

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 пиксела 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.

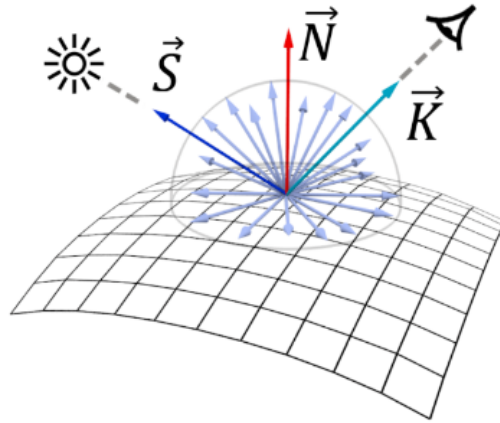


Рис. 1. Диффузное отражение света от поверхности

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 пиксела камеры, линейно связаны с его освещенностью, и примем еще ряд допущений. Тогда с учетом формулы (1) выражение для расчета освещенности каждого пиксела 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 пиксела (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} :

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

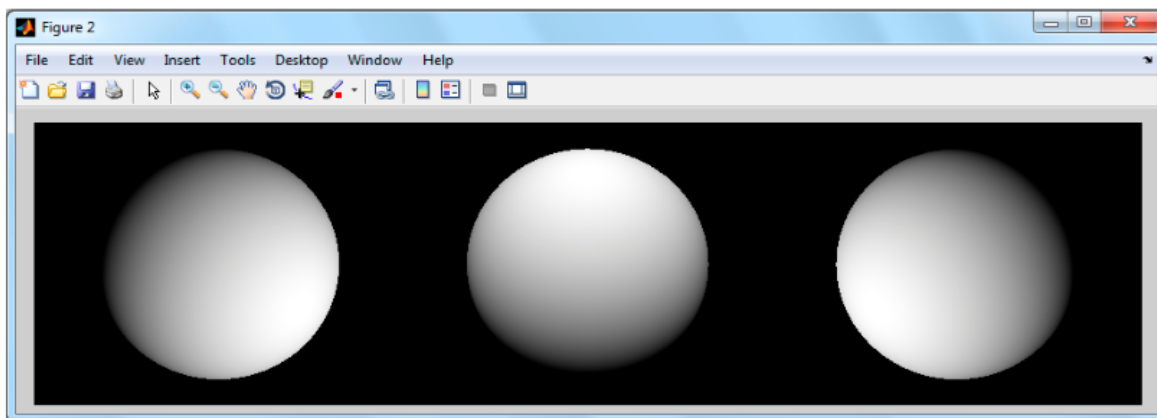


Рис. 2. — Изображения диффузно отражающего шара при различных положениях источника света

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.

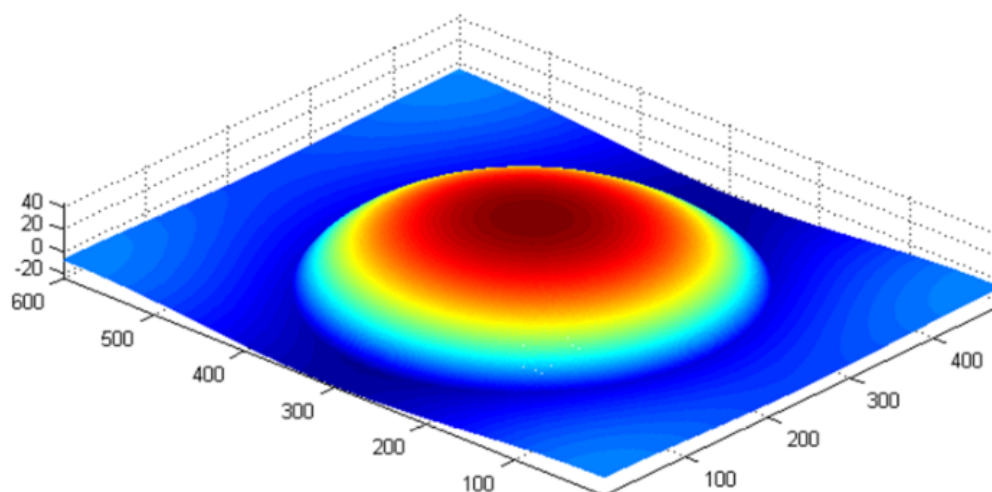


Рис. 3. — Восстановленная поверхность шара

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.

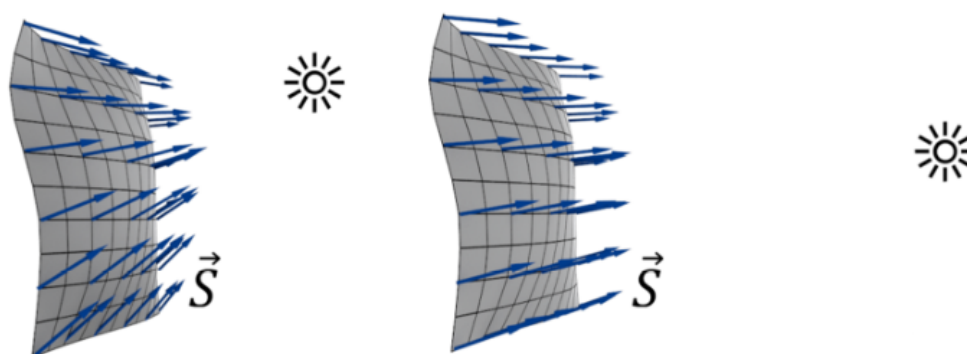


Рис. 4. Влияние расположения точечного источника света на ориентацию векторов направления на источник

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

