

Объединение фрагментов трехмерной модели объекта

Владимир В. Амелин, Владимир А. Князь

Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС)

Москва, Россия

Аннотация

В последнее время все большее распространение приобретают разнообразие системы 3D сканирования, позволяющие получить «скан» наблюдаемой части поверхности объекта. Вместе с тем, для получения полной 3D модели объекта необходимо объединение отсканированных фрагментов в единую модель. Данная работа представляет результаты разработки и апробации алгоритма для решения задачи получения полной 3D модели по набору моделей фрагментов, заданных в локальных системах координат. На начальном этапе получения полного трехмерного образа объект сканируется с различных ракурсов. После соответствующей обработки последовательности полученных изображений информация представлена в виде нескольких точно-заданных поверхностей. При этом координаты точек обычно заданы в локальной системе координат каждого фрагмента. Работа описывает алгоритм, разработанный для перевода отдельных фрагментов в общую, глобальную систему координат, то есть объединение всех фрагментов в единую 3D модель.

Ключевые слова: 3D реконструкция, фотограмметрия, 3D модель, совмещение фрагментов.

Abstract

Recently more and more applications use data from various 3D scanning systems, which allow capturing a scan of observed part of an object. However to obtain a complete 3D model of a given object it is necessary to merge captured fragments. This paper presents the results of development and testing the algorithm for merging problem solution. At first stage of complete model generation an object is scanned from different points of view. After preprocessing object information is presented as a sequence includes several point clouds. Those clouds gathered from various directions have to be merged. Each cloud represents a part of surface. Point coordinates are given in own local coordinate system, which is unique for each cloud. The problem is to find transformation matrices for all clouds without detailed information on geometrical relations between them. Then transformation matrices are used to build full and true 3D representation of the object in common coordinate system.

Keywords: 3D reconstruction, photogrammetry, 3D model, surface merging techniques.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существующие системы 3D реконструкции, такие как, лазерные сканеры, фотограмметрические системы традиционно предназначены для создания так называемых 2.5D моделей, поверхности которых представимы в виде однозначной функции двух координат. Это обусловлено тем, что в создаваемую модель включаются только те точки, которые видны

с данного ракурса сканирования. Для создания полных 3D моделей необходимы некоторые дополнительные средства, позволяющие объединять в единую модель набор фрагментов модели объекта

Существует два основных подхода к решению данной проблемы. Первый подход основывается на получении информации о внешнем ориентировании сканирующей системы для каждого фрагмента модели, то есть о ее положении в некоторой глобальной системе координат. Тогда матрицы перехода в глобальную систему координат могут быть рассчитаны для каждого отдельно взятого фрагмента. Информация о внешнем ориентировании съемочной системы может быть получена различным образом, например, при помощи использования механических координатных средств позиционирования объекта или съемочной системы или при помощи проведения процедуры внешнего ориентирования съемочной системы при помощи специальных опорных меток, нанесенных на сканируемый объект [1].

Второй подход применяется в том случае, если нет никакой дополнительной информации о связи между локальными системами координат. Он основан на анализе данных и поиске общих частей у различных фрагментов. Разработке методов построения полной 3D модели в этом случае посвящена данная работа.

Пусть имеется набор трехмерных моделей фрагментов одного объекта, каждый из которых получен в своей системе координат. Каждый фрагмент объекта представлен в виде точно-заданной поверхности (так называемое «облако» точек). Обычно координаты точек заданы в прямоугольной декартовой системе координат. Как отмечалось выше, эта система локальна, то есть у каждого «облака» она своя. Требуется для k -го фрагмента найти матрицу TM_k преобразования в глобальную систему координат. В качестве глобальной системы координат может рассматриваться локальная система одного из заданных фрагментов.

Одним из вариантов является применение методов, основанных на поиске опорных (характеристических) точек. Далее, при достаточном количестве пар точек (не менее 4, лежащих не в одной плоскости) у фрагментов, имеющих общую часть, вычисляется матрица преобразований TM_k

Задача вычисления матрицы преобразований по известным координатам пар опорных точек сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений и может быть решена, например, методом Гаусса. При этом возможно несколько вариантов матрицы TM_k для каждого фрагмента. Выбирается та матрица, которая обеспечивает наилучшее совпадение пересекающихся частей.

Для фотограмметрических систем координаты опорных точек могут определяться на этапе ввода изображения в компьютер, например, нанесением на объект специальных меток. Далее, метка выделяется на объекте за счет каких-то параметров (это

может быть текстура, яркость и т.п.), и ее локальные координаты могут быть получены наряду с точечно-заданной поверхностью фрагмента.

Но что делать, если такой возможности нет? Тогда приходится работать с уже готовыми «облаками» точек, не имея никакой априорной информации о связи между фрагментами. Требуется метод, позволяющий искать опорные точки программно. В этом случае возникают две основные проблемы.

Первая - метод должен обеспечивать независимость выбора этих точек от разрешения (среднего количества точек на единицу площади), масштаба и других параметров отдельно взятого фрагмента. Другими словами, одна и та же опорная точка поверхности в совпадающей части фрагментов обязана иметь одни (учитывая дискретный характер информации, точнее будет сказать почти одни) глобальные координаты. Другим важным моментом является поиск соответствующих пар опорных точек у разных фрагментов. Это - один из трудных для разработки этапов, где необходимо найти именно те опорные точки, которые имеют одинаковое геометрическое место на поверхности объекта. При этом необходимо анализировать как их взаимное расположение, так и окрестности этой точки на различных фрагментах.

Одним из способов нахождения опорных точек в таких случаях является использование так называемого критерия «локальной кривизны» [2]. При этом опорными становятся точки, в которых поверхность имеет максимальную кривизну в некоторой небольшой области. Размер этой области («локальность» опорной точки) может зависеть от разрешения, но, варьируя этот параметр, мы можем получить необходимое количество опорных точек. Для получения хорошего результата необходимы высокое разрешение и достаточный размер общей части у «пересекающихся» фрагментов.

Однако, на практике, количество опорных точек на части поверхности, совпадающей для обоих фрагментов, может быть недостаточным. Большое значение приобретает и точность определения координат соответствующих точек.

Для таких случаев может быть использован алгоритм, позволяющий находить матрицу преобразования по одной опорной точке.

2. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Ниже будет описан алгоритм на примере двух фрагментов модели колодки для обуви, изображенных на Рисунке 1. Фрагменты имели единый масштаб, поэтому задача сводилась к нахождению лишь тех элементов матрицы ТМ, которые отвечают за сдвиг и поворот. Исходными данными являются координаты точек в прямоугольной декартовой системе координат.

На начальном этапе работы с фрагментами необходимо оценить разрешение. Для этого при достаточно равномерной плотности точек можно использовать показатель $D_{average}$ (Average Distance).

$$D_{average}^i = \frac{1}{nVertices} \sum_{k=1}^{nVertices} \min_{\substack{1 \leq j \leq nVertices \\ j \neq k}} D(M_k, M_j), \quad i = 1, 2$$

Он рассчитывается, как среднее арифметическое расстояний от каждой точки до ближайшей. Этот параметр рассчитывается отдельно для каждого фрагмента.

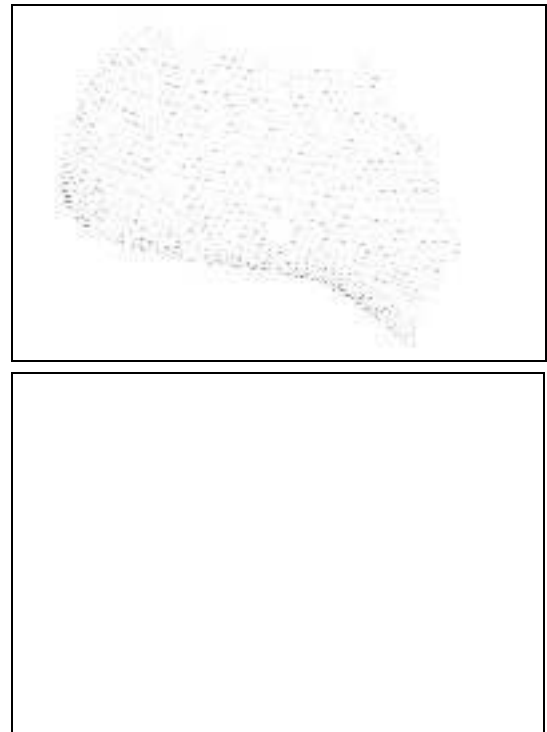


Рисунок 1: Фрагменты 3D модели колодки для обуви

Затем у обоих фрагментов выделяется область Q окрестности опорной точки (Рисунок 2). В нее отбираются точки, удовлетворяющие следующим неравенствам:

$$Q = \{M : R_m < d(M, M_0) < \sqrt{R_m^2 + \frac{100(D_{average}^1 + D_{average}^2)^2}{4\pi}}\}$$

Таким образом, область состоит из примерно 100 точек поверхности лежащих между двумя сферами с центрами в опорной точке. Точки, лежащие в непосредственной близости от опорной, малоинформативны и поэтому не используются алгоритмом. Из неравенств видно, что при увеличении разрешения область преобразуется в «кольцо» точек. Радиус внутренней сферы R_m может определяться исходя из разрешения, а может задаваться пользователем, как параметр алгоритма. Это может быть полезно, например, когда поверхность вблизи опорной точки слишком гладкая. Тогда, увеличивая R_{in} , можно добиться достаточной кривизны в области Q, что позволит с большей точностью найти необходимые преобразования.

Для удобства преобразования областей совмещаем их центры, которыми являются опорные точки, и переносим туда начало координат. Методом наименьших квадратов для каждой области строится плоскость, наилучшим образом приближающая ее множество точек (минимизируется средне-квадратичное отклонение). Нормали этих плоскостей совмещаются поворотами одной из них вокруг осей X и Y на соот-

ветственно углы φ и ψ . Для этого в правой декартовой прямоугольной системе координат положим:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{n_b^1 n_b^2 + n_c^1 n_c^2}{\sqrt{n_b^{1^2} + n_c^{1^2}} \sqrt{n_b^{2^2} + n_c^{2^2}}}, \\ \sin \varphi &= -\frac{|n_b^1 n_c^2 - n_c^1 n_b^2|}{\sqrt{n_b^{1^2} + n_c^{1^2}} \sqrt{n_b^{2^2} + n_c^{2^2}}}, \\ (*) \cos \psi &= \pm \frac{n_a^1 n_a^2 + n_c^1 n_c^2}{\sqrt{n_a^{1^2} + n_c^{1^2}} \sqrt{n_a^{2^2} + n_c^{2^2}}}, \\ \sin \psi &= \frac{|n_a^1 n_c^2 - n_c^1 n_a^2|}{\sqrt{n_a^{1^2} + n_c^{1^2}} \sqrt{n_a^{2^2} + n_c^{2^2}}}, \end{aligned}$$

где $\vec{n}^1 = (n_a^1, n_b^1, n_c^1)$, $\vec{n}^2 = (n_a^2, n_b^2, n_c^2)$ - векторы нормали.

При этом возможно два варианта преобразования, при котором вектора нормалей будут параллельны (*). При отсутствии информации об ориентации поверхности необходимо рассмотреть оба варианта.

Далее общая нормаль уже параллельных плоскостей совмещается с любой из осей. Пусть это будет ось Z, тогда это достигается поворотами вокруг осей X и Y. Для единичных векторов нормали преобразования будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{n_a^2 + n_c^2}{\sqrt{n_a^2 + n_c^2}}, \\ \sin \varphi &= -\frac{2|n_a n_c|}{\sqrt{n_a^2 + n_c^2}}, \\ \cos \psi &= \frac{n_b^2 + n_c^2}{\sqrt{n_b^2 + n_c^2}}, \\ \sin \psi &= \frac{|2n_b n_c|}{\sqrt{n_b^2 + n_c^2}}. \end{aligned}$$

Следующим шагом является последовательный поворот одной из областей вокруг оси Z на угол от 1° до 359° с шагом 1° . На каждом таком шаге вычисляется дисперсия расстояния от точки одной области до ближайшей точки другой. Выбирается такое значение угла, при котором дисперсия минимальна. Можно минимизировать и просто математическое ожидание, но при этом алгоритм будет менее устойчив к погрешности определения координат опорных точек, а они неизбежны. Из двух вариантов, полученных из-за отсутствия однозначной информации о направлении вектора нормали в опорной точке, выбирается тот, который обеспечивает наилучшее совпадение областей.

После этого к областям применяется специальная итерационная процедура. На каждом шаге последовательно, для осей X, Y и Z, методом наименьших квадратов решается задача о наилучшем приближении множества точек одной области к

множеству другой поворотом вокруг одной из осей. Для оценки расстояния между этими множествами будем использовать параметр D_{qof} (Quality of Fitting Distance), основанный на статистическом анализе расстояния между точно заданными поверхностями с использованием функции плотности [2]. Сходимость по такой норме и будет условием окончания процедуры.

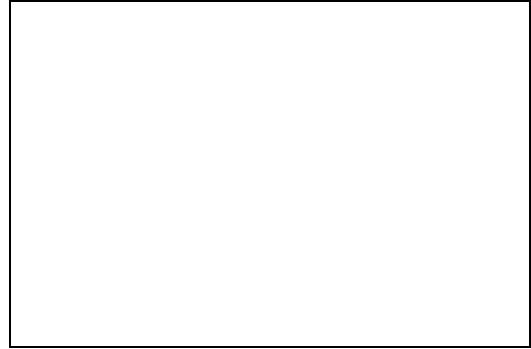


Рисунок 2: Области Q для обоих фрагментов

При этом все действия записываются в матрицу ТМ, но таким образом, что она отражает лишь преобразования одного фрагмента относительно другого. После этого матрица применяется к соответствующему фрагменту целиком, и мы получаем как бы начальное приближение, показанное на Рисунке 3. Нетрудно заметить, что фрагменты еще не совмещены полностью.

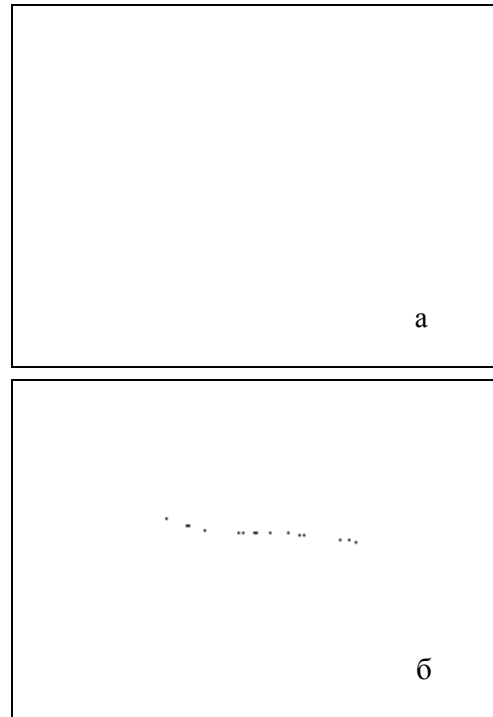


Рисунок 3: Области Q после совмещения
а) вид «сверху» б) вид «сбоку»

Работа с областями, а не со всем фрагментом позволяет существенно ускорить и упростить процесс начального приближения. При этом время работы алгоритма на этом этапе существенно не зависит от общего количества точек, что позволяет быстро находить начальное приближение для фрагментов любой сложности и размера.

Для улучшения качества совмещения фрагментов применяется итерационная процедура, аналогичная уже описанной, но с несколькими отличиями. Во-первых, для расчетов берутся лишь точки из общей части фрагментов. Во-вторых, добавляется сдвиг. Это позволяет устранить последствия ошибок при определении координат опорных точек. И, наконец, условием окончания работы процедуры может быть не только ее сходимость, но и достижение определенного значения параметром D_{qof} . Этот этап является самым продолжительным в работе алгоритма и занимает подавляющую часть времени. Начальное приближение фрагментов представлено на Рисунке 4, а окончательный результат - на Рисунке 5.

Стоит отметить, что данный алгоритм работает и в тех случаях, когда опорная точка лежит «на краю» поверхности и область Q содержит меньшее количество точек.

В алгоритме не используется 2.5-мерность фрагментов 3D модели, поэтому объединение большого количества фрагментов достигается последовательным применением алгоритма.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Алгоритм был реализован в среде Microsoft Visual C++ 6.0 и тестировался на компьютере с процессором Pentium 200. В приведенном примере масштаб равнялся 1мм. Каждый фрагмент состоял из примерно 1500 точек. Показатель $D_{\text{average}} \approx 3$.

На совмещение в первом приближении затрачено 10 секунд. Промежуточный показатель $D_{\text{qof}}(30\%)=1.614$ (то есть 30% точек фрагмента имеют в пределах этого расстояния точку другого фрагмента). Полное время, затраченное на совмещение 2 фрагментов – около 20 минут. По окончании работы алгоритма показатель $D_{\text{qof}}(30\%)$ составил 1.3041.

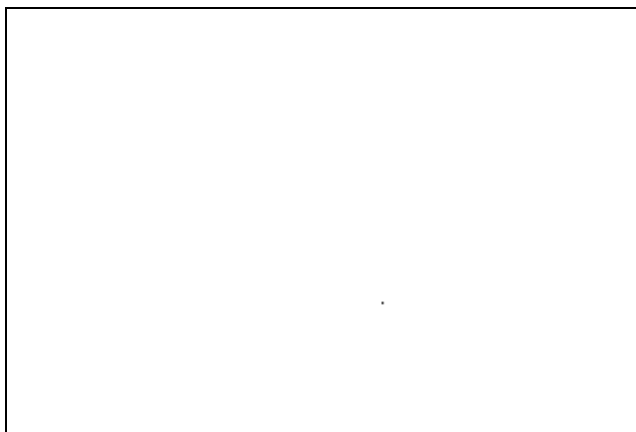


Рисунок 4: Начальное приближение фрагментов

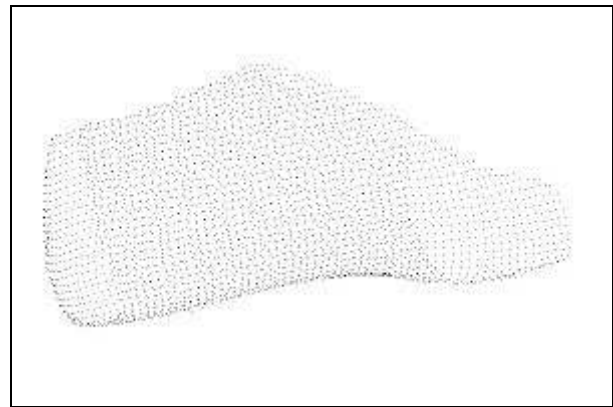


Рисунок 5: Совмещенные фрагменты.

Для сравнения приведены результаты совмещения тех же фрагментов по шести парам соответственных точек, определенных фотограмметрическим методом по стереопарам фрагментов объекта с метками опорных точек (Рисунок 6). Координаты опорных точек на изображениях для расчета их трехмерных координат определялись с субпиксельной точностью.

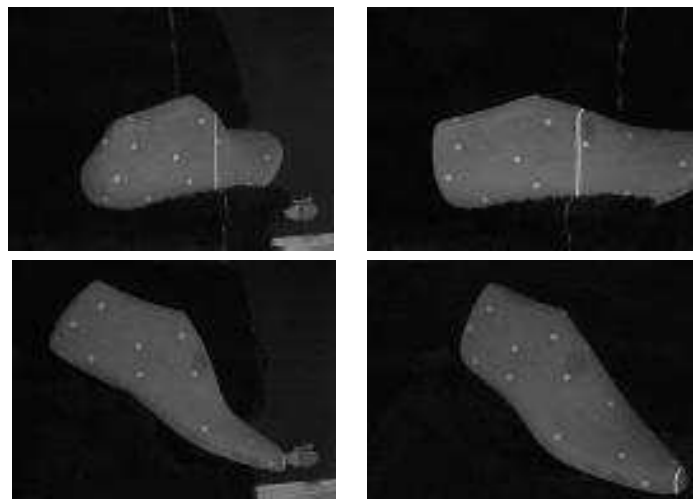


Рисунок 6: Стереопары фрагментов с опорными точками

Показатель качества $D_{\text{qof}}(30\%)$ приведения фрагментов в единую систему координат для данного метода составляет 1.3427. Результаты сравнения показывают, что разработанный метод дает улучшение качества конечной модели на 2.87%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод приведения в единую систему координат различных фрагментов 3D модели, имеющих области перекрытия поверхности. Метод предполагает, что определена одна пара соответственных точек в пересекающихся областях фрагментов.

После того, как соответственные точки определены, выполняются следующие основные этапы алгоритма объединения фрагментов трехмерной модели:

- 1) совмещение окрестностей, получение матрицы перехода в начальном приближении,
- 2) уточнение матрицы итерационным методом,
- 3) переход в глобальную систему координат,
- 4) анализ и объединение дискретной информации.

Использование данного метода объединения фрагментов позволяет упростить весь процесс создания 3D модели объекта, существенно сократив количество необходимых опорных точек. Он также позволяет уменьшить количество необходимых фрагментов объекта, полученных при обработке его изображений в разных ракурсах, и ускорить процесс создания полной 3D модели.

Для эффективного использования метода необходимо проведение дополнительных исследований зависимости показателей качества от разрешения фрагментов и выбора соответственных точек в перекрывающихся областях различных фрагментов.

Данный метод построения единой 3D модели по ее фрагментам, заданным в локальных системах координат может быть полностью автоматизирован на основе разработки робастного метода автоматического поиска соответственных точек. В качестве кандидатов в опорные точки могут рассматриваться локальные экстремумы кривизны поверхности.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1]D.G. Stepanyants, V. A. Knyaz. PC-Based Digital Close-Range Photogrammetric System for Rapid 3D Data Input in CAD Systems. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, part B5/2, Amsterdam, The Netherlands, 2000, pp. 756-763

[2]R. Sitnik, M. Kujawska, 2002. Creating true 3d-shape representation: merging methodologies. Three-Dimensional Image Capture and Applications V, Proceedings of SPIE Vol. 4661, 2002, pp. 92-99.

Об авторах:

Амелин Владимир Владимирович

Е-mail: yamelin@gosniias.msk.ru, yamelin@cs.msu.su

Князь Владимир Александрович

Е-mail: knvaz@gosniias.msk.ru

ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС)

Москва, ул. Викторенко, 7.

Тел.: 7-095-1573127, Факс: 7-095-1573900