

11, ноябрь 2015

УДК 004.925+004.932

Оценка погрешности восстановления формы объекта методом фотометрического стерео

Кузнецов А.О., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы»*

Научный руководитель: Горевой А.В., ассистент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы»*

1. Введение

В ряде приложений в различных областях компьютерной графики и компьютерного зрения используется метод фотометрического стерео (ФС). Суть метода заключается в реконструкции рельефа объекта на базе ряда изображений, полученных с одного ракурса при различных конфигурациях освещения. Такой метод может применяться сам по себе или совместно со стереоскопическим или параллаксным методом в техническом зрении, эндоскопии или распознавании лиц [1-4].

Входными данными метода ФС являются изображения и координаты источников освещения, заданные в системе координат камеры. Известное положение источников света позволяет вычислить вектора нормалей для каждого пикселя изображения зарегистрированного объекта, на их основе рассчитываются вектора производных, суммирование которых позволяет определить значение высоты рельефа объекта в рассматриваемой точке поверхности. При создании математического аппарата метода ФС сделан ряд допущений, позволяющих свести решаемую задачу к линейной относительно вектора нормали к поверхности объекта [1, 5]. При использовании метода ФС на практике это приводит к ряду методических погрешностей и не позволяет точно восстановить рельеф объекта. Другой причиной искажения формы являются погрешности аппаратуры регистрации изображений (шумы приемника излучения и электронного тракта камеры) и погрешности определения параметров используемых математических моделей (например, координат источников света). Целью данной работы является анализ источников погрешности восстановления формы объекта, связанных с используемыми

математическими моделями источника излучения и неточным определением их параметров.

Оценка влияния каждого фактора в отдельности на погрешность восстановления может быть получена при помощи компьютерного моделирования процесса регистрации изображений и последующего восстановления рельефа объекта на основе синтезированных изображений. Поэтому в данной работе ставится задача разработки программного обеспечения (ПО), позволяющего как выполнить моделирование, так и реализовать метод ФС.

Для оценки корректности используемых математических моделей требуется сравнить результаты компьютерного моделирования с результатами реального эксперимента. Таким образом, другой решаемой задачей является разработка методики проведения эксперимента, позволяющей зарегистрировать серии изображений, определить все необходимые данные для оценки погрешности и разделить влияние различных источников погрешности на результат.

2. Математический аппарат метода фотометрического стерео

Обычным допущением для метода ФС является использование модели диффузного отражения света от поверхности и точечного источника света [1, 5]. В таком случае яркость каждой точки объекта определяется следующим выражением

$$L = \rho(\vec{N} \cdot \vec{S})E, \quad (1)$$

где ρ — коэффициент диффузного отражения в данной точке объекта, E — освещенность, создаваемая источником излучения, $\vec{S}$ — вектор направления на источник излучения из рассматриваемой точки объекта (вектор направления падающего луча), $\vec{N}$ — вектор нормали к поверхности объекта в данной точке. Яркость излучения одинакова по всем направлениям, в том числе и в направлении камеры $\vec{K}$, как показано на рисунке 1.

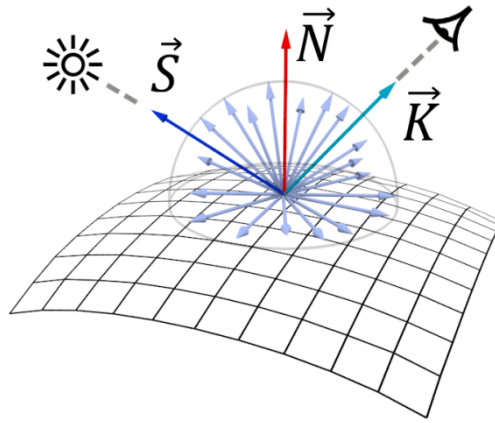


Рис. 1. Диффузное отражение света от поверхности

Используя приближение геометрической оптики и модель формирования изображения идеальной положительной линзой, каждому пикселу камеры можно однозначно поставить в соответствие некоторую точку объекта. Такую математическую модель в литературе часто называют проективной моделью камеры [1, 6]. Далее будем считать, что сигналы, полученные с каждого пикселя камеры, линейно связаны с его освещенностью, и примем еще ряд допущений. Тогда с учетом формулы (1) выражение для расчета освещенности каждого пикселя зарегистрированного изображения рассматриваемого объекта можно записать в виде [1, 5]

$$I_i(x, y) = k\rho(x, y)\vec{N}(x, y) \cdot \vec{S}_i(x, y), \quad (2)$$

$$\vec{I} = k\rho[S]\vec{N}, \quad (3)$$

где x, y — координаты пикселя (опущены в дальнейших выражениях), k — коэффициент, связывающий реакцию камеры с падающим излучением, ρ — коэффициент диффузного отражения в точке объекта, спроецированной в данную точку изображения, $[S]$ — матрица, строками которой являются координаты источников освещения $\vec{S}_i(x, y)$, i — номер изображения и источника света.

Взяв $n \geq 3$ изображений, зарегистрированных при различных положениях источника освещения (пример показан на рисунке 2), можно составить систему из уравнений типа (2) и (3) для каждого пикселя изображения и решить ее относительно вектора нормали $\vec{N}$:

$$\vec{N} = \frac{1}{k\rho} ([S]^T[S])^{-1}[S] \vec{I}. \quad (4)$$

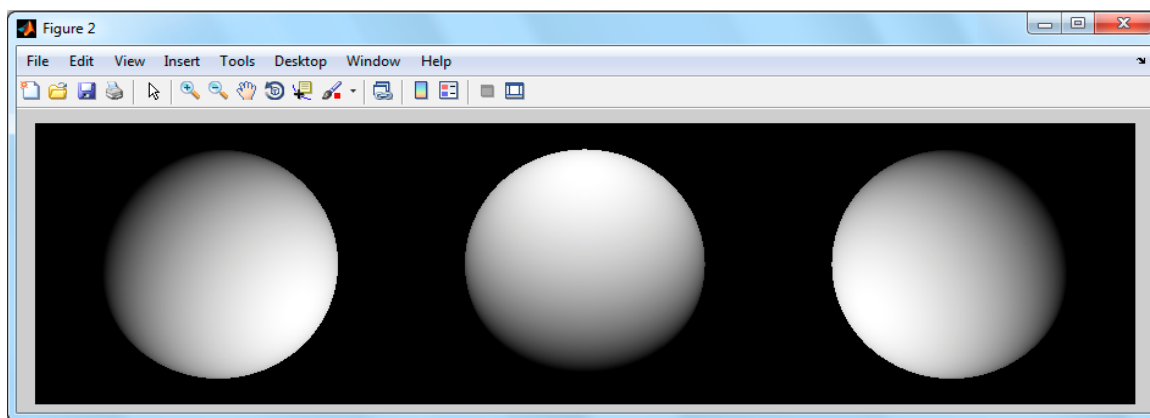


Рис. 2. — Изображения диффузно отражающего шара при различных положениях источника света

Поверхность объекта представляется в виде двумерной функции $z(x, y)$. Производные для каждой точки восстанавливаемой поверхности рассчитываются на базе найденных по формуле (4) и затем нормированных векторов нормалей согласно выражению

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{N_x}{N_z}; \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{N_y}{N_z}. \quad (5)$$

Используя полученные производные, можно получить значение высоты в точке, проинтегрировав по произвольной траектории [1]

$$z(x, y) = \oint_L \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) dl + z_0, \quad (6)$$

где L — траектория интегрирования, начинающаяся в некоторой фиксированной точке (x_0, y_0) и заканчивающаяся в точке (x, y) , z_0 — высота поверхности в начальной точке. В идеальной ситуации интегрирование по всем возможным путям должно давать одинаковые результаты, но на практике это не так. Возможно усреднять результаты, полученные при разных путях интегрирования, чтобы уменьшить погрешность результатов или «обойти» области, в которых значения производных не были вычислены. Дальнейшим развитием этой идеи является использование итерационных методов минимизации, например, метода, показанного в работе [7]. Пример восстановленной данным методом поверхности показан на рисунке 3. В качестве исходных данных были использованы три изображения диффузно отражающего шара (показаны на рисунке 2), полученные в результате математического моделирования.

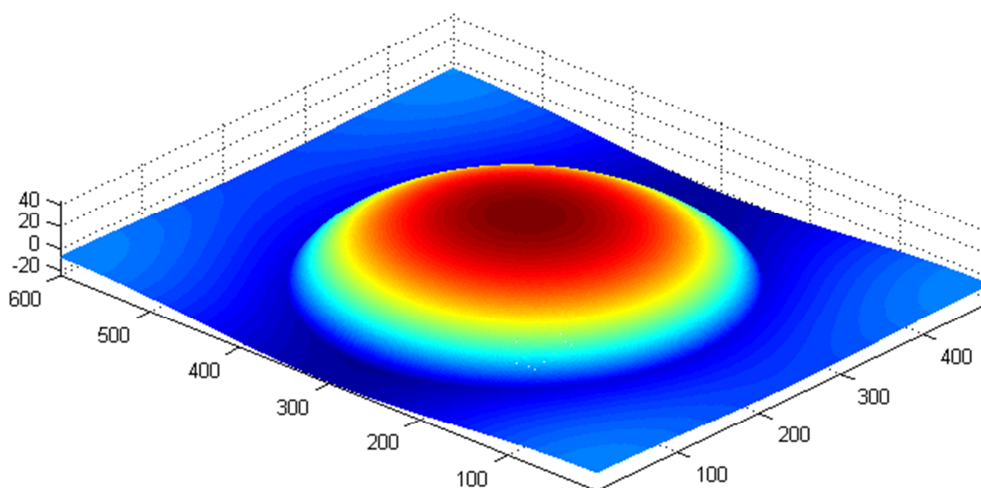


Рис. 3. — Восстановленная поверхность шара

Обычно система координат (СК) выбирается таким образом, чтобы найденные значения $z(x, y)$ соответствовали расстояниям вдоль оси OZ СК камеры, совпадающей с оптической осью объектива. Тогда значения высоты рельефа объекта $z(x, y)$ можно перевести в трехмерные координаты $\vec{P}(x, y)$ каждой точки объекта, используя проективную модель камеры [1, 6]. Отметим, что расстояние z_0 до объекта в начальной точке не может быть определено рассмотренным алгоритмом ФС и должно быть измерено другими методами. Эти методы могут работать сходным с ФС образом и не требовать дополнительной аппаратуры [5].

3. Оценка погрешностей восстановления формы объекта на основе компьютерного моделирования

При выводе выражений (1) – (3) было сделано множество допущений, позволяющих свести решаемую задачу к линейной относительно вектора нормали к поверхности объекта. При использовании метода ФС на практике это приводит к ряду методических погрешностей. Например, выражение (1) подразумевает, что все точки объекта находятся на примерно одинаковом расстоянии от источника и освещенность в данных точках одинакова, не учитывается зеркальная составляющая отраженного излучения [1]. При выводе выражения (2) пренебрегают зависимостью потока излучения, попадающего в объектив камеры, от угла наклона главного луча к оптической оси и угла между главным лучом и нормалью к поверхности. Другой причиной искажения формы поверхности объекта, восстановленной методом ФС, являются инструментальные погрешности, например, шумы приемника излучения и электронного тракта камеры. В данной работе рассматриваются погрешности восстановления формы объекта, связанные

с используемыми математическими моделями источника излучения и неточным определением их параметров.

Для вычисления вектора нормали по формуле (4) необходимо определить направление вектора источника освещения в каждой точке объекта. Если считать, что координаты источников света $\vec{L}_i$ известны в СК камеры, то для определения направления на источник света требуется знать координаты точки объекта $\vec{P}$:

$$\vec{S}_i(x, y) = \frac{\vec{L}_i - \vec{P}(x, y)}{|\vec{L}_i - \vec{P}(x, y)|}. \quad (7)$$

При восстановлении рельефа объекта, когда координаты вершин объекта заранее неизвестны, точно вычислить вектор $\vec{S}_i(x, y)$ в каждой вершине невозможно, обычно принимают вектор $\vec{S}_i$ одинаковым для всех точек объекта. Чтобы получить такие условия при проведении реального эксперимента, возникает необходимость создания параллельного пучка света, который может быть получен с использованием коллимированного источника излучения, что не всегда удобно. Как показано на рисунке 4, использование удаленного на значительное расстояние от объекта источника света позволяет отчасти решить эту проблему, но приводит к увеличению рабочего пространства и снижению освещенности на объекте.

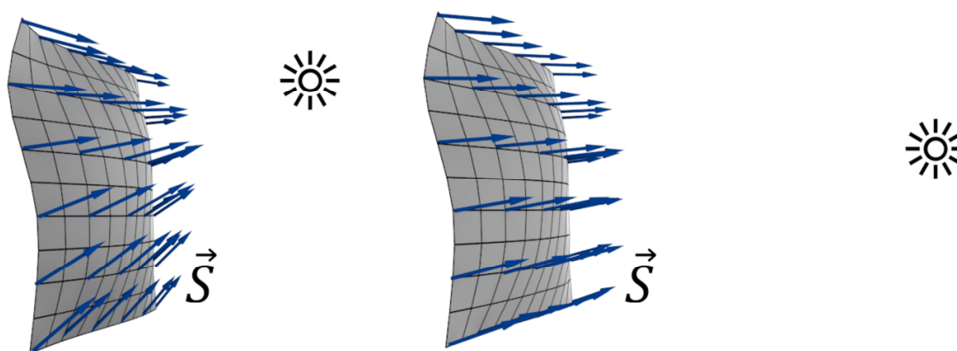


Рис. 4. Влияние расположения точечного источника света на ориентацию векторов направления на источник

В итоге на практике используются точечные источники, расположенные на конечном расстоянии от объекта, принимаемые при вычислениях на стадии восстановления рельефа за бесконечно удаленные. Подобное допущение, как и неточно известные координаты источников излучения, вносят погрешность в результат вычисления нормалей, и, следовательно, в вычисленные координаты точек поверхности объекта.

Для решения этой проблемы можно в качестве первого приближения считать объект плоскостью, расположенной на некотором расстоянии от камеры z_0 , и найти направления на источник света $\vec{S}_i(x, y)$ для каждой точки объекта по формуле (7). В том случае, когда используется дополнительное оборудование для определения расстояния до объекта в начальной точке, расстояние z_0 известно достаточно точно, в остальных случаях можно использовать приблизительную оценку. После первичного восстановления рельефа объекта методом ФС можно использовать найденные трехмерные координаты $\vec{P}(x, y)$, повторно вычислить вектора $\vec{S}_i(x, y)$ и повторить алгоритм ФС. Данную процедуру можно повторить несколько раз до сходимости. Также возможно встраивание вычисления векторов $\vec{S}_i(x, y)$ в алгоритм восстановления рельефа по разным траекториям или при использовании глобальной минимизации.

Для оценки величины подобной погрешности в среде Matlab было разработано ПО, позволяющее имитировать процесс регистрации изображений, а также ПО, реализующее алгоритм ФС. Использование компьютерного моделирования позволяет провести эксперимент с точно известными условиями, например, использовать действительно точечный источник, расположенный в точке с точно известными координатами в СК камеры, и строго диффузное отражение от поверхности. Тем самым можно оценить влияние каждого фактора на общую погрешность формы по отдельности, изменяя параметры математических моделей, используемые для создания изображений и для восстановления рельефа. Результаты работы ПО имитации процесса регистрации изображений были показаны на рисунке 2, а результаты работы ПО, реализующего алгоритм ФС, — на рисунке 3. Для интегрирования использовался метод, описанный в работе [7].

Разработанное ПО было использовано для оценки погрешности восстановления поверхности диффузно отражающего шара радиусом 50 мм. Для первой серии изображений три источника света находились на расстоянии 200 мм от объекта, для второй серии изображений — на расстоянии 500 мм от объекта. При создании изображений использовались те же допущения, что и при выводе выражений (1) – (3). Восстановление рельефа проводилось для двух вариантов: в первом случае использовались одинаковые вектора $\vec{S}_i$, соответствующие бесконечно удаленным источникам света; во втором использовались вектора $\vec{S}_i(x, y)$, вычисленные по известным координатам источника света с приближением формы объекта плоскостью. Параметры математической модели камеры полагались точно известными. Результаты восстановления рельефа показаны на рисунках 5 и 6 в виде сечений, синим показан

восстановленный профиль видимой части шара, красным — эталонный. Для количественной оценки погрешности восстановления использовалось среднеквадратическое отклонение (СКО) восстановленных координат от эталонных, вычисленное по всем видимым камерой точкам шара. Использование приближения плоскостью позволило снизить СКО с 2,56 мм до 0,58 мм в случае расстояния до источников света 200 мм, и с 0,55 мм до 0,08 мм в случае расстояния 500 мм.

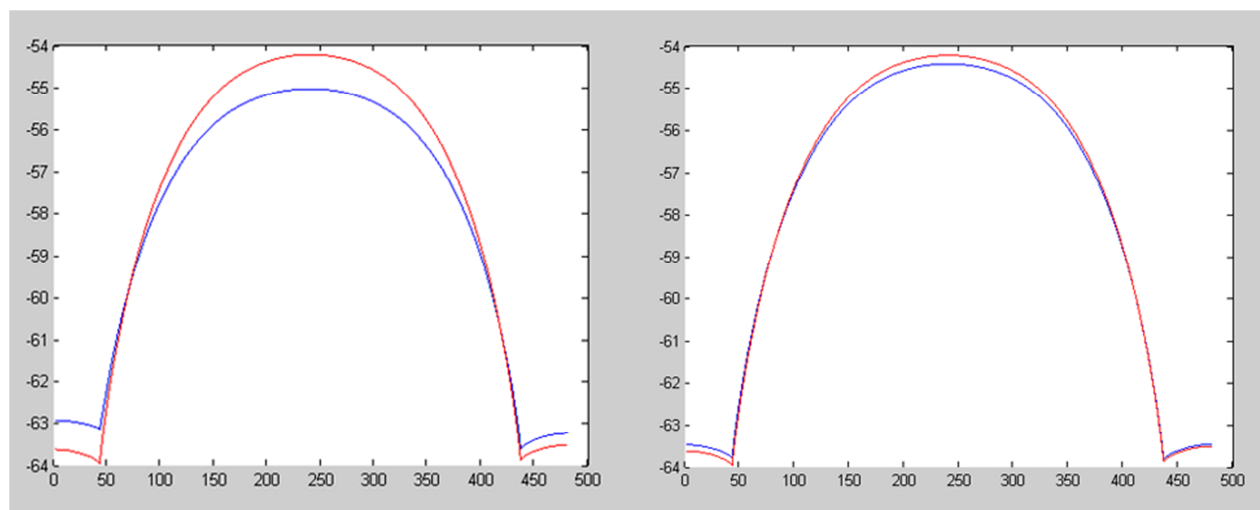


Рис. 5. Сечение восстановленного объекта при расстоянии до источника света 200 мм для допущения о бесконечно удаленном источнике (слева) и для приближения объекта плоскостью (справа)

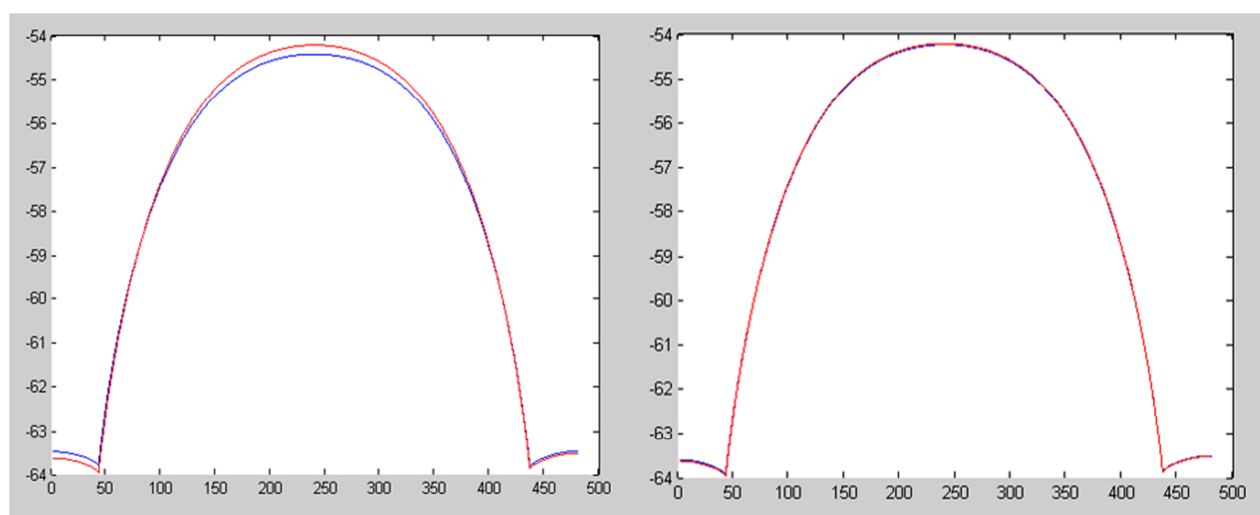


Рис. 6. Сечение восстановленного объекта при расстоянии до источника света 500 мм для допущения о бесконечно удаленном источнике (слева) и для приближения объекта плоскостью (справа)

4. Оценка погрешностей восстановления формы объекта на основе эксперимента

Проведение эксперимента с целью определения погрешности восстановления формы объекта методом ФС, вызванной допущением о бесконечно удаленном источнике или неточно определенными координатами источника, требует определения трехмерных координат источников света с достаточно высокой точностью. Поскольку в эксперименте предполагается использовать один произвольно перемещающийся источник света, требуется предусмотреть возможность определения его координат по каждому зарегистрированному изображению. Для этого может быть использовано плоское зеркало [8] или зеркально отражающий шар [5]. Поскольку использование одного зеркально отражающего шара позволит определить только направление на источник света, но не расстояние до него, в данной работе использовано несколько зеркальных шаров, как в работе [5]. Стоит также отметить, что подобный подход к определению источников может использоваться не только для проведения подобного эксперимента, но и в реальной ситуации. Например, в работе [2] показано, что для получения трехмерной модели лица человека можно использовать глаза в качестве аналога зеркальных шаров.

Для того, чтобы сделать возможным вычисление координат источника света в СК камеры был изготовлен тест-объект, изображенный на рисунке 7(а). Тест-объект состоит из жестко закрепленных друг относительно друга плоской поверхности с нанесенной на нее координатной сеткой (см. рисунок 7(б)) и четырех зеркально отражающих шаров. Координаты маркеров (углов клеток шахматной доски) сетки измерены и привязаны к СК тест-объекта. Тест-объект и помещенный перед ним восстанавливаемый объект (показан в виде цилиндра) закреплены на штативе, установленном перед камерой, источник света перемещается произвольно.

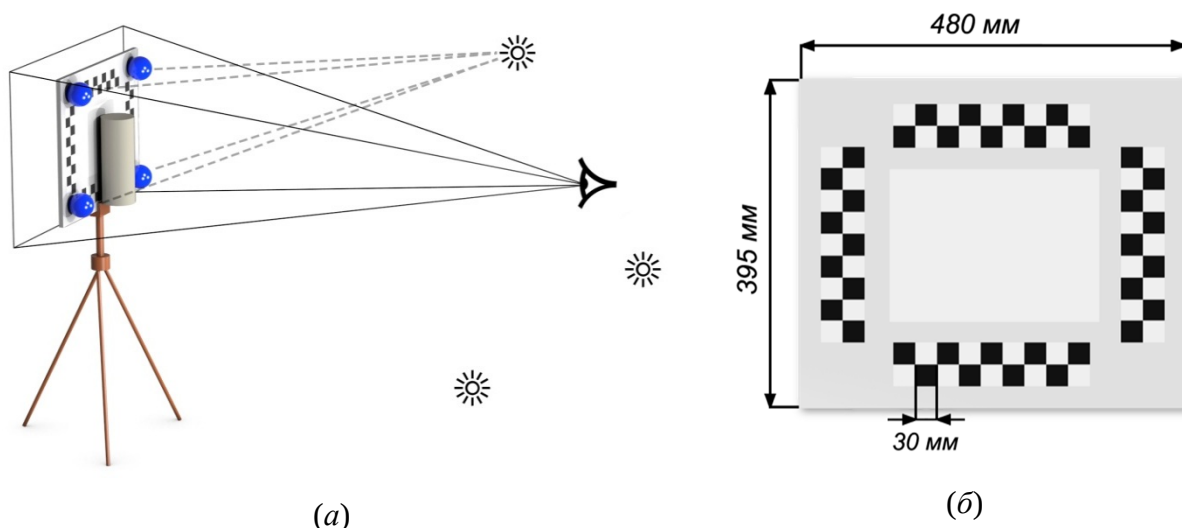


Рис. 7. Схема экспериментальной установки с тест-объектом (а) и вид координатной сетки тест-объекта (б)

При проведении эксперимента использовались цифровая камера Imperx IVG-B2520 с форматом матрицы $2/3''$, разрешением 2456×2058 и размером элемента $3,45 \text{ мкм}$; объектив с фокусным расстоянием 25 мм . Для проведения эксперимента камера была предварительно откалибрована с использованием алгоритма, предложенного в работе [9], и его реализации в среде Matlab [10]. При этом были вычислены внутренние параметры камеры, использованные далее при всех вычислениях. Штатив с тест-объектом и восстанавливаемым объектом располагались на расстоянии около 2 м от камеры, при этом тест-объект занимал большую часть углового поля (как показано на рисунке 8(а)). Использовались несколько восстанавливаемых объектов: белая плоскость (центральная часть тест-объекта), бумажный цилиндр, гипсовый бюст. В качестве источника излучения использовалась галогенная лампа с телом излучения размером $\varnothing 2 \times 8 \text{ мм}$. Для каждого объекта были зарегистрированы серии из трех изображений при трех разных положениях источника излучения, источник излучения находился примерно на таком же расстоянии от объекта, как и камера, расстояние между положениями источника составляло около $1,5 \dots 2 \text{ м}$. Также для каждого объекта в серии было зарегистрировано одно (четвертое) изображение при общем верхнем освещении.

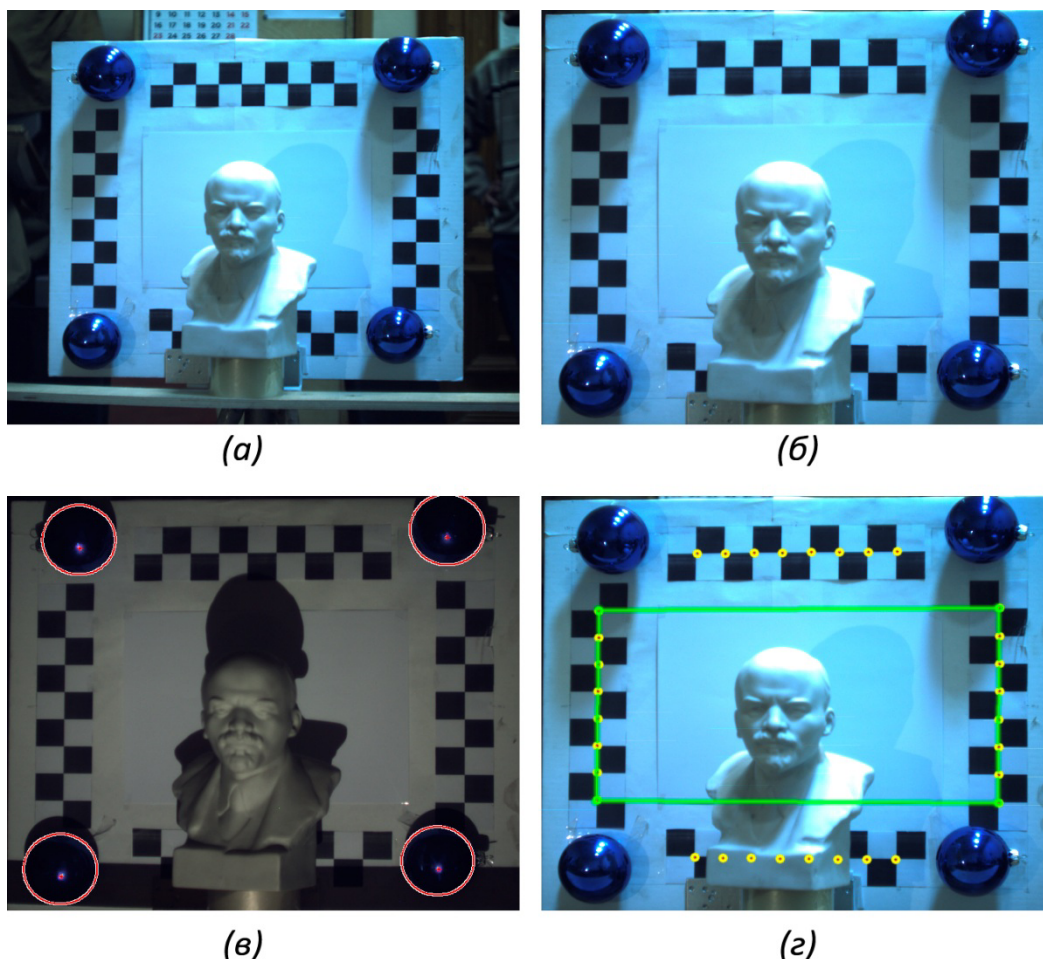


Рис. 8. Этапы работы алгоритма обработки изображений.

Каждая серия из четырех зарегистрированных изображений подвергалась обработке с целью определения координат источников света и восстановления рельефа объекта. Работу алгоритма обработки изображений и восстановления рельефа объекта можно разделить на следующие этапы:

1. **Выделение области интереса.** На изображении с верхним освещением оператором выделяется область, содержащая координатную сетку, восстанавливаемый объект и зеркально отражающие шары. Результат показан на рисунке 8(б).

2. **Поиск окружностей.** На текущем этапе происходит выделение контуров шаров на изображении с использованием преобразования Хафа [11]. Результат выделения показан на рисунке 8(в).

3. **Выделение бликов.** Программой выделяются наиболее яркие области для трех изображений серии, зарегистрированных при разных положениях источника света. Если выделенная область попадает в зону, ограниченную какой-либо окружностью, то она расценивается, как блик от источника освещения, и вычисляются

координаты центра тяжести этого блика на изображении (показаны красными точками на рисунке 8(в)).

4. Выделение координатной сетки на изображении. На данном этапе определяется расположение элементов координатной сетки (углов клеток шахматной доски) на изображении, как показано на рисунке 8(г). При этом используется тот же алгоритм, что и в работе [10].

5. Вычисление координат сетки в СК камеры. На базе полученных на прошлом этапе данных происходит расчет гомографии и определение связи СК тест-объекта и СК камеры [6, 9].

6. Расчет положения источника света. При известном расположении СК тест-объекта можно определить расположение закрепленных на тест-объекте шаров в СК камеры, используя выделенные ранее окружности и считая, что центры шаров отстоят от доски на расстояние, равное радиусу шара. Луч, проведенный через блик на поверхности шара и нормаль к поверхности шара в данной точке, позволяют определить направление на источник освещения [5], как показано на рисунке 9(а). Определив для каждого из четырех шаров направление на источник света, трехмерные координаты источника в СК камеры можно найти как точку, лежащую на минимальном расстоянии от четырех найденных лучей, как показано на рисунке 9(б). В качестве первого приближения используется среднее между точками середины общего перпендикуляра для каждой из шести пар лучей, далее используются реализованные в среде Matlab алгоритмы нелинейной минимизации [12]. Остаточная ошибка (среднеквадратическое расстояние от найденной точки до всех лучей) позволяет дать приблизительную оценку погрешности определения координат источника излучения данным методом. Для проведенного эксперимента типичные значения СКО определения координат источника освещения приведенным способом составляли $\sigma_x = 40$ мм, $\sigma_y = 60$ мм, $\sigma_z = 120$ мм. Полученные оценки погрешности координат источника могут быть использованы при компьютерном моделировании для получения количественной оценки влияния данного фактора на общую погрешность восстановления.

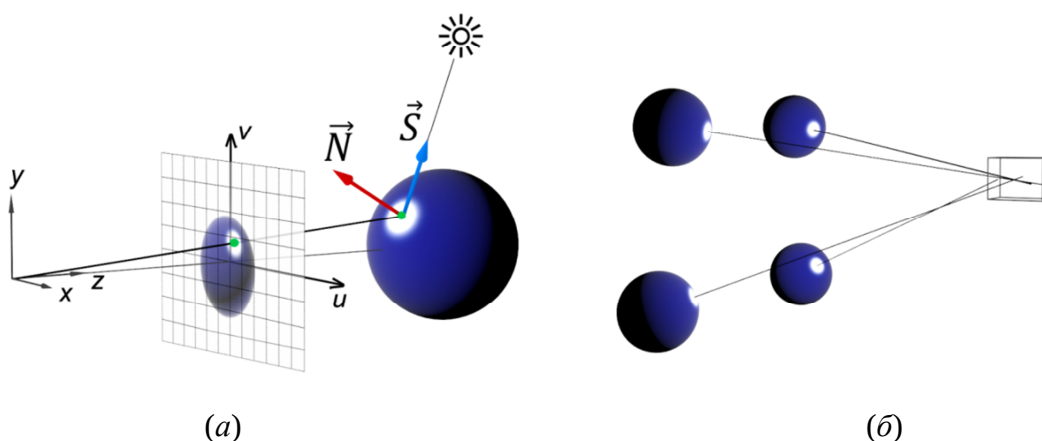


Рис. 9. Определение направления на источник излучения по блику для каждого шара (а) и определение трехмерных координат источника излучения в СК камеры (б)

7. **Выделение интересующего региона, содержащего восстанавливаемый объект.** На изображении с верхним освещением оператор выделяется область, содержащая восстанавливаемый объект.

8. **Восстановление рельефа методом ФС.** Выделенная область на трех изображениях, полученных при различных положениях источника света, использовалась в качестве исходных данных для алгоритма ФС. На базе полученных на предыдущих этапах положений источников излучения и внутренних параметров камеры производится расчет карты рельефа восстанавливаемого объекта и построение его трехмерной модели. Этапы работы реализованного алгоритма ФС для изображений гипсового бюста, показанных на рисунке 8, представлены далее на рисунке 10. Полученная на основе вычисленного расстояния $z(x, y)$ трехмерная модель объекта показана на рисунке 11. При вычислении векторов направления на источник света использовалось первое приближение объекта в виде плоскости, соответствующей плоскости координатной сетки.

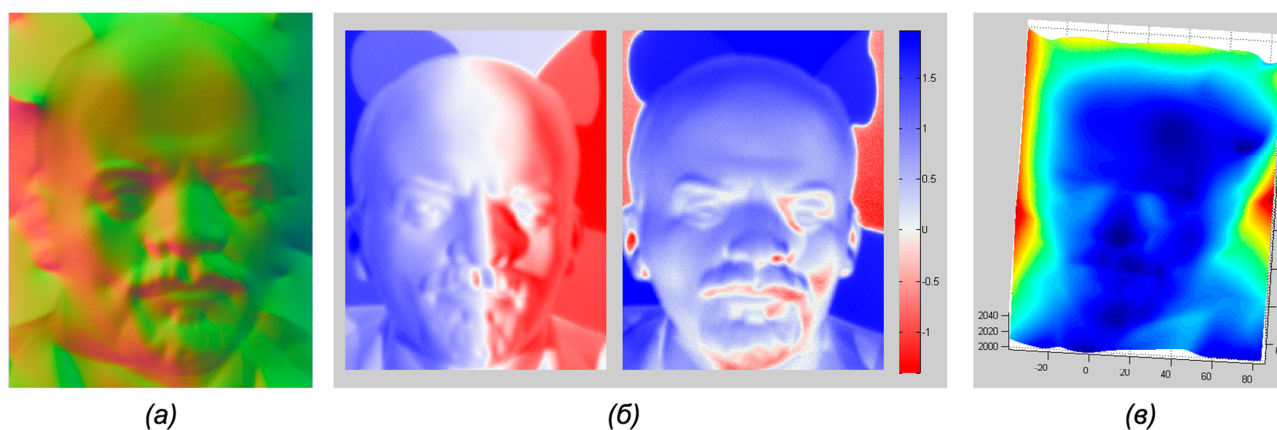


Рис. 10. Этапы работы алгоритма восстановления рельефа объекта: *а* — нормали, *б* — рассчитанные производные, *в* — восстановленный рельеф в виде функции расстояния до объекта $z(x, y)$

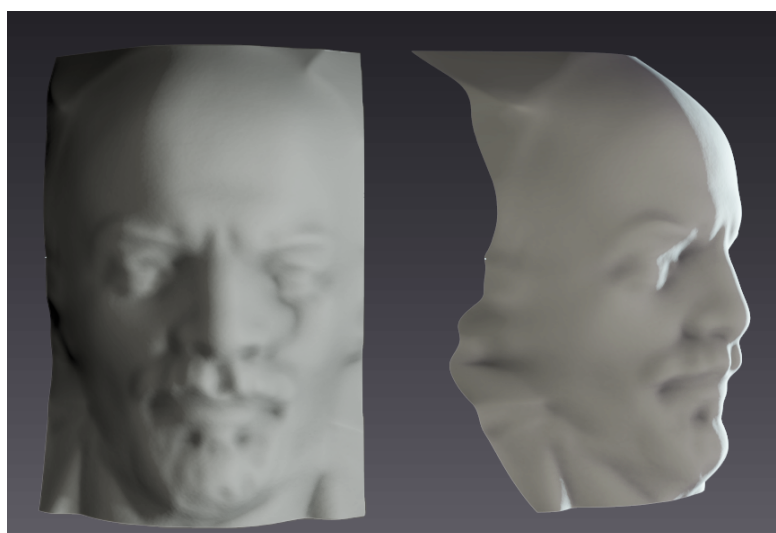


Рис. 11. Полученная трехмерная модель объекта

Для оценки влияния приближения бесконечно удаленного источника света восстановление рельефа также проводилось для двух вариантов: в первом случае использовались одинаковые вектора $\vec{S}_i$, соответствующие бесконечно удаленным источникам света; во втором использовались вектора $\vec{S}_i(x, y)$, вычисленные по известным координатам источника света с приближением формы объекта плоскостью. Сравнение полученных трехмерных моделей показано на рисунке 12(а,б). Сечения трехмерных моделей показаны на рисунке 12(в): красным показано сечение для допущения о бесконечно удаленном источнике, синим — для приближения объекта плоскостью.

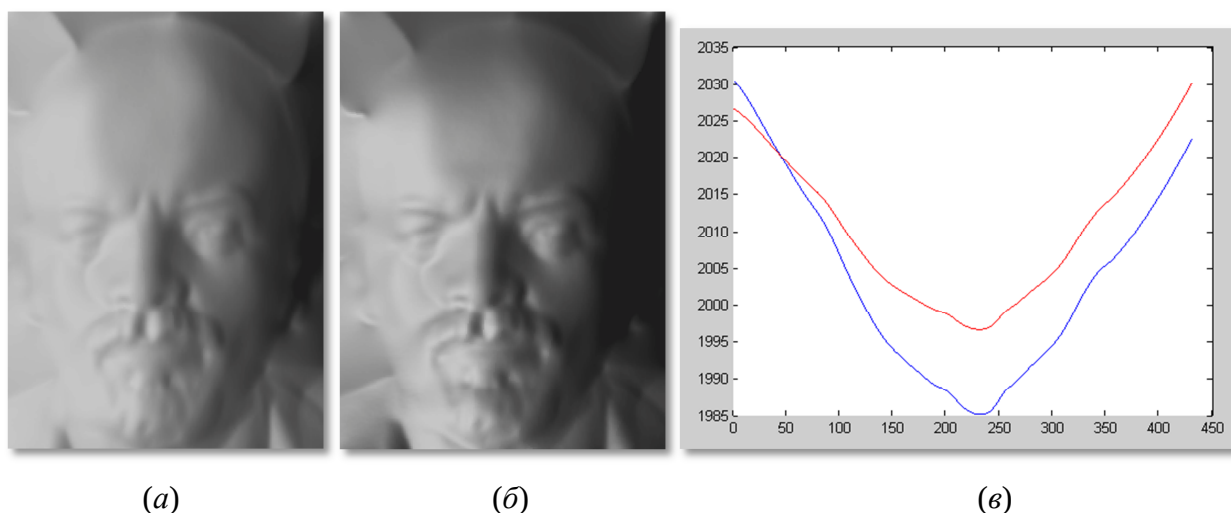


Рис. 12. Полученная трехмерная модель объекта для допущения о бесконечно удаленном источнике (а) и для приближения объекта плоскостью (б), сечения данной трехмерной модели (в)

Полученные результаты позволяют сделать только качественный вывод о влиянии данного допущения на результат восстановления, поскольку отсутствуют эталонные данные о рельефе восстановленного объекта. Для количественной оценки требуется проведение аналогичного эксперимента с некоторым реальным эталонным объектом в виде диффузно отражающей сферы, аналогичной той, которая использовалась при компьютерном моделировании. Также возможно использование для сравнения результатов трехмерной модели гипсового бюста, полученной другим методом, например, сканированием с использованием лазерного дальномера или при помощи структурированной подсветки [3, 4]. Проведение подобных экспериментов и уточнение полученных данных является задачей ближайших исследований.

5. Заключение

В ходе работы над проектом было проведено исследование метода ФС, выделены допущения, использованные при выводе математического аппарата данного метода, и обозначены основные источники погрешности данного метода.

Для оценки влияния различных факторов на погрешность восстановления рельефа было разработано ПО, выполняющее как задачу моделирования регистрации изображений, так и задачу восстановления рельефа объекта. Использование компьютерного моделирования позволяет провести эксперимент с точно известными условиями и выделить влияние рассматриваемого источника погрешности. Таким образом, в данной работе было рассмотрено влияние допущения о бесконечно удаленном

источнике и показано, что аналогичным образом может быть проведена оценка влияния погрешности определения координат источника света.

Разработанная методика определения трехмерных координат источника света и изготовленный тест-объект для ее реализации позволяют проводить различные эксперименты по оценке влияния различных факторов на погрешность восстановления рельефа объекта. Проведение дальнейших экспериментов позволит оценить влияние других допущений, использованных при задании математического аппарата метода ФС. Например, может быть проведена оценка влияния отличия реального источника света от точечного, оценка влияния неравномерной индикатрисы источника света и других факторов. Сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами компьютерного моделирования позволит оценить корректность используемых математических моделей.

Список литературы

1. Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision: a Modern Approach. 2nd ed. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, 2012. 793 p.
2. Tsumura N., Dang M. N., Makino T., Miyake Y. Estimating the directions to light sources using images of eye for reconstructing 3d human face // Proc. of IS&T/SID's Eleventh Color Imaging Conference (4 – 7 Nov. 2003, Scottsdale, Arizona, USA). 2003. P. 77-81.
3. Wöhler C. 3D computer vision. Efficient methods and applications. 2nd ed. London, UK: Springer-Verlag, 2013. 382 p.
4. Pears N., Liu Y., Bunting P. 3D imaging, analysis and applications. London, UK: Springer-Verlag, 2012. 500 p.
5. Ahmad J., Sun J., Smith L., Smith M. An improved photometric stereo through distance estimation and light vector optimization from diffused maxima region // Pattern Recognition Letters. 2014. V. 50. P. 15-22. DOI:10.1016/j.patrec.2013.09.005
6. Hartley R.I., Zisserman A. Multiple View Geometry. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000. 670 p.
7. Mallick S. Iterative integration. Available at: <http://cseweb.ucsd.edu/classes/sp05/cse152/iterative.pdf>, accessed 15.05.2015.
8. Shen H.-L., Cheng Y. Calibrating light source by using a planar mirror // Journal of Electronic Imaging. 2011. V. 20(1), 013002, P. 1-6. DOI:10.1117/1.3533326
9. Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations // Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision. 1999. V. 1. P. 666–673.

10. Bouguet J-Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab. Available at: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html#examples, accessed 15.05.2015.
11. Mathworks. Matlab R2015a Online Documentation. Imfindcircles. Available at: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/imfindcircles.html?refresh=true>, accessed 15.05.2015.
12. Mathworks. Matlab R2015a Online Documentation. Lsqnonlin. Available at: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/lsqnonlin.html>, accessed 15.05.2015.