

УДК 004.946

## Обзор методов трехмерной реконструкции объектов по изображениям

Ю. А. Якубовская

Донецкий национальный технический университет, г.Донецк  
[iulia.yakubovskaja@yandex.ru](mailto:iulia.yakubovskaja@yandex.ru)

### **Аннотация**

*В статье рассматриваются и анализируются методы трехмерной реконструкции объектов по их изображениям. Приводится их классификация по типу и количеству входящей информации. Произведено описание классифицированных методов, приведены их отличительные черты, выделены достоинства и недостатки, рассмотрены их современные реализации. Приводится сравнительный анализ описанных методов и выбирается оптимальный метод для создания программного решения для реконструкции объектов в условиях неполноты исходных данных.*

### **Введение**

В последние годы активно развивается компьютерное зрение, в связи с этим возрастает потребность в трехмерных моделях местности. Они позволяют создавать подробные изображения земной поверхности, включая рельеф, растительность, здания и сооружения, дороги и другие объекты. 3D модели местности широко используются в различных областях, таких как геодезия, картография, геоинформатика, градостроительство. Также такие модели используются историками и архитекторами в решении задач, связанных с реконструкцией исторических и археологических объектов. 3D модели зданий широко используются при реставрации, для определения первоначального облика и размеров объекта.

Еще одним преимуществом 3D моделей является возможность создания виртуальных экскурсий и экспозиций. С помощью таких моделей можно создать реалистичные изображения исторических объектов и показать их посетителям в новом свете с использованием систем виртуальной или дополненной реальности. Это может способствовать более глубокому пониманию истории и культуры, а также повысить интерес к изучению прошлого.

В этой области актуальной и наукоемкой задачей является построение трехмерных моделей таких объектов на основе их изображений.

Следует учитывать, что фотографий утраченных строений может сохраниться малое количество, возможно даже единственный экземпляр.

При этом предъявляются достаточно высокие требования к качеству цифровой модели. Понятие «качество» в данном случае включает в себя две составляющие: метрическую

точность предлагаемых моделей архитектурных сооружений и фотографические свойства их текстур.

### **Методы трехмерной реконструкции**

Один из наиболее широко применимых методов реконструкции геометрических моделей – на основе использования изображений объекта. Фотографические изображения могут быть использованы различных типов: спутниковая съемка, снимки с беспилотников, наземные обычные или панорамные и др. Такие методы относят к фотограмметрии – науке об определении форм, размеров и положении объектов по их фотографиям.

Фотограмметрия достаточно широко используется в различных областях науки, техники, для решения прикладных задач и имеет ряд преимуществ перед другими методами трехмерного моделирования:

- высокая точность: используются алгоритмы, которые по фотографиям позволяют получить точные измерения;
- быстрота: алгоритмы работают быстро и позволяют получать трехмерные модели за достаточно короткое время;
- удобство: не требует специального дорогостоящего оборудования;
- универсальность: может быть применена к широкому спектру объектов;
- безопасность: измерения производятся бесконтактным способом.

Методы создания 3D сцен по их изображениям можно поделить на три группы: по одному изображению; по нескольким изображениям; по видеоряду.

На рисунке 1 приведена классификация методов трехмерной реконструкции объектов по изображениям.

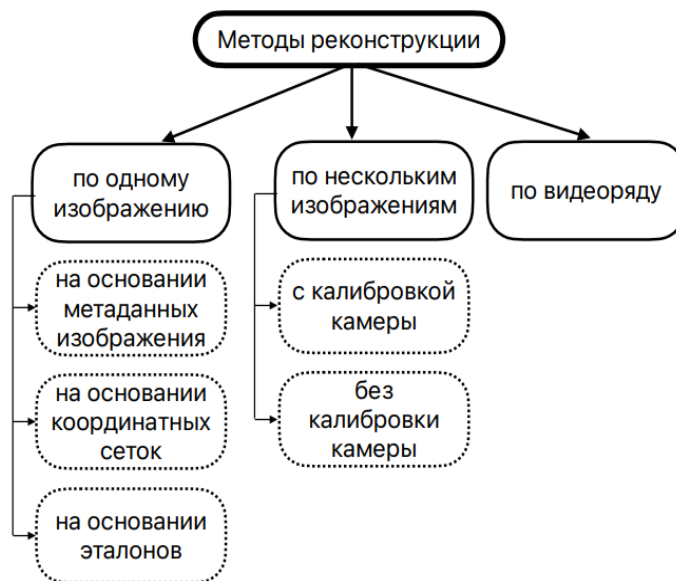


Рисунок 1 – Классификация методов трехмерной реконструкции объектов

### Методы реконструкции по одному изображению

Методы реконструкции по одному изображению можно поделить на три класса: на основании фотографии и ее метаданных, на основании координатных сеток, на основании эталонов.

### Методы на основании метаданных изображения

Методы, которые используют один снимок и его метаданные, требуют большого количества дополнительной информации о снимке, такие как угол фотографирования, параметры освещенности и тени. Также большинство подобных методов используются для определенных объектов или типов изображений, некоторые из них предъявляют определенные условия к фотосъемке. Таким образом, применение подобных методов затруднительно при отсутствии необходимых сведений.

Сушецкий Д.В. предлагает использовать лидарные изображения высокого разрешения, где в качестве основного источника информации используются интенсивности излучения отраженного света от соответствующих точек земной поверхности [1]. Для получения таких изображений требуется специальное дорогостоящее оборудование, а трехмерные модели получаются довольно низкого качества, малого уровня детализации (рис 2).

Тужилкин А.Ю. в своей работе предлагает модель реконструкции на основе спутниковых изображений и априорной информации [2].

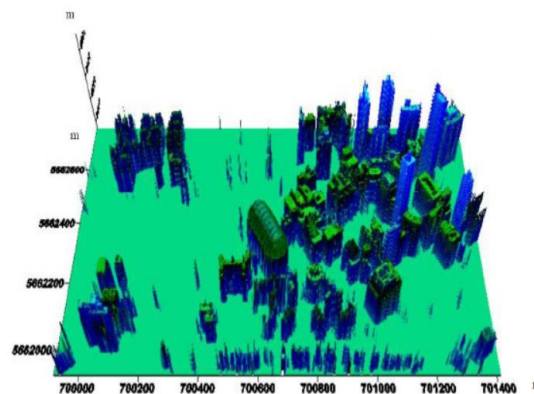


Рисунок 2 – Реконструкция трехмерных объектов на основании комплексных данных лидарных и RGB изображений

Для обнаружения зданий на фото предлагается группировать регионы, которые определяются цветовыми характеристиками, значениями высоты, областью затенения, растительности и т.д.

При реконструкции трехмерных моделей используют геометрические гистограммы (рис.3).

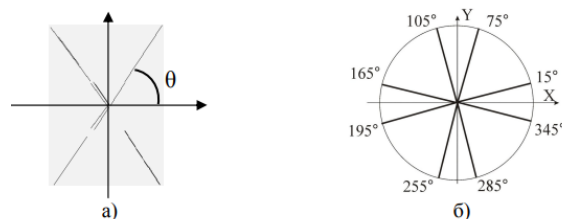


Рисунок 3 – Построение геометрических гистограмм: а) определение угла между отрезком и осью абсцисс в системе координат полигона, б) интервалы разбиения числовой окружности

Для них выбирается система координат, в которой ось ординат совмещена с центральной осью ограничивающего прямоугольника, параллельной большей его стороне (рис. 3а), а также используются неравные интервалы углов (рис. 3б). На основе расстояния Бхаттачария производится сравнение геометрических гистограмм.

### Методы на основании координатных сеток

При использовании методов с использованием координатных сеток за основу берется единственное изображение без атрибутивной информации, но существует информация о форме этого объекта и способ соотношения пикселей изображения с местоположением ряда точек этой формы. Для решения задачи на изображение накладывается сетка линий с заданной структурой. Сетки могут быть линейными или нелинейными, плоскими или пространственными, прямыми или наклонными, ортотрансформированными или перспективными.

Шахраманьян М.А предлагает методику генерации трехмерных объектов «правильной» формы, выбирая на изображении опорные точки, так чтоб они образовывали базис пространственной системы координат различного типа в зависимости от формы объекта [3]. На основании этих точек находятся масштабирующие коэффициенты, рассчитывается изображение координатной сетки, которая наносится на изображение. На сетке размечаются характерные точки, которые определяют положения точек в пространстве. Основные этапы построения трехмерной модели в соответствии с данной методикой представлены на рисунке 4.

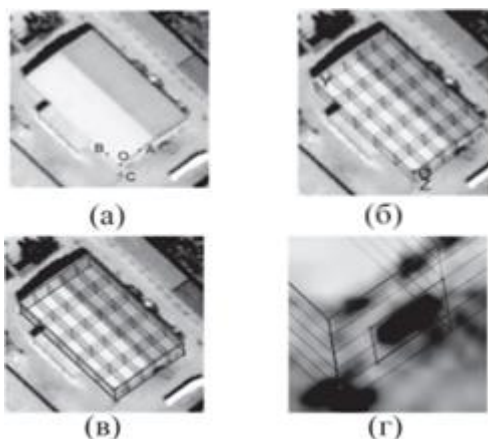


Рисунок 4 – Этапы построения трехмерной модели на основании координатных сеток:  
а) выбор опорных точек; б) расчет и построение координатной сетки; в) разметка точек и линий на сетке; г) аффинные преобразования для улучшения точности разметки (увеличение)

Руденко М.П. предлагает алгоритм с использованием метода перспективных масштабов, который позволяет определить относительные натуральные величины элементов объекта. В разработанной системе эксперту предлагается определить количество точек схода на изображении. После этого на изображение наносятся опорные точки, на основании которых строится перспективная сетка и производится построение трехмерной модели (рис. 5) [4].

Для построения элементов, отсутствующих на изображении, но уместных в модели, требуется участие эксперта.

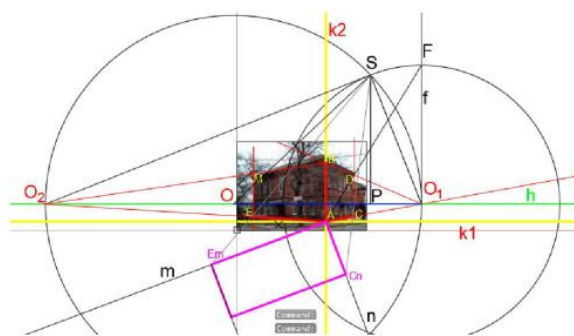


Рисунок 5 – Отыскание относительных натуральных величин основного блока архитектурного сооружения

### Методы на основании эталонов

Используя методы на основании эталонов на исходном изображении необходимо задать эталонные объекты, по их известным размерам угловым или линейным. В основе методов лежит расчёт масштабирующих коэффициентов в зависимости от направляющих осей и пространственного разрешения.

Рихтер А.А. предлагает методику построения по объекту-эталоно, для которого известно значение высоты, соответствующей определенному отрезку на изображении, таким образом получив масштабирующий коэффициент. Также предложен альтернативный вариант расчета «по тени» в условиях отсутствия видимости боковых частей расчетного объекта [5].

Также необходимо отметить, что существуют подходы к трехмерной реконструкции объектов, которые объединяют несколько методов из вышеперечисленных, а также интегрируют их с нейросетевыми технологиями. Так, например, в [6] описывается метод построения трехмерных объектов по одному спутниковому изображению, который основан на сочетании традиционных и нейросетевых методов. В работе на основании эталонных объектов (опорных железнодорожных столбов и рельс) оцениваются масштабирующие коэффициенты для оценки высоты и формы

основания строения. Метод основан на применении двух сверточных нейронных сетей, первая из которых выполняет сегментацию и выделение объектов заданных классов, вторая – на сегментированных изображениях извлекает индивидуальные объекты, определяет параметры и строит модель по растровым областям. Данный метод предполагает, что исходные изображения были предварительно обработаны.

### **Методы реконструкции по нескольким изображениям**

Такие методы можно поделить на два класса: методы с калибровкой камер и методы без калибровки. Калибровка камер – это изучение взаимного расположения камер в пространстве, а также их внутренних параметров.

### **Методы реконструкции с калибровкой камер**

Калибровка камер широко используется при реконструкции по стереопаре или при малом количестве снимков. В процессе калибровки необходимо установить точные параметры камер, такие как фокусное расстояние, оптическая ось, геометрическое искажение, углы обзора и т.д. Для калибровки камер по стереопаре необходимо определить положение камер в пространстве, на основании относительных координат сопоставленных точек на изображениях, а также данных полученных с камеры. Калибровка камер при трехмерных реконструкциях является трудоемким процессом и зависит от множества факторов, таких как количество камер, их расположение, условия съемки, наличие «шумов», наличие достаточного количества точек, настройка параметров камеры, размер сцены и т.д. В [7] описывается реконструкция с использованием калиброванных камер по двум изображениям. Подробно рассмотрено вычисление трехмерных координат точки по стереопаре. Сделан вывод, что для получения трехмерных координат необходимо решить ряд следующих задач: задача калибровки, взаимного ориентирования, поиска сопряженных точек.

### **Методы реконструкции без калибровки камер**

В методах, работающих без калибровки камер часто накладываются определенные ограничения на внутренние параметры камер или используются методы, основанные на алгоритмах триангуляции, факторизации матриц, а нахождение координат точек осуществляется с помощью эпиполярной геометрии. Такие алгоритмы, как правило, не используют непосредственно изображение, им необходимы

координаты характерных точек на ряде изображений. Координаты точек в данном случае имеют абстрактные величины, и оценивается их взаимное относительное расположение.

Беляков П. В. предлагает использовать вариационный метод на основе вычисления фундаментальной матрицы и оптического потока [8]. Вместе с этим определяется пространственное положение точек сцены и требование гладкости поверхности. В качестве входных данных используется последовательность изображений, которые получены путем движения камеры по непрерывной траектории, также предполагается, что внутренние параметры камеры известны.

В [9] предложен метод реконструкции без калибровки камер по двум изображениям, который также основывается на вычислении фундаментальной матрицы. В работе используется полиномиальный алгоритм триангуляции для нахождения трехмерных координат, который характеризуется достаточно хорошим быстродействием, а также достаточно высокой точностью. В качестве входной информации используется стереопара, без информации о метрических характеристиках камеры.

### **Методы реконструкции по видеоряду**

Третий тип методов реконструкции – по видео, эти методы предполагают построение геометрических моделей объектов, которые фиксирует движущаяся камера. Такие методы основываются на использовании силуэтов, освещенности и движения. В некоторых работах, для реконструкции по видео из видеоряда просто извлекаются стереопары, в других используется дополнительно специализированное оборудование: дальномеры, системы освещенности, высокая частота съемки, множество камер и т.д. Подобные методы требуют больших материальных затрат и предполагают высокую вычислительную трудоемкость.

Бобков В. А. предлагает метод трехмерной реконструкции в видео-сценах, восстановление структуры и движения. Модель динамического объекта строится путем объединения видов из различных позиций камеры [10]. В рамках данной работы решаются следующие задачи: построение трехмерного точечного представления сцены и выделение из нее объектов; выделение статических и движущихся объектов, вычисление траекторий движения; генерация различных точечных видов движущегося объекта; построение трехмерной поверхностной модели по полученным видам.

В [11] предлагается из видеоряда выбрать два соседних кадра, далее применяются методы эпиполярной геометрии, без калибровки камер описанные выше.

### **Сравнительный анализ методов реконструкции по изображениям**

Сравнительный анализ рассмотренных методов приведен в таблице 1. Основными параметрами для сравнения выбраны: количество входящей информации; необходимость дополнительной или атрибутивной информации об изображении или объекте; необходимость особых условий фотосъемки; необходимость предварительной обработки фото; экспертный контроль. Для реконструкции трехмерных объектов зданий для

исторических и археологических исследований предпочтительны методы, которым необходим минимум входящей информации, так как от утраченного памятника архитектуры может остаться единственное изображение или чертеж. Также, для объектов такого рода практически невозможно предъявлять особые требования к условиям съемки или запрашивать атрибутивную информацию. Поэтому оптимальными методами для трехмерной реконструкции зданий и сооружений памятников архитектуры являются методы на основе одного изображения с использованием координатных сеток.

Таблица 1 – Сравнение методов реконструкции

	Методы реконструкции					
	По одному изображению			По нескольким изображениям		По видео
	Используют метаданные	Используют координатные сетки	Используют эталоны	С калибровкой камеры	Без калибровки камеры	
Количество входящей информации	1 фото	1 фото	1 фото	≥ 2 фото	≥ 2 фото	видео
Необходимость дополнительной или атрибутивной информации	+	-	+	+	-	+
Особые требования к условиям получения изображений	+	-	-	+	-	+
Необходимость предварительной обработки фото	-	-	-	+	+	+
Необходимость экспертного контроля	+	+	+	+	-	+

### **Выводы**

В работе рассмотрены и классифицированы методы реконструкции трехмерных моделей по изображениям. Предложена классификация по входящей информации: методы на основании одного изображения – с использованием метаданных, с использованием эталонов, с использованием координатных сеток; на основании нескольких изображений – с калибровкой камеры, без калибровки; на основании видеоряда.

Оптимальной группой методов для реконструкции при наличии недостаточного количества изображений и неизвестных условиях съемки являются методы на основании одного изображения с использованием координатных сеток. Перспективным направлением разработки является объединение этих методов с нейросетевыми технологиями для повышения уровня автоматизации реконструкции.

### **Литература**

1. Суцевский, Д. В. Выявление и 3-D визуализация искусственных объектов земной поверхности с использованием лидарных и оптических спутниковых изображений // Вестник Херсонского национального технического университета, 2014. - №3 (50).
2. Тужилкин, А. Ю. Модели и алгоритмы реконструкции трехмерных сцен на основе спутниковых изображений и априорной информации: автореф. дис. ... кан. техн. наук. - Нижний Новгород, 2016. - 19 с.
3. Шахраманьян, М. А. Методика построения 3D-модели объектов правильной формы по одному изображению и ее применение в задаче космического мониторинга объектов захоронения отходов / М. А. Шахраманьян, А. А. Рихтер, А. Б. Мурынин, М. Л. Казарян // Информация и космос, 2018. - № 2 (8). - С. 76-81.

4. Руденко, М. П. Усовершенствованный алгоритм синтеза моделей трехмерных объектов по их изображению / М. П. Руденко, А. А. Бабакина, В. В. Карабчевский // Проблемы искусственного интеллекта, 2020. - №1 (16).

5. Рихтер, А.А. Методика построения 3D-моделей ригидных объектов и её применение в моделировании антропогенных территорий по космическим изображениям / А. А. Рихтер, А. Б. Мурынин // Материалы 15-й Всерос. откр. ежегод. конф.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных (ИКИ РАН-2017, 13-17 ноября). - М.: ИКИ РАН, 2017. - С. 50.

6. Гвоздев, О. Г. Построение трехмерных моделей ригидных объектов по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения с использованием сверточных нейронных сетей / О. Г. Гвоздев, В. А. Козуб, Н. В. Кошелева [и др.] // Исследование Земли из космоса, 2020. – № 5. – С. 78-96

7. Меженин, А. В. Реконструкция трехмерных моделей по растровым изображениям / А. В. Меженин, В. Т. Тозик // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2007. - №45.

8. Беляков, П. В. Вариационный метод трехмерной реконструкции по изображениям / П. В. Беляков, М. Б. Никифоров, А. И. Новиков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, 2019. – Т. 8, № 3(47). – С. 107-112.

9. Шепилова, К. М. Метод трехмерной реконструкции сцены в относительных координатах по двум изображениям с неоткалиброванных видеокамер / К. М. Шепилова, А. В. Сотников, А. В. Шипатов, Ю. В. Савченко // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2020. – Т. 25. - № 3. – С. 265-276.

10. Бобков, В. А. Пространственная реконструкция объектов в динамической сцене по видеопотоку / В. А. Бобков, А. П. Кудряшов // Подводные исследования и робототехника, 2020. – № 3(33). – С. 11-17.

11. Захаров, А. А. Алгоритм автоматической реконструкции трехмерных сцен по видеопоследовательности / А. А. Захаров, М. И. Ткачук // Информатика, телекоммуникации и управление, 2011. - №3 (126).

**Якубовская Ю. А. Обзор методов трехмерной реконструкции.** В статье рассматриваются и анализируются методы трехмерной реконструкции объектов по их изображениям. Приводится их классификация по типу и количеству входящей информации. Произведено описание классифицированных методов, приведены их отличительные черты, выделены достоинства и недостатки, рассмотрены их современные реализации. Приводится сравнительный анализ описанных методов и выбирается оптимальный метод для создания программного решения для реконструкции объектов в условиях неполноты исходных данных.

**Ключевые слова:** фотограмметрия, 3D модель, изображение, трехмерная реконструкция, метод реконструкции.

**Yakubovskaya Y. Review of three-dimensional reconstruction methods.** The article considers and analyzes methods of three-dimensional reconstruction of objects based on their images. Their classification by type and quantity of incoming information is given. The classified methods are described, their distinctive features are given, advantages and disadvantages are highlighted, and their modern implementations are considered. A comparative analysis of the described methods is given and the optimal method is chosen to create a software solution for the reconstruction of objects in conditions of incompleteness of the initial data.

**Keywords:** photogrammetry, 3D model, image, 3D reconstruction, reconstruction method.

Статья поступила в редакцию 25.02.2023  
Рекомендована к публикации профессором Карабчевским В.В.