Оценка соответствия напечатанного прототипа его цифровой копии

Фрагмент конспекта

А.С. Грицай

# Слайд № 1

Оценка соответствия напечатанного прототипа его цифровой копии.

# СЛАЙД № 2

Сначала нужно рассмотреть основные понятия.

3D-печать – это методика изготовления объемных изделий на основе цифровых моделей. Независимо от конкретной технологии, суть процесса заключается в постепенном послойном воспроизведении объектов.

3D-модель – это объемное цифровое изображение необходимого объекта, как реального, так и вымышленного.

3D-моделирование – это процесс создания объемного цифрового изображения требуемого объекта.

3D-сканер — периферийное устройство, анализирующее форму предмета и на основе полученных данных создающее его 3D-модель.

Облако точек – набор вершин в трёхмерной системе координат. Эти вершины, как правило, определяются координатами X, Y и Z.

# СЛАЙД № 3

Введение в курс темы.

В настоящее время благодаря развитию средств вычислительной, фото и видеотехники довольно широкое распространение приобрели различные системы, позволяющие бесконтактно, т.е., не вступая в непосредственное механическое взаимодействие, выполнять построение и сохранение в памяти компьютера трехмерной модели некоторого реального объекта, т.е. системы, позволяющие выполнять бесконтактное 3D-сканирование или реконструкцию 3D-сцены.

Реализация таких средств и систем может быть как чисто программной, в виде некоторого алгоритма обработки набора изображений или видеопотока, получаемых с обычной фото- или видеокамеры, выполняющего построение 3D-модели снимаемого объекта, как, например алгоритм Voxel Coloring (рисунок слева), так и программно-аппаратной, представляющее собой специализированное оборудование (3D-сканеры) такое, как стереокамеры, инфракрасные дальномеры или лазерные сканеры (бесконтактные 3D-сканеры), в нашем случае мы используем 3D-сканер Ciclop, поступающие данные с которых обрабатываются с помощью специальных алгоритмов, например, стереокамера Stereolabs ZED Stereocam, единый видеопоток которой обрабатывается с помощью средств программного пакета ZED SDK.

# СЛАЙД № 4

Основные способы представления трёхмерных моделей и их особенности.

Как было замечено ранее, модель трехмерного объекта в памяти компьютера может быть представлена несколькими разными способами, в виде:

* аналитической модели, т.е. с помощью набора математических выражений, описывающих форму поверхности объекта (объекты имеющие сложную форму описываются сплайнами – специальными функциями, аппроксимирующими её отдельный фрагменты, группа которых формирует модель полной поверхности сложной формы);
* векторно-полигональной модели – определенным образом скомбинированного в пространстве множества полигонов (многоугольников), описывающихся набором его точек-вершин и вектора-нормали плоскости, в которой лежит данный полигон, образующих таким образом полый многогранник определенной формы;
* воксельной (вокселной) модели или трехмерного растра – комбинации из множества минимальных кубических элементов объема или вокселей, обладающих определенным набором свойств, например, цветом или прозрачностью, и аналогично пикселям, составляющим растровое двухмерное изображение, составляющих модель трёхмерного объекта;
* трехмерной сетки равномерной или регулярной структуры, пример которой представлен на следующем слайде (слева), т.е. множества точек или узлов, две из трех координат (любой трехмерной системы координат) каждого из которых, однозначно определяют третью, при этом все узлы данного множества равномерно распределены в области определения этих двух основных координат, иными словами, такую трехмерную сетку удобно представить в виде своего рода двухмерного массива (таблицы высот), парой индексов в котором будут является пара основных координат (обычно x и y, для ортогональной декартовой системы координат), а значение, будет соответствовать оставшейся третьей координате (обычно z в декартовой системе координат);
* трехмерной сетки неравномерной или нерегулярной структуры, или облака точек – множества точек, определенным образом расположенных в пространстве, пример которой, также, приведен на следующем слайде (справа).

# СЛАЙД № 5

Пример равномерной (слева) и неравномерной (справа) трехмерных сеток человеческого лица.

# СЛАЙД № 6

Для модели трехмерного объекта, представленной почти в любой из перечисленных форм представления, существуют методы прямого и обратного преобразования в почти любую другую из них, обладающие разной сложностью выполнения, так, например, преобразование векторно-полигональной модели в облако точек осуществляется очень легко, однако обратное преобразование является довольно сложной и нетривиальной задачей. Исключением, в данном случае, является форма регулярной трехмерной сетки, преобразование в которую возможно не всегда: на приведение 3D-модели из любой другой формы представления в данную дополнительно накладывается ограничение однозначной зависимости одной из координат узлов будущей сетки от пары других, преобразование модели трехмерного объекта в форму равномерной трехмерной сетки возможно только при выполнении данного условия.

Сложность и порядок выполнения различных геометрических преобразований и операций, таких как: перемещение, поворот, масштабирование и т.д. – моделей трехмерных объектов в различных формах представления, также могут довольно сильно различаться. Наиболее сложными в данном отношении, в общем случае, являются аналитические трехмерные модели (выполнение таких более специализированных операций как, например, "разрез", для моделей в аналитической форме представления является очень сложной задачей, в то время как масштабирование осуществляется легко и без потери качества модели), а наиболее простыми – воксельные.

Кроме того для хранения моделей трехмерных объектов требуется разное количество памяти компьютера, а также количество требуемой памяти по-разному зависит от детализации модели, так, наиболее "компактной" является аналитическая форма описания, причем в зависимости от детализации модели количество памяти, требуемой для её хранения, растет относительно медленно, в то время как векторно-полигональные, воксельные модели и трехмерные сетки требуют большего объёма памяти, а при возрастании детализации модели количество требуемой для её хранения памяти, особенно для воксельных моделей, возрастает очень быстро.

Специфика различных форм представления трехмерных объектов определяет области их практического применения, так, например, для создания медиа-контента используются в основном векторно-полигональные модели, результаты маппинга (построения трехмерной карты пространства, окружающего беспилотный аппарат) и 3D-сканирования оптическими камерами чаще всего представлены в виде облаков точек и т.д.

Таким образом, основываясь на имеющихся общих сведениях о формах представления трехмерных объектов в памяти компьютера возможна постановка задачи оценки качества напечатанной трёхмерной модели на 3D-принтере, с помощью результатов его 3D-сканирования с помощью воксельной модели.

# СЛАЙД № 7

Инструменты для работы с воксельными моделями.

CloudCompare – это программное обеспечение для обработки трехмерного облака точек (и треугольной сетки). Первоначально он был разработан для сравнения двух плотных трехмерных облаков точек (например, облаков, полученных с помощью лазерного сканера) или между облаком точек и треугольной сеткой. Он опирается на определенную структуру октодерева, предназначенную для этой задачи. После этого оно было расширено до более общего программного обеспечения для обработки облаков точек, включающего в себя множество продвинутых алгоритмов (регистрация, повторная выборка, обработка цветовых / нормальных / скалярных полей, вычисление статистики, управление датчиками, интерактивная или автоматическая сегментация, улучшение отображения и т. д.).

MeshLab – система с открытым исходным кодом для обработки и редактирования трехмерных треугольных сеток.

Он предоставляет набор инструментов для редактирования, очистки, исцеления, проверки, рендеринга, текстурирования и преобразования сеток. Он предлагает функции для обработки необработанных данных, полученных с помощью инструментов / устройств 3D-оцифровки, а также для подготовки моделей для 3D-печати.

# слайд № 8

Основные функции, реализованные в приложении MeshLab для работы с воксельными моделями:

* выравнивание – фаза выравнивания трехмерных данных является фундаментальным шагом в конвейере обработки трехмерных сканированных данных, которую предоставляет MeshLab, как мощный инструмент для перемещения различных сеток в общую систему отсчета, способный управлять большим набором карт дальностей, реализующий точно настроенный шаг выравнивания один к одному ICP, за которым следует глобальный шаг распределения ошибок настройки пакета, а также выравнивание может быть выполнено на сетках и облаках точек, поступающих из нескольких источников, включая активные (как ближние, так и дальние) сканеры и инструменты 3D-изображения;
* реконструкция – процесс преобразования независимых приобретений, или облаков точек, в триангулированную сетку с одной поверхностью может выполняться различными алгоритмическими подходами;
* чистка 3D моделей – MeshLab предлагает серию автоматических, полуручных и интерактивных фильтров для удаления тех геометрических элементов, которые в большинстве программ и алгоритмов считаются «неправильными», например, можно удалить топологические ошибки, дублированные и не имеющие ссылок вершины, небольшие компоненты, вырожденные или пересекающиеся грани и многие другие геометрические и топологические особенности, а также используя различные методы автоматического и интерактивного выбора, можно изолировать и удалить ненужные области ваших сеток и облаков точек;
* упрощение, уточнение и пересмешивание – общей потребностью при обработке трехмерной модели является уменьшение ее геометрической сложности, создание геометрии с той же формой, но с меньшим количеством треугольников (или точек), которые могут быть решены различными способами упрощения (децимации) триангулированных поверхностей, способные сохранять геометрические детали и наложение текстуры, или выборочно уменьшать количество точек в облаке точек, а также различные схемы деления, фильтры повторного смешивания и повторной выборки для увеличения геометрической сложности трехмерных моделей или для оптимизации распределения точек и качества триангуляции;
* измерение и анализ – интерактивное двухточечное измерение трехмерной модели производится при помощи автоматических фильтров, которые возвращают различную геометрическую и топологическую информацию о 3D-модели (или только о выбранной области), в то время как инструмент секционирования может экспортировать сквозные сечения сетки в виде полилиний, а различная геометрическая информация (например, кривизна, геодезическое расстояние или локальная плотность вершин) может быть рассчитана на сетках и трехмерных моделях с использованием автоматических фильтров;
* сравнение моделей – измерение геометрической разницы между двумя 3D-моделями с использованием Hausdorff Distance является распространенным подходом при обработке сетки.

# Слайд № 9

Определение параметров, влияющих на печать модели на 3D-принтере.

В первую очередь стоит отметить, что практически абсолютное большинство всех современных ЗD принтеров используют шаговые двигатели одного типа, сконструированы по похожему принципу. Так же их печатные головки и приводные механизмы не сильно отличаются друг от друга.

Практически на любой модели можно добиться примерно одинакового качества печати, с незначительными отличиями. И зависит это не от указанной производителем «точности», а от материала, которым печатаете, опыта оператора, который управляет 3D-принтером и от скорости печати. Чуть более высоким качеством печати, могут похвастаться 3D-принтеры, которые изготавливаются в металлическом корпусе и построены на линейных рельсовых направляющих. С помощью более точных безлюфтовых рельс и винтов, погрешность при печати будет снижена, соответственно можно будет использовать пластик на более высокой скорости.

Исходя из описанных выше данных, уже можно сделать некоторые выводы и разобраться, чем именно отличается тот или иной FDM принтер от своих конкурентов, помимо его стоимости. Сразу заменим, что только «Основные отличия» способны каким-то образом повлиять на конкретное качество получаемой 3D печати.

Основные отличия 3D принтеров:

* требования принтера к качеству материалов для использования;
* жесткий корпус, рамная конструкция;
* наличие камеры для печати закрытого типа;
* тефлоновая сердцевина экструдера и прижимной механизм;
* более мощный, но при этом не тяжелый, двигатель экструдера;
* место расположения катушки с пластиком;
* наличие подогреваемого стола и системы обдува.

Важные отличия:

* тип привода (винтовой или ременной);
* возможность автономной печати без ПК;
* максимальный размер области печати.

В данном случае эти признаки качества должны определять достоинства самого принтера и качества его печати. Современные FDM 3D-принтеры обладают следующими свойствами, которые выделяют их среди прочих:

* высота шага по оси Z;
* точность позиционирования;
* диаметр сопла (размер капли, которую получаем из сопла).

Эти признаки могут повлиять на «качество» будущей печати и определить ее «точность», которую часто путают с «качеством». Но если в случае с «качеством» нужно учитывать влияние обдува, окружающую среду и типа камеры 3D принтера, то на его «точность» они не влияют.

Высота шага по оси Z или высота слоя является довольно маленькой. На современных моделях установлена платформа, которая сдвигается на очень небольшие расстояния, порядка 0,0025 мм. При этом высота слоя будет несколько отличаться при печати. Хотя в теории, можно добиться и 2,5 микрон, но сделать это не получится в связи с физическими ограничениями материалов, которые не позволят создать слой подобного размера. Экструдер выдавливает вязкую каплю и сделать ее настолько мелкой невозможно.

В результате множества экспериментов была рассчитана оптимальная высота слоя для 3D печати на принтерах FDM, равная 0,15-0,20 мм. В таком случае капля имеет достаточный объем, чтобы приклеиться к предыдущему слою и надежно зафиксироваться на нем.

Параметр, который способен определить верность перемещения печатающей головки 3D принтера, относительно установленных программой координат, называется точностью позиционирования.

При этом у большинства моделей точность позиционирования указывается в диапазоне 0,20-0,30 мм.

Размер точки напрямую зависит от диаметра отверстия сопла, которое присутствует у экструдера. Инженеры и разработчики технологии 3D печати, в ходе своих экспериментов сделали выводы о том, что оптимальный диаметр сопла должен быть в пределах 0,30-0,50 мм.

# слайд № 10

Также немаловажным фактором, влияющим на качество и точность печати, является подготовка модели трёхмерного объекта к самой печати, а именно конвертация воксельной модели объекта в численно-позиционный код (G-код). Это осуществляется с помощью программ-слайсеров, про которые уже было сказано ранее, они «нарезают» облако точек на слои и затем переводят их в цепочку координат трёхмерного пространства, по которым и будет двигаться сопло экструдера.

* Cura;
* Simplyfy3d.

Данные программы призваны упростить и ускорить работу с готовыми воксельными моделями для оператора 3D принтера. В их составе имеется множество настроек как самой печати (скорость печати, диаметр сопла экструдера, размер печатного стола и т.д.) так и материалов печати (виды пластиков и температура их плавления), также эти программы имеют в арсенале встроенные генераторы поддержек, которые формируют непосредственно поддержки в местах нависающих деталей трёхмерного объекта, не давая тем самым провисать либо деформироваться объекту при печати.

# слайд № 11

Оценка соответствия напечатанной 3D-модели её эталону.

В настоящее время благодаря развитию средств вычислительной, фото и видеотехники довольно широкое распространение приобрели различные системы, позволяющие бесконтактно, т.е., не вступая в непосредственное механическое взаимодействие, выполнять построение и сохранение в памяти компьютера трехмерной модели некоторого реального объекта, т.е. системы, позволяющие выполнять бесконтактное 3D-сканирование или реконструкцию 3D-сцены.

Реализация таких средств и систем может быть как чисто программной, в виде некоторого алгоритма обработки набора изображений или видеопотока, получаемых с обычной фото- или видеокамеры, выполняющего построение 3D-модели снимаемого объекта, как, например алгоритм Voxel Coloring, так и программно-аппаратной, представляющее собой специализированное оборудование (3D-сканеры) такое, как стереокамеры, инфракрасные дальномеры или лазерные сканеры (бесконтактные 3D-сканеры), поступающие данные с которых обрабатываются с помощью специальных алгоритмов, например, стереокамера Stereolabs ZED Stereocam, единый видеопоток которой обрабатывается с помощью средств программного пакета ZED SDK.

В данной работе используется 3D-сканер Ciclop, техническая часть которого и функционал описывался выше.

# слайд № 12

Модель трехмерного объекта в памяти компьютера может быть представлена несколькими разными способами, в виде:

* аналитической модели, т.е. с помощью набора математических выражений, описывающих форму поверхности объекта (объекты имеющие сложную форму описываются сплайнами – специальными функциями, аппроксимирующими её отдельный фрагменты, группа которых формирует модель полной поверхности сложной формы);
* векторно-полигональной модели – определенным образом скомбинированного в пространстве множества полигонов (многоугольников), описывающихся набором его точек-вершин и вектора-нормали плоскости, в которой лежит данный полигон, образующих таким образом полый многогранник определенной формы;
* воксельной (вокселной) модели или трехмерного растра – комбинации из множества минимальных кубических элементов объема или вокселей, обладающих определенным набором свойств, например, цветом или прозрачностью, и аналогично пикселям, составляющим растровое двухмерное изображение, составляющих модель трёхмерного объекта;
* трехмерной сетки равномерной или регулярной структуры, пример которой представлен на рисунке на слайде, т.е. множества точек или узлов, две из трех координат (любой трехмерной системы координат) каждого из которых, однозначно определяют третью, при этом все узлы данного множества равномерно распределены в области определения этих двух основных координат, иными словами, такую трехмерную сетку удобно представить в виде своего рода двухмерного массива (таблицы высот), парой индексов в котором будут является пара основных координат (обычно x и y, для ортогональной декартовой системы координат), а значение, будет соответствовать оставшейся третьей координате (обычно z в декартовой системе координат);
* трехмерной сетки неравномерной или нерегулярной структуры, или облака точек – множества точек, определенным образом расположенных в пространстве, пример которой приведен на рисунке на слайде.

Для модели трехмерного объекта, представленной почти в любой из перечисленных форм представления, существуют методы прямого и обратного преобразования в почти любую другую из них, обладающие разной сложностью выполнения, так, например, преобразование векторно-полигональной модели в облако точек осуществляется очень легко, однако обратное преобразование является довольно сложной и нетривиальной задачей. Исключением, в данном случае, является форма регулярной трехмерной сетки, преобразование в которую возможно не всегда: на приведение 3D-модели из любой другой формы представления в данную дополнительно накладывается ограничение однозначной зависимости одной из координат узлов будущей сетки от пары других, преобразование модели трехмерного объекта в форму равномерной трехмерной сетки возможно только при выполнении данного условия.

Сложность и порядок выполнения различных геометрических преобразований и операций, таких как: перемещение, поворот, масштабирование и т.д. – моделей трехмерных объектов в различных формах представления, также могут довольно сильно различаться. Наиболее сложными в данном отношении, в общем случае, являются аналитические трехмерные модели (выполнение таких более специализированных операций как, например, "разрез", для моделей в аналитической форме представления является очень сложной задачей, в то время как масштабирование осуществляется легко и без потери качества модели), а наиболее простыми – воксельные.

Кроме того для хранения моделей трехмерных объектов требуется разное количество памяти компьютера, а также количество требуемой памяти по-разному зависит от детализации модели, так, наиболее "компактной" является аналитическая форма описания, причем в зависимости от детализации модели количество памяти, требуемой для её хранения, растет относительно медленно, в то время как векторно-полигональные, воксельные модели и трехмерные сетки требуют большего объёма памяти, а при возрастании детализации модели количество требуемой для её хранения памяти, особенно для воксельных моделей, возрастает очень быстро.

Специфика различных форм представления трехмерных объектов определяет области их практического применения, так, например, для создания медиа-контента используются в основном векторно-полигональные модели, результаты маппинга (построения трехмерной карты пространства, окружающего беспилотный аппарат) и 3D-сканирования оптическими камерами чаще всего представлены в виде облаков точек и т.д.

# слайд № 13

CloudCompare – это программное обеспечение для обработки трехмерного облака точек (и треугольной сетки). Первоначально он был разработан для сравнения двух плотных трехмерных облаков точек (например, облаков, полученных с помощью лазерного сканера) или между облаком точек и треугольной сеткой. Он опирается на определенную структуру октодерева, предназначенную для этой задачи. После этого оно было расширено до более общего программного обеспечения для обработки облаков точек, включающего в себя множество продвинутых алгоритмов (регистрация, повторная выборка, обработка цветовых / нормальных / скалярных полей, вычисление статистики, управление датчиками, интерактивная или автоматическая сегментация, улучшение отображения и т. д.).

# слайд № 14

MeshLab – система с открытым исходным кодом для обработки и редактирования трехмерных треугольных сеток.

Он предоставляет набор инструментов для редактирования, очистки, исцеления, проверки, рендеринга, текстурирования и преобразования сеток. Он предлагает функции для обработки необработанных данных, полученных с помощью инструментов / устройств 3D-оцифровки, а также для подготовки моделей для 3D-печати.

Основные функции, реализованные в приложении MeshLab для работы с воксельными моделями:

* выравнивание – фаза выравнивания трехмерных данных является фундаментальным шагом в конвейере обработки трехмерных сканированных данных, которую предоставляет MeshLab, как мощный инструмент для перемещения различных сеток в общую систему отсчета, способный управлять большим набором карт дальностей, реализующий точно настроенный шаг выравнивания один к одному ICP, за которым следует глобальный шаг распределения ошибок настройки пакета, а также выравнивание может быть выполнено на сетках и облаках точек, поступающих из нескольких источников, включая активные (как ближние, так и дальние) сканеры и инструменты 3D-изображения;
* реконструкция – процесс преобразования независимых приобретений, или облаков точек, в триангулированную сетку с одной поверхностью может выполняться различными алгоритмическими подходами;
* чистка 3D моделей – MeshLab предлагает серию автоматических, полуручных и интерактивных фильтров для удаления тех геометрических элементов, которые в большинстве программ и алгоритмов считаются «неправильными», например, можно удалить топологические ошибки, дублированные и не имеющие ссылок вершины, небольшие компоненты, вырожденные или пересекающиеся грани и многие другие геометрические и топологические особенности, а также используя различные методы автоматического и интерактивного выбора, можно изолировать и удалить ненужные области ваших сеток и облаков точек;
* упрощение, уточнение и пересмешивание – общей потребностью при обработке трехмерной модели является уменьшение ее геометрической сложности, создание геометрии с той же формой, но с меньшим количеством треугольников (или точек), которые могут быть решены различными способами упрощения (децимации) триангулированных поверхностей, способные сохранять геометрические детали и наложение текстуры, или выборочно уменьшать количество точек в облаке точек, а также различные схемы деления, фильтры повторного смешивания и повторной выборки для увеличения геометрической сложности трехмерных моделей или для оптимизации распределения точек и качества триангуляции;
* измерение и анализ – интерактивное двухточечное измерение трехмерной модели производится при помощи автоматических фильтров, которые возвращают различную геометрическую и топологическую информацию о 3D-модели (или только о выбранной области), в то время как инструмент секционирования может экспортировать сквозные сечения сетки в виде полилиний, а различная геометрическая информация (например, кривизна, геодезическое расстояние или локальная плотность вершин) может быть рассчитана на сетках и трехмерных моделях с использованием автоматических фильтров;
* сравнение моделей – измерение геометрической разницы между двумя 3D-моделями с использованием Hausdorff Distance является распространенным подходом при обработке сетки.

# слайд № 15

Рассмотрим оценку соответствия напечатанной модели её цифровой копии на примеры простого объекта – кубика.

Одним из основных критериев оценки качества печати и зависящей от неё точности печати является степень соответствия полученного объекта при помощи печати с его исходной трёхмерной моделью, а именно геометрические размеры объекта, точность исполнения отверстий и выступающих узлов на нём.

Для решения данной задачи была взята простая и хорошо отражающая все неточности модель – калибровочный куб, который имеет внешние размеры 20х20х20 мм. После печати на 3D принтере он был отсканирован с помощью сканера Ciclop, тем самым получено облако точек – воксельная модель данного куба, которая представлена на слайде слева.

Однако с полученной воксельной моделью работать ещё нельзя, т.к. она имеет множество точек, не имеющих отношения к самой модели, так называемые «шумы». Эти «шумы» относятся к фону, на котором было совершено сканирование, а также всевозможным частичкам пыли, находящимся в воздухе в момент сканирования и лучам света.

Для работы с данной моделью необходимо убрать лишние точки путём их удаления, а также произвести фильтрацию и сглаживание облака точек, методом заполнения пустого пространства между слишком удалёнными точками для последующего преобразования данного облака точек в «mesh» и работы с ним.

После обработки данного облака точек, его фильтрации и заполнения пустого пространства между точками с помощью инструментов, предоставляемых программным обеспечением MeshLab, было получено облако точек, представленное на рисунке по центру, которое похоже на искомую модель и позволяющее произвести оценку соответствия с эталоном.

# слайд № 16

Для оценки степени соответствия использовался программный продукт в основе работы которого лежит метод оценки степени сходства трехмерных объектов, так же, как и методы формального анализа и анализа с использованием аппарата искусственных нейронных сетей, опирается на воксельную форму представления трехмерных объектов, но в отличии от них является методом геометрического сравнения.

Общий принцип данного метода – прост и заключается в приведении эталонного объекта к виду воксельного массива, причем таким образом, чтобы полученный воксельный массив включал в себя только те воксели, в пределах которых находится какая-либо часть исходной 3D-модели, т.е. будет получен массив вокселей, скомбинированный таким образом, чтобы с некоторой, точностью, определяющейся размером, а, следовательно, и количеством, вокселей полученного массива, повторить форму исходного эталонного объекта.

Сравниваемый объект представлен в виде облака точек, в общем случае, неоднозначного, содержащего дефекты и шумы, и повторяет форму просканированного реального объекта. Т.е. после выполнения отсечения помех в облаке точек, масштабирования и совмещения в пространстве сравниваемых объектов, значительная часть точек облака окажется в пределах вокслей массива, соответствующего эталонному объекту, из чего можно сделать вывод, что часть эталонной модели, представленная такими вокселями присутствует в облаке точек, а, следовательно, и в реальном объекте.

Данный метод включает в себя два этапа:

* подготовительный этап, на котором осуществляется формирование воксельного массива по исходной эталонной трехмерной модели, отсечение помех в исходном облаке точек, масштабирование и наложение сравниваемых объектов;
* этап анализа, на котором осуществляется анализ присутствия точек облака в пределах вокселей массива, подсчет «существующих» вокселей и нахождение соотношения количества «существующих» вокселей к их общему количеству вокселей в массиве, что и является мерой соответствия сравниваемых объектов.

При этом данный метод сравнения трехмерных объектов и предложенная мера их сходства обладают такими преимуществами как: легкость интерпретации результатов, как меры присутствия эталона в результатах сканирования реального объекта, легкость визуализации результатов применения, в некоторой степени устойчивость к помехам в облаке точек, т.к. при условиях относительно правильного наложения, сравниваемых объектов друг на друга, возможные шумовые точки оказавшись за пределами вокселей массива не будут учитываться, при этом, в пределах размера вокселя сохраняется возможность учета не шумовой точки облака, в условиях некоторого возможного случайного отклонения значений её координат.