

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ МЕТОДОМ «БРОСАНИЯ ЛУЧЕЙ»

Тултемирова Гульназ Усенбековна, старший преподаватель, КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: tultemirova@gmail.com

Шаршеева Кундуз Токтобековна, старший преподаватель, КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: kunduz2000@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальность применения цифровой голограммы в области оптической обработки информации и синтез цифровых голограмм. Приводится сравнительный анализ метода «бросания лучей» и алгоритм его работы с проверкой окклюзии. Реализация данного метода в двух различных режимах позволяет решить задачу, связанную с точечной природой сцены. Так же дает возможность для расширения модели освещения, в которой более сложные взаимодействия света, такие как рефлексия, пропускание или преломление. Могут быть включены в конечное изображение с помощью геометрической оптики, а не волновой оптики, требующей больших вычислительных затрат. В данной научной работе фотореалистичный результат, борьба с окклюзией, масштабируемость, аппаратная реализация и гибкость метода выделяется из ряда других методов синтезирования для использования в качестве базисного метода.

Ключевые слова: голограмма, синтез, комплексная амплитуда, световое поле, окклюзия.

SYNTHESIS OF DIGITAL HOLOGRAMS BY THE METHOD OF «RAY CASTING»

Tultemirova Gulnaz Usenbekovna, Senior Lecturer, KSTU named after I. Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, 66 Aitmatova Ave., e-mail: tultemirova@gmail.com

Sharsheeva Kunduz Toktobekovna, Senior Lecturer, KSTU named after I. Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, 66 Aitmatova Ave., e-mail: kunduz2000@mail.ru

Abstract. The article considers the relevance of using digital holograms in the field of optical information processing and the synthesis of digital holograms. There are given a comparative analysis of the method of "casting rays" and the algorithm of its work with verification of occlusion. The implementation of this method in two different modes allows us to solve the problem associated with the point nature of the scene. It also provides an opportunity to expand the lighting model, in which more complex interactions of light, such as reflection, transmission or refraction. They can be included in the final image using geometric optics, rather than wave optics, which requires large computational costs. In this scientific work, the photorealistic result, the fight against occlusion, scalability, hardware implementation and flexibility of the method stand out from a number of other synthesizing methods for use as a basic method.

Key words: hologram, synthesis, complex amplitude, light field, occlusion.

Введение. Исследования в области компьютерного синтеза привели к появлению цифровой голографии, как нового самостоятельного научного направления. Цифровая голография, в свою очередь, способствовала возникновению бурно развивающегося, в настоящее время, нового научного направления как компьютерная оптика [1-5].

Голограммы, синтезированные с помощью компьютера, находят широкое применение в таких областях, как оптическая обработка информации, распознавание образов, трехмерная индикация цифровых данных, моделирование голографических процессов, защита информации. Трудно переоценить полезность использования синтезированных голограмм для восстановления изображения в акустической и СВЧ-голографии. Перспективным является применение синтезированных голограмм в качестве элементов голографических запоминающих устройств. Часто компьютерный синтез оказывается единственным способом получения голограмм с заданными свойствами. Главное же достоинство синтезированной голограммы заключается в том, что она является эффективным средством для преобразования цифровой информации в оптическую. Благодаря этому можно создать уникальные по производительности гибридные вычислительные системы, включающие в свой состав цифровой электронный и оптический процессоры и сочетающие гибкость и универсальность электронного компьютера с присущей оптическому процессору огромной производительностью, обусловленной параллелизмом обработки оптической информации. Перспективным является применение цифровых голограмм в качестве элементов в голографических запоминающих устройствах. Цифровые голограммы находят применения и в медтехнике, внедряются в области нанотехнологии [7].

Принцип синтеза голограмм. Синтезированная голограмма – это не запись реальной физической волны, а результат численного моделирования дифракционного и интерференционного явления. Численный характер процесса синтеза облегчает некоторые части синтеза голограммы, чем запись голограммы оптическим способом. Однако есть и недостатки. В частности, феномен дифракции очень сложно смоделировать с точки зрения времени вычислений.

Сложность синтеза можно проиллюстрировать следующим примером. Пусть целевое голографическое отображение представляет собой плоский дисплей, аналогичный 17-дюймовой ЖК-панели. Стандартное разрешение 17-дюймового ЖК-дисплея составляет 1280×1024 , поэтому шаг между пикселями составляет 0,25 мм. Компьютер должен вычислять $1,3 \times 10^6$ выборок при обновлении всего изображения. Голографическое отображение с шагом 1,0 мкм между элементами имеет разрешение 320000×256000 , поэтому компьютер должен вычислять $8,2 \times 10^{10}$ образцов при обновлении всего изображения. Это в 62500 раз больше образцов по сравнению с ЖК-дисплеем.

Следует также отметить, что минимальная частота кадров для интерактивной работы составляет 15 кадров в секунду, поэтому голограмма должна быть рассчитана за менее 60 мс и поток данных для такой частоты кадров составляет 1,2 ТБ в секунду.

Простейшая голограмма – это голограмма точечного источника однородных сферических волн. Сферические волны регулируются уравнением (1). Для каждой точки на голограмме вычисляется расстояние r до точечного источника и вычисляется уравнением (1). Если сцена содержит больше точек, то для каждой точки накапливается комплексная амплитуда, полученная из уравнения (1), и конечное значение представляет собой конечную комплексную амплитуду. В результате расчета голограммы на основе точечных источников появился метод рейкастинга – метод «бросания лучей».

$$\tilde{u}(r) = \frac{\tilde{a}}{r} \exp(ikr), \quad (1)$$

где $k = (k_x; k_y; k_z)$ обозначает волновой вектор, а \tilde{a} – комплексная амплитуда, определяющая фазу и амплитуду в начале волны. Вектор $r = (x, y, z)$ обозначает радиус-вектор, $r = |r|$ расстояние от источника. Отношение \tilde{a}/r отражает тот факт, что поверхность распространяющейся сферической поверхности растет квадратично, в то время как энергия, излучаемая источником, постоянна. Поэтому интенсивность должна снижаться квадратично с расстоянием от источника, т.е. $|\tilde{a}|^2/r^2 = \tilde{a}/r$.

Разнообразие подходов к синтезу цифровых голограмм велико. Общей характеристикой является соотношение между качеством вывода и вычислительными требованиями, а самые быстрые подходы являются наименее гибкими. При оценке соответствия методологии большое значение играет применение синтезированных голограмм. Поскольку главной целью этой работы является высокое качество изображения, то наиболее важной особенностью является поддержка фотореалистичной визуализации, а вторичной особенностью является, конечно, скорость оценки. Однако высокое качество и быстрая оценка находятся в явном противоречии.

Наиболее простой метод синтеза голограммы заключается в вычислении светового поля в связи с предполагаемым содержанием сцены, а затем голограмма вычисляется путем добавления опорного пучка. Световое поле может быть вычислено путем численного моделирования дифракционного явления в соответствии с одной из дифракционных моделей. Это довольно просто сделать, если сцена состоит из плоского объекта, параллельного плоскости голограммы. Световое поле, обусловленное этим объектом, вычисляется с помощью преобразования Фурье. Осложнения возникают, если сцена содержит трехмерный объект.

Вычисление дифракционной картины на плоскости голограммы довольно сложно для нетривиального содержания сцены. Точное решение требует оценки дифракционной формулы (2) в каждой точке выборки плоскости голограммы. Принципиальной сложностью такой оценки является, в общем случае, $O(N^5)$, где N представляет количество образцов в одном направлении записанного кубического объема. По этой причине было приложено немало усилий для выявления такой аппроксимации дифракционного явления, которая могла бы уменьшить сложность задачи и в то же время не ухудшить качество восстановленного изображения. Различные методы достигли различной степени успеха в решении этой задачи.

$$\tilde{u}_l(\mathbf{p}_0) = \frac{\tilde{a}}{i\lambda} \iint_{\Sigma} \frac{\exp[ik(r_{21}+r_{01})]}{r_{21}r_{01}} \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_{01}) ds \quad (2)$$

Здесь следует подчеркнуть, что пространство для аппроксимации сужается за счет первичного применения синтетических голограмм. В контексте этого тезиса основным применением является трехмерное расширение изображения высокого качества, как это известно из современных телевизионных или компьютерных отображений. В связи с этим применение аппроксимаций, которые, например, игнорируют непрозрачность или предполагают только диффузные поверхности, неприемлемы, а методы, которые используют такие аппроксимации, не рассматриваются как перспективные, поскольку они не способны предоставлять голограммы, дающие фотореалистичные изображения.

Существует довольно большой набор подходов к синтезу цифровой голограммы. Принцип каждой методологии при необходимости описывается вместе с математической базой. Рассматривая преимущества и недостатки, а также пригодность каждой методологии, можно отсортировать их в соответствии со следующими критериями оценки и по степени их приоритетности:

1. Фотореалистичный выход
2. Скорость оценки
3. Масштабируемость алгоритма
4. Аппаратная реализация
5. Описание сцены.

Обзор и реализация метода. Метод «бросания лучей» имеет довольно высокие показатели по вышеуказанным критериям сравнительно с другими существующими методами синтеза цифровых голограмм. Преимущество этого метода заключается в способе борьбы с окклюзией. Информация об окклюзии между двумя точками определяется путем подачи луча между этими двумя точками в сцену, и если между лучом и существующей геометрией обнаружено пересечение, точки не видны друг другу. Этот тест на окклюзию должен выполняться для всех пар $[s, \mathbf{u}]$, где $s \in S$ – точка сцены, $\mathbf{u} \in U$ – точка на плоскости голограммы. Таким образом, проверка на окклюзию, которая является достаточно сложной операцией, проводится $S \times U$ раз. Алгоритм работы метода «бросания лучей» для синтеза с проверкой окклюзии:

```
foreach ( $\tilde{u} \in U$ )
{
  foreach ( $s \in S$ )
  {
     $I_{s,u} = \text{Cast}(\text{Ray}(s,u))$ 
    if ( $I_{s,u} == \text{NULL}$ )  $\tilde{u} \leftarrow \tilde{u} + \text{SphericalWave}(s)$ 
  }
}
```

Метод «бросания лучей» может быть реализован в двух различных режимах (рис. 1). Первый режим выполняет итерацию через все точки, составляющие сцену, и отбрасывает лучи от каждого из них к каждой точке кадра голограммы. Это эквивалентно точечному методу, однако, в нем есть несколько подводных камней. Первый из них заключается в том, что количество точечных образцов влияет на количество лучей, необходимое для рейкастинга. Вторая проблема – это пространственная однородность точечных источников. Если точечные источники распределены неравномерно по поверхности, то им необходим коэффициент веса, который показывает, насколько велика поверхность, которую они представляют. Кроме того, коэффициент веса должен быть скоррек-

тирован в соответствии с предполагаемой площадью участка. Это не требуется, если используется второй режим подачи луча.

Второй режим метода литья лучей (рис. 1) не содержит статического набора точечных источников. Вместо этого он создает точечные источники в местах пересечения конуса лучей, возникающих в текущей вычисляемой точке выборки кадра голограммы, и геометрии сцены. В этом режиме количество лучей на точку выборки является постоянным. Количество лучей не зависит от сложности геометрии, что является преимуществом. Количество лучей скорее зависит от угла, вычитаемого ограничивающей рамкой сцены. Если обрабатываются только ближайшие пересечения, то это также решает проблему окклюзии.

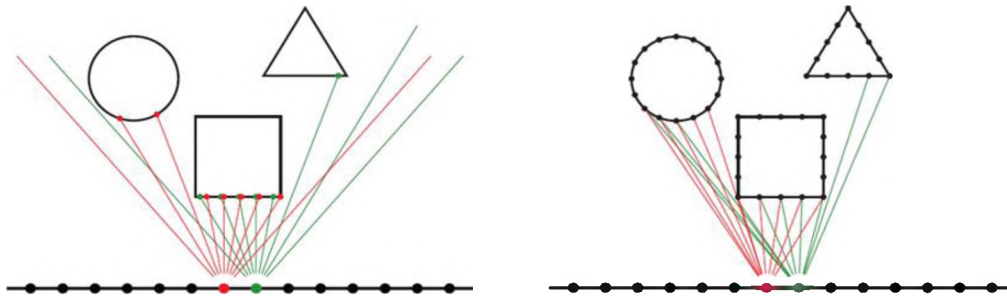


Рис. 1. Два режима работы при методе «бросания лучей»

В заключении следует отметить, что методы, основанные на бросании лучей, требуют гораздо большего объема вычислений, чем другие методы, но, с другой стороны, они обеспечивают большую гибкость для других операций рендеринга, таких как недиффузные свойства материала, и поддерживают проверку окклюзии в исходном виде. Другим преимуществом использования этого метода для синтеза голограмм является большой объем исследований о методах ускорения рейкастинга, которые выполняются в классической компьютерной графике, поэтому все существующие методы и подходы трассировки лучей могут быть использованы непосредственно с одной крупной модификацией, которая основана на комплексной амплитудно-ориентированном режиме работы.

Бросание лучей обеспечивает естественное решение для окклюзии и освещения. Кроме того, оно обеспечивает удобный способ решения других эффектов, таких как отражение и преломление, благодаря подходу трассировки лучей, хорошо известному из CGI. Метод динамической выборки сцены устраняет ограничение на описание сцены по сравнению с другой методикой. Скорость оценки оценивается относительно высокой, особенно в случае более сложной сцены. Масштабируемость остается хорошей, так как эта методология легко реализуется как параллельный процесс. Аппаратный критерий является проблематичным для реализации, поскольку выборка сцены включает проверку пересечения лучей/геометрии, что является нетривиальной операцией.

Список литературы

1. Сисакян И. Н., Сойфер В. А. Компьютерная оптика. Достижения и проблемы // Компьютерная оптика / Под ред. акад. Велихова Е. П. и акад. Прохорова А. М., 1987. С. 5-19.
2. Сойфер В. А. Введение в дифракционную микрооптику. Самара, 1996.
3. Казанский Н. Л., Котляр В. В., Сойфер В. А. Коррекция волновых фронтов // Методы компьютерной оптики / под редакцией В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000. С. 542-579.
4. Полещук А. Г. Дифракционная оптика // Мир техники кино. 2008. № 8. С. 27-31.
5. Досколович Л. Л., Казанский Н. Л., Сойфер В. А. Расчет бинарных дифракционных оптических элементов для фокусировки в заданную двумерную область // Автометрия. 1995. № 5. С. 42-50.
6. Математические методы цифровой голографии: учеб. пособие / В. И. Гужов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 82 с.
7. Пен Е. Ф., Шаталов И. Г. Исследование объемов микрочастиц и рельефных объектов методами цифровой голографии // Мир техники кино. 2008. № 8. С. 35-38.
8. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. М.: Машиностроение, 1988. 440 с.