

**РЕКОНСТРУКЦИЯ СЛОЖНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ  
МЕТОДОМ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ**

**М. В. Фурса**

*Институт физико-технической информатики, г. Протвино, Россия  
Фраунгоферовский институт медиакоммуникаций, г. Санкт-Августин, Германия  
E-mail: zyx@go.ru*

Рассмотрена проблема создания точных 3D-моделей сложных реальных объектов для использования в приложениях виртуальной реальности. Представлена одна из систем, осуществляющих реконструкцию трехмерных координат сцены по ее плоскому изображению с помощью структурированного освещения. Описаны проблемы, возникающие в процессе работы с системой и ведущие к ошибкам реконструкции. Предложена новая методика, позволяющая улучшить качество работы данной системы за счет учета оптических искажений и использования нескольких изображений для реконструкции одного и того же участка сцены.

**Введение.** Системы виртуальной реальности могут существенно повысить эффективность визуального анализа данных. Задача таких систем – погрузить исследователя в искусственный мир анализируемой модели и предоставить естественный интуитивный интерфейс для взаимодействия с ее элементами.

Появление доступных систем виртуальной реальности значительно увеличивает потребность в разработке для них новых приложений. Важный элемент любого приложения – используемые в нем цифровые модели. Трехмерное моделирование является весьма востребованным, но достаточно сложным и кропотливым занятием. Поэтому на рынке присутствует целый ряд устройств трехмерного сканирования объектов, которые могут помочь дизайнерам.

Существующие технологии для создания трехмерных моделей аппаратными методами в автоматическом или полуавтоматическом режиме разделяются на контактные и бесконтактные (рис. 1). Первые подразумевают наличие механического устройства – щупа, с помощью которого в компьютер передаются координаты выбранных оператором точек. Система позиционирования и вычисления координат таких приборов построена на основе работы механических датчиков. От их точности зависит точность работы прибора в целом. Вторые являются значительно более сложными приборами. Некоторые устройства включают в себя лазерные датчики (заменяющие механический щуп контактных 3D-сканеров) и цифровой фотоаппарат, используемый



Рис. 1. Классификация технологий получения трехмерной модели объекта

для большей точности сканирования, что позволяет получить не только геометрию объектов, но и их текстуры.

Вместо лазерных датчиков могут применяться и более сложные системы. Например, в последнее время начали появляться системы 3D-сканирования на базе ультразвуковых установок, преимуществом которых перед конкурентами является режим сканирования тел для определения их внутренней структуры или тел, погруженных в однородную среду.

Активно ведутся разработки магнитных сканеров, использующих для определения пространственных координат объекта изменение его пространственного магнитного поля. Однако ультразвуковые и магнитные сканеры крайне чувствительны к различного рода шумам. Так, первые могут реагировать на погодные явления, звуковые волны, создаваемые другим оборудованием, кондиционерами или флюоресцентными лампами. Источником помех для вторых могут быть металлические объекты в помещении и электропроводка.

Оптические сканеры подразделяются на активные и пассивные. Пассивные – это устройства, основанные на двух камерах и использующие для реконструкции тени, силуэты объекта и т. д., однако особой точностью они не обладают.

Активные оптические 3D-сканеры имеют согласованные источник света и приемник изображения. В качестве источника может быть использован лазер или кодированный по форме или цвету световой пучок, проецируемый на объект. Приемником изображения является обычная CCD-камера, фотографирующая объект с отраженным от его поверхности сигналом от источника [1, 2]. Источником в системе структурированного света будет вспышка со встроенной сеткой, состоящей, как правило, из параллельных и перпендикулярных линий. Сетка может оптически масштабироваться, изменяя свой размер и расстояние между соседними линиями. Таким образом регулируются разрешение и точность реконструкции. Меньший размер сетки позволяет достичь более точных результатов, однако увеличивает трудоемкость метода.

Реконструкция координат узлов сетки в такой системе основана на принципе триангуляции. Системы структурированного света активно применяются для сканирования относительно небольших объектов (размером  $50 \times 50$  см). Как будет показано далее, после определенных улучшений она может применяться и для сканирования крупных объектов.

**Постановка задачи.** В последнее время в рамках проектов по сохранению культурного наследия возникла необходимость в создании моделей архитектурных объектов и статуй [3–6]. Классический метод создания моделей статуй с помощью измерительных устройств является очень трудоемким процессом из-за сложной формы статуй и имеет ограниченную точность, что не позволяет достоверно выполнять реставрационные работы, создавать каталоги, репродукции, воссоздавать расположение статуй в виртуальных моделях исторических архитектурных ансамблей и т. д.

Для создания моделей статуй выбрана оптическая система структурированного света [7], которая должна была обеспечить приемлемую точность реконструкции с разрешением менее 1 мм. Первые эксперименты дали относительно большое количество грубых ошибок реконструкции, а также систематическое накопление ошибок, ведущее к невозможности создания точной замкнутой модели статуи. Анализ полученных результатов показал:

1. На большинстве изображений линии сетки, проецируемые вспышкой, были видны довольно отчетливо. Однако примерно на 20 % изображений они различались плохо, что привело к сбою автоматической реконструкции. Для улучшения распознавания проекционных линий требовалось увеличить контрастность большинства изображений.

2. Автоматическая реконструкция не учитывала оптических искажений камеры, что, в свою очередь, привело к накоплению ошибок и невозможности создания замкнутой реконструированной модели. Основными источниками искажений изображения, полученного камерой, являются радиальные (рис. 2) и тангенциальные искажения, вследствие чего изображение объекта выглядит некорректно и каждая точка снимаемого камерой объекта более или менее смещена, в результате пропорции на изображении отличаются от реальных.

Эксперименты показали, что в нашем случае всеми искажениями, кроме радиальных, можно пренебречь. Измерения производились с помощью метода Хейкилла [8], доступного как в виде модулей для программы Matlab, так и в составе Microsoft DirectX SDK. Кроме того, благодаря съемке статуи с перекрытием стала возможной реконструкция определенных частей статуи по нескольким изображениям.

Таким образом, были сформулированы следующие задачи: определение трехмерных координат объекта с учетом оптических искажений камеры, уменьшение количества грубых ошибок реконструкции за счет исключения из расчетов наименее точно реконструированных элементов, увеличение точности реконст-

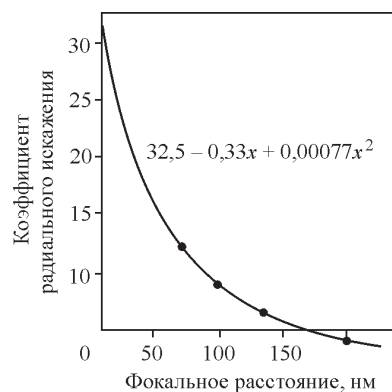


Рис. 2. Зависимость радиальных искажений камеры Canon D60 от фокусного расстояния

рукции в результате использования информации о локальной точности калибровки системы.

**Описание системы.** В комплекте со сканером ShapeCam поставляется программное обеспечение ShapeSnatcher, с помощью которого осуществляется полуавтоматическая реконструкция. Сканер состоит из:

- 1) цифровой камеры Canon D60 с разрешением 6 Мпикселей;
- 2) объектива Canon 70-200/2.8 IS USM L;
- 3) вспышки с линзой и насадкой в виде сетки, по искажениям которой осуществляется реконструкция;
- 4) управляющей рамки, имеющей места крепления для камеры и вспышки, кнопку спуска затвора камеры, синхронизованную со вспышкой 3, подвижные лазерные диоды слева и справа для фиксации расстояния;
- 5) вспышки Canon Speedlite 550EX для получения текстур.

Последовательность действий при сканировании выглядит следующим образом:

*Установка параметров.* Перед началом работы необходимо зафиксировать камеру и вспышку на управляющей рамке и задать им оптимальные для условий съемки установки.

*Калибровка.* Для калибровки системы требуется обработать снимок калибровочной цели со спроецированной на нее сеткой (рис. 3). Калибровочная цель состоит из двух перпендикулярных плоскостей белого цвета, на которые по вертикали и горизонтали нанесены черные круги радиусом 1,5 см, находящиеся на расстоянии 2,0 см друг от друга. Если сетка распознается хорошо, то изображение может быть использовано для калибровки, которая заключается в определении внутренних и внешних параметров камеры по конфигурации эллипсов – кругов калибровочной цели. Затем калибровочная цель и различные геометрические объекты, находящиеся на таком же расстоянии от камеры, могут быть реконструированы. В результате калибровки фокусное расстояние линзы фиксируется, а лазерные лучи управляющей рамки устанавливаются так, чтобы они сводились на калибровочной цели в одну точку, что позволяет по их совпадению на сканируемом объекте определять необходимое расстояние. После каждого изменения параметров камеры,

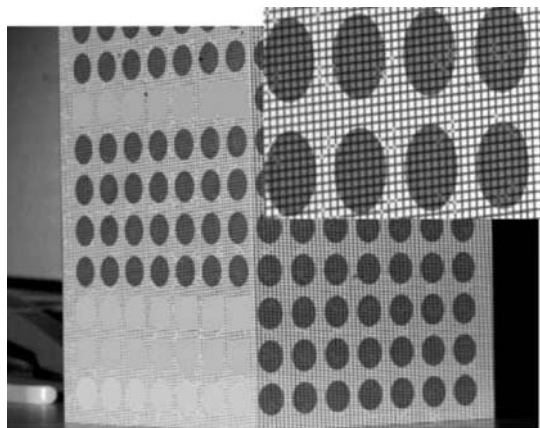


Рис. 3. Изображение калибровочной цели со спроецированной на нее сеткой

вспышки или их конфигурации на управляющей рамке, а также при большом количестве снимков процесс калибровки должен быть повторен.

*Фотографирование объектов с сеткой и без нее.* После калибровки можно переходить к съемке объектов для реконструкции. Одно изображение соответствует прямоугольнику размером примерно  $30 \times 20$  см, поэтому если объект крупный, то необходимо условно поделить его на такие прямоугольники и фотографировать их с перекрытием для последующего соединения.

*Реконструкция формы объекта.* Когда фотографирование закончено, осуществляется поиск сетки на всех изображениях, указывается калибровочный файл для каждого изображения и производится реконструкция узлов сетки в декартовой системе координат. Реконструированная модель записывается в открытый файл формата SS3D. Количество полигонов, получаемых из одного изображения, составляет несколько десятков тысяч. Их точное количество зависит от настроек вспышки и формы объекта.

*Наложение текстуры на поверхность.* После реконструкции каждому объекту ставится в соответствие файл текстуры, которая должна быть точно совмещена с объектом по характерным точкам.

*Объединение участков объекта в единое целое.* Реконструированные участки статуи объединяются в одной модели. Это объединение осуществляется как самой программой ShapeSnatcher, так и альтернативными пакетами программ Scanalyze [9]. Работа программ основана на поиске одинаковых опорных точек в двух объектах и вычислении их относительного положения при совмещении этих точек.

Следует отметить особенности процесса сканирования непосредственно на Вилле Боргезе в Риме. Статуя Давида высотой около 2 м установлена на пьедестале высотой около 0,5 м. Нижняя часть статуи фотографировалась оператором, стоящим на полу и держащим устройство ShapeCam в руках (выдержка  $1/60$  с позволяла снимать без штатива), с расстояния около 1 м. Для фотографирования ее верхней части использовалась специальная платформа, которая могла передвигаться как вертикально, так и горизонтально. Один оператор с устройством ShapeCam находился на платформе, а другой – перемещал ее в нужную позицию. Дополнительные источники освещения не применялись.

**Предлагаемый метод реконструкции.** При реконструкции для каждого изображения использовались данные каждой точки (узла сетки), записанные в файл, который сохраняется программой ShapeSnatcher (файл SS3D):

- номер узла сетки;
- реконструированные 3D-координаты точки в системе координат калибровочной цели (миллиметры);
- 2D-координаты точки на изображении (пиксели);
- 2D-координаты узла сетки, проецируемой вспышкой (внутренние координаты вспышки);
- номера соседних узлов сетки справа, слева, сверху и снизу для упрощения поиска.

Кроме того, использовалась калибровочная цель с известной геометрией.

Процесс реконструкции включает следующие действия: вычисление зависимости оптических искажений камеры от расстояния; пересчет калибровочных параметров камеры с учетом оптических искажений и калибровочных параметров вспышки; вычисление точности калибровки для всех элементов сетки; пересчет координат всех точек файла SS3D с учетом оптичес-

ких искажений и поправок, которые вычислены по изображениям одного и того же участка статуи.

Проективное преобразование точки  $M$  в мировой системе координат в точку  $m$  в плоскости изображения в гомогенных координатах запишем как  $m = PM$  ( $P$  – матрица проективного преобразования) [10–12]. Без учета искажений матрица  $P$  имеет вид

$$P = \begin{bmatrix} a_u & -a_u \cos \theta & u_0 \\ 0 & a_v / \sin \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad t] = \begin{bmatrix} q_1^T & q_{14} \\ q_2^T & q_{24} \\ q_3^T & q_{34} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где первая матрица отвечает за внутренние параметры камеры:  $a_u$  и  $a_v$  – масштабирующие коэффициенты, умноженные на фокусное расстояние камеры,  $(u_0, v_0)$  – оптический центр камеры,  $\theta$  – угол между сторонами ячеек камеры; вторая матрица – за внешние параметры:  $t$  – вектор смещения камеры относительно центра координат,  $R$  – матрица вращения камеры.

Наличие искажений приводит к тому, что фактически на изображении оказывается не точка  $m$ , а точка  $m_d = m + \delta m$ . В случае радиальных искажений смещение  $\delta m = (\delta u, \delta v)$  определяется уравнениями

$$\begin{aligned} \delta u^{(r)} &= u(k_1 r^2 + k_2 r^4); \\ \delta v^{(r)} &= v(k_1 r^2 + k_2 r^4), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние до центра искажений;  $k_i$  – коэффициенты радиального искажения первого и второго порядков.

Задача калибровки состоит в вычислении внутренних и внешних параметров камеры в зависимости от модели. Существуют разные способы калибровки [13]. В некоторых случаях вычисляется сразу матрица  $P$ . Для разложения ее на составляющие, соответствующие внутренним и внешним параметрам, используется декомпозиция в соответствии с уравнением (1).

В данной работе применялся метод калибровки Р. Цая [14]. Результатом работы программы калибровки являются внутренние и внешние параметры камеры. Из этих параметров можно сконструировать матрицу  $P$  в соответствии с (1).

Алгоритм калибровки камеры имеет следующий вид:

- запись 3D-координаты центров кругов калибровочной цели  $M_{ki}$  в декартовой системе координат;
- нахождение на изображении 2D-координаты центров кругов калибровочной цели для каждого калибровочного изображения путем его морфологического анализа;
- вычисление координат центров кругов без искажений  $m_{ki}$  по зависимости коэффициента радиального искажения от расстояния и уравнению (2) с использованием информации в файле изображения об установках камеры в момент съемки;
- калибровка камеры по методу Р. Цая и вычисление калибровочной матрицы  $P_1$ , связывающей 3D-координаты точек  $M_{ki}$  с их проекциями  $m_{ki}$ , без искажений.

Для калибровки вспышки необходимо:

1. Вычислить 3D-координаты узлов проекции сетки  $M_{s_i}$ . Для этого требуется получить уравнения плоскостей калибровочной цели, вычислить уравнения лучей, соединяющих проекции узлов сетки  $m_{s_i}$  на плоскость изображения камеры с точками  $M_{s_i}$ , с помощью калибровочной матрицы  $P_1$  и найти точки пересечения лучей и плоскости для всех узлов сетки.

2. Каждый узел сетки, которую проецирует вспышка, имеет внутренние координаты  $m_{v_i}$ . Используя их как 2D-координаты проекции сетки и вычисленные 3D-координаты узлов проекции сетки, с помощью метода Р. Цая (аналогично камере) можно вычислить калибровочную матрицу вспышки  $P_2$ .

После того как вычислена матрица  $P$ , находим ошибки обратного проецирования для точек, использованных при калибровке. Эти ошибки являются характеристиками точности калибровки.

Вычислив матрицы  $P_1$  и  $P_2$ , получаем координаты реконструированной точки статуи.

Фактически имеется два луча, соединяющих точку  $M$  с ее образами на камере и на вспышке. Из-за различных погрешностей эти лучи не пересекаются в одной точке. Точка, находящаяся на минимальном расстоянии от лучей, и есть точка  $M$ . Чтобы найти ее координаты, нужно решить систему уравнений

$$\begin{aligned} q_{i1}^T M - u_i q_{i3}^T M &= u_i q_{i34} - q_{i14}; \\ q_{i2}^T M - v_i q_{i3}^T M &= v_i q_{i34} - q_{i24}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $(u_1, v_1)$  – координаты образа точки  $M$  в плоскости изображения камеры;  $(u_2, v_2)$  – координаты образа точки  $M$  на сетке вспышки;  $q_{1ij}$  и  $q_{2ij}$  – элементы соответствующих матриц  $P_1$  и  $P_2$  (1).

Уравнение (3) можно переписать в виде  $AM = b$  и применить для его решения метод факторизации. Вычислив координаты точки  $M$ , находим вектор невязки  $r = AM - b$  для каждой реконструированной точки. После вычисления данные в файле SS3D обновляются. При этом в отдельный файл записывается информация о положении камеры и вспышки в системе координат калибровочной цели, а также информация о невязках. После обновления всех файлов SS3D можно вычислить окончательные координаты точки  $M$  в системе координат модели. При этом один из реконструированных участков определяет систему координат модели, а матрицы поворота и вектора смещений для остальных участков вычисляются относительно первого с использованием характерных точек, присутствующих на обоих участках. Далее информация о невязках и точности калибровки камеры может использоваться следующим образом:

1) если невязка превышает некоторое пороговое значение, то это свидетельствует о вероятной ошибке реконструкции, и поэтому такая точка по возможности не должна применяться для вычислений, а вместо нее может использоваться точка, реконструированная по другому изображению;

2) если точка  $M$  успешно реконструирована на нескольких изображениях, то ее окончательные координаты должны быть вычислены с учетом локальной точности калибровки системы таким образом, чтобы вклад от наиболее точно прокалиброванных изображений был максимальным.

На основе вышеописанных методов созданы соответствующие программы, работающие в полуавтоматическом режиме.

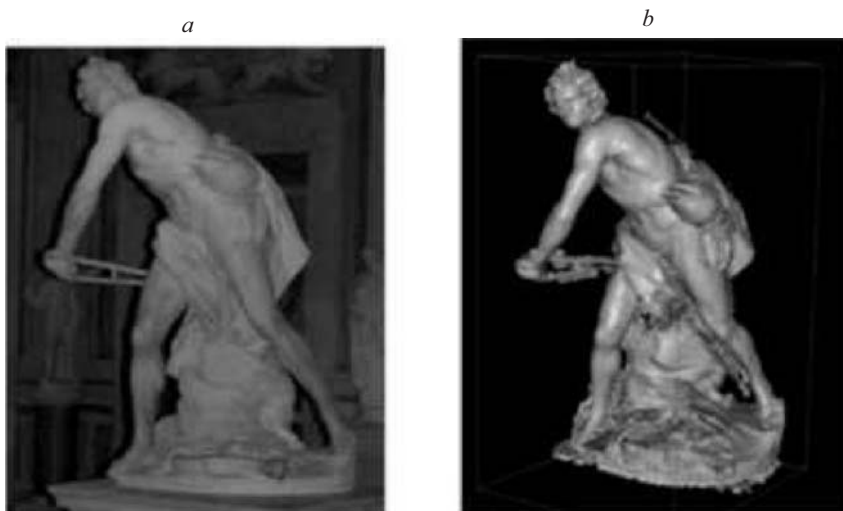


Рис. 4. Статуя Давида: фотография (а) и реконструированная модель (b)

**Заключение.** В данной работе предложена новая методика, позволяющая улучшить качество трехмерных моделей за счет вычисления ошибок реконструкции для выявления неверно реконструированных элементов и использования информации о локальной точности калибровки таким образом, чтобы наиболее точно прокалиброванные участки сцены вносили наибольший вклад в окончательный результат. Такая методика использовалась при реализации проекта по созданию моделей статуй Жана Лоренцо Бернини (1598–1680 гг.) на Вилле Боргезе в Риме. В частности, была реконструирована модель статуи Давида (рис. 4, а, b). В общей сложности затрачено примерно 30 ч на фотографирование и сделано около 3000 фотографий. На обработку результатов потребовалось более 6 месяцев. Помимо непосредственно реконструкции была подготовлена информационная база для вычислений функций отражения и распределения света. Полная реконструированная модель содержала порядка миллиона полигонов. Ошибка реконструкции не превышала 1 мм, когда проецируемая сетка распознавалась хорошо. Использование вышеописанного метода позволило сократить количество ошибок реконструкции и увеличить точность системы. Однако в некоторых случаях из-за проблем с освещением, особенностей поверхности или сложности доступа к некоторым участкам статуи реконструкция оказывалась невозможной. Такие области обрабатывались вручную и измерений ошибок не проводилось.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Isdale J.** 3D Scanner Technology Review // <http://vr.isdale.com/3DScanners/3DScannerReview.html>
2. **Geomagic** 3D Scanner Report // <http://www.geomagic.com/support/resources/3scannersA.pdf>
3. **Digital** Michelangelo Project // <http://graphics.Stanford.edu/projects/mich/>



4. **Levoy M., Pulli K., Curless B. et al.** The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues // Proc. of the 27th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. N. Y.: ACM Press–Addison-Wesley Publ. Co., 2000. P. 131.
5. **Pieta Project** // <http://www.research.ibm.com/pieta/>
6. **Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H. et al.** Studying sculpture with a digital model: Understanding Michelangelo's Pieta of the Cathedral // ACM SIGGRAPH Conf.: Abstracts and Applications. N. Y.: ACM Press, 1998. P. 281.
7. **Eyetrionics Company** // <http://www.eyetrionics.com/>
8. **Heikkila J., Silven O.** A Four-step camera calibration procedure with implicit image correction // Proc. of the IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society Press, 1997. P. 1106.
9. **Система** объединения данных Scanalyze // <http://graphics.Stanford.edu/software/scanalyze/>
10. **Faugeras O. D.** Three-Dimensional Computer Vision. MIT Press, 1992.
11. **Faugeras O. D., Luong Q.-T.** The Geometry of Multiple Images. MIT Press, 2001.
12. **Hartley R., Zisserman A.** Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
13. **Armangue X., Salvi J., Batlle J.** A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation // Pattern Recogn. 2002. **35**, N 7. P. 1617.
14. **Tsai R. Y.** An efficient and accurate camera calibration technique for 3-D machine vision // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami Beach, USA: IEEE, 1986. P. 364.

*Поступила в редакцию 31 августа 2006 г.*