

Эффективные вычислительные методы и алгоритмы трехмерной реконструкции объектов культурного наследия

М.П. Руденко

Донецкий национальный технический университет
e-mail: m.p.rudenko@mail.ru

Аннотация

В статье приведен анализ существующих эффективных методов и алгоритмов трехмерной реконструкции объектов культурного наследия на примере фотограмметрических методов и методов, использующих проективную геометрию. Показано, что существующие фотограмметрические методы не в полной мере отвечают требованиям реконструкции. На основании этого был предложен алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображению, основанный на методе перспективных масштабов. На примере трехмерной реконструкции главного фасада дома Горелика по одной фотографии показана работа алгоритма.

Введение

Вопрос о трехмерном восстановлении частично или полностью утраченных объектов культурного наследия в настоящее время чрезвычайно актуален, так как оно рассматривается как один из приёмов решения проблем музеефикации. Таким образом, возможно не только зафиксировать современное состояние архитектурных объектов для последующих поколений, но и смоделировать все этапы существования того или иного объекта для научно-исследовательских и образовательных целей в различных сферах жизнедеятельности.

Постановка задачи

Общая задача реконструкции трехмерных моделей объектов по их изображениям может быть сформулирована следующим образом:

Учитывая m изображений n точек сцены, снятых с разных точек обзора (камер), определить трехмерные координаты n точек объекта сцены (геометрическую модель), изображенного на фотографиях (рис. 1) и матрицы камер m просмотров [1].

Другими словами, по заданной на одном или нескольких изображениях группе координат пикселей необходимо найти соответствующий набор матриц камеры и структуру геометрии сцены так, чтобы:

$$x = PX, \quad (1)$$

где: $X = (X, Y, Z, W)^T$ – описываемая однородными координатами точка в объектном пространстве; $x = (x, y, w)^T$ – ее проекция на изображении; $P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4]$ – проектирующая матрица, составленная из четырех

трехкомпонентных векторов-столбцов (« $\Rightarrow$ » означает «равны с точностью до масштабирующего коэффициента»).

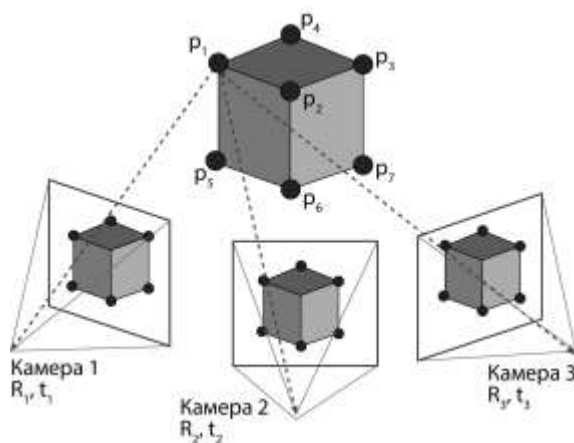


Рисунок 1 – Просмотр геометрии в компьютерном зрении с разных ракурсов

Первые три столбца матрицы P представляют собой координаты главных точек схода v_x , v_y и v_z в X -, Y - и Z - направлениях соответственно, т.е.:

$$p_1 = v_x, p_2 = v_y, p_3 = v_z. \quad (2)$$

Четвертый столбец матрицы P есть проекция o начала объектной системы координат $OXYZ$: $p_4 = o$.

На рисунке 2 приведена классификация способов синтеза модели трехмерного объекта по его изображению.

На рисунке 3 приведены виды синтезируемых трехмерных моделей.



Рисунок 2 - Классификация способов синтеза модели трехмерного объекта по его изображению

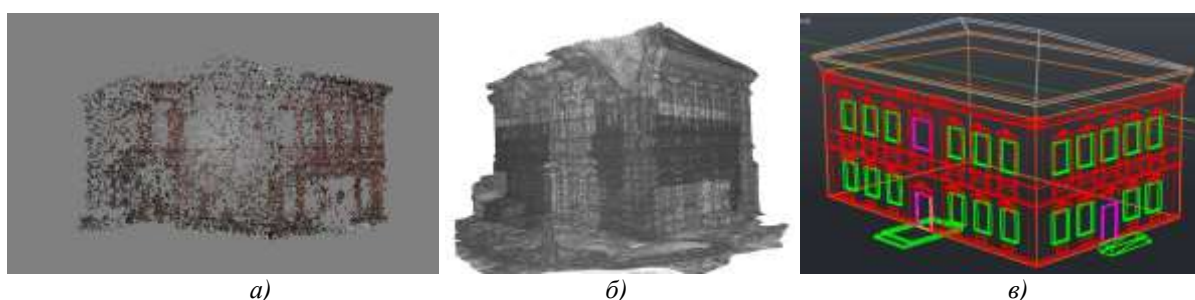


Рисунок 3 - Виды трехмерной модели: а) облачная модель; б) полигональная модель; в) каркасная модель

При трехмерном восстановлении архитектурной среды по фотоизображениям возникает необходимость в обеспечении высокой точности построений при ограниченном количестве изображений, а также реконструкции кривых линий и поверхностей.

Трехмерная реконструкция объектов культурного наследия в задачах археологии предполагает использование [2-4]:

- лазерного сканирования;
- трехмерное восстановление с нуля с использованием иконографических материалов;
- фотограмметрию.

Использование лазерного оборудования при трехмерной реконструкции для сканирования архитектурного сооружения представляет собой дорогостоящий процесс и не подходит для работы с фотоизображениями. Полученная таким способом модель требует дальнейшей доработки в специализированных графических средах, так как содержит ряд искажений, шумов и артефактов (рис. 3а).

В сравнении с лазерным сканированием, использование фотограмметрии при трехмерной реконструкции объектов имеет ряд преимуществ, а именно: высокую точность измерений при имеющемся наборе фотоизображений; возможность измерения параметров объекта бесконтактным методом; доступность (рис. 3б).

Трехмерное моделирование объекта по его изображению, основанное на методах проективной геометрии, дает пропорционально правильную модель на выходе без искажений.

Автоматическая идентификация образа предполагает генерацию полигональной или облачной модели, но на этапе дальнейшей работы с ней значительно усложняется процесс редактирования, так как в основном эти виды моделей имеют шумы и искажения, удаление которых требует определенных временных затрат (рис. 3б).

Ручной способ идентификации образа предполагает работу эксперта при распознавании, это, как правило, обеспечивает лучшие качественные характеристики получаемой модели (обычно каркасной или твердотельной), однако время реконструкции при этом увеличивается (рис. 3в).

Анализ наиболее популярных фотограмметрических систем, выполняющих синтез модели трехмерных объектов по набору изображений

Системы, которые будут рассматриваться, выбраны из ряда графических редакторов, работающих по принципу фотограмметрии.

Алгоритм трехмерного моделирования в таких редакторах примерно одинаковый,

отличаются только интерфейс и количество шагов на пути к созданию трехмерной модели.

Главным преимуществом таких фотограмметрических редакторов являются минимальные трудозатраты при создании трехмерной модели. Работа эксперта состоит в выборе ряда фотоизображений, на основе которых будет производиться моделирование. А значит, сам процесс моделирования происходит без участия человека.

Однако это и является главным недостатком, потому что требования к фотоизображениям являются довольно высокими:

- все фотографии должны быть сделаны при хороших погодных условиях;
- фотографии должны быть сделаны желательно по всему периметру объекта;
- фотографии не должны содержать фон, то есть быть отредактированными;
- для корректной передачи формы объекта, фотографии не должны содержать дополнительных элементов, например, деревьев возле фасадов;
- чем больше фотографий, тем лучше качество модели (не менее двадцати).

Дополнительная работа с фотоматериалом увеличивает временные затраты при моделировании.

Еще одним существенным недостатком фотограмметрических редакторов является сам процесс моделирования, вычислительная сложность которого достаточно высока.

На рисунке 4 представлен алгоритм создания трехмерной модели объекта по набору его фотоизображений для лучшего понимания работы фотограмметрических редакторов.



Рисунок 4 – Алгоритм работы системы, использующей набор изображений

Полученная трехмерная модель нуждается в доработке, так как содержит артефакты и искажения, а также дополнительные шумы, которые устраняются в графических редакторах, занимающихся трехмерным моделированием (рис. 5).



Рисунок 5 – Создание трехмерной модели объекта в фотограмметрическом редакторе: а) эталонный объект; б) трехмерная модель объекта.

Стоит добавить, что процесс редактирования облачной и полигональной моделей является весьма трудо- и время-затратным

В таблице 1 выполнено сравнение наиболее популярных систем, осуществляющих трехмерное моделирование по принципу фотограмметрии.

Для того, чтобы определить, какой редактор наилучшим образом справляется с поставленной задачей, автором были сделаны 25 фотографий эталонного объекта по периметру, которые импортировались в рабочие среды представленных ниже редакторов для дальнейшей генерации трехмерной модели объекта.

Таблица 1. Сравнение популярных фотограмметрических редакторов

Фотограмметрические редакторы	Наличие инструкции (+/-)	Удобный и понятный интерфейс (+/-)	Время создания трехмерной модели	Необходимость фото-обработки перед моделированием	Тип полученной модели	Возможность редактирования модели (+/-)	Качество модели
Autodesk ReCap Photo [5]	+	+	1	нет	полигональная	+	
Agisoft Photoscan [6]	+	+	1,5	да	облачная	+	
MeshLab [7]	+	-	1,5	нет	полигональная	+	
Photomodeller [8]	+	-	2	да	облачная	+	

Общие недостатки систем, работающих по принципу фотограмметрии:

- работа только с набором изображений (от двадцати фотографий), а значит, реконструкция объекта по одиночному изображению становится невозможной;
- не всегда понятный и удобный интерфейс фотограмметрических редакторов, инструкции только на английском языке;
- необходимость использовать платное программное обеспечение;
- необходимость в предварительной обработке фотографий, избавление их от шумов, фона, дополнительных элементов, что означает увеличение временных затрат;
- большие затраты времени при получении трехмерной модели объекта, если ее качество должно быть высоким.

Можно сделать вывод, что известные методы не в полной мере отвечают требованиям синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, таким как качество получаемой модели, скорость генерации, возможность работы с ограниченным иконографическим материалом, возможность построения модели

сложной формы. Это обуславливает необходимость совершенствования методов и алгоритмического аппарата решения задачи реконструкции моделей трехмерных объектов по их изображениям, особенно для частных случаев общей задачи с учетом объективных ограничений.

Поэтому аргументирована необходимость в разработке вычислительного алгоритма и программного комплекса синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, с целью обеспечения высокой точности реконструкции при ограниченном количестве иконографического материала и даже с использованием одного изображения, возможности построения моделей сложной формы, а также умеренной потребности в вычислительных ресурсах.

Алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображению, основанный на методе перспективных масштабов

Исходя из данного анализа был предложен алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов, основанный на методе перспективных

масштабов в виде программного комплекса [9]. Он является более простым в использовании, не требующим вычисления параметров камеры и фокусного расстояния, следовательно, и определенного количества итераций для дальнейшей корректной работы, определяющий пропорциональную зависимость между элементами трехмерной модели. Также он может применяться в уже существующих графических средах, используемых проектировщиками.

Построение полной трехмерной модели объекта только по одиночному изображению невозможно, так как некоторые части объекта невидимы. Однако недостаток исходных данных может частично или полностью компенсироваться путем привлечения дополнительной информации о характеристиках моделируемого объекта.

Для практического применения предложенного программного комплекса были выбраны архитектурные здания города Донецка, являющиеся памятниками архитектуры, построенными в период развития Старой Юзовки. Все они спроектированы в популярном на тот момент «кирпичном стиле». Результаты трехмерной реконструкции дома Юза-Свицына, дома Бальфура, а также дома Горелика, внедрены в научно-методический отдел по охране памятников истории и культуры Государственного учреждения культуры «Донецкий республиканский краеведческий музей» при выполнении работ по созданию виртуальной реконструкции Старой Юзовки.

На примере трехмерной реконструкции главного фасада дома Горелика по одной фотографии (рис. 6), который на сегодняшний день является сохранившимся архитектурным сооружением, показана работа алгоритма.



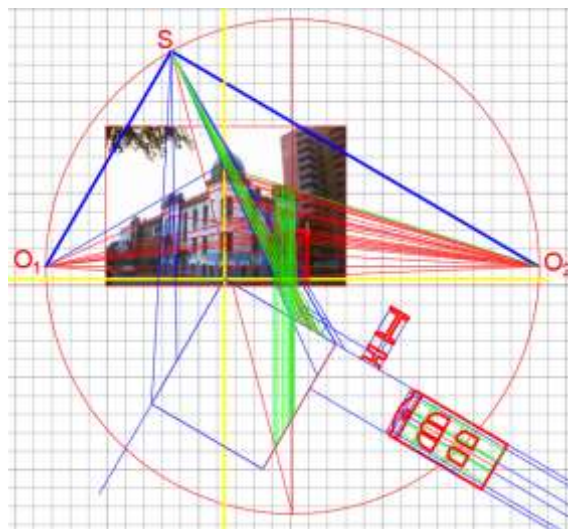
Рисунок 6 – Главный фасад дома Горелика

Дом купца Горелика является памятником архитектуры и градостроительства в Донецке. Построен между 1901–1905 годами. Решение фасадной части здания выполнено в стиле модерн. Угол здания подчеркнут гранёной башней с заостренным куполом. В башне раньше

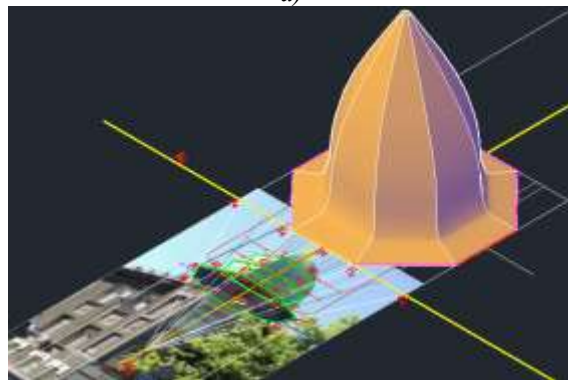
размещалась молельня. Здание выделяется среди других донецких построек причудливыми очертаниями балконов, динамичным обрамлением окон, сдержанным декором фасадов и вставками облицовки из керамической плитки [10]. Особенностью этого дома является выступ на фасаде, имитирующий башню с крышей в виде сомкнутой кровли с восьмиугольником в плане.

Фотография главного фасада дома Горелика импортируется в рабочую среду программного комплекса для дальнейшей работы с экспертом (рис. 7). Экспертом наносятся опорные точки на фотоизображении, после чего программа самостоятельно начинает процесс построения модели.

Процесс построения основан на методах проективной геометрии и дает более точные контуры будущей модели.



а)



б)

Рисунок 7 – Работа алгоритма после нанесения опорных точек: а) отыскание относительных натуральных величин; б) моделирование крыши по найденным величинам

Результат моделирования по найденным относительным величинам на фотографии показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Трехмерная модель главного фасада дома Горелика

Для подтверждения адекватности разработанного программного комплекса была проведена проверка на точность, которая показала, что результаты находятся в пределах допустимой погрешности согласно ГОСТ Р 58942-2020 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве» [11]. Также проведено испытание программного комплекса для моделирования эталонного объекта и сделано сравнение полученной модели эталонного объекта с моделью, сгенерированной в фотограмметрическом редакторе.

Модель, полученная с помощью разработанного программного комплекса, отличается лучшими качественными характеристиками, по сравнению со второй моделью, такими как: полное управление процессом генерации экспертом; полученная модель не требует дальнейшего редактирования контуров; время генерации модели в ряде случаев может быть сокращено до 5 раз; возможность генерации модели с использованием одного изображения; соответствие натурным измерениям эталонного объекта [12].

Выводы

При анализе существующих эффективных методов и алгоритмов трехмерной реконструкции объектов культурного наследия было выявлено, что они делятся на фотограмметрические и методы, использующие проективную геометрию. Оказалось, что известные методы не в полной мере отвечают требованиям синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям, таким как качество получаемой модели, скорость генерации, возможность работы с ограниченным иконографическим материалом, возможность построения модели сложной формы.

Предложен алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов, основанный на методе

перспективных масштабов, в виде программного комплекса, который является более простым в использовании, не требующим вычисления параметров камеры и фокусного расстояния и определяющий пропорциональную зависимость между элементами трехмерной модели. Проверка адекватности предложенного программного комплекса показала работу в допустимых пределах погрешности, а модель, полученная в нем, отличается лучшими качественными характеристиками по сравнению с моделями, полученными в известных фотограмметрических редакторах.

Литература

1. Hartley, R. Multiple View Geometry in Computer Vision [Text] / R. Hartley, A. Zisserman // Cambridge University Press, 2004. – 672 p.
2. Пачеко-руис Р. 4D моделирование подводных археологических раскопок в условиях плохой видимости с помощью фотограмметрии / Р. Пачеко-руис, Д. Адамс, Ф. Педротти // Геоинфо, 2022. – № 10. – С. 6-15.
3. Андреева, И. И. 3D-моделирование археологических раскопок / И. И. Андреева, М. В. Грицкевич, А. В. Белоусов, А. В. Хоперсков // Научный альманах, 2016. – № 1-1 (15). – С. 358-365.
4. Живица, В. В. Принципы 3D реконструкции объектов культурного наследия античного периода на примере греко-скифского городища Калос Лимен в Республике Крым [Текст] / В. В. Живица, А. А. Эрайзер // Строительство и техногенная безопасность, 2022. – № 24 (76). – С. 7-18.
5. Autodesk. 3D Design, Engineering and Construction Software / ReCap Pro. Reality Capture Software connecting the physical world to the digital [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/recap/overview?plc=RECAP&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1#0>, свободный. – Яз.англ.
6. Agisoft Metashape [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.agisoft.com/>, свободный. – Яз.англ.
7. MeshLab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.meshlab.net/#>, свободный. – Яз.англ.
8. Photomodeller Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.photomodeler.com/>, свободный. – Яз.англ.
9. Руденко, М. П. Алгоритм трехмерного моделирования архитектурных сооружений по фотоизображению методом перспективных масштабов / М. П. Руденко // Информатика и кибернетика. - Донецк : ДонНТУ, 2019. – №2(16). – С. 89-95.

10. Донецкий авторский сайт Е. Ясенова / Новое о доме Горелика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://donjetsk.com/homes/9739-povoe-o-dome-gorelika.html>, свободный. – Яз.рус.

11. Руденко, М. П. Моделирование сложных элементов архитектурных сооружений методом перспективных масштабов / М. П. Руденко // Информатика и кибернетика. - Донецк : ДонНТУ, 2019. – №3(17). – С. 30-37.

12. Руденко, М. П. Методы синтеза моделей трехмерных объектов по их изображениям / М. П. Руденко // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ - 2022» : материалы 18-й междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, 10 — 14 октября 2022 г. / Севастоп. гос. ун-т; под ред. И. Л. Афонина. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2022. – С. 146.

Руденко М.П. Эффективные вычислительные методы и алгоритмы трехмерной реконструкции объектов культурного наследия. В статье приведен анализ существующих эффективных методов и алгоритмов трехмерной реконструкции объектов культурного наследия на примере фотограмметрических методов и методов, использующих проективную геометрию. Показано, что существующие фотограмметрические методы не в полной мере отвечают требованиям реконструкции. На основании этого был предложен алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображению, основанный на методе перспективных масштабов. На примере трехмерной реконструкции главного фасада дома Горелика по одной фотографии показана работа алгоритма.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, вычислительные методы, трехмерная реконструкция, фотограмметрия, редакторы, синтез моделей трехмерных объектов.

Rudenko M.P. Effective Computational Methods and Algorithms for the Cultural Heritage Objects 3D Reconstruction. The article analyzes the existing effective methods and algorithms for the three-dimensional reconstruction of cultural heritage objects on the example of photogrammetric methods and methods using projective geometry. It is shown that the existing photogrammetric methods do not fully meet the requirements of reconstruction. Based on this, an algorithm was proposed for synthesizing models of three-dimensional objects from their image, based on the method of perspective scales. Using the example of the Gorelik's house main facade a three-dimensional reconstruction one photo the operation of the algorithm is shown.

Keywords: three-dimensional modeling, computational methods, virtual reconstruction, photogrammetry, editors, the three-dimensional objects models synthesis.

Статья поступила в редакцию 11.10.2023
Рекомендована к публикации зав. каф. КМД Карабчевским В. В.