

ПРОГРАММНЫЙ ДРАЙВЕР СВЯЗИ 3D СКАНИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С СИСТЕМАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В работе предложены подходы к оптимизации обработки результатов трехмерного сканирования. Эти подходы основаны на анализе процедур преобразования набора точек в различные формы представления объектов. Предложенные подходы реализованы в системах компьютерного проектирования для машиностроения.

In article the approaches for optimization of results of three-dimension scanning processing has been proposed. Those approaches are based on procedure of processing of sets of three-dimension points to different forms of object representations. Proposed approaches has been realizing on system for computer designing in mechanical engineering.

Введение

Важной сферой практического применения компьютерных технологий являются системы автоматизированного проектирования в машиностроении. Их использование позволяет многократно сократить сроки проектных работ, повысить качество проекта и оперативно выполнять его модификацию.

Современные системы компьютерного проектирования (CAD -Computer Aided Design) в машиностроении представляют собой сложный комплекс алгоритмических, программных и аппаратных средств. К числу последних относятся устройства двумерного (2D) и трехмерного (3D) сканирования реальных объектов, параметры которых вводятся в CAD. Необходимость ввода описания объектов путем их многомерного сканирования возникает при решении задач создания математических моделей объектов, измерения деталей и заготовок, контроля параметров готовых изделий. При этом сам процесс сканирования и описания 3D-объектов представляет собой сложную задачу.

Проблема совершенствования технологии ввода в системы компьютерного проектирования информации о внешних объектах реального мира является актуальной и практически значимой.

Анализ технологий ввода

Трехмерное (3D) сканирование представляет собой процесс ввода изображений трехмерных объектов и их дискретизации с целью эффективной обработки компьютерных систем. При 3D-сканировании осуществляется снятие рельефа исследуемого объекта. Оно состоит в обхождении поверхности объекта, с использованием специального сенсора, который выдает

при этом последовательность координат точек объекта в рамках виртуальной трехмерной системы координат. Пространственные координаты точек получаются путем объединения относительного положения сенсора и его показаний по трем взаимно-перпендикулярным осям.

Построение эффективной модели представления 3D-объектов в компьютерных технологиях представляет собой сложную задачу вычислительной геометрии, которая в значительной степени зависит от целевого назначения и требуемых параметров модели.

К настоящему времени предложено ряд способов аппроксимирующего представления 3D-объектов в компьютерных системах. Одним из наиболее распространенных на практике является представление 3D-объекта в виде множества пространственных треугольников. Для получения такого представления используются такие базовые процедуры: диаграммы Вороной, триангуляция Делоне и процедура построения огибающей фигуры (выпуклого многогранника). Ниже эти процедуры рассмотрены более подробно.

Для построения огибающей фигуры (выпуклого многогранника) используется последовательный алгоритм. Вначале, находятся такие точки, которые подчиняются следующему правилу (рис. 1) [3]. Точки 1 и 2 задают прямую, точка 3 не лежит на ней. Эти три точки определяют поверхность в трехмерном пространстве, точка 4 не должна лежать на ней. В результате, получается тетраэдр, к которому добавляются другие точки, положение которого относительно тетраэдра определяет видимость или невидимость точки. Если добавленная точка расположена внутри тетраэдра, то она не лежит на выпуклой огибающей, то есть является невиди-

мой. В противном случае, точка видимая. Строится пирамида с ребрами от видимой точки до всех видимых вершин уже образовавшейся фигуры (рис. 1), после чего стираются те вершины, которые находятся внутри пирамиды.

Процесс продолжается с объединением двух фигур. В результате получается выпуклый многогранник, от которого удаляются те грани, которые расположены внутри фигуры, а именно те грани, которые являются общими между двумя фигурами. Потом берется следующая точка для добавления и так далее до исчерпания всех точек. В конечном результате получается выпуклый многогранник на основе множества точек в трехмерном пространстве.

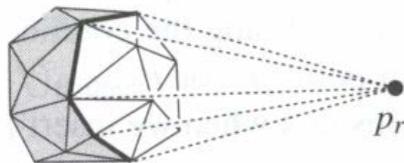


Рис.1. Пример построения выпуклого многогранника по видимым точкам и вершинам.

Диаграмма Вороной представляет собой специальный вид декомпозиции метрического пространства, задаваемая множеством дискретных точек в этом пространстве. Фактически метрическое пространство разделяется на области, каждая из которых включает только одну точку и границы областей находятся на одинаковом расстоянии от двух точек. Пример диаграммы Вороной представлен на рис.2.

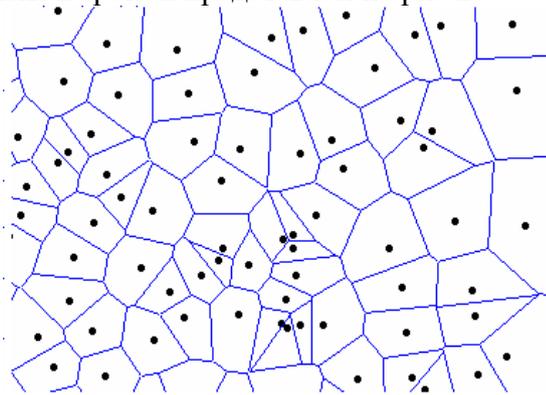


Рис.2. Пример диаграммы Вороной

В самом простом и самом общем случае в плоскости, для заданного множества точек S с координатами X и Y , диаграмма Вороной для S представляет деление на плоскости, которые ассоциируют область V_p с каждой точкой p из S таким образом, что все точки V_p находились ближе к p , чем к любой другой точки из S .

Все области Вороной являются выпуклыми многоугольниками, некоторые из которых бесконечны. Диаграмма Вороной делит плоскость по правилу самого ближнего соседа. Осюда

можно заключить, что биссектриса двух сегментов l_i и l_j равна $B_{ij} = \{x \in R_2 \mid d(x, l_i) = d(x, l_j)\}$, где l_i и l_j точки главного множества, определяющие прямую, а любая клетка $v_i = \{x \in R_2 \mid d(x, l_i) \leq d(x, l_j), \text{ для любого } j\}$, где d функция расстояния.

Если S конечное множество точек, то граница между двумя соседними областями является симметраллой отрезка между соответствующими двумя точками. Отсюда можно заключить, что три области Вороной определяют точку Вороной, которая является центром окружности, описанной около соответствующих точек, в которую не попадает никакая другая точка из S .

Существуют два вида диаграмм Вороной - статическая и динамическая. Статическая диаграмма исчисляется для наперед заданного множества точек, а динамическая позволяет осуществлять дополнительные операции добавление или стирание точки. над уже существующей диаграммой. В процессе добавления точки, сначала в диаграмму добавляется один конец сегмента, а потом он расширяется путем перемещения точки до другого его конца. При стирании используется операция уменьшения сегмента до точки, после чего эта точка удаляется из диаграммы.

Каждая ячейка Вороной образуется в результате пересечения плоскостей, образованных двумя соседними точками. Любая найденная плоскость пересекается с остальными до тех пор, пока не найдутся такие плоскости, которые огибают все точки.

Триангуляция Делоне $DT(p)$ для множества лежащих в одной плоскости точек p с координатами X_p и Y_p , определяется как такая триангуляция, при которой ни одна точка p не находится в окружности, описанной около любого из треугольников. Триангуляция Делоне позволяет сделать максимально равносторонними все треугольники, которые представляют объемную аппроксимацию объекта [5]. Пример триангуляции Делоне показан на рис.3.

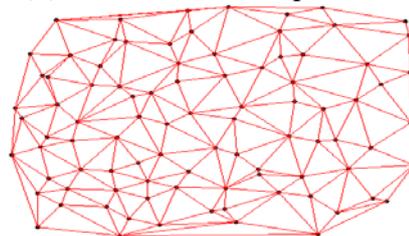


Рис.3. Пример триангуляции Делоне

Триангуляцию Делоне для множества точек можно представить и как набор ребер, удовлет-

ворящую условие „пустых кругов“. Это означает, что для любого ребра можно найти окружность, содержащую конечные точки ребра, но не содержащую других точек (рис.4).

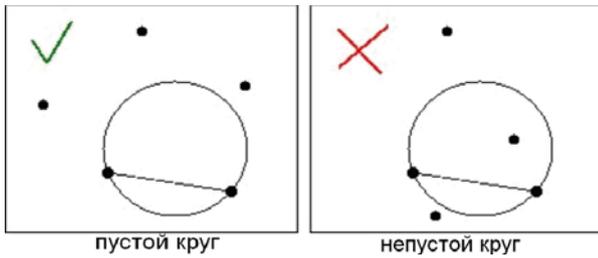


Рис.4. Примеры ребер, удовлетворяющих (слева) и не удовлетворяющих (справа) условию Делоне

Это правило следует из определения Делоне, что описанная окружность формируется из трех точек треугольника. Описанная окружность называется пустой, если она не содержит других точек, кроме трех ее образующих. Все остальные точки множества должны оставаться вне описанной окружности.

Триангуляция Делоне для заданной сети треугольников единственна, если описанные окружности пусты. Это правило верно только для двумерного пространства. Триангуляция Делоне в своем трехмерном варианте представляет совокупность тетраэдров, описанная сфера около которых не содержит ни одной из точек главного множества точек, кроме точек тетраэдра, задающих сферу (фиг. 5) [5].

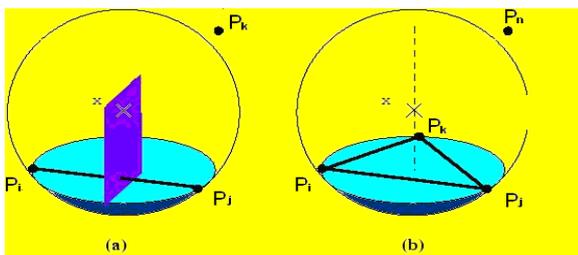


Рис.5. Ребро Делоне (а) и треугольник Делоне (б) в пространстве 3D

Триангуляция Делоне для заданного конечного множества S представляет собой планарный граф с вершинами в точках S и прямыми ребрами, который максимален в смысле, что нельзя добавить ни одного ребра без пересечения с другим. Каждая триангуляция S содержит ребра выпуклой оболочки S . Ее ограниченные стенки являются треугольниками. Это подмножество ребер данной триангуляции можно представить и как мозаику (дробление) S , если

оно содержит ребра выпуклой оболочки и у любой точки S присутствуют хотя бы два прилежащих ребра. Пример триангуляции Делоне в трехмерном пространстве показан на рис.6.

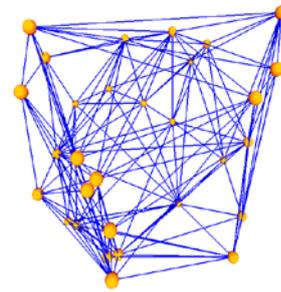


Рис.6. Пример 3D триангуляции Делоне

Все алгоритмы вычисления построения триангуляции Делоне базируются на решении задачи о том, располагается ли данная точка на описанной около треугольника окружности.

Следует отметить дуализм представления трехмерного объекта диаграммами Вороной и триангуляциями Делоне. Это означает, что существуют процедуры, позволяющие переходить от диаграмм Вороной к триангуляции Делоне и обратно [5]. Построение одной структуры, исходя из другой, реализуется очень легко, так как алгоритмы преобразования линейны [6].

Целью работы является повышение эффективности преобразований результатов сканирования трехмерных объектов в пригодные для дальнейшей обработки формальные представления, создание, на этой основе, драйвера 3D лазерного сканера для систем компьютерного проектирования и контроля.

Структура модульной сканирующей системы

На фиг. 7 представлена структура модульной сканирующей системы и ее связь с внешней CAD системой. Связь между двумя системами осуществляется через файл унифицированного формата для описания объектов в пространстве. Потребитель задает команду сканирования фигуры. Система активирует сканирующий модуль и инициирует процесс лазерного 3D сканирования. В результате сканирования получается множество точек, которые сохраняются в памяти.

После этапа сканирования начинает работать модуль создания 3D фигуры по множеству точек. При этом полученные в результате сканирования точки поступают на входной интерфейс модуля.

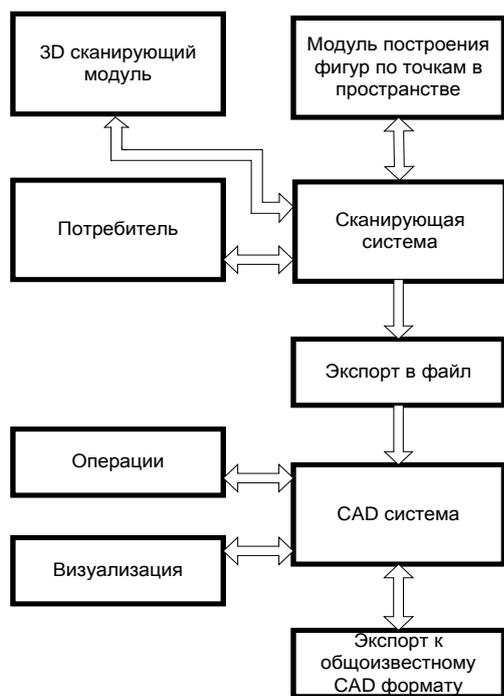


Рис.7. Структура системы сканирования

На выходе модуль генерирует множество полигонов, сохраняющиеся в памяти. По запросу пользователя система экспортирует сгенерированную полигональную фигуру в унифицированный файловый формат на жесткий диск потребителя. Потребитель имеет возможность запустить CAD систему с целью оценки результата сканирования. CAD система реализует не только 3D визуализацию объекта, но и позволяет модифицировать объект. Кроме того возможен экспорт представления объекта другие CAD форматы (STL, DXF).

Программный модуль построения фигуры по точкам реализует алгоритм, представленный на рис.8.

Алгоритм состоит из пяти основных этапов работы, каждый из которых решает определенную комплексную проблему. На вход поступает множество точек с координатами (X, Y, Z) , описывающих поверхность объекта. Точки записываются в отдельный массив S .

Первый этап состоит в исчислении диаграммы Вороной по входному множеству точек S . Диаграмма дает в результате список ячеек диаграммы Вороной и точек, к которым эти ячейки соотносятся.

На втором этапе находится выпуклый многогранник по множеству точек S .

Третий этап связан с нахождением полюсов ячейки Вороной. Выполняется итерация для каждой точки из главного множества S . Если точка лежит на выпуклом многограннике, то по

построенной диаграмме Вороной находятся ячейки, являющиеся соседними текущей и образуются треугольники из точек, которые закрыты ячейками (триангуляция Делоне). На образовавшихся треугольниках строятся нормальные вектора и находится вектор, средний по отношению их ориентации. Если обрабатываемая точка не лежит на выпуклом многограннике, то находится самая отдаленная вершина ячейки Вороной и образуется вектор от текущей точки до найденной точки. Эта вершина ячейки Вороной отмечается как $p+$. На следующем шаге находится самая отдаленная вершина ячейки, такую, что скалярное произведение по отношению найденного уже вектора отрицательно. Эта вершина отмечается как $p-$. Процесс продолжается до окончания обхода всех точек S .

На четвертом этапе вычисляется триангуляция Делоне для главного множества S и найденных полюсов ($p+$ и $p-$). Процесс заканчивается после исключения треугольников, все три точки которых являются точками главного множества S .

Таким образом, предложенный алгоритм построения фигуры имеет на входе множество точек, а на выходе генерирует множество треугольников. Рассматриваются два подхода для сохранения дискретных данных о фигуре на выходе.

Подход 1 : Сохраняется структура треугольника, содержащая информацию о трех точках. Недостаток этого подхода состоит в дублировании данных.

Подход 2 : Сохраняется таблица с точками, идентифицируемыми индексом, причем никакая точка в таблице не повторяется. Сохраняется структура треугольника как три числа, которые соотносятся с индексами таблицы и описывают треугольник. Этот подход позволяет значительно уменьшить требуемый объем памяти, но более сложен в реализации.

Информация, полученная на выходе алгоритма построения 3D фигуры, представляется в форме полигонов. Объект 3D составлен из множества полигонов, склеенных один к другому. Хорошо было бы представить формат данных в коде ASCII во избежании необходимости исполнять дополнительные проверки конвенции "endian" для представления чисел - от младшего байта к старшему или от старшего к младшему (little endian, big endian).

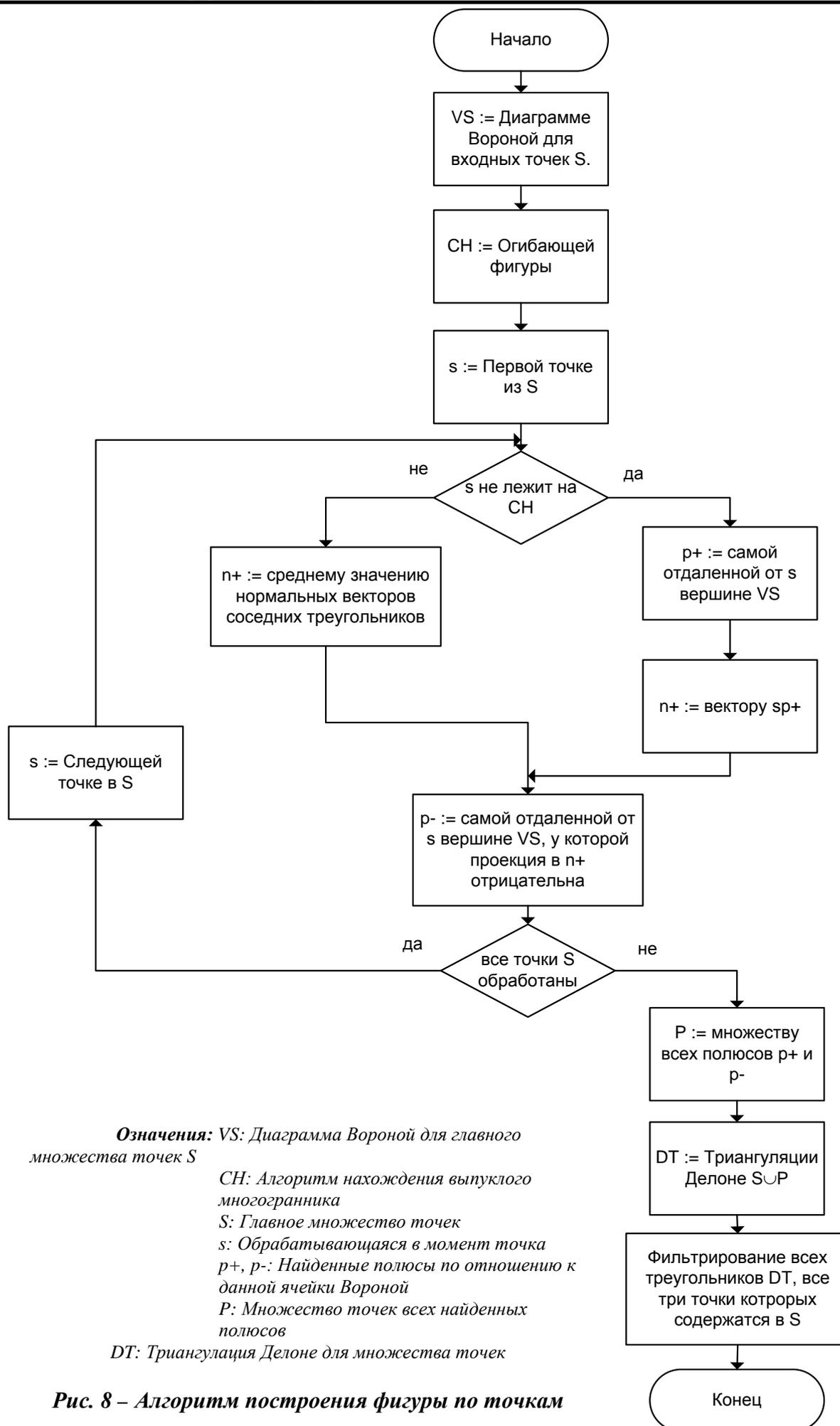


Рис. 8 – Алгоритм построения фигуры по точкам

Важным аспектом проекта является создание CAD системы. Создание настоящей системы имеет два отличия: 1) концептуальное – необходимо было отделить процессы сканирования в одну систему, а процесс визуализации – в другую; 2) направленность на облегчение работы потребителя. На рис. 9 показана общая схема CAD системы (среды).

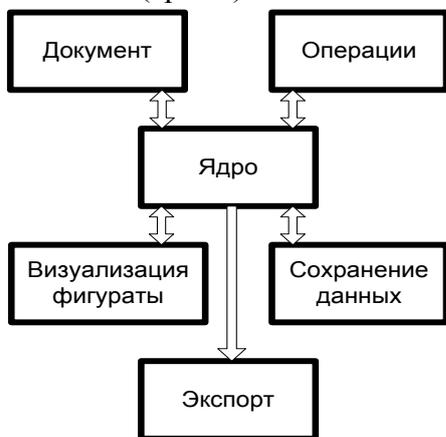


Рис.9. Структура CAD системы

Концептуально в системе заложен множественный документный интерфейс (MDI – Multiple Document Interface). Таким образом, CAD система предлагает возможность работы с множеством открытых документов и множеством видов на документы. Понятие документа используется только для абстракции. Документ, который загружается в CAD систему, является созданный сканирующей системой исходный файл.

После загрузки файла в CAD среду создается документ, который добавляется к списку открытых документов в системе. Во время загрузки создаются две таблицы - таблица точек и таблица полигонов (таблицы представляются в памяти массивами данных). Таблица полигонов содержит индексы точек для соответствующей таблицы. Наличие этих двух таблиц гарантирует отсутствие повторных копий сохраненных данных. Документ содержит как список, содержащий нормальные векторы для каждого

полигона, так и исчисление границ фигуры. Нормальные векторы полигонов используются для черчения, потому что эта информация нужна системе визуализации. Все операции, которые выполняются на фигуре, заносятся в конкретный документ, так как он содержит всю информацию о фигуре.

Одна из задач системы CAD состоит в визуализации фигуры. Создание системы, преобразующей трехмерные координаты в двумерные является сложной задачей. Поэтому, в качестве языка управления черчением выбирается OpenGL. Причина такого выбора состоит в том, что этот стандарт является открытым, что упрощает его использование. С точки зрения потребителя над видом объекта возможны операции ротации, масштабирования и трансляции фигуры, что облегчает работу потребителя, так как любая из них осуществляется мышью. Система визуализации использует разные виды – вид только поверхности фигуры, вид с очертанием полигонов, вид с очертанием полигонов и поверхностей, вид одних только точек фигуры. Вид снабжен дополнительными возможностями черчения, как черчение границ фигуры черчение координатной системы. Добавлена возможность простого выбора вида фигуры – вид сверху, вид снизу, вид слева, вид справа, вид спереди, вид сзади.

Выводы

В результате выполненных исследований предложены подходы к оптимизации процессов обработки результатов сканирования трехмерных объектов. На основе этих подходов создана реальная система компьютерного проектирования с использованием 3D-сканера, разработанном совместно Техническим Университетом - Габрово и АМК ЕООД – Габрово. Практическое использование системы доказало эффективность разработанных подходов к оптимизации обработки результатов 3D сканирования.

Список литературы

1. Иларионов, Р. Компютърна периферия, Университетско издателство „В. Априлов“, 2008, Габрово, България.
2. Иларионов, Р. и др. Въвеждане на 3D обекти в изчислителна среда. Сборник с доклади на International Scientific Conference “Uniteh 07”, Volume I, 23-24 ноември 2007, Габрово, България.
3. <http://www.cse.ohio-state.edu/~tamaldey/paper/tcocone/tcocone.pdf>
4. <http://www.cs.utexas.edu/users/amenta/pubs/sm.pdf>
5. <http://intervisio.openfmi.net/index.php>
6. http://web.mit.edu/manoli/www/publications/Amenta_Siggraph_98.pdf