

## Трехмерная реконструкция утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению методом перспективных масштабов

М. П. Руденко

Донецкий национальный технический университет

[m.p.rudenko@mail.ru](mailto:m.p.rudenko@mail.ru)

*Руденко М. П. Трехмерная реконструкция утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению методом перспективных масштабов. В статье рассматривается метод Structure-from-Motion как метод построения трехмерной реконструкции утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению, показаны его положительные стороны и недостатки. На примере построения трехмерной реконструкции дома Юза-Свицына предложен метод перспективных масштабов.*

### Введение

Виртуальная реконструкция утраченных памятников архитектуры позволяет сегодня полностью воссоздать их первоначальный облик, применяя последние тенденции в компьютерном моделировании. Процесс создания виртуальной архитектурной среды представляет не только научный интерес, но и историко-культурный, так как приносит вклад в культурное наследие общества.

В настоящее время предлагаются различные методы трехмерной реконструкции различных моделей по фотографическим изображениям. Использование этих методов для реконструкции утраченных памятников архитектуры является особенно интересной задачей, так как зачастую первоначальный облик памятников архитектуры сохраняется только на фотографиях или рисунках, а сам он находится либо в полуразрушенном состоянии, либо полностью утрачен.

Целью данной статьи является рассмотрение метода Structure-from-Motion как метода построения трехмерной реконструкции утраченных памятников архитектуры, а также предложение метода перспективных масштабов на примере виртуального воссоздания дома Юза-Свицына.

### Анализ исследований и публикаций

Анализ исследований и публикаций показал большой интерес к теме построения трехмерной реконструкции моделей по фотографическим изображениям [1-4], и не меньший интерес к задачам автоматизации такого построения [5-7].

В [5] рассматривается метод трехмерной реконструкции сцены по фотографическим изображениям Structure-from-Motion (SFM), предложенный в [8]. В [6,7] предложен

модифицированный метод SFM, улучшающий качество трехмерной реконструкции модели. Источник [9] также использует метод SFM из [8] и предлагает свой метод построения трехмерной реконструкции модели по фотографическому изображению, ссылаясь на [10-12]. Данный метод трехмерной реконструкции модели был взят как пример для решения задачи построения трехмерной реконструкции утраченных памятников архитектуры, так как решает задачи трехмерного построения архитектурных зданий, используя моделирование, основанное на построении геометрических блоков.

### **Рассмотрение метода SFM как задачи построения трехмерной реконструкции утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению**

В [9] метод SFM встроено в программу трехмерной реконструкции архитектурных зданий по фотографическому изображению "Façade". Его суть сводится к определению параметров модели и положения камеры таким образом - в программу импортируется фотографическое изображение архитектурного здания, затем сверху на фотографии намечаются основные горизонтальные и вертикальные отрезки для того, чтобы обрисовать форму здания. Эти отрезки в дальнейшем создают трехмерные блоки, которые и формируют модель архитектурного здания.

Задача метода SFM состоит из:

1. Начальной оценки положений камеры и параметров модели, так как архитектурное здание на фотографии расположено в перспективе.

2. Минимизации целевой функции по отношению к параметрам модели и положению камеры для того, чтобы точно определить пропорции и координаты будущей трехмерной модели (рис.1).

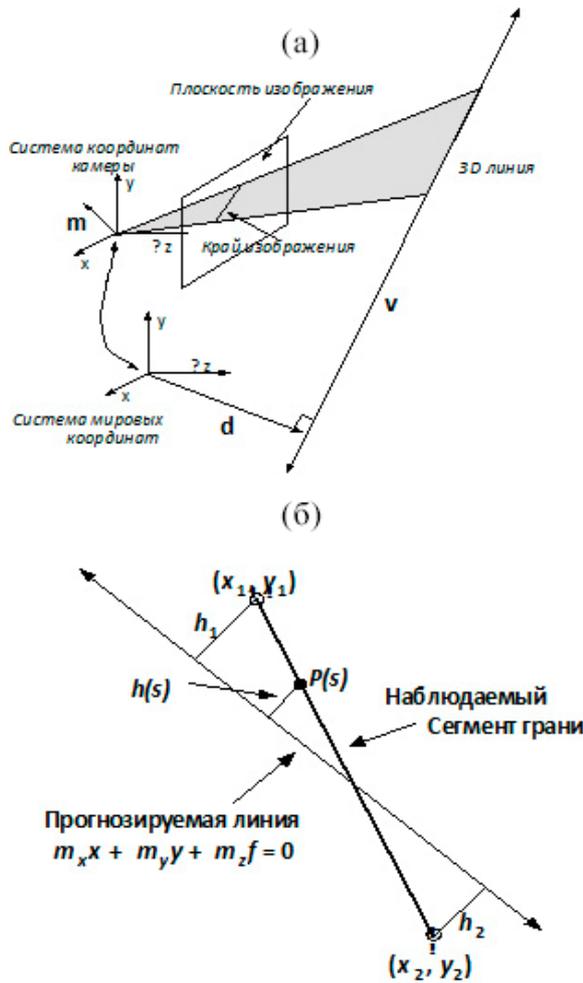


Рисунок 1 – а) Проецирование прямой линии на плоскость изображения камеры; б) Функция ошибки, используемая в алгоритме реконструкции [9].

На рис.1 (а) показано, как прямая линия в модели проецируется на плоскость изображения камеры. Прямую линию можно определить парой векторов  $v$  и  $d$ , где  $v$  – направление линии, а  $d$  – точка на линии. Положение камеры относительно мировых координат задается матрицей вращения  $R_j$  и вектором сдвига  $t_j$ . Тогда вектор нормали, обозначенный буквой  $m$  на рисунке, вычисляется из следующего выражения:

$$m = R_j(v \times (d - t_j)) \quad (1)$$

Проекция линии на плоскость изображения представляет собой просто пересечение плоскости, обозначенной  $m$  с плоскостью изображения, расположенной в точке  $z = -f$ , где  $f$  – фокусное расстояние камеры. Таким образом, край изображения

определяется уравнением:

$$m_x x + m_y y + m_z f = 0 \quad (2)$$

На рис.1 (б) показано, как рассчитывается ошибка между наблюдаемым краем изображения

$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2)\}$  и прогнозируемой линией изображения для каждого соответствия. Точки на наблюдаемом краевом сегменте могут быть параметризованы одной скалярной переменной

$s \in [0, 1]$ , где  $l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$  длина края.

Пусть  $h(s)$  – функция, которая возвращает кратчайшее расстояние от точки на отрезке  $p(s)$  до прогнозируемого края.

При этих определениях полная ошибка между наблюдаемым сегментом края и прогнозируемым краем рассчитывается как:

$$Err_i = \frac{l}{3}(h_1^2 + h_1 h_2 + h_2^2) = m^T (A^T B A) m \quad (3)$$

где:

$$m = (m_x, m_y, m_z)^T$$

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B = \frac{l}{3(m_x^2 + m_y^2)} \begin{pmatrix} 1 & 0.5 \\ 0.5 & 1 \end{pmatrix}$$

Функция (будем называть ее  $O$ ), которая в итоге рассчитывает натуральную длину края в системе мировых координат является суммой ошибок, т.е.  $O = \sum Err_i$ .

Так как графический редактор “Facade” является устаревшим, практические вычисления для нахождения натуральных величин отрезков, отмеченных на фотографическом изображении выполняются в графической среде AutoCAD.

Используя данные формулы для построения натуральных величин отрезков в перспективе, необходимо учитывать, что значения матрицы вращения  $R_j$  определяется случайным образом и требует не меньше десяти итераций для получения значений, близких к правильным. В [5] предложено несколько методов представления  $R_j$ , а также сделан вывод о том, что задача представления этого параметра является трудоемкой и требующей длительной работы для получения необходимого значения координат.

При всей простоте расчетных формул данного метода существуют такие недостатки как: поиск удачного значения матрицы вращения; установление фокусного расстояния; зависимость построения натуральных величин отрезков от координатных значений.

### **Использование метода перспективных масштабов при построении трехмерной реконструкции дома Юза-Свицына**

Рассмотренный выше метод SFM определения натуральных величин отрезков, отмеченных на фотографическом изображении натолкнул на мысль о том, что чтобы сам алгоритм работал быстрее и эффективнее, а также требовал меньших затрат при нахождении натуральных величин, необходимо заменить сам метод поиска натуральных величин, который не требует значений матрицы вращения и фокусного расстояния. Таким методом оказался метод построения перспективных масштабов.

Суть этого метода состоит в следующем:

1. Определение и указание точек схода на фотографическом изображении архитектурного здания;

2. Определение и указание натуральных величин отмеченных отрезков на фотографическом изображении методом перспективных масштабов, подробно описанном в [13, С.231-240].

Для практического применения данного метода был выбран частично утраченный памятник архитектуры г. Донецка дом Юза-Свицына. Дом основателя Донецка английского магната Джона Джеймса Юза является истинным памятником архитектуры для нашего города, так как - это одно из первых исторических зданий, спроектированных и построенных в первые годы основания Донецка, выполненное в «кирпичном» стиле, характерном для проектирования общественных и гражданских зданий на рубеже XIX-XX веков (рис.2). Само здание визуально состоит из параллелепипедов, что упрощает построение его трехмерной модели в графической среде AutoCAD.

Алгоритм применения метода перспективных масштабов состоит из следующих пунктов:

1. Импортировать фотографию в рабочую среду графического редактора AutoCAD в начало координат (0,0,0);

2. Наметить точки схода ( $O_1, O_2$ );

3. Наметить отрезки (AB, BC, BE) на фотографии, натуральные величины которых будут определяться (АкВк, ВкСк, ВкЕк);

4. На основе выполнения пункта 3 последовательно построить трехмерную модель архитектурного памятника.

Так как трехмерная модель дома Юза-Свицына состоит из параллелепипедов, то для определения параметров параллелепипеда требуются только три величины – высота, ширина и глубина (рис.3).

После построения, трехмерная модель архитектурного памятника импортируется в

графическую среду 3dsMax, в которой детальнее выстраивается фасад здания, накладывается текстура и конечный вид модели визуализируется (рис.4).

(а)



(б)



(в)



Рисунок 2 – а) Фотография дома Юза, начало XX века; б) нынешнее состояние дома Юза, в) боковой фасад дома [14].

Метод перспективных масштабов является более простым в поиске натуральных величин отрезков, намеченных на фотографии, и дальнейшем построении трехмерной модели по ряду причин:

1. Не требует параметров матрицы вращения камеры, а также параметра фокусного расстояния;

2. Не зависит от координат отрезков;

3. Определяет только пропорциональную зависимость между элементами трехмерной модели, которые потом можно масштабировать.

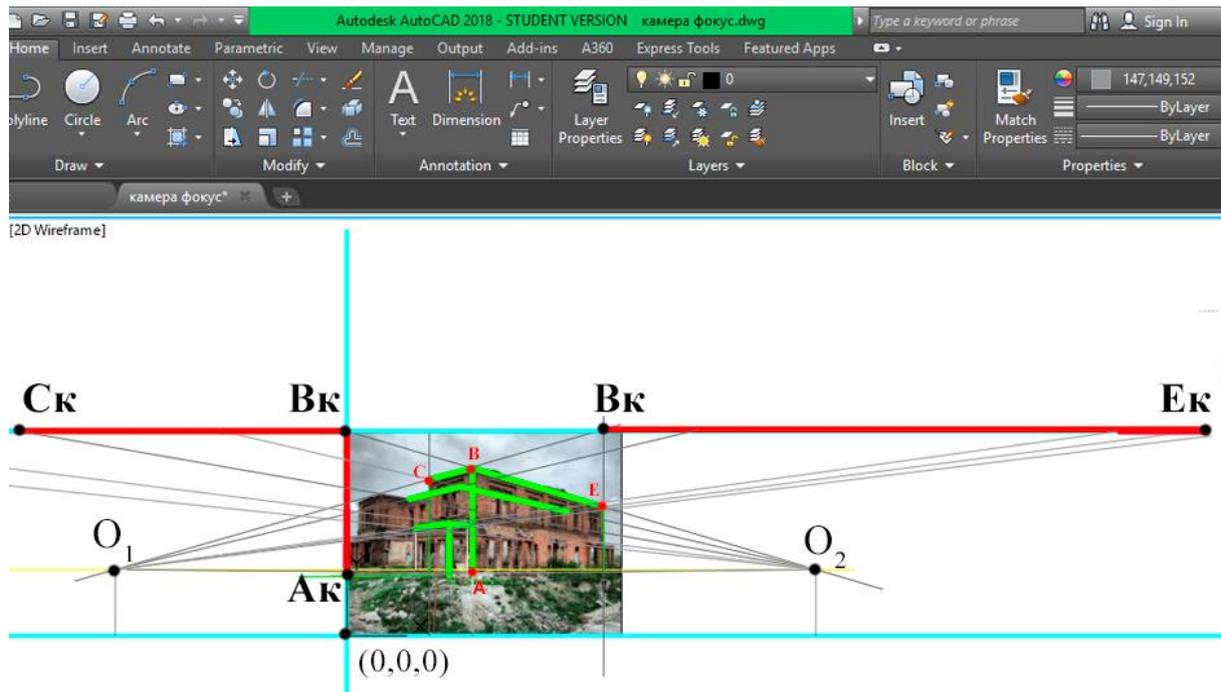


Рисунок 3 – Визуализация метода перспективных масштабов в AutoCAD.

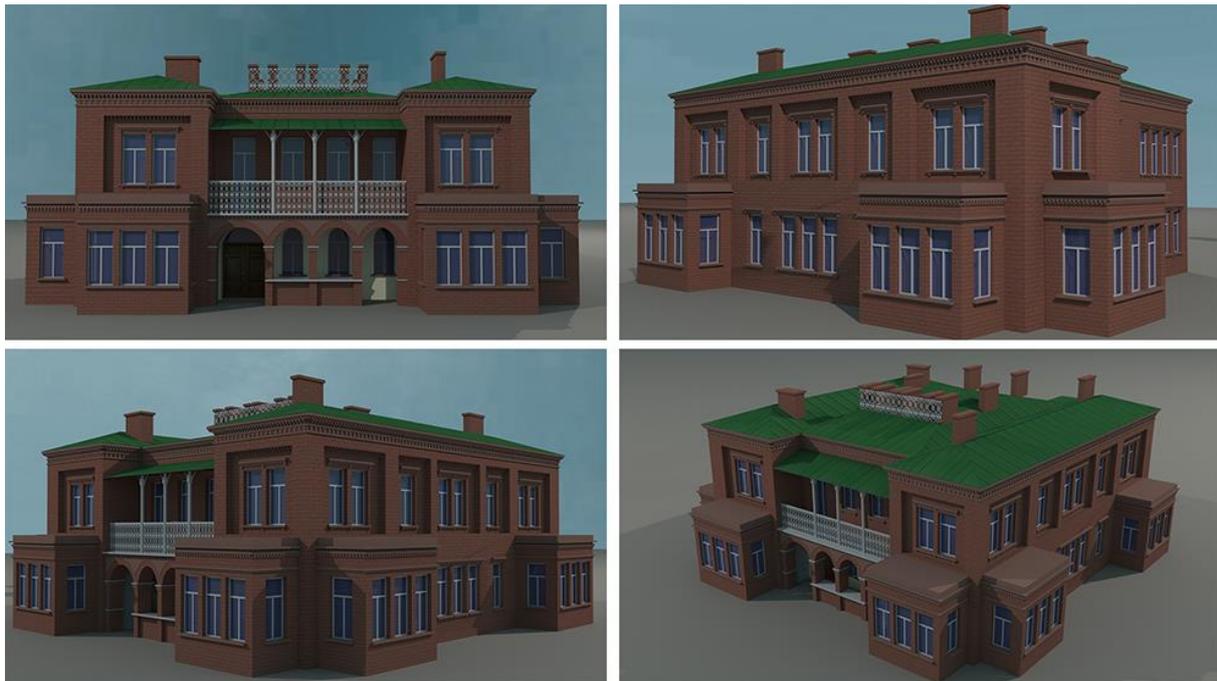


Рисунок 4 – Трехмерная реконструкция дома Юза-Свицына.

### Выводы

Рассмотрение метода SFM как метода построения трехмерной реконструкции утраченных памятников архитектуры показало, что при всей простоте формул поиска натуральных величин отрезков, отмеченных на фотографии, такие значения как параметры фокусного расстояния и матрицы вращения камеры, требуют неоднократного поиска и уточнения, что занимает много времени.

Предложенный метод перспективных масштабов как метод поиска натуральных величин отрезков, отмеченный на фотографии, является более простым в исполнении, так как не требует вычисления параметров камеры и фокусного расстояния.

Перспективы дальнейшего исследования следующие:

1. Автоматизация метода перспективных масштабов средствами графической среды AutoCAD с использованием встроенного языка

программирования AutoLisp.

2. Использование метода перспективных масштабов для построения более сложных трехмерных объектов, созданных из окружностей, многоугольников и кривых.

### Литература

1. Руденко М.П. Методы виртуальной реконструкции памятников архитектуры // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, № 1(8) – 2(9), 2015. – С. 110-116.

2. Крейдун Ю.А., Жилин С.И. Построение пространственных моделей утраченных архитектурных памятников по одиночным изображениям // Ползуновский вестник, № 3, 2004. – С. 83-88.

3. Меженин А.В., Тозик В.Т. Реконструкция трехмерных моделей по растровым изображениям // Научно-технический вестник информационных технологий, механики, оптики, № 45, 2007. – С. 203-207.

4. Захаров А.А., Тужилкин А.Ю. Трехмерная реконструкция визуальной обстановки по видеоизображениям на основе вероятностного подхода // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, № 2, 2014. – С. 45-49.

5. Ковальский С.В., Зори С.А. Исследование алгоритма извлечения трехмерной структуры объектов из их фотоизображений для реконструкции геометрических моделей сцен городских ландшафтов. В кн. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка (ИКВТ-2005). Донецк: ДонНТУ, 2005, с.12-21.

6. Ковальский С.В., Зори С.А. Модифицированный алгоритм реконструкции

трехмерных сцен городских ландшафтов на основе фотоизображений / Моделирование и компьютерная графика: Материалы I-й Международной научно-технической конференции. – Донецк, ДонНТУ, Министерство образования и науки Украины, 2005. – С. 70-76.

7. Зори С.А., Ковальский С.В. Автоматизация создания трехмерных моделей реальных ландшафтов на основе фотографий // Известия ЮФУ. Технические науки, № 5(106), 2010. - С. 134-140.

8. Camillo J. Taylor and David J. Kriegman. Structure and motion from line segments in multiple images. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 17(11), November 1995.

9. Debevec P.E. Modeling and Rendering Architecture from Photographs. Doctoral dissertation. University of California at Berkeley. 1996.

10. Camillo J. Taylor and David J. Kriegman. Minimization on the lie group  $so(3)$  and related manifolds. Technical Report 9405, Center for Systems Science, Dept. of Electrical Engineering, Yale University, New Haven, CT, April 1994.

11. Eric N. Mortensen and William A. Barrett. Intelligent scissors for image composition. In SIGGRAPH '95, 1995.

12. Steven Smith. Geometric Optimization Methods for Adaptive Filtering. PhD thesis, Harvard University, Division of Applied Sciences, Cambridge MA, September 1993.

13. Соловьев С.А., Буланже Г.В. Черчение и перспектива. – М.: Высшая школа, 1982. – 319 с: ил.

14. <http://all-photo.ru/empire/index.ru.html?kk=2e4b12b045&big=on&img=18604#picts>. – Российская Империя в фотографиях.

*Руденко М. П. Трехмерная реконструкция утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению методом перспективных масштабов. В статье рассматривается метод Structure-from-Motion как метод построения трехмерной реконструкции утраченных памятников архитектуры по фотографическому изображению, показаны его положительные стороны и недостатки. На примере построения трехмерной реконструкции дома Юза-Свицына предложен метод перспективных масштабов.*

*Rudenko M. P. The lost architectural monuments virtual reconstruction from photograph by the perspective scales method. The Structure-from-Motion method as the method of the lost architectural monuments virtual reconstruction from photograph is considered, its advantages and disadvantages are shown. The perspective scales method is offered to make the virtual reconstruction of the Hughes-Svitsyn House.*

*Статья поступила в редакцию 4 мая 2018 г.  
Рекомендована к публикации доцентом Зори С. А.*