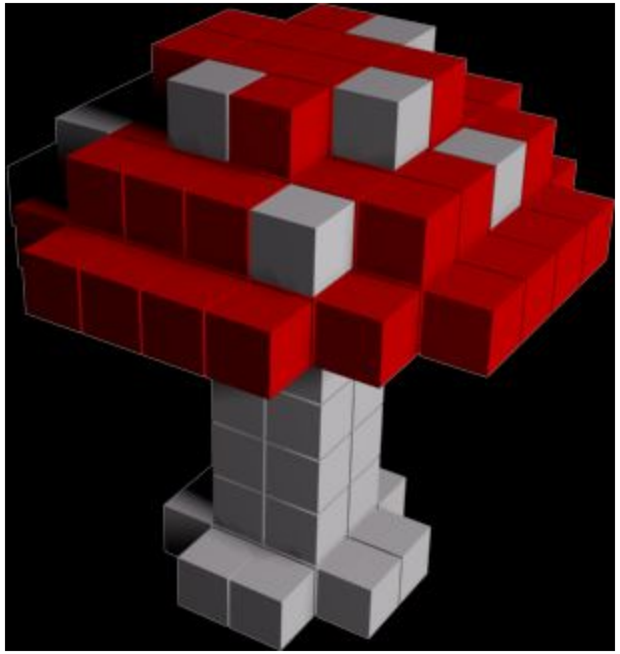
Воксельная графика

- Во́ксел (в разговорной речи воксель, англ. Voxel — образовано из слов: объёмный (англ. volumetric) и пиксель (англ. pixel)) — элемент объёмного изображения, содержащий значение элемента растра в трёхмерном пространстве. Вокселы являются аналогами двумерных пикселей для трёхмерного пространства. Воксельные модели часто используются для визуализации и анализа медицинской и научной информации.

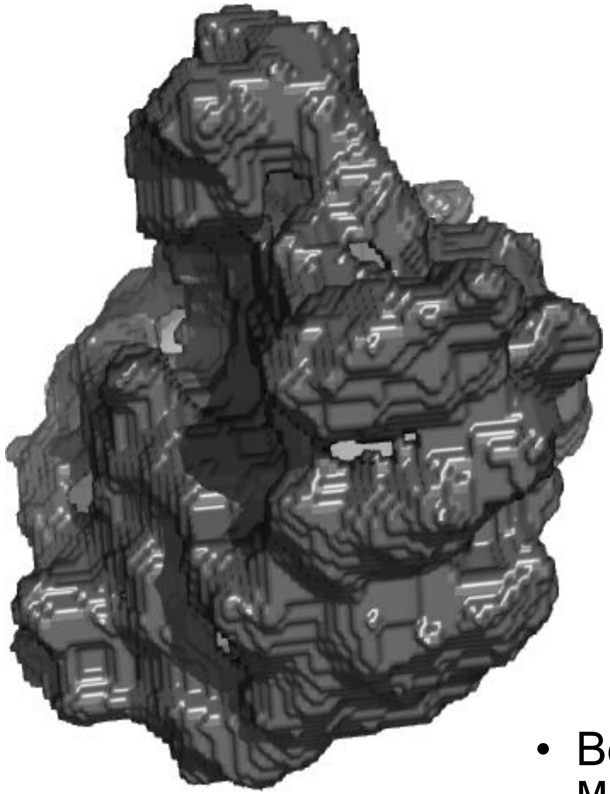
- Виртуальными пикселями «рисуют» плоские 2D модели объектов в 3D мире.
- Полигонами или 2D плоскостями как бы обволакивают пустое 3D пространство.
- Вокселями выкладывают объёмные модели объектов, которые имеют внутренности.

То есть в отличие от полигонов и пикселей, воксели — это истинный 3D кирпичик, а не 2D плоскость которая "окружает" пустое 3D пространство.

Визуализация вокселов



- Воксельная модель. Один воксел соответствует одному кубику



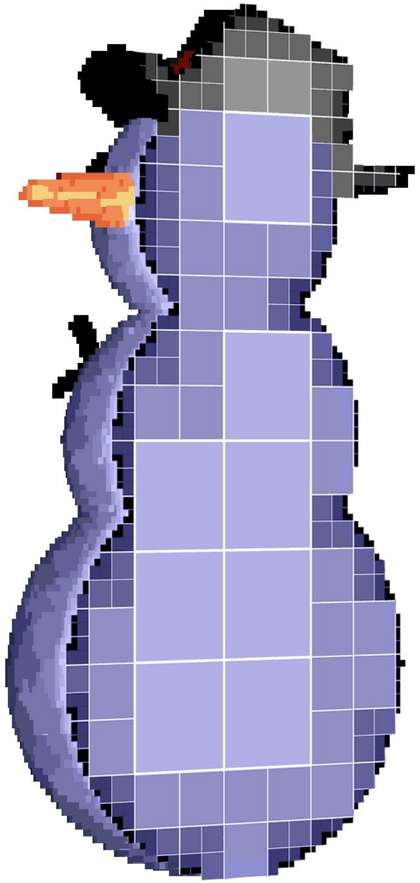
- Воксельное изображение макромолекулы рибосомы

Моделирование в виртуальных пикселях уже почти не встречается в производстве 3D графики. Сейчас при 3D моделировании объекты часто создают в основном только двумя способами:

- либо с помощью плоских полигонов, тем самым будет создана полая модель без внутреннего наполнения, но для тех, кто наблюдает 3D часто и не требуется знать, что, например, у 3D кошки внутри ничего нет. Для наблюдателя достаточно лишь хорошо сшитой из треугольных полигонов поверхности кошки.
- либо с помощью объёмных кубиков — вокселей, которые полностью заполняют внутренности 3D модели, где каждый такой кубик несёт в себе информацию о том, чем он является, например, кожей, мышцами, костями и т.д.

Разреженное воксельное октодерево (Sparse Voxel Octree)

- Одной из технологий, позволяющей делать эффективную детализацию воксельных объектов, является разреженное воксельное октодерево (sparse voxel octree). В числе её преимуществ: значительная экономия памяти, естественная генерация уровней детализации (аналога mipmap-карт) и высокая скорость обработки в рейкастинге.

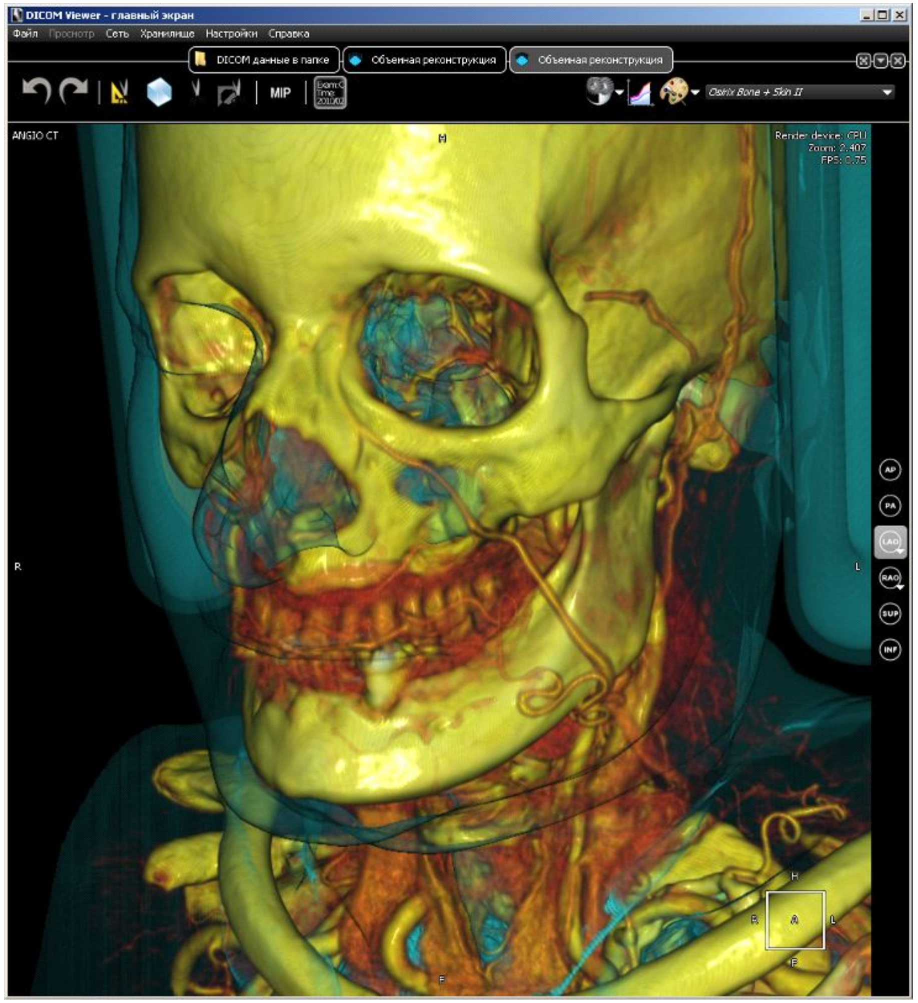


Первый узел дерева — корень, является кубом, содержащим весь объект целиком. Каждый узел или имеет 8 кубов-потомков, или не имеет никаких потомков. В результате всех подразбиений получается регулярная трёхмерная сетка вокселей.

Докселы — это вокселы, изменяющиеся во времени. Как ряд картинок составляет анимацию, так и ряд воксельных моделей во времени могут составлять трёхмерную анимацию.

Медицинские данные

- Ряд медицинских устройств, как, например, сканеры компьютерной томографии, трехмерное УЗИ, МРТ выдают послойную информацию при сканировании. По завершении сканирования строится воксельная модель. Значения вокселей в этом случае отражают данные с устройства. В компьютерной томографии, например, это прозрачность тела по шкале Хаунсфилда, то есть прозрачность для рентгеновских лучей.



Визуализация воксельной модели

- Для воксельных моделей существует множество алгоритмов визуализации. Один из быстрейших способов называется «бросанием снежков» (англ. splatting). Вокселы «бросаются» на поверхность просмотра в порядке удалённости от неё, от дальних к близким. Получившиеся «следы от снежков» (сплэты) рендерятся как диски, цвет и прозрачность которых изменяется в зависимости от диаметра в соответствии с нормальным (гауссовым) распределением. В различных реализациях могут использоваться другие элементы или же другие распределения.

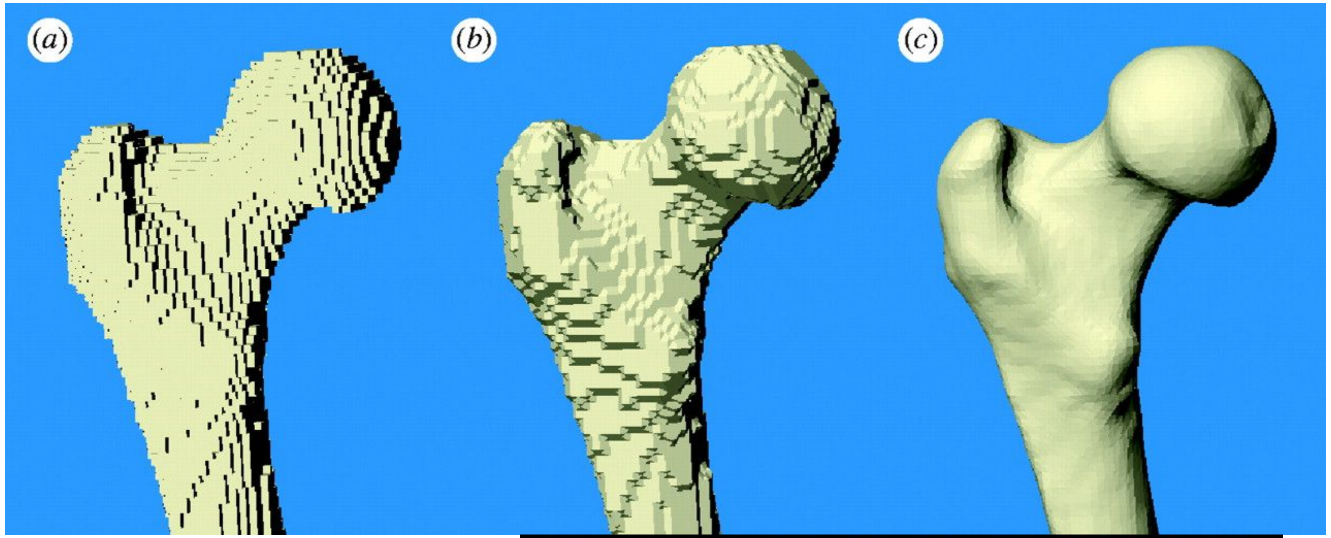
Для улучшения качества изображения используются более сложные алгоритмы отрисовки: алгоритм Marching cubes и другие. Алгоритм «Marching Cubes» (бегущие кубики) строит изоповерхность, опираясь на данные вокселов. Обычная реализация алгоритма использует значения 8-ми соседних вокселов, чтобы отрисовать полигон внутри куба, образованного их координатами. Так как существует всего 256 возможных комбинаций, можно заранее их подготовить и использовать типовые «кирпичики» (уже в экранных координатах) для отрисовки больших объёмов данных в хорошем качестве.

Существуют и другие алгоритмы, например, проекция максимальной интенсивности, которая хорошо отображает положение в трёхмерном пространстве наиболее ярких участков трёхмерного объекта.

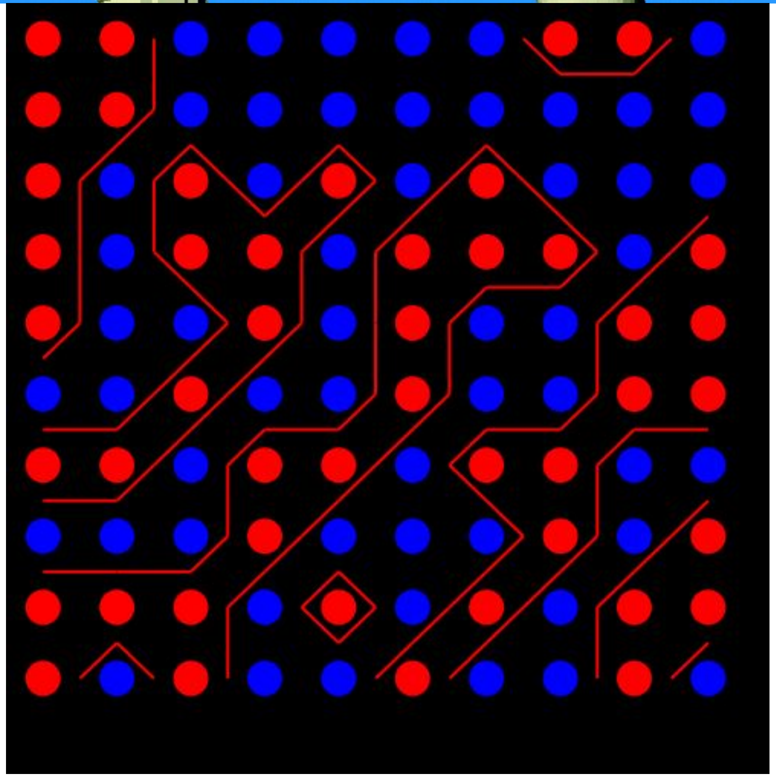
Объёмные дисплеи

Объёмные дисплеи могут выводить модели в трёхмерном объёме. Такие дисплеи используют различные физические механизмы для показа светящихся точек в пределах некоторого объёма. Например, могут состоять из множества плоскостей, формирующих изображение, которые расположены одна над другой, или плоских панелей, создающих эффект объёмности за счёт своего вращения в пространстве.Иногда для таких дисплеев указывается их разрешение в вокселах, например 128×128×128.

Marching cubes



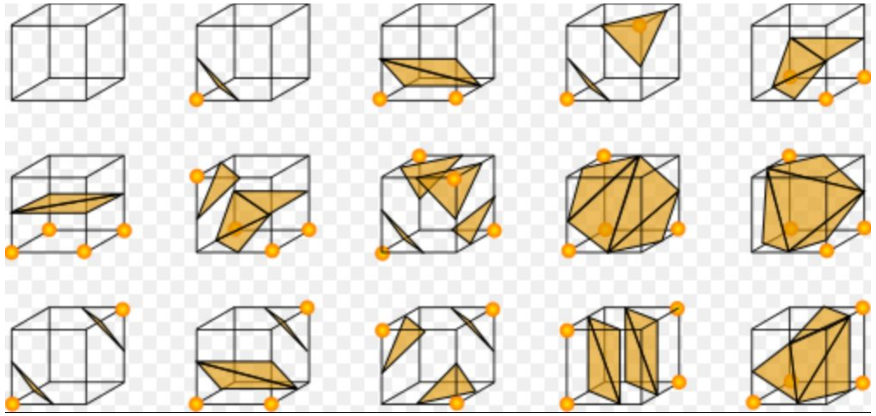
Marching cubes (с англ. — «шагающие кубики») — алгоритм в компьютерной графике, впервые предложенный в 1987 году на конференции SIGGRAPH Вильямом Лоренсеном и Харви Клайном, для обработки полигональной сетки изоповерхности трехмерного скалярного поля (чаще называемой сеткой вокселей).

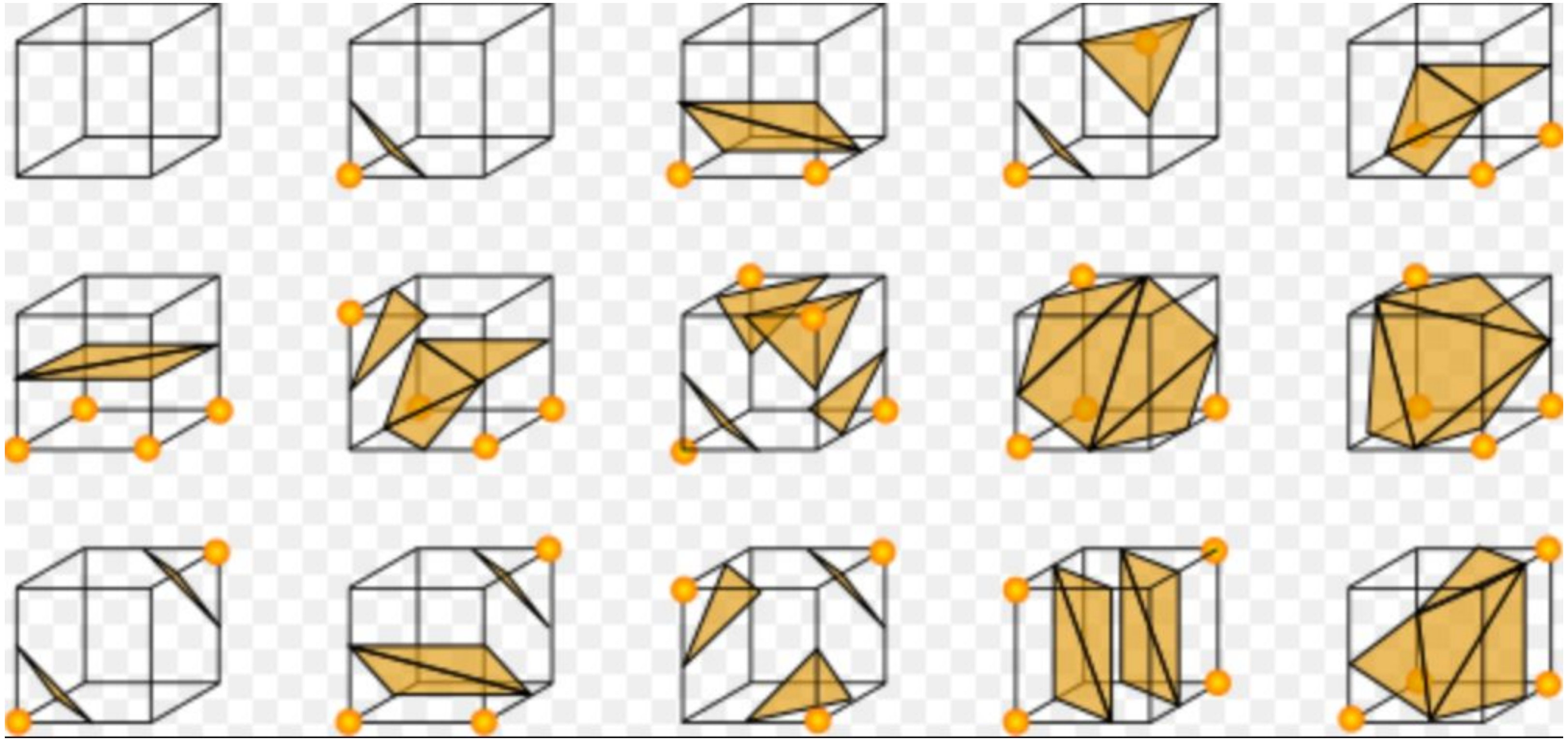


Аналогичный алгоритм на плоскости называется marching squares.

Алгоритм пробегает скалярное поле, на каждой итерации просматривает 8 соседних позиций (вершины куба, параллельного осям координат) и определяет полигоны, необходимые для представления части изоповерхности, проходящей через данный куб. Далее, на экран выводятся полигоны, образующие заданную изоповерхность.

Так как алгоритм выбирает полигоны, исходя только из положения вершин куба относительно изоповерхности, всего получается 256 ({\displaystyle 2^{8}=256} 2^{8}=256) возможных конфигураций полигонов, которые можно вычислить заранее и сохранить в массиве. Поэтому каждый куб можно представить восьмибитным числом, сопоставив каждой вершине 1, если значение поля в точке больше, чем на изоповерхности, и 0 в противном случае. Полученное число используется в качестве индекса элемента массива, хранящего конфигурации полигонов. Наконец, каждая вершина сгенерированного полигона помещается в подходящую позицию на том ребре куба, на котором она лежала изначально. Позиция вычисляется путём линейной интерполяции значений скалярного поля в концах ребра.





Заранее вычисленный массив из 256 конфигураций полигонов можно получить поворотами и отражениями 15 различных конфигураций куба. Однако использование всего 15 базовых конфигураций не гарантирует получение замкнутой поверхности.

Воксельный метод объединения поверхностей

Задача формулируется следующим образом. Имеются n видов, для каждого из которых на предварительном этапе была построена поверхность в виде пространственной триангуляционной сетки. Триангуляционная сетка строилась по 2D-триангуляции на регулярной пиксельной решетке изображения с использованием карты глубин. Заметим, что карта глубин вычисляется для точек, видимых на данном изображении. Метод работает в воксельном пространстве сцены.

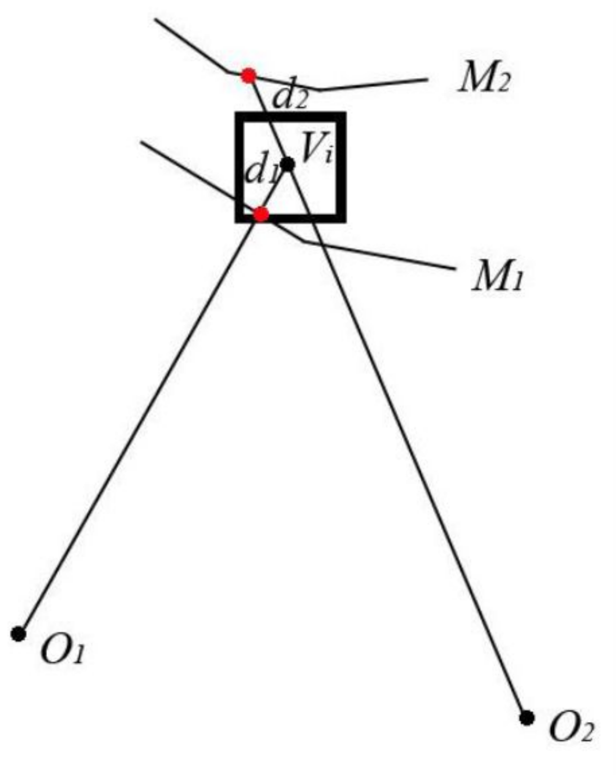


Рис. 1. Построение скалярной функции

Используется непрерывная неявная функция D(Vi), представленная значениями в узлах воксельной решетки. Функция конструируется как взвешенная сумма получаемых для n видов расстояний d1(Vi), d2(Vi), …, dn(Vi) от точки Vi до ближайшей поверхности (рис. 1).

Расстояние dj берется на луче, направленном из центра проекций вида j в точку Vi, и является величиной со знаком (положительное для точек, находящихся перед поверхностью, и отрицательное для точек за поверхностью).
В качестве весовой функции W(Vi) берется скалярное произведение вектора нормали к поверхности и вектора направления на точку наблюдения. Такой выбор исходит из предположения, что при корреляционном подходе к определению расстояния до поверхности степень неопределенности для наклонных поверхностей выше, чем для поверхностей, наблюдаемых под прямым углом.
Для вычисления D и W используются следующие инкрементальные правила:

$$D_{j+1}(\mathbf{V}_i) = [W_j(\mathbf{V}_i)D_j(\mathbf{V}_i) + w_{j+1}(\mathbf{V}_i)d_{j+1}(\mathbf{V}_i)] \;/\; [W_j(\mathbf{V}_i) + w_{j+1}(\mathbf{V}_i)]$$

$$W_{j+1}(\mathbf{V}_i) = W_j(\mathbf{V}_i) + w_{j+1}(\mathbf{V}_i), \qquad (1)$$

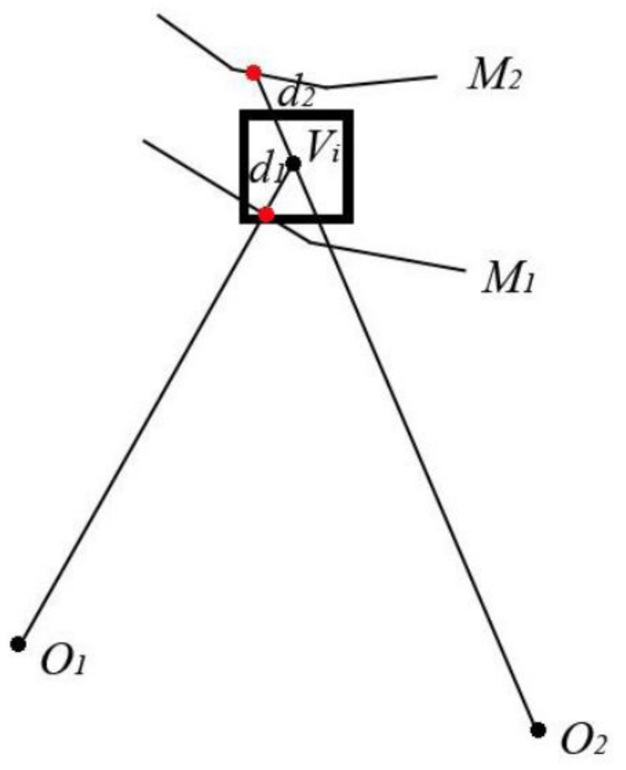


Рис. 1. Построение скалярной функции

где i – номер вокселя; j – номер вида.
Весовая функция W(Vi) – константа для всех вокселов до видимой поверхности (для данного вида), ложных поверхностей
а для вокселов за поверхностью линейно убывает до нуля в пределах ε-окрестности. Такой выбор области определения весовой функции направлен на предотвращение возникновения.
В результате последовательной обработки всех видов каждому вокселю присваиваются значения интегральной функции расстояния D(Vi) (величина со знаком) и интегральной весовой функции W(Vi). Тогда построение изоповерхности D(Vi) = 0 и является решением нашей задачи. Преимуществом сведения исходной задачи к такой постановке является то, что построение изоповерхности скалярного поля, заданного на воксельной решетке, можно выполнить с помощью известного алгоритма марширующих кубиков.

Зашивка дыр

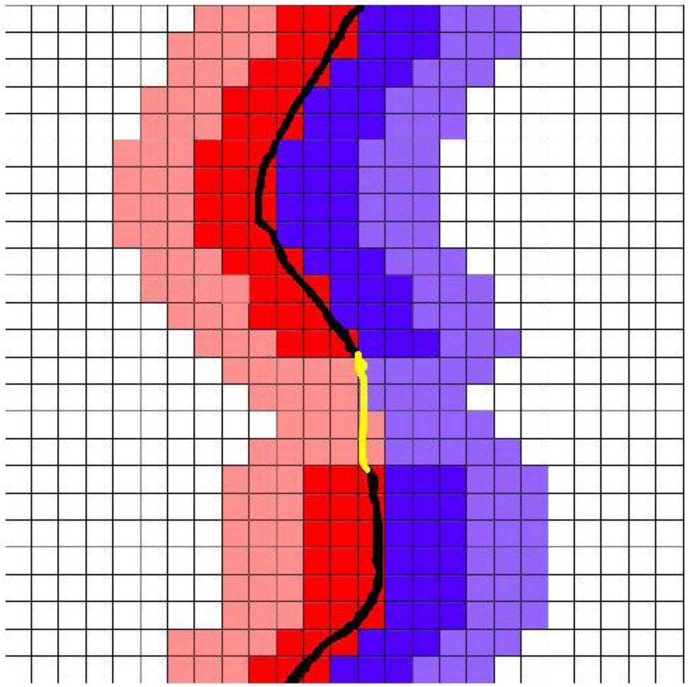


Рис. 2. Диффузное размытие (желтым цветом показана новая поверхность, построенная на месте перехода от отрицательных значений весовой функции к положительным)

Для зашивки дыр в полученной единой модели применяется диффузное размытие значений неявной функции. Диффузное размытие необходимо для заполнения пустых вокселей значениями с соседних (непустых) вокселей, по этим значениям будет строиться новая поверхность (рис. 3).

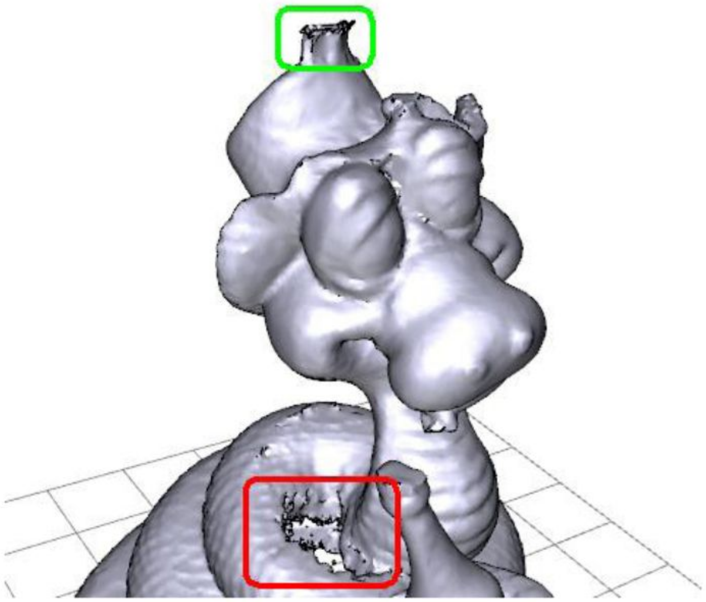


Рис. 3. Дефекты оригинального метода

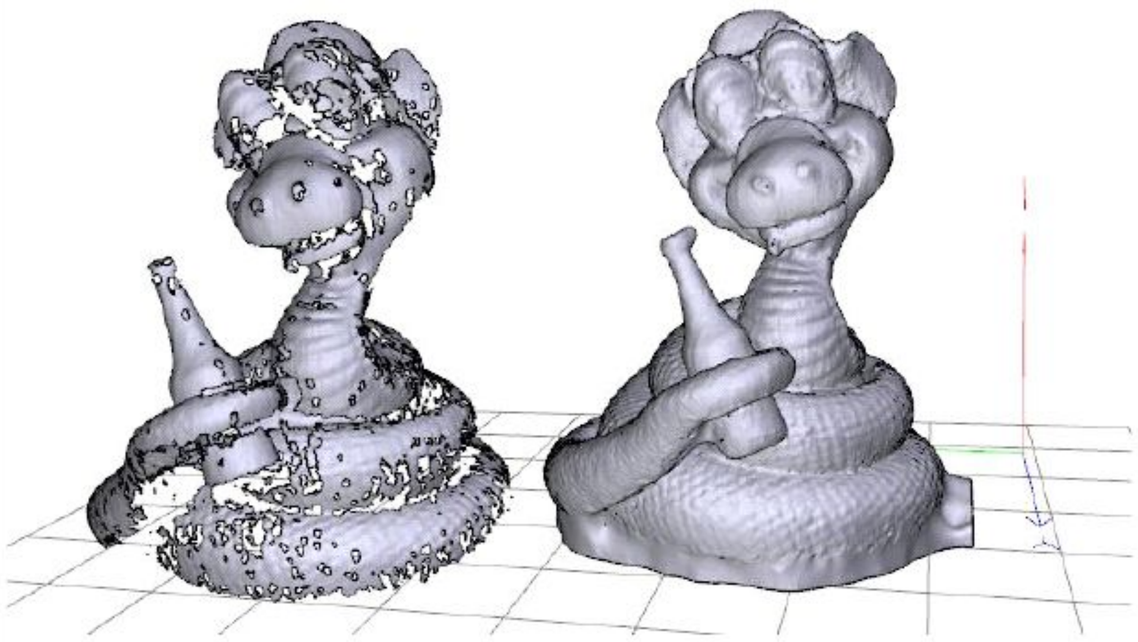


Рис. 11. Простое объединение и объединение с зашивкой дыр (модель «Змея»)

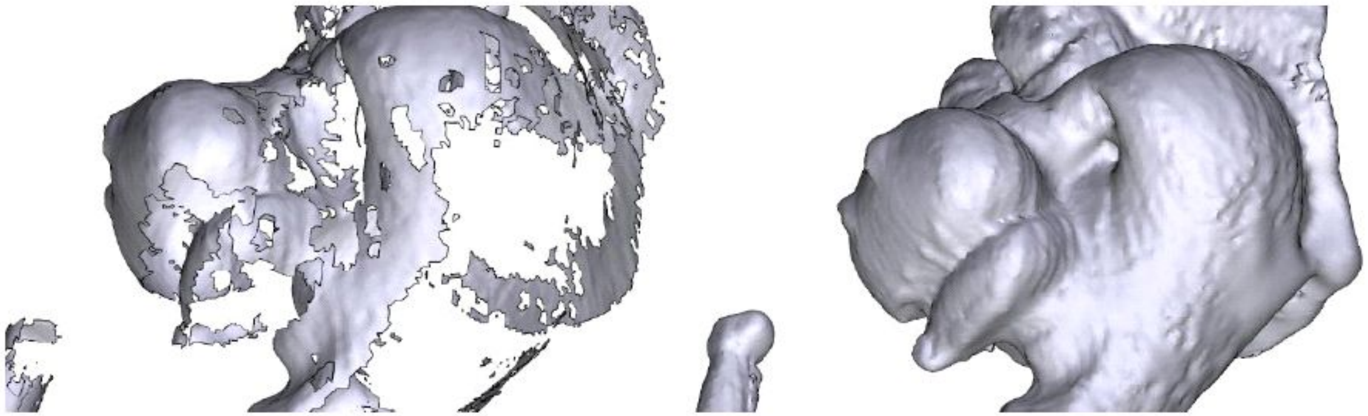


Рис. 12. Более детальное изображение тех же моделей

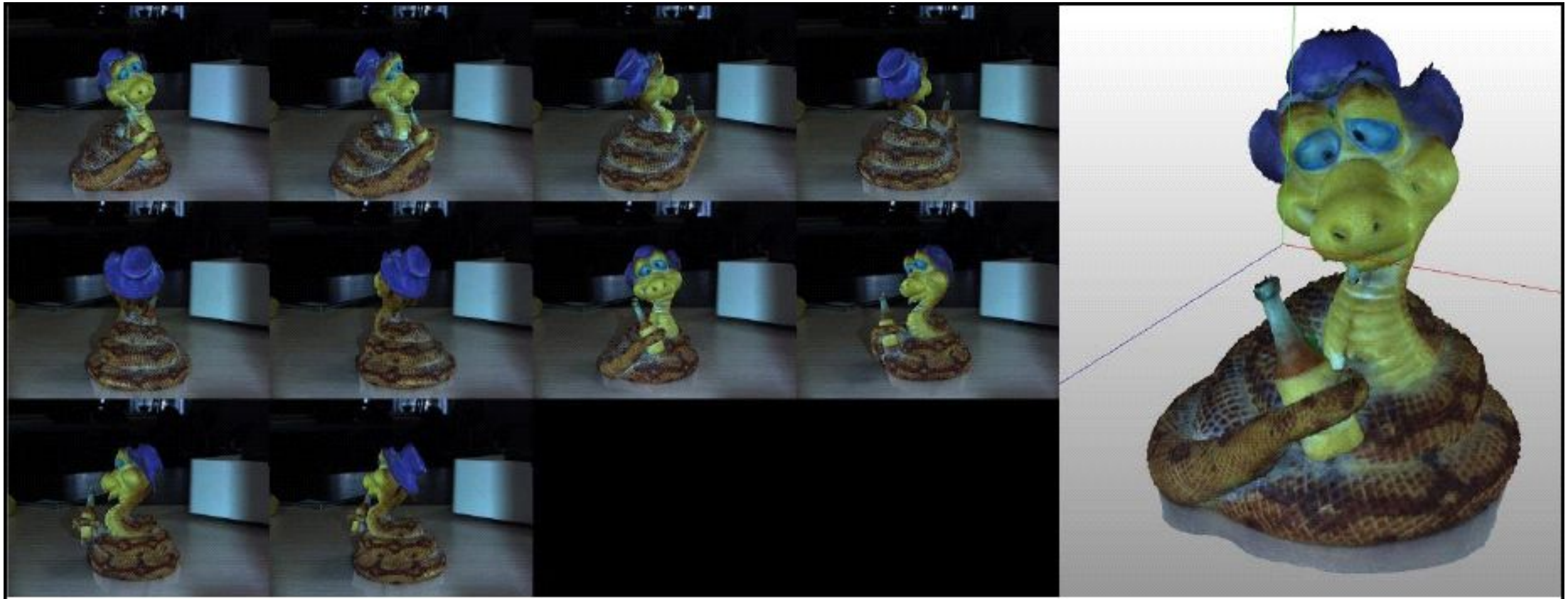
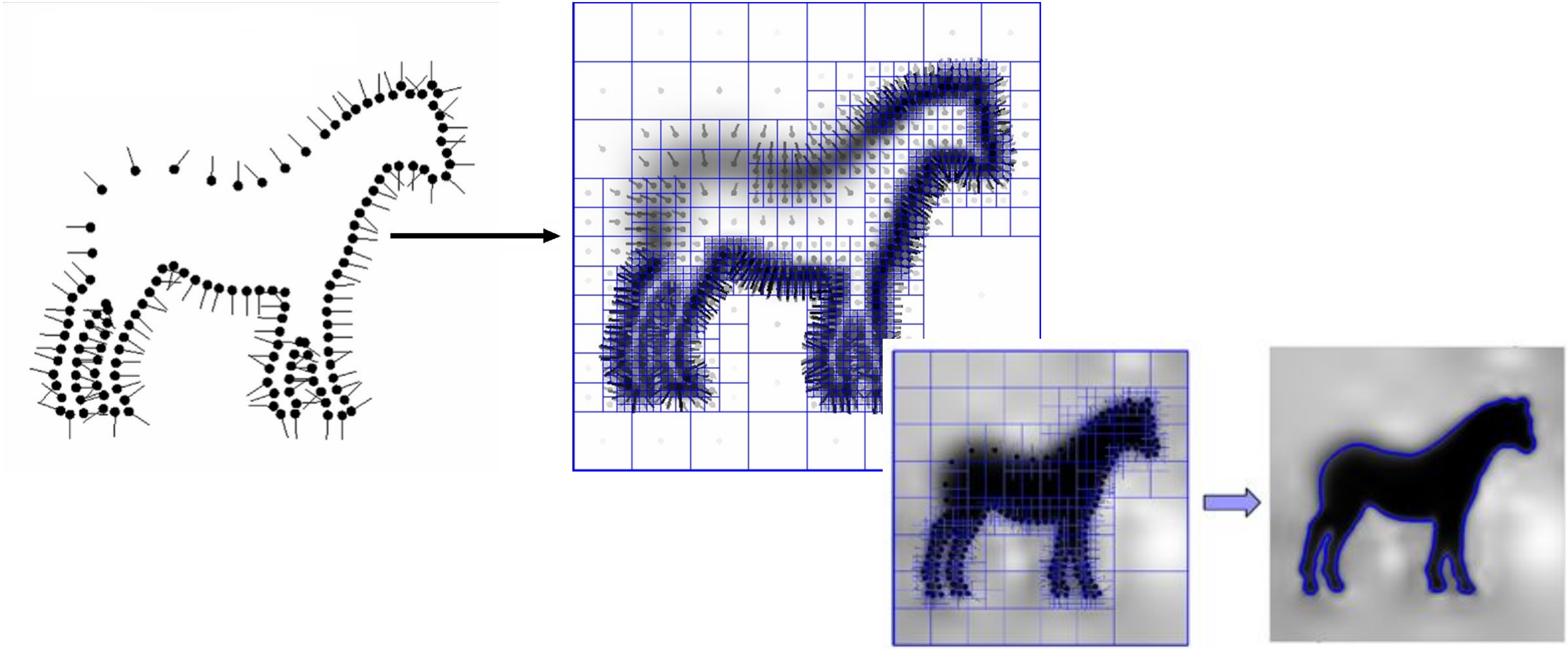


Рис. 13. Исходные виды и результат реконструкции (модель «Змея»)

Poisson Surface Reconstruction



Michael Kazhdan , Matthew Bolitho and Hugues Hoppe

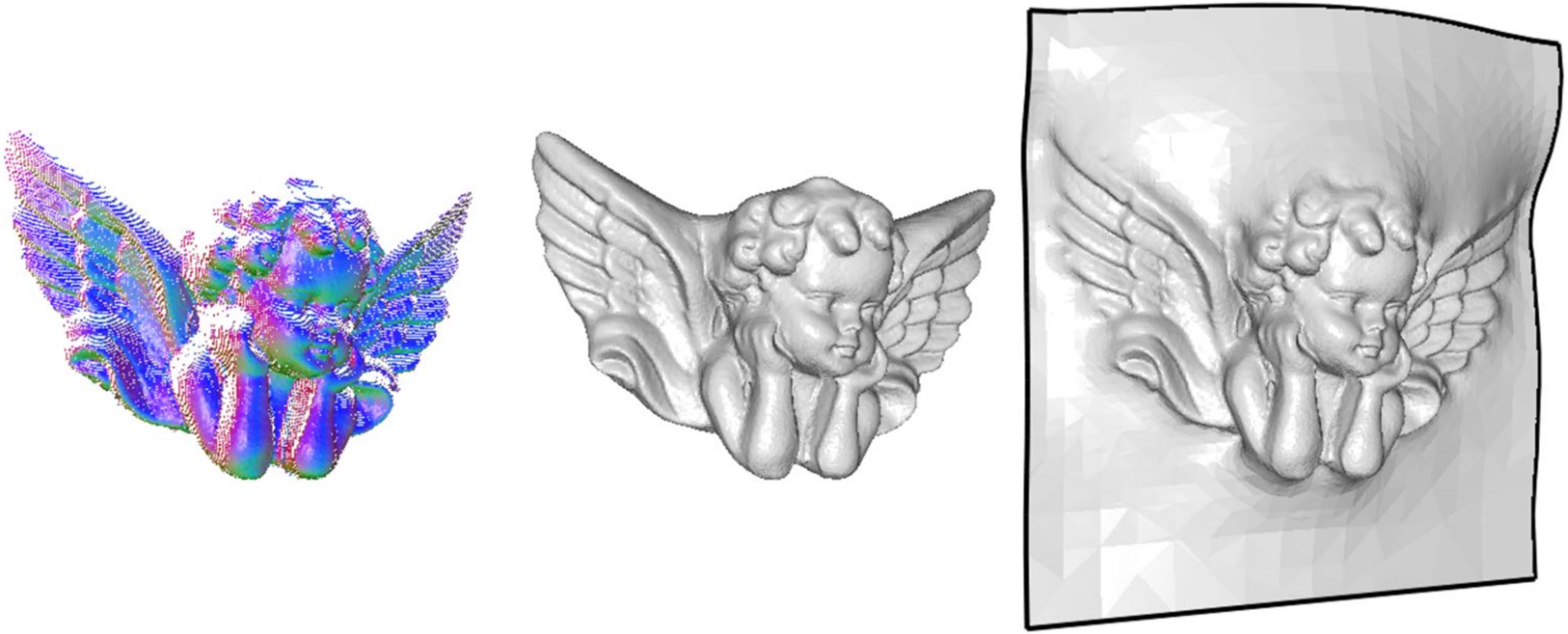


Fig. 3: Reconstructions of the Angel point set[‡] (left) using Dirichlet (center) and Neumann (right) boundary conditions.