

ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ УТРАЧЕННЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ ПО ОДИНОЧНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Ю.А. Крейдун, С.И. Жилин, А.А. Васильев

В работе описывается оригинальная методика построения трехмерных моделей утраченных памятников архитектуры по одиночным изображениям, реализованная в программном продукте 3DRecoverer. В качестве иллюстрации приведены результаты обработки фотоснимка разрушенной церкви с. Усть-Кан, получена проволочная модель основных архитектурных форм. Модель сопоставлена с планом сохранившейся части храма, построенного по аналогичному проекту. Разработанный программный продукт может использоваться при подготовке специалистов в области искусствоведения и архитектуры.

Введение

Эпоха войн и революций в двадцатом веке принесла России утрату многих памятников истории и культуры. Работа по возрождению духовного наследия нашего народа приобретает все большую актуальность [1]. Особое значение имеют памятники архитектуры, в том числе церковные здания, которые были достоянием наиболее широких слоев населения.

В наше время культурно-религиозное наследие становится объектом изучения различных дисциплин, как в высших, так и в средних учебных заведениях. Кроме того, активизировался процесс реставрации утраченных памятников церковного зодчества, требующий подготовки специалистов в сфере архитектуры, строительства и искусствоведения. Одной из важнейших практических задач в этой области является воссоздание облика утраченных сооружений по уникальным фотодокументам в виде трехмерных моделей. К сожалению, инструментарий решения подобных задач недостаточно разработан. Быстро развивающиеся информационные технологии (компьютерной графики, трехмерного моделирования, машинного зрения) позволяют реализовать известные в архитектуре методы проективной геометрии на качественно новом уровне.

Задача восстановления пространственной модели сцены по изображениям является хорошо известной в машинном зрении. Традиционная постановка этой задачи подразумевает наличие, по крайней мере, двух изображений, полученных съемкой из разных точек. Такая входная информация позволяет восстанавливать трехмерную структуру сцены с использованием методов, так или иначе основывающихся на модели стереоскопического зрения [2-4]. На практике возникают си-

туации, когда приходится решать ту же задачу по единственному изображению, поскольку получить дополнительные изображения либо затруднительно, либо невозможно. Примером такой ситуации может служить задача построения моделей утраченных архитектурных памятников по уникальным сохранившимся фотографиям.

Построение полной трехмерной модели объекта только по одиночному изображению, вообще говоря, невозможно, т.к. некоторые части объекта невидимы. Однако недостаток исходных данных может частично или полностью компенсироваться путем привлечения дополнительной (в том числе экспертной) информации о характеристиках моделируемого объекта (симметрия, отдельные размеры и т.п.).

Известные методы восстановления трехмерных моделей сцены по одиночному изображению опираются на тот факт, что изображение есть результат перспективного проектирования сцены [5-6]. При выраженности эффекта перспективы на изображении параметры породившего его проективного преобразования могут быть восстановлены с точностью до некоторого множителя. Немногочисленные программные продукты, реализующие подобные технологии построения моделей по одиночным изображениям (ImageModeler, PhotoModeler, Canoma), ориентированы на широкий круг приложений и не позволяют использовать некоторую ценную специфическую для архитектурных сооружений информацию о моделируемом объекте. Еще одним традиционным для отечественного исследователя препятствием в использовании коммерческого программного обеспечения является его стоимость.

В настоящей работе описывается программный продукт, позволяющий проводить построение трехмерных моделей по одиноч-

ным изображениям и опыт его применения для восстановления облика утраченных архитектурных памятников.

Математический аппарат

Перспективное проектирование объектов сцены на изображение является линейным преобразованием $x = PX$, 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, а «=» означает «равны с точностью до масштабирующего коэффициента». 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. $p_1 = v_x$, $p_2 = v_y$, $p_3 = v_z$. Четвертый столбец матрицы P есть проекция o начала объектной системы координат $OXYZ$: $p_4 = o$.

Система координат объектного пространства обычно выбирается пользователем так, чтобы координатная плоскость OXY совпадала с базовой плоскостью, служащей основанием для моделируемого объекта (для архитектурных сооружений ею чаще всего является поверхность Земли). Ось OZ при этом выбирается ортогональной к базовой плоскости таким образом, чтобы обеспечить линейную независимость p_1 , p_2 и p_4 , т.е. чтобы проекция o начала объектной системы координат на изображении не принадлежала линии схода l , определяемой главными точками схода v_x и v_y (линии горизонта). Этого можно добиться, например, выбрав OZ так, чтобы o , а, следовательно, и p_4 совпадали с нормированным вектором нормали прямой l , т.е.

$$o = p_4 = \frac{l}{\|l\|} = \bar{l},$$

где $l = v_x \times v_y$, а $\|\cdot\|$ – евклидова норма. Таким образом, матрица перспективного проектирования примет вид $P = [v_x \ v_y \ v_z \ \bar{l}]$.

Все прямые, параллельные какой-либо из осей объектной системы координат, в результате перспективного преобразования трансформируются в пучок прямых с центром в точке схода, соответствующей координатной оси. Этот факт позволяет определить координаты точек схода по изображению путем поиска точки пересечения прямых, являющихся проекциями прямых, параллельных в объектном пространстве. Процесс поиска таких проекций может быть автоматизирован путем поиска линейных элементов на изображении и последующей их кластеризации по направлению, но в простейшем случае необходимые линейные элементы могут быть указаны пользователем в интерактивном режиме. Координаты точки схода в плоскости изображения отыскиваются в результате решения, как правило, переопределенной системы уравнений, описывающих найденные проекции-прямые. Наиболее простым способом решения этой системы уравнений является метод наименьших квадратов, хотя в целях повышения точности оценок координат точек схода для этих целей можно использовать и более продвинутые процедуры оценивания (робастные, нестатистические, алгоритмы типа RANSAC и т.д.).

Как отмечалось, оценки координат точек схода представляют собой и компоненты матрицы проектирования P . Знание параметров проективного преобразования позволяет решать некоторые задачи восстановления пространственных координат точек объекта по их проекционным координатам на изображении, привлекая дополнительные ограничения и доопределяя тем самым систему уравнений $x = PX$.

Одной из разрешимых является задача восстановления координат точек объекта, лежащих в базовой плоскости. Z -компонента точек базовой плоскости равна нулю, т.е. в объектном пространстве они описываются координатами $X = (X, Y, 0, W)^T$. Если указаны координаты $x = (x, y, w)^T$ проекции такой точки на изображении, то, решая систему трех линейных уравнений

$$x = PX = Xp_1 + Yp_2 + Wp_4$$

с тремя неизвестными X , Y и W , можно получить ее координаты в объектном пространстве. Заметим, что решение полученной системы уравнений единственно, так как p_1 ,

ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ УТРАЧЕННЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ ПО ОДИНОЧНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

p_2 и p_4 линейно независимы по построению.

Если по указанной на изображении проекции x точки из базовой плоскости уже найдены ее координаты $X = (X, Y, 0, W)^T$ в объектном пространстве, то можно восстановить пространственные координаты точки $X' = (X', Y', Z', W')^T$, лежащей на пересечении перпендикуляра, восстановленного к базовой плоскости в точке X , и некоторой плоскости, параллельной базовой. Выбор этой плоскости может быть осуществлен пользователем путем указания на изображении проекции $x' = (x', y', w')^T$ точки X' . Поскольку x' получена в результате проектирования точки X' , имеем систему $x' = PX'$ из трех уравнений с четырьмя неизвестными X' , Y' , Z' и W' . Недостающее четвертое уравнение после исключения переменной W' дают отношения $XW' = X'W$ и $YW' = Y'W$, вытекающие из определения однородных координат и факта принадлежности точек X и X' одной и той же прямой, параллельной оси OZ . Решение полученной системы уравнений дает искомые пространственные координаты точки X' .

Имея пространственные координаты точки X' , лежащей в плоскости, параллельной базовой, можно определить пространственные координаты любой другой точки $X'' = (X'', Y'', Z'', W'')^T$, принадлежащей той же плоскости, если пользователем указана ее проекция $x'' = (x'', y'', w'')^T$ на изображении. В силу принадлежности точек X' и X'' одной и той же плоскости, ортогональной OZ , имеем $Z'W'' = Z''W'$. Это отношение замыкает систему уравнений $x'' = PX''$ и позволяет найти координаты точки X'' в объектном пространстве.

Заметим, что аналогичным образом восстанавливаются пространственные координаты точек, для которых в качестве базовых выбираются координатные плоскости OYZ и OZX .

По известным оценкам параметров перспективного преобразования также возможно найти пространственные координаты точки $C = (X_c, Y_c, Z_c, W_c)^T$ расположения камеры во время регистрации изображения, которая

является центром проектирования и удовлетворяет системе уравнений $PC = 0$. Используя для ее решения правило Крамера, получим:

$$X_c = -\det[p_2 \ p_3 \ p_4],$$

$$Y_c = \det[p_1 \ p_3 \ p_4],$$

$$Z_c = -\det[p_1 \ p_2 \ p_4],$$

$$W_c = \det[p_1 \ p_2 \ p_3].$$

Программная реализация

На основе изложенного несложного математического аппарата разработано Windows-приложение 3DRecoverer, реализующее следующие функции.

Полуавтоматический поиск точек схода. Для вычисления координат точек схода пользователю в интерактивном режиме необходимо указать отрезки прямых, являющиеся проекциями отрезков, параллельных осям выбранной пространственной системы координат. Этап определения точек схода является наиболее ответственным в технологии восстановления пространственной модели, поскольку полученные на этом этапе оценки параметров проективного преобразования служат исходными данными для всех прочих построений и от их точности во многом зависит точность всей модели.

Восстановление координат точек модели, принадлежащих базовой плоскости по их проекциям, указанным пользователем на изображении. Набор точек в базовой плоскости определяет «фундамент» будущей модели, все прочие восстанавливаемые точки прямо или косвенно соотносятся с одной из точек, лежащей в базовой плоскости. В качестве базовой может рассматриваться любая из координатных плоскостей.

Восстановление координат точек модели, лежащих вне базовой плоскости. Использование этой функции подразумевает, что для восстанавливаемой точки уже построена точка на базовой плоскости, являющаяся проекцией искомой в базовом направлении.

Построение проволочной модели объекта. Соединение пар указанных пользователем точек с восстановленными пространственными координатами позволяет получить каркасную модель объекта.

Запись сконструированной модели в файл. Экспорт модели возможен либо в



Рис. 1. Никольский храм с. Усть-Кан (фото нач. XX в.)

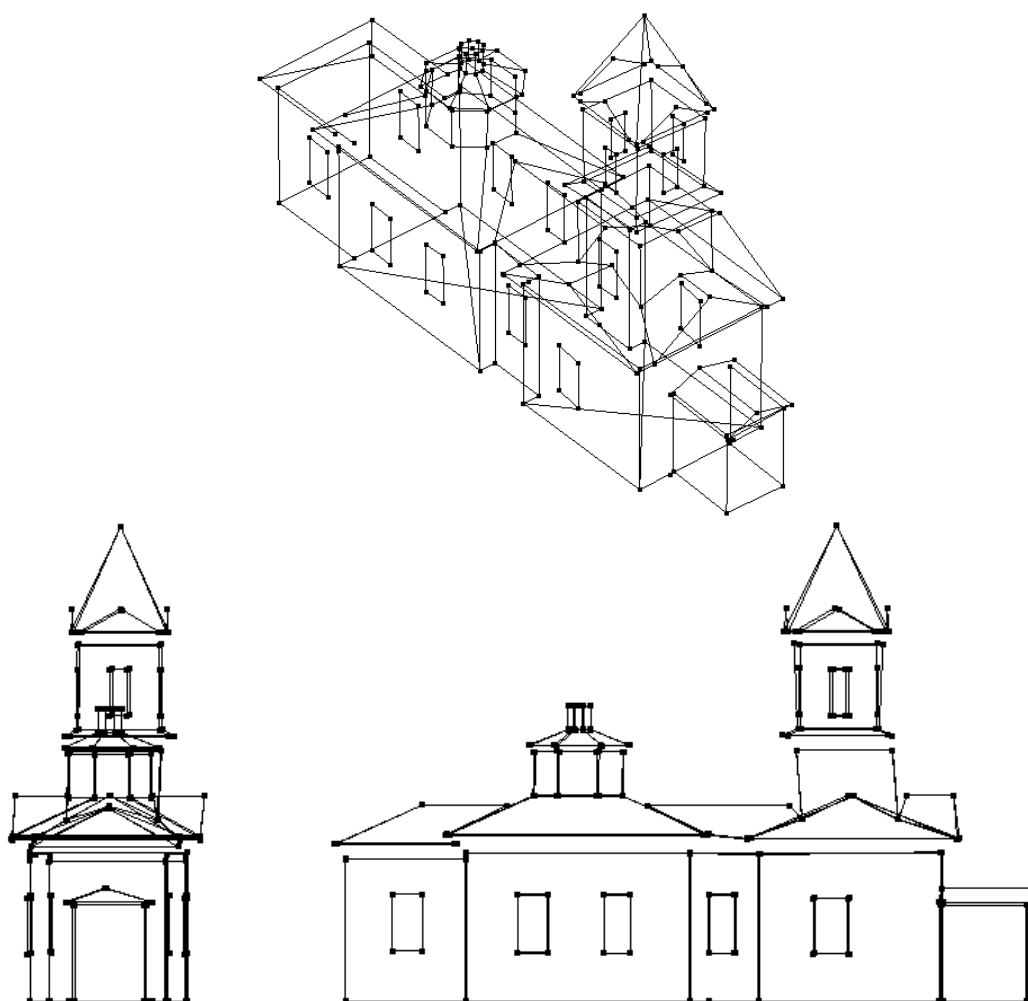


Рис. 2. Трехмерная проволочная модель основных архитектурных форм Никольского храма: аксонометрическая проекция (вверху); вид с запада (слева); вид с севера (справа)



Рис. 3. Сохранившийся сруб бывшей Пантелеимоновской церкви с. Мариинского (фото 2003 г.)

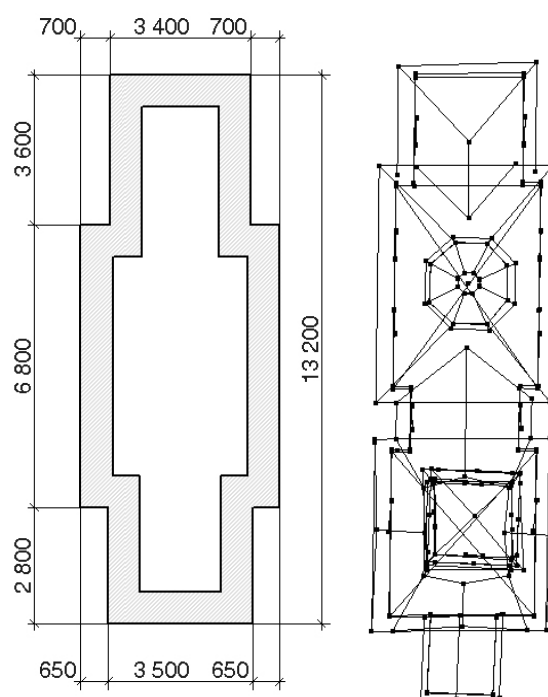


Рис. 4. План основной части сруба церкви с. Мариинского (слева) и план Никольской церкви, полученный по восстановленной трехмерной модели (справа)

ASCII-файл несложного обменного формата, либо в файл формата 3ds системы трехмерного моделирования 3D Studio. Наличие этой функции в составе 3DRecoverer позволяет для последующей доработки модели использовать специализированные системы трехмерного моделирования.

Апробация и обсуждение

Первый опыт в использовании программы 3DRecoverer был получен при выполнении работ по восстановлению исторического облика полностью утраченного деревянного храма села Усть-Кан по сохранившемуся фотоизображению, приведенному на рис 1.

Деревянный храм села Усть-Кан был построен в 1875 году бийским купцом Тимофеем Евграфовичем Мокиным. Архитектура храма достаточно отчетливо отражает черты купеческой застройки. Наиболее характерной деталью являются деревянные перила со столбиками, устроенные по периметру основной и алтарной части крыши.

Результатом работы в программе 3DRecoverer над снимком Усть-Канского храма явилось построение трехмерного «проволочного» каркаса основных архитектурных форм храма (рис 2).

Наибольшую сложность представляло построение модели невидимых частей. Для решения этой проблемы была учтена важная особенность церковной архитектуры – это симметрия здания относительно оси восток-запад. Таким образом, были выявлены план фундамента, расположение окон на невидимом фасаде. Также удалось установить профиль крыши, которая над основной частью храма являлась четырехскатной, усеченной сверху восьмигранным барабаном. Над алтарной частью форма крыши – трехскатная.

Анализ полученной модели позволил выявить дефекты здания. Высота сруба первого яруса колокольни оказалась несколько ниже сруба основной части храма. К началу XX в., когда был сделан снимок, храм просуществовал, как минимум, тридцать лет. За это время нижние венцы храма ветшали, что приводило к просадке здания. Нагрузка на венцы колокольни, с учетом ее высоты, больше, чем на венцы центральной части храма, поэтому сруб колокольни оказался более просевшим. Кроме того, качество обшивки стен достаточно низкое. Во многих частях наблюдаются прогибы обшивочных реек. Также нарушена горизонтальность некоторых карнизов. Уровень оконных проемов нижнего яруса колокольни и центральной

части храма расположены не на одном уровне.

Вместе с дефектами здания на качество модели в немалой степени повлияли оптические искажения фотографии. Более всего это было заметно на высотных частях здания, где влияние оптики фотокамеры выразилось в отклонении геометрических центров соответствующих ярусов от вертикали, проведенной из центра основания храма (базовой плоскости).

Несмотря на указанные сложности, приемлемость полученной с помощью 3DRecoverer проволочной модели была подтверждена сопоставлением относительных размеров модели Усть-Канского храма с размерами сохранившегося сруба бывшей церкви села Мариинского (рис 3). Дело в том, что этот храм был построен в 1886 г. тем же купцом Т.Е. Мокиным и, по всей видимости, по тому же проекту. По крайней мере, пропорции основания центральной части восстановленной модели Усть-Канской церкви и пропорции основания сохранившегося сруба Мариинской церкви оказались идентичными (рис. 4).

Рассмотренный в работе математический аппарат и его реализация в программе 3DRecoverer могут быть использованы для практических занятий по таким предметам, как проективная геометрия, компьютерная графика, истории архитектуры соответствующих специальностей вузов. Кроме того, с учетом некоторых дополнений данная программа позволит в значительной степени облегчить решение задач восстановления и реставрации частично или полностью утраченных памятников истории и архитектуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Иванов М.Э. Проблемы создания 3D-изображений объектов историко-культурного наследия // Тезисы конференции EVA'2000, Москва, 2000, с. 14-4-2.
- 2.Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Prentice Hall, 2002. – 693 p.
- 3.Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2004. – 672 p.
- 4.Цифровая обработка изображений в информационных системах/ И. С. Грузман, В. С. Киричук и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
- 5.Criminisi A., Reid I., Zisserman A. Single View Metrology. // IJCV, 40 (2000), №2. pp. 123–148.
- 6.Kushal A.M., Bansal V., Banerjee S. A simple method for interactive 3D reconstruction and camera calibration from a single view. // Proc. Indian Conf. on Computer Vision, Graphics and Image Processing, Ahmedabad, 2002, pp 19-25.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №3 2004