияние с точки зрения изучения и контактирования, но это вопрос должен быть тщательно продуман.

Благодарность

Мы хотели бы поблагодарить за вклад Autodesk, Исследовательский проект Koobi Fora, Национальные музеи Кении, Институт Теркана Басин, а также всех людей, которые, посредством этих организаций, приняли участие в проекте Африканские ископаемые.

Ссылки

1. 1 Koobi Fora Research Project monograph series. Volume 1-6. California Academy of Sciences.

Переводчики: alex_itz, Woolpit

3D печать в художественных инсталляциях

Даниэль Пьетросемоли

Медиалаб-Прадо, Мадрид, Испания

daniel.pietrosemoli@gmail.com

Альтернативное использование технологии было достаточно распространено на протяжении всей истории. Многие из сегодняшних популярных технологий индустрии развлечений эволюционировали из простых и полезных инструментов в более игровые и нелепые устройства. Область дешевой 3D печати не стала исключением.

Дешевая 3D печать – это относительно новая технология, которая началась приблизительно в 2006 году с проекта RepRap. В те дни, традиционно «первым отпечатком» RepRap была рюмка, куда бы Вы могли налить свой любимый напиток и праздновать завершение многочасовой работы 3D принтера, построенного Вашими собственными руками.

Напечатанная рюмка (источник: http://www.thingiverse.com)

3D печать «Сделай сам»(DIY) была быстро воспринята и умельцами и любителями электроники, и в большинстве случаев использовалась тогда и сейчас просто для развлечения,

игры или забавы. Фактически, 3D принтеры DIY достаточно давно стали больше инструментом, чем гаджетом для всезнаек («ботанов», «умников»). Принтеры стали быстрее, стабильнее, и отпечатки стали больше, прочнее и качественнее, таким образом, домашний 3D принтер стал мощным и универсальным инструментом.

Поскольку планка знаний, необходимых для использования этих небольших машин, понижается, на поезд 3D печати стало садиться всё больше людей. Пользователи с незначительными навыками в электронике, программировании или моделировании нашли в 3D печати способ создать и выразить себя в ранее неизвестной материальной манере. Объекты теперь перепрыгивают с экрана на рабочий стол после нескольких щелчков мыши. Непосредственность процесса делает его очень полезным, и люди раздвигают пределы своего творчества, пользуясь этой дешевой, простой и одновременно очень сложной технологией.

В области искусств, творческие умы приняли эту технологию с самого начала, и стали ее использовать, чего никто не мог прежде предположить. От 3D печати вашей собственной статуэтки или ребенка в чреве матери, до сканирования и печати древних скульптур, которые можно найти только в музее.

3D печать и художественные инсталляции

3D печать также стала популярным инструментом в необычных приложениях, вот несколько распространенных примеров ее использования:

Создание частей костюма для художественных инсталляций

Художественные инсталляции включают широкий спектр устройств ввода, таких как камеры, датчики, переключатели, и также устройства вывода, такие как двигатели, приводы или световые сигналы. Эти устройства обычно не видны глазу из эстетических соображений или скорее из соображений безопасности. Чтобы вместить эти компоненты, разработчики полагаются на существующие коммерческие продукты. С 3D принтером возможно изготовить корпус по условиям заказчика, чтобы удовлетворить точным требованиям к составляющим деталям.

Во многих современных интерактивных произведениях искусства встречается один и тот же электронный компонент – плата Arduino: платы Arduino могут быть соединены со многими устройствами ввода-вывода, но как только эти устройства соединены, мы должны поместить их все в корпус, чтобы избежать случайных разъединений. Быстрый поиск через Thingiverse[1], дает нам более ста различных корпусов для этой платы.

Корпус Arduino (источник: http://www.thingiverse.com/)

Создание больших конструкций из небольших распечатанных частей

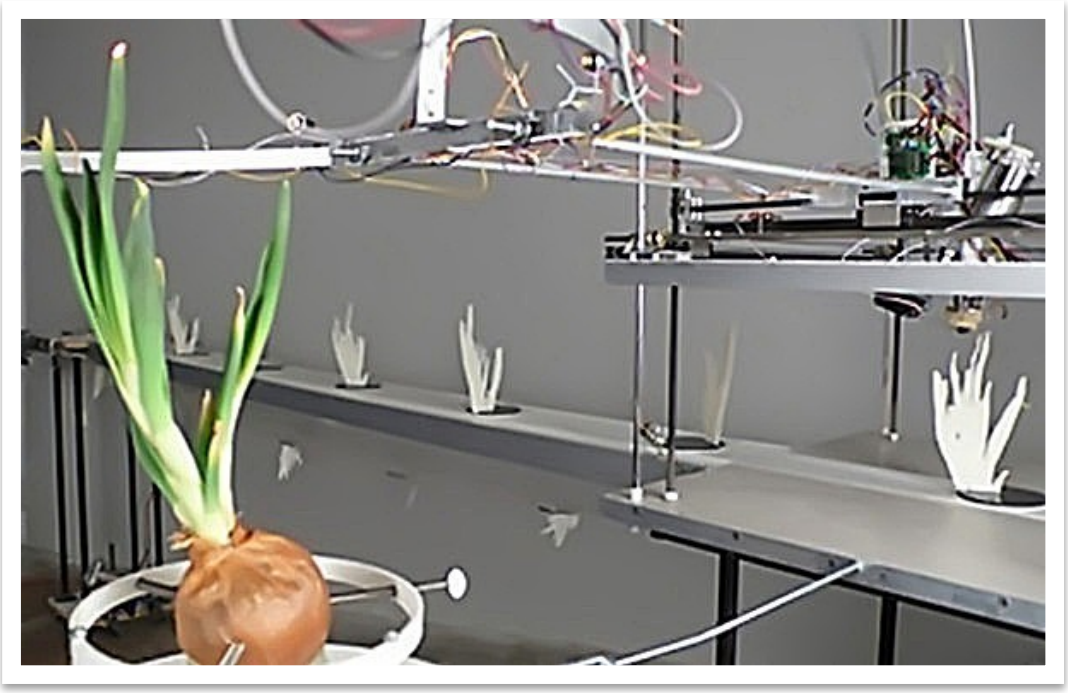
Самодельные 3D принтеры не достаточно быстрые. Печать маленького двадцатимиллиметрового куба может занять несколько минут, и время печати возрастает по экспоненте с объемом, завершение более сложных или больших деталей может занять часы. По этой причине, область печати этих машин обычно ограничивается временем и количеством используемой пластмассы. Печать маленьких частей, которые соединяются вместе для создания большой детали, является обычным способом.

Красивый пример – это скульптура сделанная Космо Венманом[2]. Венман использует цифровую камеру, чтобы сделать сотни снимков с разных углов существующей скульптуры, и затем сшивает их вместе, используя компьютерную программу. Одна из его самых выразительных работ – это Голова лошади, принадлежащая древней мраморной скульптуре, обнаруженной в Афинах приблизительно в 438 до н.э. После получения модели, она была разделена на меньшие печатные части, затем она была вновь собрана и покрашена, чтобы быть похожей на бронзовую. Это также привело к другому использованию 3D печати: возможность воспроизводить музейные экспонаты, которые могут быть представлены где угодно.

Голова лошади (источник: http://www.cosmowenman.com/)

3D печать, как центр художественной инсталляции

Не смотря на то, что 3D печать действительно мощный инструмент многих пользователей, иногда она становится центром художественной инсталляции. Отделение, названное «Устройство моделирования роста», созданное Дэвидом Боуэном. Он использовал сканирование в реальном времени и 3D принтер, чтобы отсканировать лук и воспроизвести его в пластмассе в каждый период времени. В итоге – парадокс, принтер производит статическую часть живого организма из пластмассы, который постоянно изменяется[3].



Система визуализации роста (источник: http://www.dwbowen.com/)

Другой пример публичной инсталляции «Будь своим собственным сувениром» от группы blablablab, где используются 3 датчика Kinect, чтобы отсканировать пешеходов на прогулке в Барселоне, а затем они были распечатаны на месте. В результате – сувенир самого себя[4].

Будь своим собственным сувениром (источник: http://www.medialab-prado.es/)

Итак, что я могу напечатать?

Поскольку персональная 3D печать получила широкое признание, возросла потребность в подходящем контенте. Чтобы сделать печатаемые модели можно пользоваться стандартными приложениями для 3D моделирования, такими как Sketchup, Rhino или Autocad, несмотря на то, что эти приложения традиционно использовались для создания очень сложных анимационных моделей в видеоиграх, компьютерных образов (Computer Generated Imaginery – CGI, *прим.ред.*) в фильмах, высококачественного рендеринга для профессиональных стереолитографических машин и т.д.

DIY (Do-It-Yourself – "сделай сам", Прим. ред.) 3D печать, с другой стороны, не предназначена для воспроизводства деталей с высоким уровнем детализации, а скорее для быстро производства рабочих прототипов.

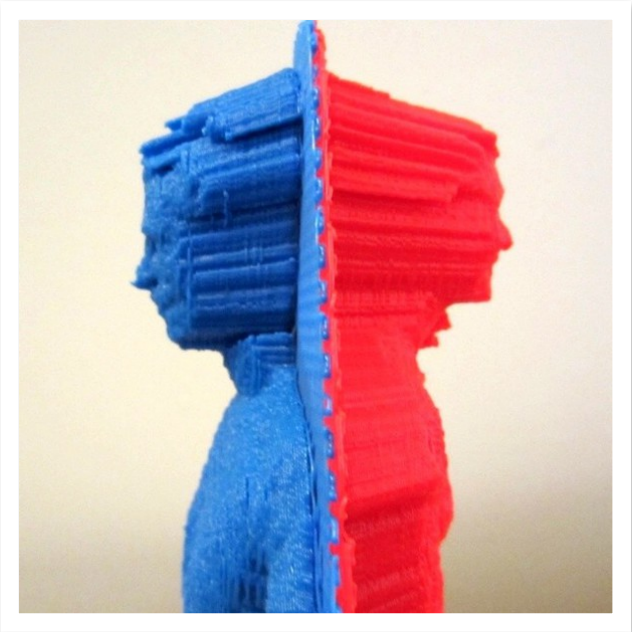
3D сканеры и 3D печать

Один из способов получения печатных моделей – отсканировать уже существующий объект, и затем его воспроизвести. 3D сканеры получают геометрию физического объекта, делая сотни тысяч измерений. Результат 3D сканирования – обычно точечное облако или полигональная сетка.

Высококачественные сканеры, например лазерные, являются отличным способом получить очень подробные модели, но они дороги, ценой от пары сотен до нескольких тысяч евро. Другие технологии 3D сканирования, такие как компьютерная томография, МРТ и ультразвук, могут использоваться для получения печатаемых моделей. Но опять же, это дорогие машины, и находятся за пределами возможностей сообщества DIY.

Один из распространенных способов получить 3D снимок состоит в том, чтобы взломать известные устройства, такие как контроллер Kinect от Microsoft®. Kinect предназначался как недорогое устройство ввода, чтобы управлять играми и другими приложениями консоли Xbox (авторы имеют ввиду именно XBOX 360, Kinect XBOX ONE пока не взломан, но работа уже кипит :), Прим. ред.) с использованием движений тела, но он был быстро адаптирован и преобразован в простой и дешевый 3D сканер. при работе Kinect снимает инфракрасное облако точек в пространстве, а с помощью инфракрасной камеры отслеживает, сколько точек сместилось, сравнивая с уникальным калибровочным образцом.

Довольно низкое разрешение Kinect идеально для DIY 3D печати, и модели, полученные с его помощью, могут быть легко распечатаны с незначительными изменениями.



3D снимок с использованием Kinect (источник:http://www.ultra-lab.net/)

Ссылки

1. http://www.thingiverse.com
2. http://www.cosmowenman.com
3. http://www.dwbowen.com/gmd.html
4. http://byos.blablablab.org

Переводчики: Woolpit, alex_itz

От математики к драгоценностям – пример

Гайя Фьйор

МЦТФ Отдел научного распространения коллаборанти 32b.it Триест, Италия

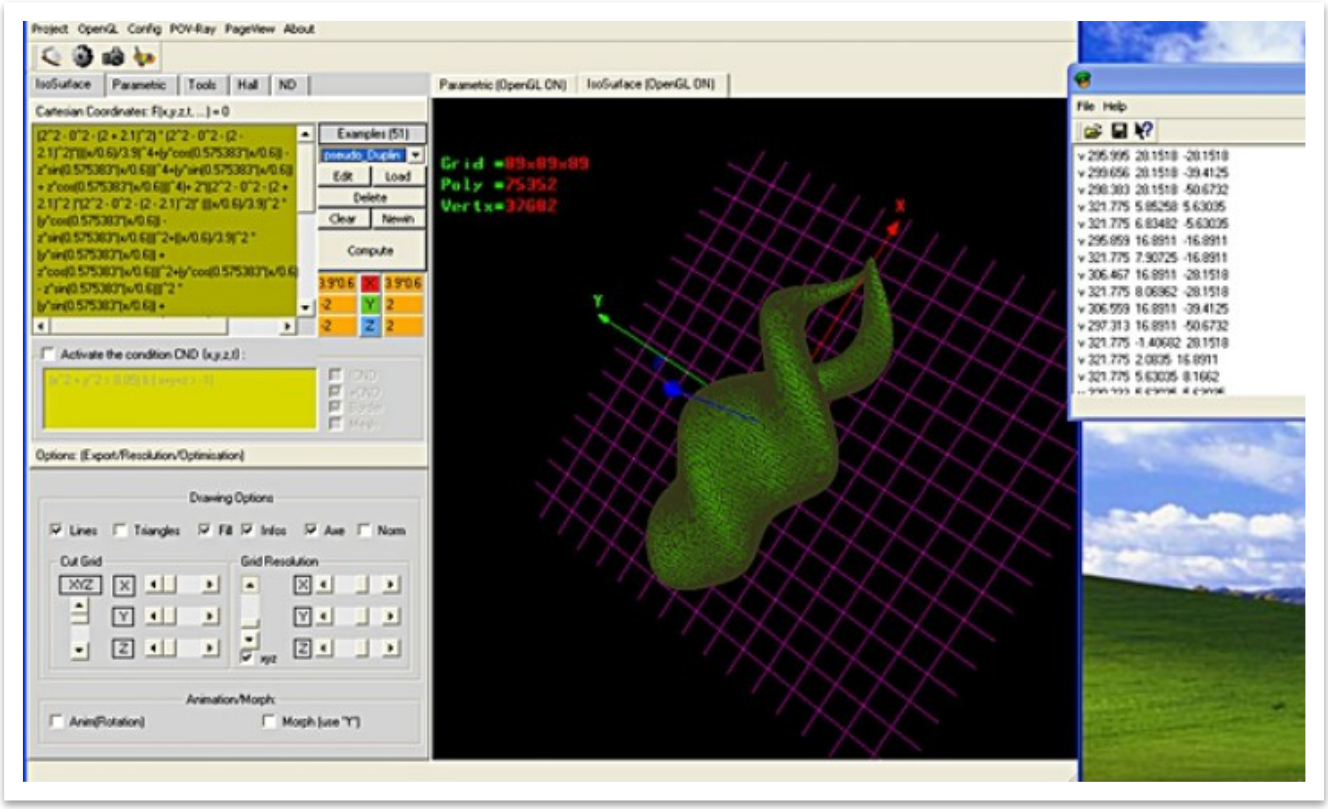
gfiorfior@gmail.com

3D печать дает возможность преобразовать то, что можете представить в материальный объект, который затем можно надеть и похвастаться.

Мы увидим, как используя только бесплатные инструменты, доступные в сети, мы можем преобразовать математическую изоповерхность в объект, который может использоваться для учебной или декоративной цели.

Первый шаг – загрузка программного обеспечения, которое позволяет нам визуализировать и управлять математическими поверхностями в трех измерениях. Хороший выбор – K3DSurf [1], бесплатный инструмент, который работает на многочисленных платформах и поддерживает параметрические уравнения и изоповерхности.

Программное обеспечение снабжено более чем 50 встроенными примерами, таким образом, Вы можете начать изменять параметры в готовых уравнениях, чтобы изучить эффекты на обработанных результатах.



Интерфейс K3DSurf

После игр с примерами можно начать вставлять свои собственные уравнения в текстовое поле, не забывая, что приложение требует, чтобы правая сторона уравнения равнялась нулю.

Несколько веб-сайтов с интересными формулами поверхностей:

- Неявные алгебраические поверхности

http://www-sop.inria.fr/galaad/surface/

- Университет Турина

http://www.dm.unito.it/modelli/index.html

- Геометрия, поверхности, кривые и многогранники Пола Боурка

http://paulbourke.net/geometry/

- Виртуальный музей математики

http://virtualmathmuseum.org

- Java инструмент, который дает возможность изменить все параметры и видеть результат; Вы можете скопировать соответствующее уравнение на вкладке формулы

http://www.javaview.de/demo/PaSurface.html

- Java инструмент для вычисления исключительных алгебраических кривых и поверхностей

http://www.singsurf.org/singsurf/SingSurf.html

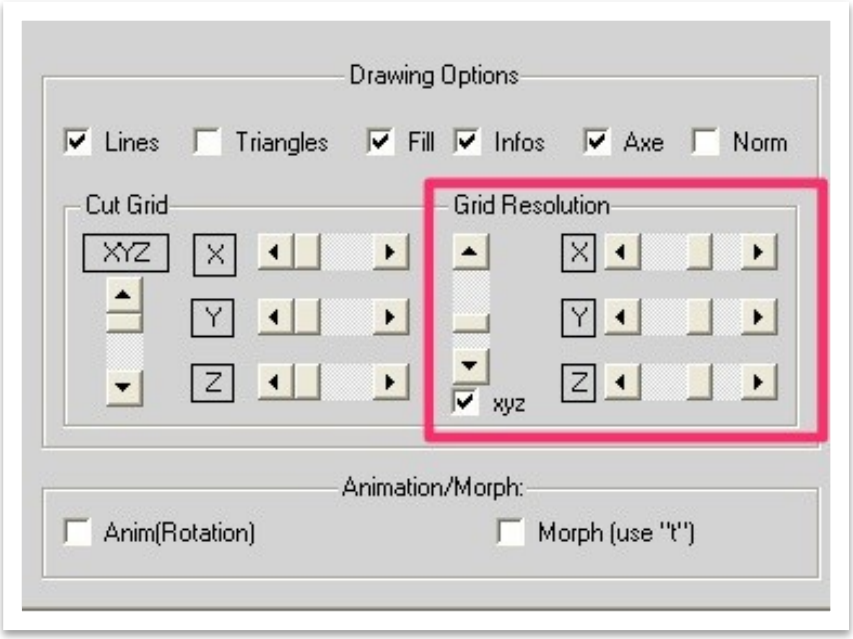
- Учебное руководство по изоповерхности Майка Уильямса

http://www.econym.demon.co.uk/isotut/

Для следующего примера мы собираемся использовать один из примеров встроенных в приложение; изоповерхность, называемая псевдо-Даплин, выбрана, потому что она выглядит интересно, имеет все характеристики, необходимые для получения хороших печатных результатов на бюджетном 3D принтере.

```
(2^2 - 0^2 - (2 + 2.1)^2) * (2^2 - 0^2 - (2 - 2.1)^2)*(((x/0.6)/3.9)^4+(y*cos(0.575383*(x/0.6))
- z*sin(0.575383*(x/0.6)))^4+(y*sin(0.575383*(x/0.6)) + z*cos(0.575383*(x/0.6)))^4)+
2*((2^2 - 0^2 - (2 + 2.1)^2 )*(2^2 - 0^2 - (2 - 2.1)^2)* (((x/0.6)/3.9)^2 * (y*cos(0.575383*(x/
0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6)))^2+((x/0.6)/3.9)^2 * (y*sin(0.575383*(x/0.6)) +
z*cos(0.575383*(x/0.6)))^2+(y*cos(0.575383*(x/0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6)))^2 *
(y*sin(0.575383*(x/0.6)) + z*cos(0.575383*(x/0.6)))^2))+2* 2^2 *((-0^2-2^2+2^2+2.1^2)* (2
*((x/0.6)/3.9) *2+2* (y*cos(0.575383*(x/0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6)))* 0-2^2)-4*0 *2.1^2
*(y*cos(0.575383*(x/0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6))))*(((x/0.6)/3.9)^2+(y*cos(0.575383*(x/
0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6)))^2+(y*sin(0.575383*(x/0.6)) + z*cos(0.575383*(x/0.6)))^2)+
4 * 2^4 * (2 *((x/0.6)/3.9)+0 *(y*cos(0.575383*(x/0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6))))* (-2^2+0 *
(y*cos(0.575383*(x/0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6)))+2 * ((x/0.6)/3.9))+4* 2^4 * 2.1^2 *
(y*cos(0.575383*(x/0.6)) - z*sin(0.575383*(x/0.6)))^2+2^8
```

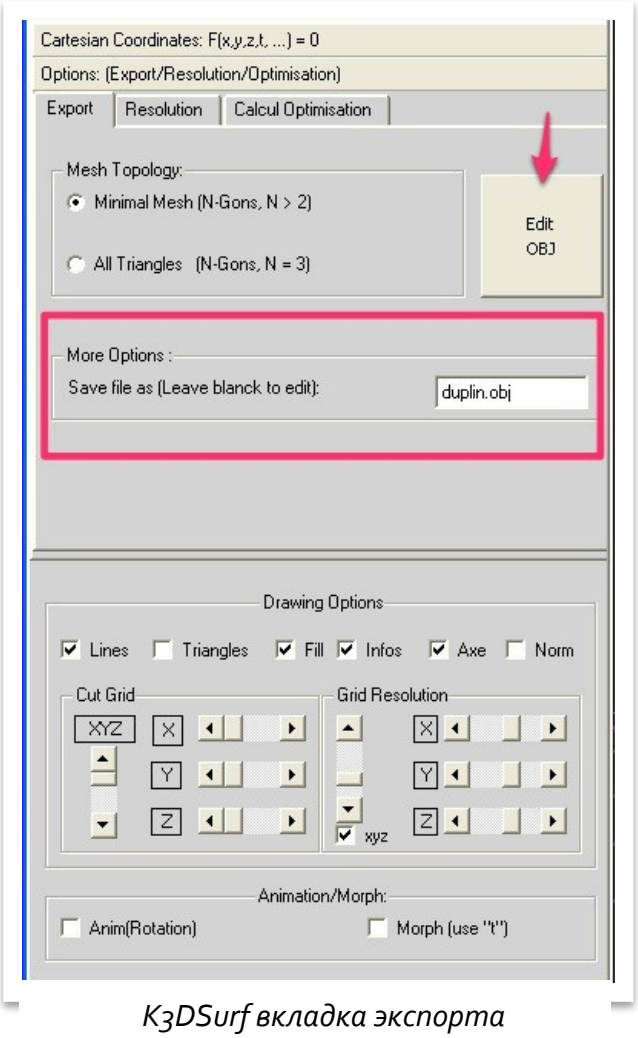
После выбора подходящего объекта Вы захотите проверить разрешение решетки в нижней части окна: выбор очень разреженной сетки приведет к острым краям и «пиксельному» виду.



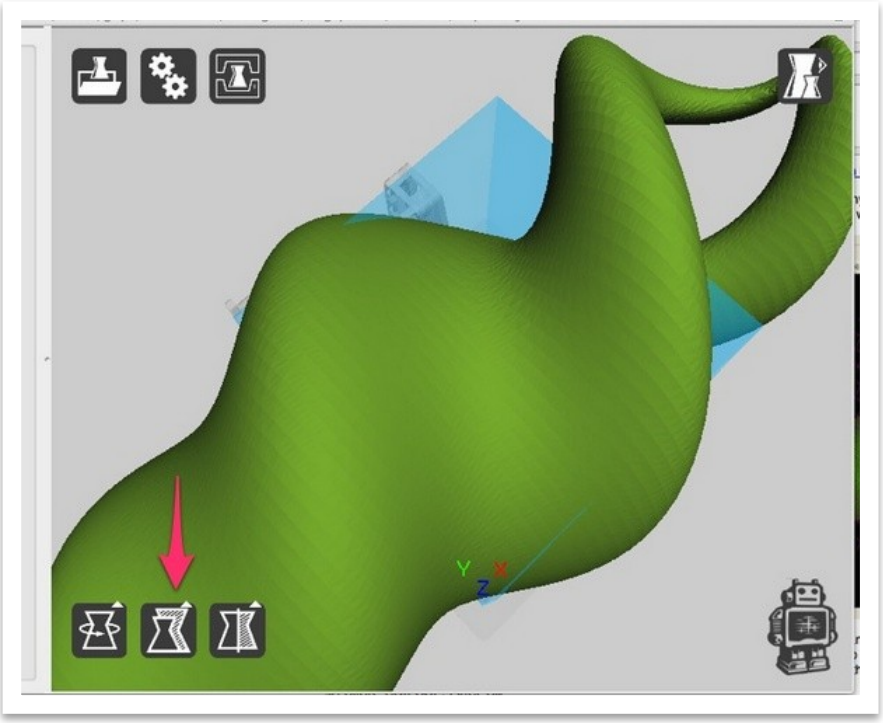
Вкладка опций рисования K3DSurf

Когда Вы удовлетворены результатом, можете экспортировать файл OBJ на вкладке «Опции: (Экспорт/Разрешение/Оптимизация)».

Здесь впишите выбранное имя для проекта (помните, необходимо добавить .obj вручную) и нажмите «Edit OBJ». Получившийся файл затем можно открыть в Netfabb Basic [2], чтобы обнаружить и устранить ошибки в треугольной сетке, если необходимо, и преобразовать его в STL – обычно используемый различными приложениями 3D печати формат файла. Следующие шаги будут показаны с использованием Cura [3], приложением 3D печати, разработанным Ultimaker [4], ему не требуется преобразовывать файл OBJ, так как программа «понимает» этот формат.



K3DSurf вкладка экспорта

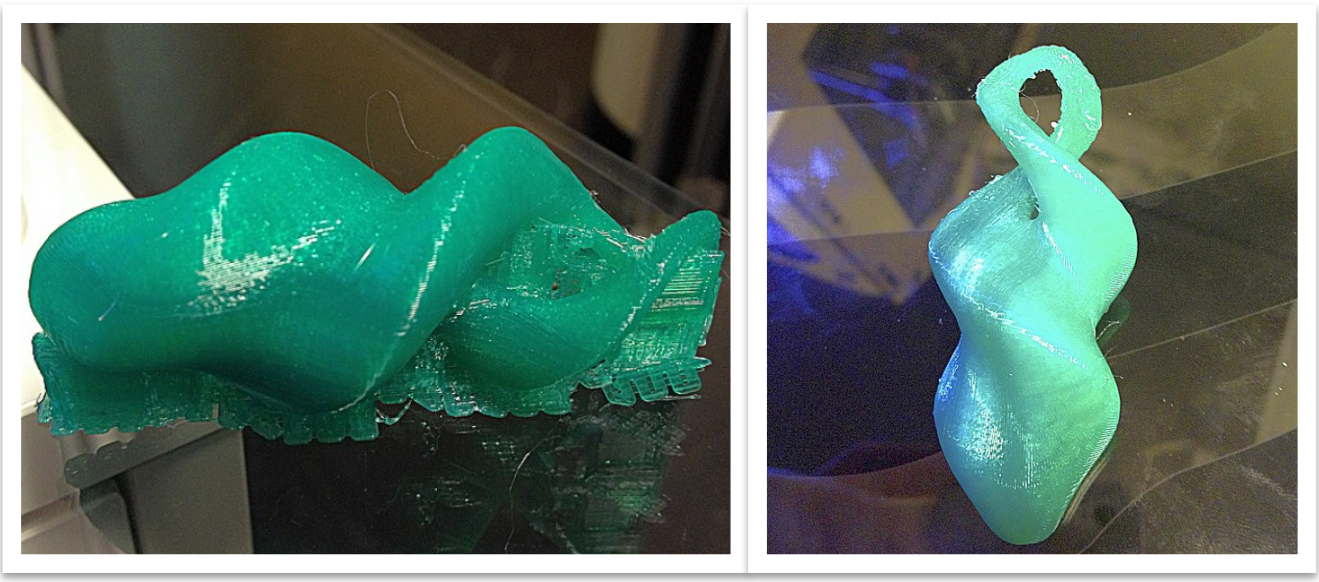


С Вашим приложением нарезки Вам следует, во-первых, масштабировать объект до приемлемых размеров печати, так как K3DSurf не дает возможности выбрать размер готового объекта. Cura позволит Вам легко сделать это кнопкой «масштаб», в то время как Netfabb Basic имеет команду «scale parts», с которой можно получить такой же результат.

Подсвечен выбор масштабирования в Cura

Теперь объект может быть нарезан с учетом правильных параметров для выбранного принтера, и отправлен в 3D принтер (на печать). Помните, большинство математических изоповерхностей имеют кривую основу и пустые участки и будут нуждаться в подложке и/или опорных конструкциях для пригодных к печати результатов на бюджетном 3D принтере.

Псевдо-Даплин масштабирован для печати



Выбранный объект, распечатанный на Ultimaker до и после отделения поддерживающих конструкций

Некоторые математические поверхности отчасти подходят для драгоценностей за их форму и характеристики. Например, в данный образец не требуется добавлять какие-либо кольца чтобы подвесить объект на цепочку, но в других случаях Вы, возможно, захотите поправить .OBJ файл в программе 3D моделирования, чтобы вручную добавить элемент крепления.

После теста с PLA на стандартном 3D принтере Вы можете отправить файл в службу печати, чтобы распечатать его в другом материале, таком как металл или керамика.

Этот пример был распечатан из позолоченной нержавеющей стали при помощи i.materialise[5].

Абдеррахман Таха, разработчик K3DSurf, утверждает на веб-сайте, что «Математика может быть такой забавной!» и «изображение стоит 1000 слов».

В то время как оба эти утверждения, конечно верны, я лично считаю, что их можно дополнить утверждениями «Математика может быть такой модной!» и «3D объект стоит 1000 изображений». Математика и искусство путешествуют бок о бок с тех пор, как древние египтяне начали вводить золотое сечение в свои монументы[6], и сегодня мы видим математические принципы, которые применяются ко всему, включая моду. Дешевый 3D принтер дает нам возможность заполнить разрыв между воображением и созданием, и иметь в своих руках математическую структуру, чтобы учиться, демонстрировать или надевать. Это может использоваться представлением прототипа для следующего шага к профессиональной службе печати или быть высоко оценено само по себе.

Благодарность

http://metamagics.wordpress.com

http://k3dsurf.s4.bizhat.com

Ссылки

1. http://k3dsurf.sourceforge.net
2. http://www.netfabb.com/basic.php
3. http://daid.github.com/Cura/
4. http://www.ultimaker.com
5. http://i.materialise.com
6. http://en.wikipedia.org/wiki/Mathematics_and_art

Переводчики: alex_itz, Woolpit

Доступная 3D
печать для
устойчивого
развития

3D печать в развивающихся странах: Извлечение уроков из выставки Techfortrade 3D4D

Вильям Хойл

Текфотрейд, Великобритания

william.hoyle@techfortrade.org

Техфортрейд, некоммерческая организация Великобритании, основанная в 2011, для обеспечения содействия развитию торговли с помощью перспективных технологий и борьбы с бедностью среди фермеров, рабочих и их сообществ. Расширение возможностей торговли имеет решающее значение для стран с низким доходом и целевой рынок для качественных продуктов и услуг в основании пирамиды огромен. Пока у 2.6 млрд человек на планете годовой доход менее 3$k и еще 1.4 млрд имеют доход между 3$k и 20$ k в год, общий оборот мирового рынка составляет более $25 млрд в год.

Однако есть некоторые существенные барьеры перед торговлей в основе пирамиды, не последним из них является бедная материальная инфраструктура, которая чрезвычайно затрудняет передвижение товаров и услуг. Главным мотивом Текфотрейд в решении организовать международную встречу в 2012 году была перспектива, что 3D печать может бросить вызов неразвитой инфраструктуре, выявить преобразующие применения для технологии 3D печати, которая могла бы изменить жизни некоторых из беднейших людей в мире.

Решение о проведении созыва было принято под влиянием того факта, что в развивающихся рынках быстро формируется необходимая для реализации 3D печати технологическая экосистема. В нее входят уровень мобильного проникновения, доступ к Интернету с мобильных приложений или смартфонов и быстро падающая стоимость общедоступного оборудования 3D печати и дешевого мобильного сканирующего оборудования.

С призом в $100k на реализацию выигрышного проекта 1-ого мая 2012 была запущена Выставка 3D для развития (3D4D),. Цели выставки были следующими:

- повысить осведомленность о возможностях 3D печати в развивающихся странах, путем подготовки ряда международных семинаров.
- дать участникам простой механизм для его применения где угодно в мире.
- краткий список лучших идей и назначение наставников для помощи финалистам в разработке их предложений.
- собрать финалистов вместе в Лондоне, чтобы представить их идеи независимой группе экспертов для выбора победителя.

К 6 августа 2012, дате окончания приема, Текфотрейд получил более 70 заявок. Из длинного списка были выбраны семь финалистов. Это были:

- Борис Коган (Израиль) – маломерная, простая в производстве 3D распечатанная автоматизированная теплица для увеличения производства пищевых продуктов
- Washington Open Object Fabricators – WOOF (США) – позволяет повторно перерабатывать пластиковые отходы и производить на крупногабаритных 3D принтерах продукцию, востребованную в повседневной санитарии (компостируемые уборные)
- Проект EN3D (Канада) – 3D распечатанное средство слежения за солнцем для увеличения эффективности устойчивого производства энергии
- Fripp Design & Research (Великобритания) – 3D печать протеза мягких тканей (носы, уши) для пациентов с врожденными дефектами и травмированных
- Just 3D Print (Индия) – переработка ненужных материалов в экономичное и экологически рациональное сырье для труженников 3D печати
- Рой Омбэтти (Кения) – 3D распечатанная специальная обувь для пациентов, страдающих от инвазии мухи Джига

- Colalight (Великобритания) – группа собрала солнечную лампу, основанную на бутылке от колы, с деталями, сделанными на 3D принтере

В качестве победителя судьи выбрали проект WOOF. Проект WOOF создаст новые рабочие места, позволяя использовать ненужную пластмассу, как материал для создания продукта.

Команда проекта сотрудничает с организацией «Вода для человечества» (WFH) и их начальные продукты будут посвящены местным проблемам с водой и улучшению санитарных условий в Оахаке, Мексика.

Подготовка выставки 3D4D обеспечила возможность узнать о текущей картине людей и организаций, работающих над идеями связанными с использованием 3D печати на развивающихся площадках. Очевидно, что есть возрастающая группа ученых, предпринимателей и любителей 3D печати, работающих над рядом идей: от создания библиотек полезных 3D печатных продуктов, которые можно использовать в развивающихся странах, до проектов разработки транспорта на солнечных батареях для 3D принтеров. Вероятно, слишком рано, чтобы описать эту группу как сообщество, несмотря на то, что Выставка до некоторой степени объединила людей под символом «3D для развития (3D4D)».

Было также очевидно, что в мастерских требуются некоторые навыки для использования преимуществ технологии, имеющихся в больших запасах. Растущее сообщество «мастер», возникающее во многих развивающихся странах, основывается на традиции «справлюсь и починю», как наборе навыков, утерянных в большом количестве развитых стран. Также стоит упомянуть тот факт, что всё более и более молодые разработчики и студенты-инженеры компетентны в использовании программ CAD и быстро схватывают понятие 3D производства. Фактически, видео[1] о работе энтузиастов около Йоханнесбурга, сделанное дома, где у нас есть одна из наших мастерских, показывает, что даже школьники быстро схватывают эту концепцию!

Также ясно, что даже в развивающихся странах молодые предприниматели ухватили идею использования 3D печати в качестве дешевого способа создания прототипов продукта и мелкосерийных изделий. Это важно, потому что даже с достижениями в технологии инъекционного литья, формы могут стоить минимум $5к; цена, которая недоступна для мелких предпринимателей в странах с низким доходом.

После Финала, мы поддерживали связь со всеми нашими финалистами, и большинство из них добились большого прогресса в своих проектах, не смотря на то, что не выиграли приз. Выставка предложила эффективную основу для демонстрации проектов, и в результате многие финалисты позднее получили предложения о сотрудничестве

Наш проект-победитель предлагает возможность протестировать проект производственного бизнеса для малых групп, которая включает вторичную переработку пластика и совершенствование локальных 3D производственных навыков в производстве ассортимента необходимых деталей и продукции для местных рынков. Он также использует общедоступные разработки для крупногабаритного печатного оборудования и оборудование для измельчения и экструдирования пластмассовых отходов.

Не смотря на то, что проект может стать основой для репликации и масштабирования инициатив, таких как WOOF'S и проекта Just 3D Printing, который имеет такие же цели, есть ряд задач, которые необходимо решить, прежде чем этот проект сможет иметь реальный коммерческий потенциал.

К этим задачам относятся:

- Разработка технологии производства материалов, для расширения ассортимента пластиков, подходящих для вторичной переработки и изготовления высококачественной нити простым и недорогим способом.
- Разработка технологии производства пигмента, чтобы стало возможным простое и дешевое изготовление маленьких партий цветной нити .
- Обращение к первым двум задачам может позволить развивающимся странам поставлять нить на коммерческой основе, таким образом, рынок для 3D печатной нити быстро расширится за следующие несколько лет.
- Юридические проблемы, связанные с интеллектуальной собственностью, которые можно предотвратить, например, открыв доступ к файлам CAD для запасных частей.

- Лучшее понимание экономики мелкосерийного производства на основе 3D печати, по сравнению с более традиционным производством и распространением в развивающихся рынках.

Особенно нас интересует в развивающихся странах производство коммерческой сортовой нити из переработанной пластмассы, собранной и отсортированной на свалках. Мы не знаем ни одной организации, преследующей концепцию понятия «этичной нити». Джошуа Пирс, доцент кафедры материаловедения и машиностроения и кафедры электротехники и вычислительных устройств Мичиганского Технологического университета написал недавно в блоге Текфотрейд[2]:

> *«Один из наших главных проектов – создание открытого проекта RecycleBot, который может превратить ненужный пластик в 3D нить. У него есть возможность упростить сбор мусора в развивающихся странах для переработки пластика в ценные изделия для продажи или просто для обеспечения своих собственных потребностей. Использование устойчивого источника энергии и переработанной нити не только дают возможность помочь неимущим людям, но также и улучшают экологическую эффективность 3D печати».*

В Текфодтрейд мы планируем новые инициативы, которые, мы надеемся, будут поощрять дальнейшие разработки, чтобы решить некоторые из этих проблем и мы постоянно в поисках совместного сотрудничества, которое поможет нам достичь наших целей.

Ссылки

1. http://www.house4hack.co.za/makerdroid
2. http://www.3d4dchallenge.org/designing-the-future/

Переводчики: alex_itz, Woolpit

Отпечатанные в 3D анатомические копии

Паоло Росси, Карло Кампана

Международная кооперация стоматологов, негосударственная организация

Европейский центр международного обучения гигиене полости рта, Турин, Италия

paolorossi64@hotmail.com

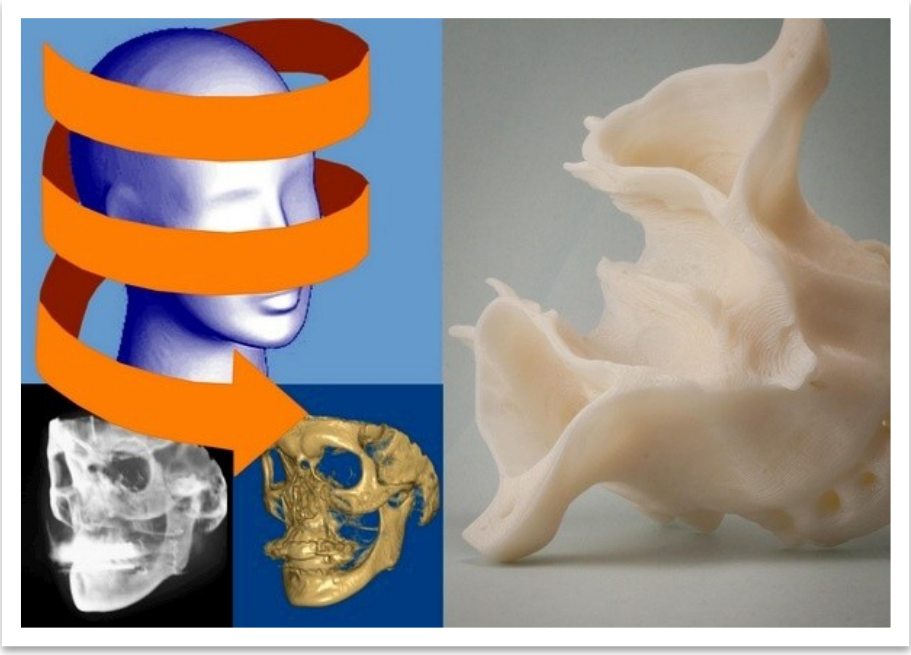
Radiologia Trevenezie, Монфальконе, Бассано-дель-Граппа

3dprinterpooling, Италия

info@radiologiatrevenezie.it

Введение

Современные отделения цифровой рентгенологии анализируют костные структуры человеческого тела при помощи трехмерных изображений, подходящих для морфологических исследований.



Использование конического рентгеновского луча (компьютерная томография коническим лучом, Cone Beam Computed Tomography – CBCT, Прим. ред.) позволяет, в частности, обнаруживать сплошные массивы тканей. Поглощенные дозы ионизирующего излучения немного выше, чем у прежней рентгенографии и снижены на 70% по сравнению с традиционной компьютерной томографией. Использование ядерного магнитного резонанса позволяет получить детали мягких и твердых структур без использования рентгеновских лучей.

Эти изображения очень полезны для практического и правильного плана хирургических вмешательств в комплексных анатомически участках, таких как череп и верхнечелюстные кости, при рассматривании, например, структуры костей верхней челюсти, чтобы определить расположение подходящей поверхности для удаления кости, или для ее вставки куда необходимо.

Предложенный метод – система, которая делает возможными сборку анатомических копий в форме анатомической медицинской модели профессиональными стереолитографическими

машинами или с помощью 3D принтеров, которые обычно можно найти на рынке по доступной цене.

Цель состоит в том, чтобы обеспечить доступ к методу уже использующемуся в челюстно-лицевой хирургии, но до настоящего времени сдерживаемого чрезвычайно ограниченным количеством клинических случаев из-за его высокой стоимости, и распространить его максимально возможному количеству пользователей в дидактических, образовательных целях и с целью улучшения взаимодействия между пациентом и операторами.

Двух – и трехмерная медицинская обработка изображений в зубной рентгенологии: от файлов Dicom к понятию толщины изображения

Тесное сотрудничество между рентгенологией и стоматологией развивается через определение вопросов, относящихся к жалобам пациентов. Сравнивая рентгенологическое исследование, Вы можете следовать, главным образом, двумя путями: исследования первого уровня, обычно двухмерные изображения, выполненные прямым сканированием; и исследования второго уровня, которые объединены в то, что мы называем «трехмерные анализы». Последнее представляет интерес для развития стереолитографических медицинских моделей.

Начальной точкой является файл «Dicom – Цифровая обработка и передача изображений в медицине», формат обмена изображения только для медицинского использования, обычно используются для двух – и для трехмерных изображений. Обычный диск, полученный посредством процесса дигитализации, составлен из растрового изображения и текстового файла, который может содержать данные пациента и облучения испускаемого во время выполнения исследования; все это образует файлы Dicom.

Двумерное медицинское изображение Dicom, обычно используемое стоматологами

Говоря компьютерными терминами, мы анализируем изображения, состоящие из точек, и оцениваем в значениях, которые соответствуют «градациям серого» в медицинских изображениях, полученных путем считывания отпечатка с электронного сенсора, освещенного рентгеновскими лучами. Все эти значения, помещенные в шаблон определенного размера, порождают рентгенографическое изображение.

Когда мы говорим о трехмерном изображении, мы должны представить, что пиксели, характеризуемые «градациями серого», формируют объем, и таким образом матрица имеет дополнительную характеристику – «толщину». Комплексность медицинских данных, полученных из трехмерных обзоров, выполненных машинами, такими как CT (компьютерная томография) или MRI (магнитно-резонансная томография), являются частным примером разделения объема на отдельные слои («осевая декомпозиция»). Если Вы представите пациента в вертикальной позиции, осевые срезы – это изображения, ориентированные параллельно земле.

Осевое изображение CBCT и трехмерное получение объема: понятие толщины

На компьютере мы получаем не единственный файл Dicom, а их последовательность, каждый из которых содержит осевое изображение, характеризующееся толщиной, и таким образом, файл Dicom описывает все «значения серого», составляющие определенную толщину исследуемого объема. Толщина и осевые последовательности – начальная точка построения анатомической копии для 3D принтеров. Фактически, выбирая значение толщины при формировании Dicom последовательности, полученной при помощи компьютерной томографии, мы можем задать объем анализируемых данных при производства 3D модели и определить их качество. Например, малая толщина образует много «слоев» объема, давая возможность увеличить точность модели, но это также увеличивает ошибки в описании анатомической модели. С другой стороны, большее значение толщины может привести к утрате важных анатомических деталей.

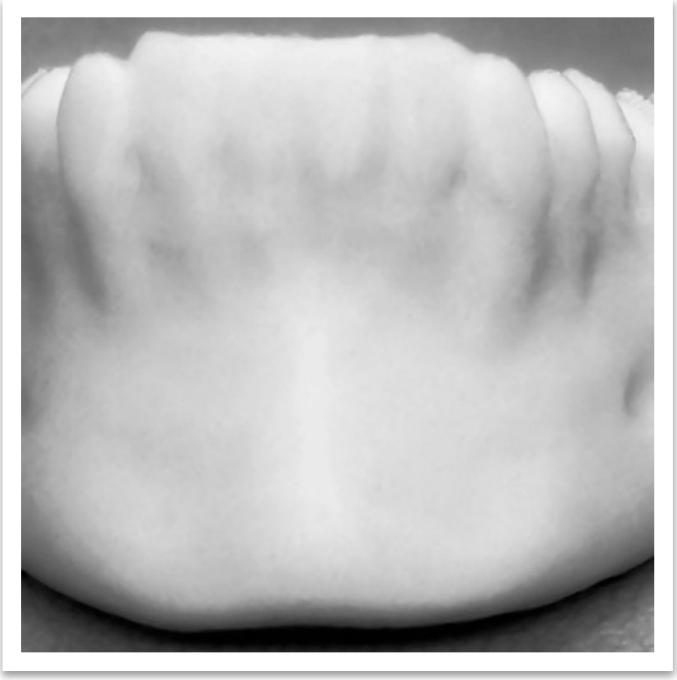
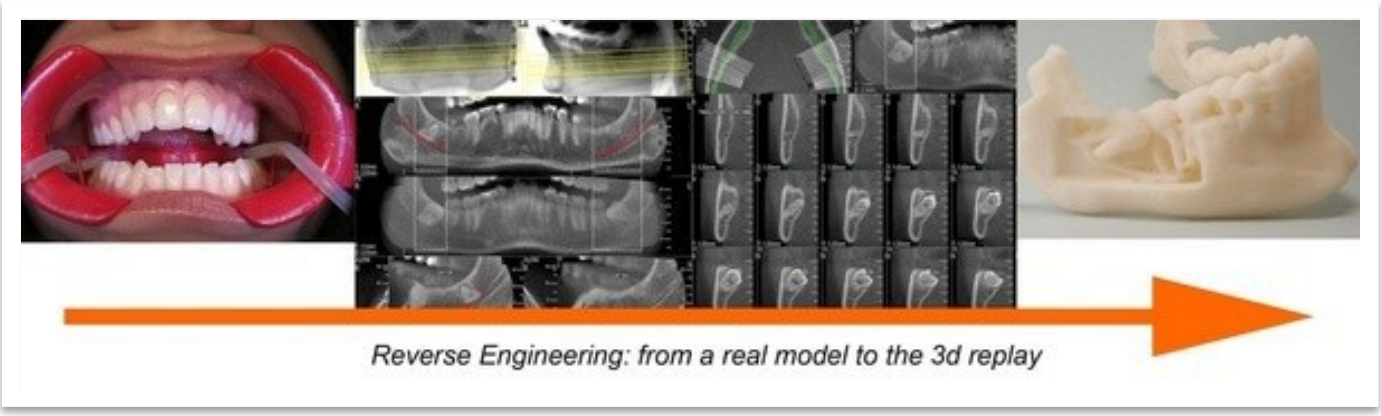


Рисунок модели сделанной с высоким значением толщины: это не стоматологические детали, невозможно определить анатомические элементы

Рисунок модели с корректным значением толщины: анатомические элементы определимы

Обратное проектирование и реализация STL файла: Трехмерная печатаемая модель

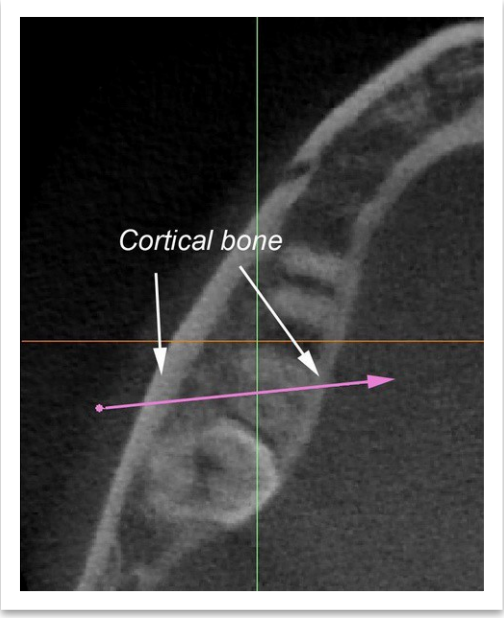
Анатомическая стереолитографическая модель является представлением в масштабе 1:1 реальной модели: пациента. Все переходы пост-обработки, ведущие от захвата сканированной анатомической части реальной напечатанной трехмерной анатомической копии следуют за процессом "обратного проектирования".

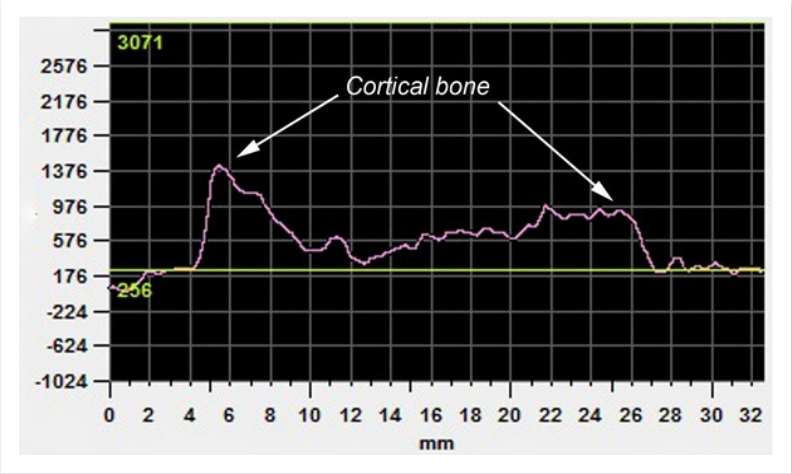


Инженерный анализ: от фактической модели до 3D воспроизведения

Конический луч компьютерной томографии, используемый в стоматологической рентгенологии, характеризуется очень хорошей диагностикой отношения риск/преимущества для пациентов, но при использовании источника излучения низкой мощности он не в состоянии

создать точную аналогию между «значениями серого» и анатомическими тканями пациента. До сих пор, нет шкалы(такой как, например, шкала Хоунсфильда для многослойной компьютерной томографии полного сканирования тела), который описывает четкое отношение между реальными тканями и радиодиагностическими изображениями.

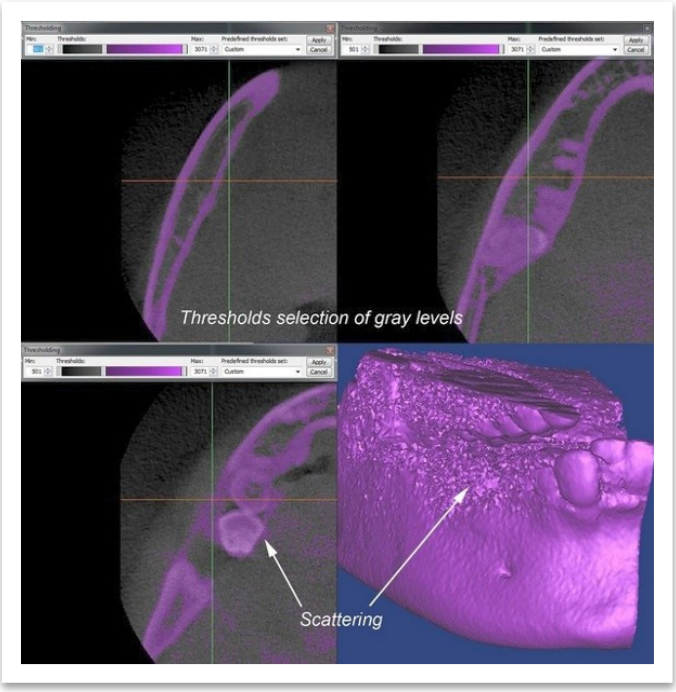


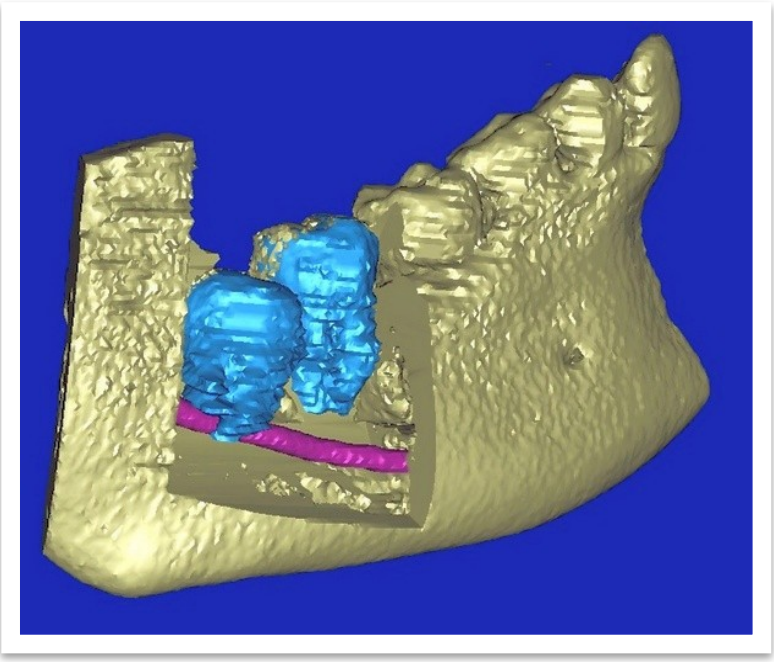


Анализ пределов градаций серого

Первый шаг в реализации стереолитографического файла «STL» в области медицины – пороговая обработка, на этом этапе после анализа степеней яркости, составляющих медицинское изображение, осевые кадры «обработаны», сегментированы на участки, характеризуемые интервалами уровней яркости. Все анатомические участки, выбранные на данном этапе, составят трехмерную модель.

В этой точке, трехмерная модель содержит много «шума» и, особенно на уровне выпуклых участков рта, на уровне реконструкции зубов это плохо определимо и нереалистично. Причиной для этого является известный в области медицинских снимков феномен рассеивания в дентальной области вследствие наличия металлов или пломбирующих материалов. Эти материалы, подвергаясь рентгеновским лучам, дают серые следы, которые выводят на экран случайные диапазоны и нюансы вокруг места, где находится металл или пломбы.



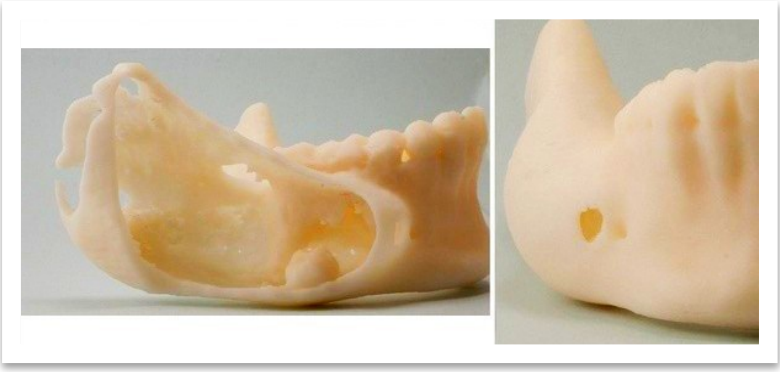


Чтобы достигнуть большей четкости областей, где присутствует рассеивание, мы приступаем к «очистке» на каждом осевом изображении – мы начали устранять из сегментированной области что-либо, дающее «шум» 3D модели.

На этом этапе файл готов к преобразованию в STL файл и, после проверки отсутствия каких-либо «отверстий», которые могут повлиять на 3D печать, мы запускаем процессы стереолитографической печати.

Медицинская модель, изготовленная на основании магнитно-резонансного сканирования: воспроизведение мягких тканей

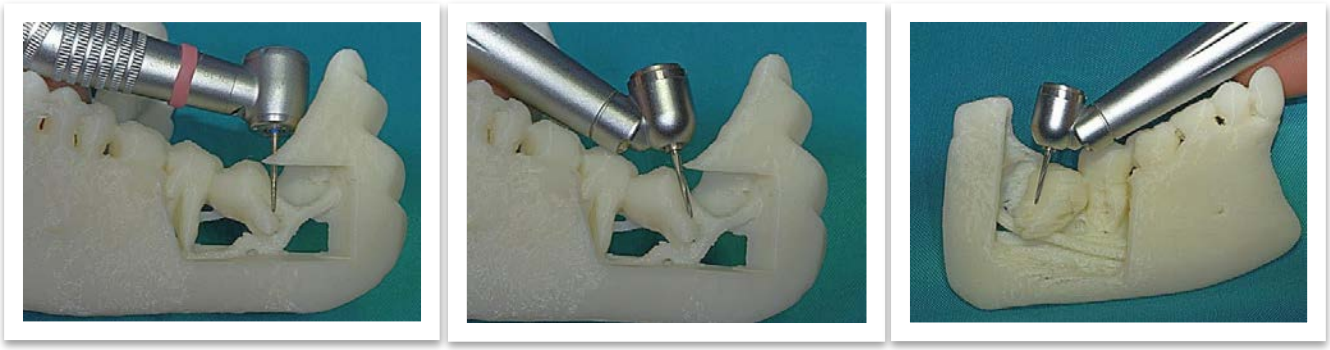
Изучение восьмого зуба с 3D предоперационной моделью



Большой кистозный остеолиз, изучение при помощи двойной модели, первое – внутреннее изображение и второе – полностью воспроизведенная челюстная кость

Использование 3D копий для дидактической программы вмешательства

В стоматологии процессы челюстно-лицевой хирургии и зубы теперь успешно воспроизводятся в 3D, верхняя челюсть с выделением верхнечелюстных пазух, крыловидного отростка, скул или всей нижней челюсти, с нижним альвеолярным каналом определяются, исходя из полученных при цифровой рентгенологии данных. (CT зубное сканирование, обмотка, конусный луч, и т.д.).

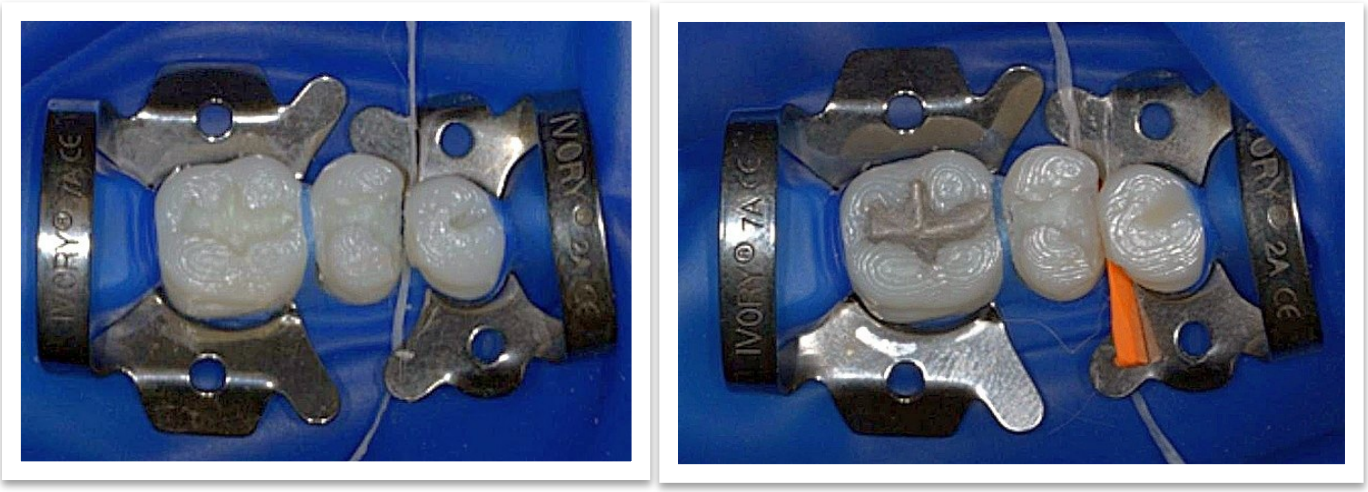


Учебный план вмешательства в восьмой зуб

Учебный план предварительного имплантирования

Анатомическое копирование позволяет хирургу не только изучить и проработать операцию, чтобы выполнить, но также и смоделировать все фазы хирургии. Например, начиная с модели, мы можем упростить реконструкцию атрофий моделированием уже вне ротовой полости, части разнородных костей с предельной точностью, или смоделировать установку зубных имплантов, оценивая в первую очередь объем кости и плотность, строение верхнечелюстных пазух, или даже разработать хирургический эндопротез сосуда, используя тот же 3D принтер, или может быть выполнен с чрезвычайной простотой в нашей доверенной лаборатории. Чтобы производить анатомические копии, нам необходимы только Dicom-данные компьютерной томографии пациента. Однако, специализированное программное обеспечение позволяет добиться «чистых результатов» из разнородных данных, путем коррекции снимков согласно потребностям и преобразованию, при необходимости, к определенному формату файла. Файлы, обработанные таким образом, отправляются в 3D принтер, производя анатомические копии.

Материалы, используемые для создания анатомических копий, различаются по свойствам в зависимости от их применения, но по существу это специальные термопластические смолы ABS или стерильные полиамиды, которые сертифицированы для клинического применения. Затем, как только мы разрабатываем и моделируем вмешательство на копии, все материалы могут быть стерилизованы и использоваться для пациента, значительно уменьшая время операции, дискомфорт пациента и риск осложнений.



Пример использования 3D модели для практики в консервативной терапии

В итоге, проектирование вне полости рта и среда моделирования позволяют избежать любой хирургической неожиданности, например, вскрытия края слизистой десен, определять точный контрольный список необходимых материалов, размера и типа имплантов, количество биоматериала, размер остеосинтетических винтов или штифтов, и т.д. Это проверенная, очень полезная для обучения сложным случаям и для начальной подготовки операторов консервативная и экстрактивная терапия.

Переводчики: Woolpit, alex_itz

Проект Бесконечного пластика.

Йонас Мартенс, Лаура Клаусс

Better Future Factory, Нидерланды

jonas@betterfuturefactory.com

laura@betterfuturefactory.com

Из мусора в ценности

С помощью 3D-принтеров бесполезные пластиковые отходы парой простых движений превращаются в ценное, созданное по запросам пользователя изделие. Сейчас «Проект вечного пластика» использует в качестве исходного сырья старые пластиковые стаканчики, разбрасываемые повсюду во время фестивалей. Механизм чистит, измельчает и экструдирует старые отходы в нить для 3D-печати, которая, в свою очередь, используется 3D-принтером для создания почти бесконечного множества готовых изделий.

«Проект вечного пластика» имеет дело с локальной переработкой пластика. Проект был успешно запущен на фестивале «Лоулендс-2012» в Нидерландах. Мы установили свою мини-фабрику, и посетители, самостоятельно управляя механизмом, могли превращать использованные ими стаканчики в новые изделия.

У проекта двойная цель:

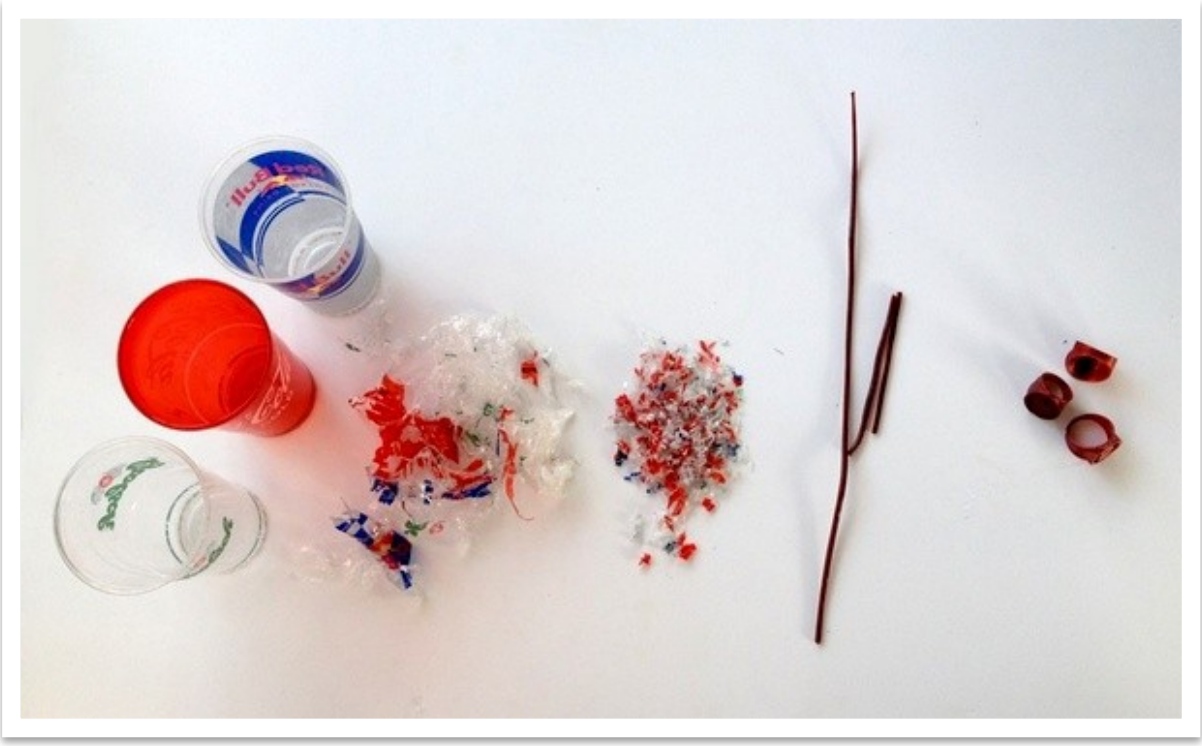
- Путём побуждения и вовлечения в проект людей добиться локальной переработки пластика.
- Повысить осведомлённость потребителей, научив их новым способам повторного использования материалов.

Поэтому мини-фабрика максимально открыта и прозрачна. Можно вручную управлять механизмами и на практике изучать, каким образом стаканчики превращаются в сырьё, а затем в новое изделие.

Мини-фабрика "Проекта вечного пластика"

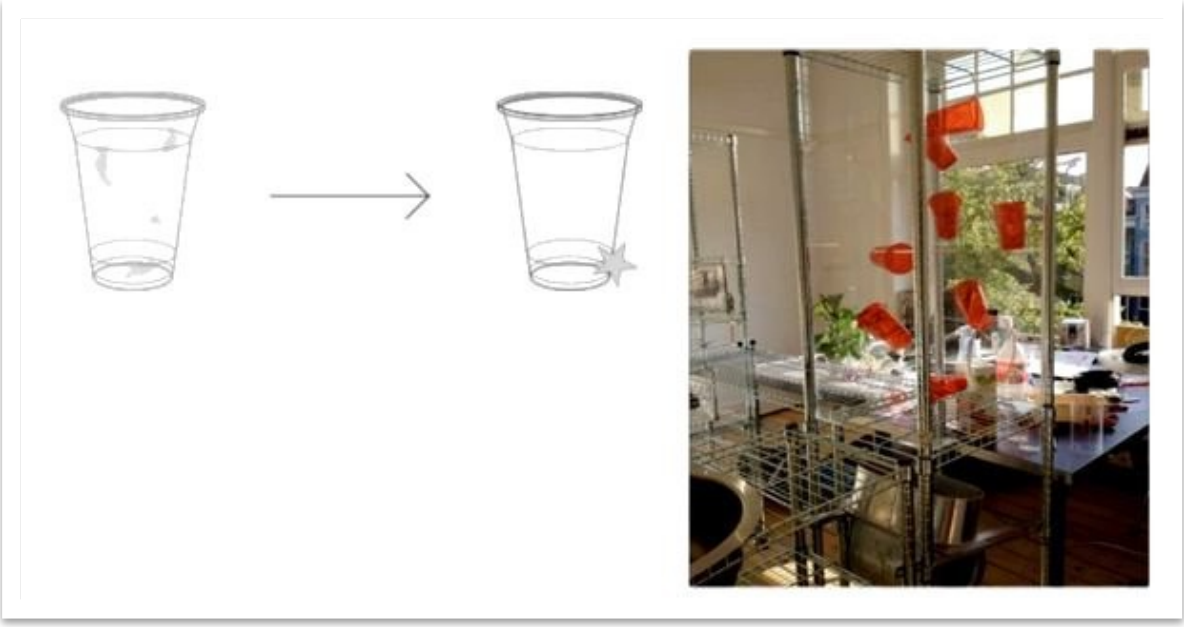
Для создания нового изделия люди со своими использованными стаканчиками проходят через стадии мытья, сушки, измельчения, экструзии и 3D-печати. На 3D-принтере создаются заказные и индивидуализированные изделия, которые можно носить на себе и забрать домой. Эти вещи становятся броским памятным подарком, который вызывает обсуждения и распространяет молву о своём происхождении и новой концепции вторичной переработки. Несомненно, с 3D-принтером можно сделать много функциональных, долговечных и желанных изделий. Задача разработчиков — исследовать возможности этих развивающихся технологий и сделать так, чтобы они служили человеческим нуждам.

Переработка пластика шаг за шагом



Шаг 1-й. Мытьё и сушка

Помойте использованные стаканчики в раковине с водой, чтобы избавиться от всей грязи. Затем положите их в воздуходувку, чтобы они полностью высохли. Любые остатки грязи или воды вызовут проблемы во всём дальнейшем процессе, как только мы нагреем (био-)пластик.

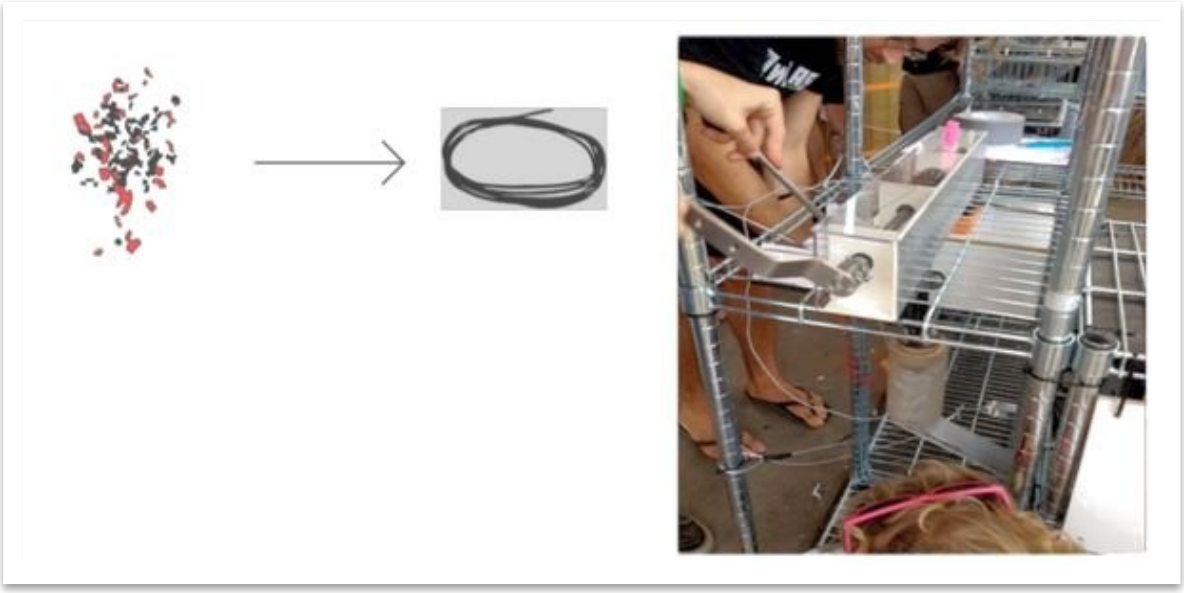


Шаг 2-й. Измельчение

Теперь вы можете измельчить свой стаканчик на мелкие кусочки в шредерах, чтобы получить нужный размер исходного сырья для экструдера. Стаканчики разрываются на части острыми ножами.

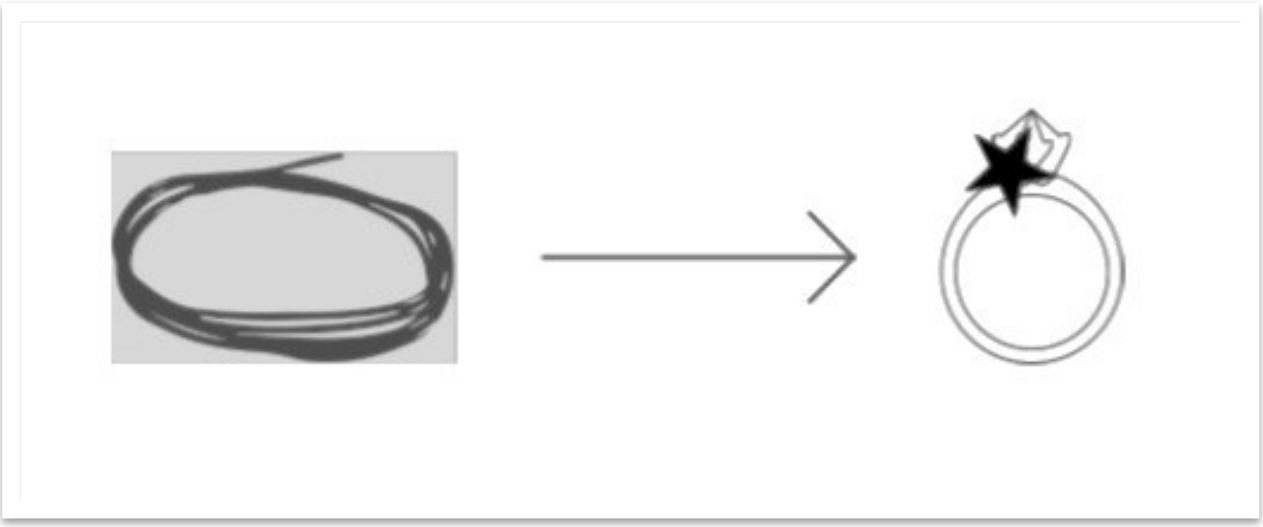
Шаг 3-й. *Экструзия*

Мелкие кусочки биопластика, некогда бывшие вашим стаканчиком, нагреваются примерно до 190 градусов и проталкиваются через небольшое отверстие в экструдере, чтобы получилась тонкая нить переработанного пластика. Крутите медленно!



Шаг 4-й. *3D-печать*

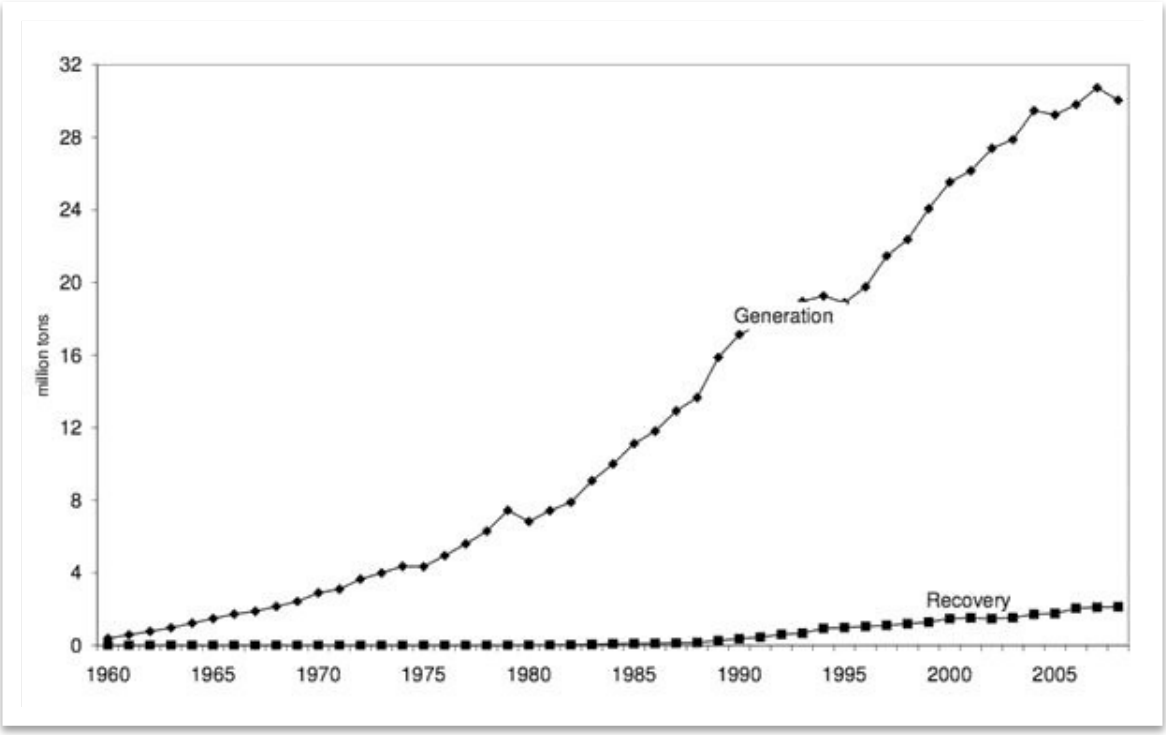
Именно здесь происходит волшебство — 3D-принтер превращает нить переработанного биопластика в новые изделия. 3D-файлы CAD служат основой для создания изделия из тонких слоёв расплавленного пластика.



Зачем мы это делаем?

Сегодня лучшая часть всех пластиковых отходов не имеет никакой ценности, их большая часть — и то только если они собраны должным образом — в конечном итоге оказывается на свалке или в мусоросжигательной установке. Свалки и мусоросжигательные установки очень сильно влияют на окружающую среду. Однако пластиковый мусор, который не был собран надлежащим образом, оказывается в итоге в морях, реках, лесах и, со временем, даже в животных. Во всём мире перерабатывается только 7-12% отходов пластика.

Мы считаем, что по-настоящему проблема начинается со стороны потребления. Она начинается с потребителя, который воспринимает пластиковые отходы как бесполезный материал. В отличие, например, от использованной древесины, которая в наши дни невероятно сильно возрастает в цене, если её обработать простыми инструментами вроде наждачной бумаги, гвоздей и лака. Суть проблемы в том, что у потребителей нет никакого осязаемого и понятного способа, которым можно было бы создать что-то ценное из пластикового мусора, производимого ими по большей части непреднамеренно.



12Иллюстрация, полученная авторами в Управлении по охране окружающей среды США http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/msw2008data.pdf

Вместе с тем пластик, как материал сам по себе, имеет много преимуществ перед всеми другими. Использование других материалов для упаковок увеличило бы их вес примерно в 3,6 раза, удвоило бы потраченное на их изготовление энергию, а в воздух было бы выпущено в 3 раза больше парниковых газов. Это значит, что проблема не в самом материале, её истинный корень — в недостаточной переработке.

Первые шаги

Первый шаг: мы хотим показать людям, что их пластиковый мусор ценен, и то, как они могут использовать его для новой цели. Мы делаем это при помощи нашей мобильной мини-фабрики, чтобы позволить людям превращать использованные стаканчики в любой вид трёхмерных печатных изделий. Использовать наши механизмы — одно удовольствие, к тому же они объясняют людям весь процесс осязаемым способом — обучение на практике. Увлечь проектом потребителя (людей) и вовлечь его в процесс — ключ к успеху и наш величайший дизайнерский вклад.

Второй шаг: надо собрать вместе все компании, которые влияют на жизненный цикл пластика. Объединёнными усилиями мы сможем сделать этот цикл более коротким. У нас уже есть контакт с производителями биопластика и потребителями одноразовой посуды из пластика. Сообщество open source (RepRap) и производители 3D-принтеров тоже играют важную роль в разработке технических решений и продукции в более человеческом измерении. Мы соединяем точки между техникой, материалом, опытом пользователей, фестивальными организациями и научными исследованиями.

В составе наших действующитх партнеров:

Ultimaker

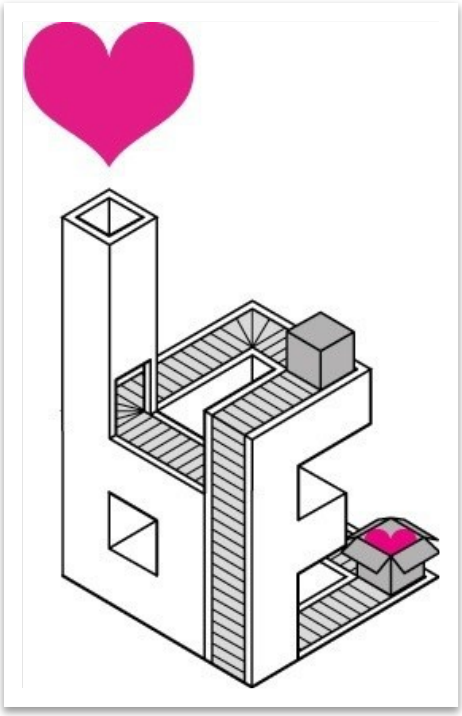
PURAC
pure by nature

TU Delft

Некоторые мероприятия с нашим участием (середина 2012 – начало 2013 г.):

Заключительная стадия

Наша конечная цель состоит в том, чтобы воплотить концепцию в продукте, который позволит всем людям и мировым сообществам послужить на пользу самим себе. Мусор, который в противном случае загрязнит их жилую среду или будет вывезен куда-нибудь подальше, сможет прямо на месте использоваться для создания чего-то нужного. Как дизайнерский коллектив, мы хотим решить самую большую мировую проблему; мы хотим доказать, что циркулярная экономика (безотходная экономика, направленная на сбережение энергетических и природных ресурсов и экологически чистое производство и потребление — *Прим. ред.*) не только необходима, но и возможна прямо сейчас. Таким образом мы вносим свой вклад в то, что станет для нас — хочется верить — лучшим будущим.



Better Future Factory — мастерство XXI века:

пишите нам *на love@betterfuturefactory.com*

Переводчики: aks_id

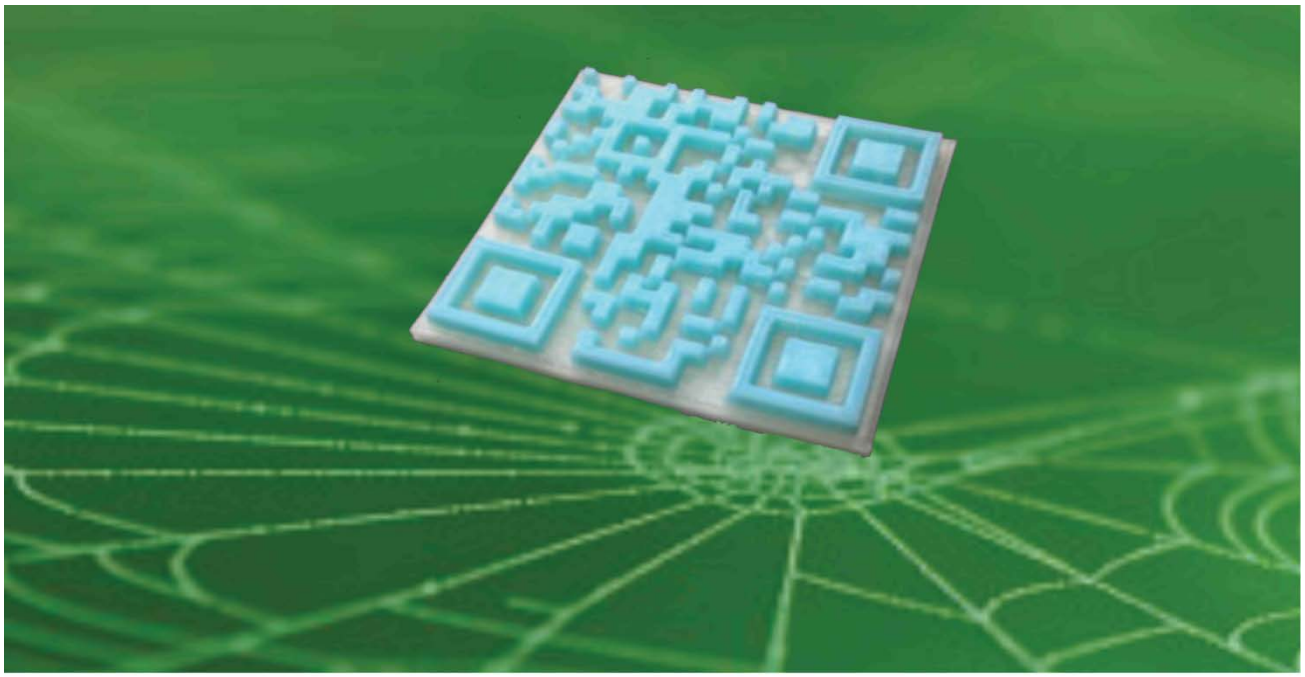
The Abdus Salam
International Centre
for Theoretical Physics

IAEA

Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития

Доступная, трехмерная настольная печать, несмотря на то, что находится в начальной стадии развития, быстро формируется с, по-видимому, безграничным потенциалом. Мы надеемся, что эта ультрасовременная 3D технология откроет новые измерения для науки и образования, и окажет заметное влияние в развивающихся странах.

Эта книга представляет разумный, первый обзор текущего исследования области 3D печати. Она стремится вызвать любопытство и глубокое понимание у молодых стипендиатов и новых поколений ученых, чтобы мотивировать их накапливать собственный опыт 3D-печати, чтобы исследовать огромный потенциал, который обеспечивает эта доступная технология, *конечной целью является вкладывание знаний прямо в ваши руки.*



Graphic design by C. Fonda.
Cover photo courtesy of G. Fior.
Published by the ICTP, © 2013.

ISBN 92-95003-48-9

SOME RIGHTS RESERVED