

УДК 62+006+004.42

Формирование цифровой копии крупногабаритных элементов летательных аппаратов, имеющих аэродинамический профиль по результатам лазерного сканирования

Гейко Иван Павлович

ivangeyko@mail.ru

Зиняев Валерий Викторович

ФАУ «ЦАГИ» им. профессора Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

Аннотация. Представлены текущие результаты в области обратного инжиниринга с применением технологии лазерного сканирования и создания каркаса аэродинамического профиля из триангулированного вида с точностью моделей от 0,2 до 3,0 мм. Для решения данной задачи было разработано специализированное программное обеспечение, в котором по координатам из «облака точек» создаются каркасные линии с помощью аппроксимации сплайнов. Была отработана методика получения крупногабаритных частей ЛА (до 7 м).

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, обратный инжиниринг, триангуляционная модель, лазерное сканирование, профильная поверхность

Formation of a digital copy of large - sized aircraft elements with an aerodynamic profile based on laser scanning results

Geyko Ivan Pavlovich

ivangeyko@mail.ru

Zinyaev Valery Viktorovich

Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky (TsAGI), Moscow, Russia

Abstract. Current results in the field of reverse engineering using laser scanning technology and the reconstruction of an aerodynamic profile framework from a triangulated surface with model accuracy from 0,2 to 3 mm. To address this task, specialized software was developed, which generates framework curves from “point cloud” coordinates using spline approximation. A methodology for obtaining large-scale aircraft components (up to 7 m) has been refined.

Keywords: reverse engineering, backward engineering, triangulated model, laser scanning, profile surface

Введение. Реверс-инжиниринг позволяет воссоздавать математические модели из данных, полученных различными методами. Одним из этих методов является технология лазерного сканирования, в которой с помощью механизма триангуляции получаем цифровую копию физического объекта. Лазерная триангуляция осуществляется путем проецирования лазерной линии или точки на объект, а затем регистрации ее отражения с помощью датчиков, расположенных на известном расстоянии от лазерного источника. В результате

угол отражения может быть интерпретирован как информация о рельефе. Сканер повторяет этот процесс тысячи или даже миллионы раз в секунду, каждый раз для немного другого направления лазерного луча. В результате получается большое количество измерений расстояния с разных точек обзора, создавая «облако точек» данных. Обеспечивается «стереозрение» сканирующей системы, т. е. определение координат всех точек объекта [1].

Получение входных данных для реверс-инжиниринга. Данная технология относится к бесконтактным неразрушающим способам контроля, исключая повреждение или искажение контролируемой геометрии объекта, позволяя получить объемную картину отклонений с высокой степенью достоверности. Технология лазерного сканирования применена для получения профиля консоли крыла крупномасштабной аэродинамической модели ЛА с размахом 7 метров (рис. 1). Съемка контролируемого объекта консоли крыла производилась с разных ракурсов для получения всесторонней информации. Погрешность измерений составила 35 мкм на 1 м [2].



Рис. 1. 3D-сканирование крыла и результаты обработки полученной модели

В процессе сканирования была отработана методика сбора данных с помощью лазерного 3D-сканирования: подготовка сканируемого объекта (создание однотонной поверхности — все узлы должны иметь схожие светотражающие параметры), калибровка 3D-сканера, установка светотражающих маркеров (базовых точек), сканирование «облака» светотражающих маркеров, сканирование «облака точек» на поверхности объекта. При сканировании

крупногабаритных объектов (более 3 м), а также наличии сложных изогнутых поверхностей объектов стоит учитывать вычислительные мощности ЭВМ, так как система получает для обработки сотни миллионов точек. Чтобы решить данную задачу были определены рациональное расположение меток и диапазон параметров вывода при сканировании. Для каждого узла подбирались параметры сканирования, зависящие от габаритов изделия, светоотражающих свойств поверхности и требуемой точности вывода координат измеренных точек.

Алгоритм обработки результатов 3D-сканирования. Результатом сканирования физического объекта с помощью измерительных систем является набор координат точек. Как правило, полученные точки представлены в виде файла в одном из стандартных представлений (форматов) — STL, OBJ, PLY и др. В таких представлениях точки упорядочены в виде вершин треугольных фасет. Также в дополнение к плоским фасетам может быть добавлена информация о векторах нормали к всей фасете или в отдельных точках. Сами треугольные фасеты в общем случае не упорядочены. Например, в формате STL полностью отсутствует информация о взаимном расположении фасет. В форматах OBJ и PLY фасеты задаются как массив целочисленных индексов, указывающих положение координат их вершин в массиве точек. Общие ребра для двух фасет можно определить путем сопоставления (равенства) индексов вершин ребра (для OBJ и PLY) или координат вершин (для STL). Т. е. отсутствие непосредственной информации о взаимном расположении фасет требует их полного перебора в случае необходимости определения соседней фасеты к заданной.

В задаче восстановления трехмерного цифрового представления (реинжиниринг) агрегатов с аэродинамической профилировкой (типа «крыло» и «лопасть») по результатам координатных измерений одной из базовых задач является построение сечений триангуляционного представления поверхности. Данная задача подразумевает выполнение сечения каждого, составляющего поверхность треугольника, в результате которого строится отдельный отрезок. Далее полученных набор отрезков объединяется в одну ломанную линию, представляющую сечение триангуляционной модели. В случае неупорядоченной триангуляционной модели (без наличия связей между фасетами) вычислительная сложность построения отдельных отрезков — сечений фасет $\sim N$, процедуры объединения отрезков в ломаную $\sim N^2$, где N — число фасет в триангуляционной модели [3].

Учитывая, что N для используемых современных средств бесконтактного сканирования может достигать порядка 10^6 и более, необходимо разработать структуру триангуляционной модели поверхности таким образом, чтобы она обеспечивала выполнение базовых операций с вычислительной сложностью не выше $\sim N$. Этого можно достичь, если в триангуляционной модели будет присутствовать информация о взаимном расположении фасет. Далее представлено описание разработанной структуры фасетной модели, удовлетворяющей данному требованию.

На рис. 2 приведен пример работы алгоритма построения линии сечения с использованием модели со связями между фасетами. Первоначально ищется первая фасета, имеющая пересечение с заданной плоскостью P . На рис. 2 это фасета $F3$. Результат пересечения — отрезок $L0$. Следующая фасета — кандидат на пересечение — ищется из набора соседних с $F3$ фасет. Пересечение имеет фасета $F0$ в виде отрезка $L1$. Т. к. фасеты $F3$ и $F0$ соседние, то отрезки $L0$ и $L1$ можно сразу объединить в ломаную. Далее описанная операция выполняется аналогично [4].

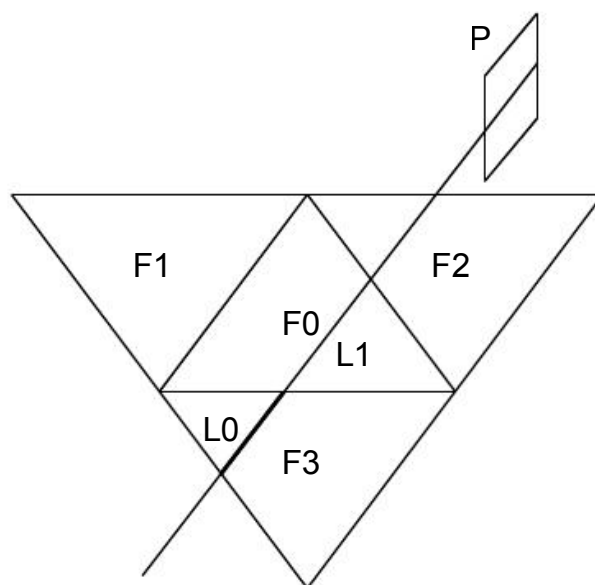


Рис. 2. Построение линии сечения поверхности модели в триангуляционном виде

Таким образом, применение описанной выше процедуры формирования сечений триангуляционной модели позволяет существенно повысить эффективность выполнения геометрических операций.

Основой для построения математического описания аэродинамических поверхностей является каркас продольных и поперечных линий, полученных в результате сечений триангуляционной модели, построенной на базе точек замеров физической модели (рис. 3).

Линии сечения триангуляционной модели, являющиеся результатом пересечения заданной плоскости и набора треугольных фасет, представляют собой ломаные линии. В таком виде они не могут быть использованы в качестве каркаса для построения гладкой аэродинамической поверхности. Необходимо выполнить процедуру их сглаживания. Для этой цели может быть использована сглаживающая аппроксимация кусочным сплайном третьей степени в форме Безье. Такой выбор обусловлен широким применением сплайнов (NURBS, Безье) в современных системах автоматизированного проектирования. Третья степень сплайна является минимально необходимой для обеспечения непрерывности кривизны — требования к аэродинамическим поверхностям.

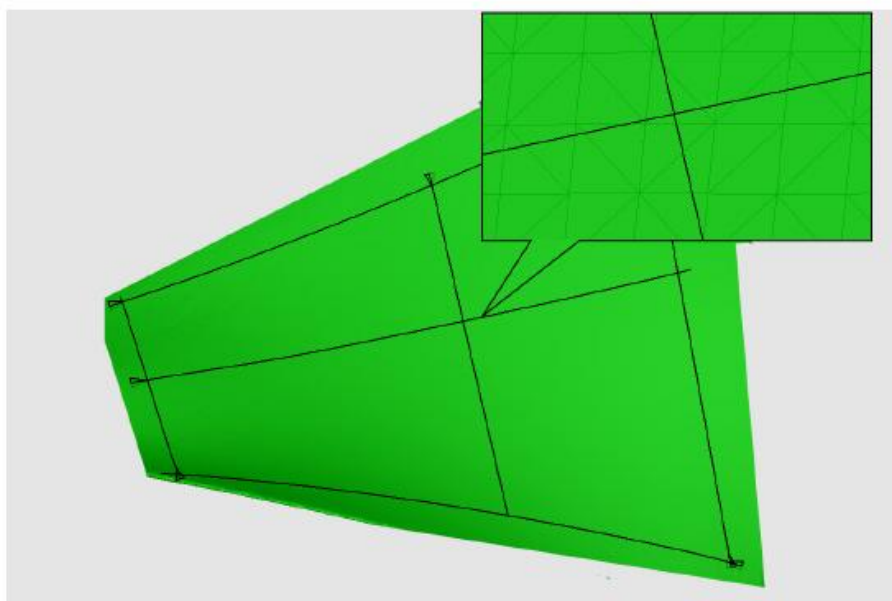


Рис. 3. Каркас линий сечений триангуляционной модели

Сглаживающий аппроксимационный сплайн строится таким образом, что каждой стороне одной клетки каркаса линий сечений соответствует один сегмент кривой Безье третьей степени. Такой выбор соответствует характерной форме аэродинамических поверхностей типа «крыло» и «лопасть».

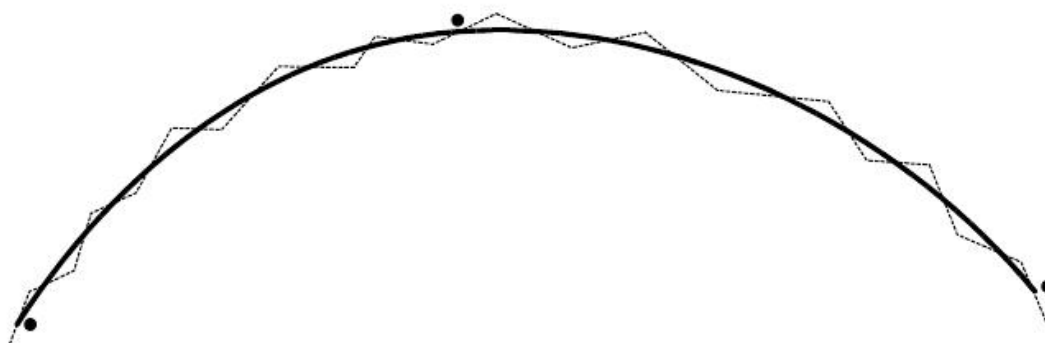


Рис. 4. Пример построения сглаживающего сплайна исходного профиля

На рис. 4 приведен пример построения сглаживающего сплайна на упрощенном для наглядности наборе точек. Аппроксимируемые точки заданы в виде многоугольника — пунктирная линия на рисунке. Жирными точками обозначены первоначальные положения узлов.

Для построения цифровой модели объекта в пространстве по полученному «облаку измеренных точек» разработано специализированное программное обеспечение. Оно позволяет построить параметрическую поверхность из триангулированного вида или «облака точек». Основная задача данного разработанного ПО — создание линий продольного и поперечного каркаса на основе данных, полученных с системы трехмерного сканирования (рис. 5) [5].

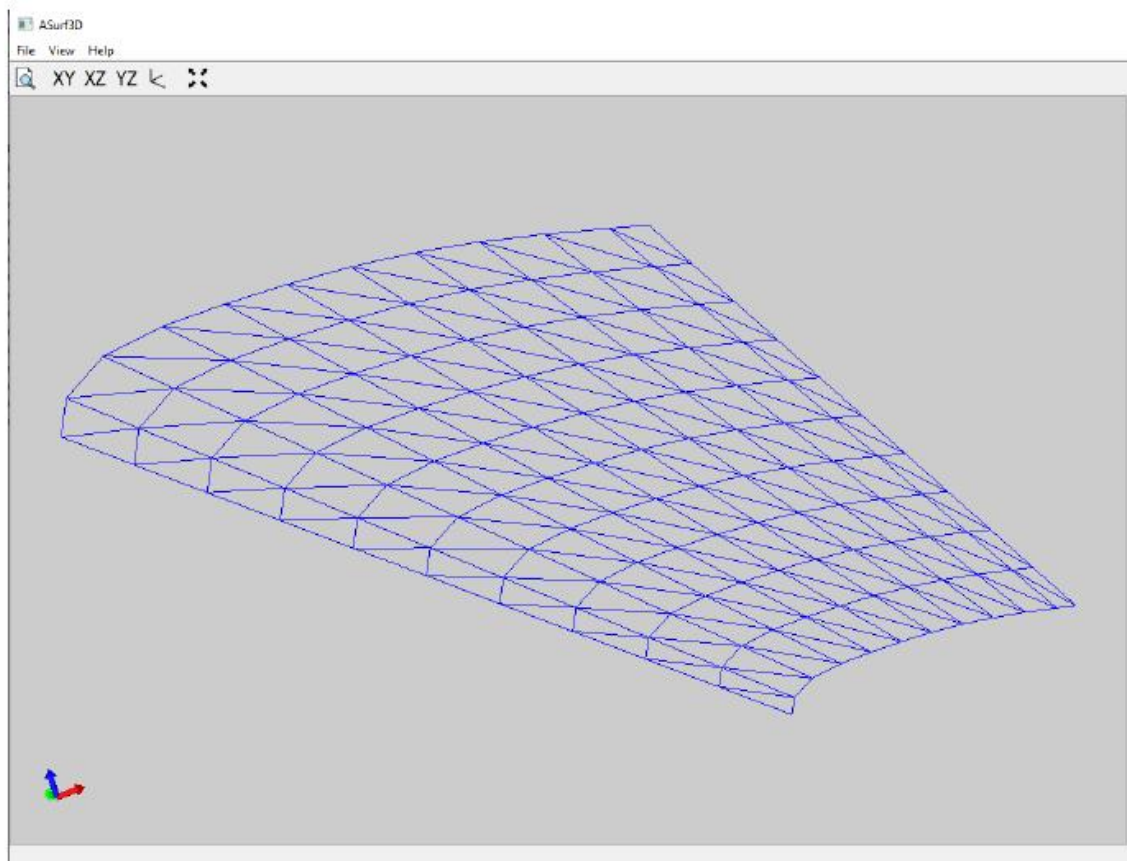


Рис. 5. Графический интерфейс макета программы

Разработанное программное обеспечение включает модуль ввода данных и следующие алгоритмические компоненты:

- алгоритм построения сечений триангуляционного представления поверхности;
- алгоритм выполнения сглаживающей аппроксимации построенного сечения;
- алгоритм согласования линий продольного и поперечного каркасов;
- алгоритм построения поверхности на базе подготовленного каркаса линий.

Алгоритм построения сечений триангуляционного представления поверхности включает в себя четыре составляющих части:

- подготовка структуры триангуляционной модели;
- поиск начальной точки;
- построение сечения одной панели;
- объединение отрезков сечений отдельных панелей в единую ломаную линию.

Заключение. Отработана технология лазерного сканирования поверхности крупноразмерных геометрических объектов, имеющих аэродинамическую профилировку. Разработаны структура фасетной триангуляционной модели со связями соседних фасет и алгоритм ее построения. Для связанной фасетной модели разработан алгоритм построения сечений фасетной поверхности. Их математическая обработка с проведением сглаживающих аппрок-

симаций позволяет получить опорный каркас для построения поверхности на основе параметрического бикубического сплайна. Разработано программное обеспечение получения каркасных линий профиля из триангуляционных моделей, полученных методом лазерного 3D-сканирования. Полученный набор каркасных линий может быть использован для автоматического формирования профиля аэродинамической поверхности в виде Безье-сети или NURBS, как цифровой копии сканируемого объекта.

Список источников

- [1] ГОСТ Р ИСО 10360-1–2017. *Характеристики изделий геометрические. Приемочные и перепроверочные испытания координатно-измерительных машин. Словарь*. Москва, Стандартиформ, 2018, 32 с.
- [2] ГОСТ Р ИСО 10360-4–2017. *Характеристики изделий геометрические. Приемочные и перепроверочные испытания координатно-измерительных машин. Координатно-измерительные машины, применяемые в режиме сканирования*. Москва, Стандартиформ, 2018, 16 с.
- [3] Пратт М., Фокс А. *Вычислительная геометрия, применение в проектировании и на производстве*. Москва, Мир, 1982, 304 с.
- [4] Шрайнер Д., Ву М., Нейдер Д., Девис Т. OpenGL. *Официальное руководство программиста*. Санкт-Петербург, DiaSoft, 2002, 584 с.
- [5] Адамс Д., Роджерс Д. *Математические основы машинной графики*. Москва, Мир, 2001, 606 с.