

Количественная оценка уровня артефактов в объёмной визуализации

Николай И. Гаврилов, Вадим Е. Турлапов

Нижегородский государственный университет, Н.Новгород, Россия

gavrilov86@gmail.com; vadim.turlapov@cs.vmk.unn.ru

Аннотация

Несмотря на обилие подходов к оптимизации алгоритма объёмного рендеринга в терминах качества и производительности, в литературе практически отсутствует формальный подход к количественной оценке качества изображений, получаемых в ходе визуализации научных и медицинских пространственных данных. В статье предложен метод оценки артефактов алгоритма объёмного рендеринга, связанных с недостаточно малой длиной шага луча в методе испускания лучей. На основе предложенного метода оценки в ходе экспериментов сравниваются различные подходы, призванные улучшить качество рендеринга, для разных случаев визуализации выявляются оптимальные из этих подходов по критерию качество/производительность. Предложены также новые методы устранения артефактов выборки, отличающиеся использованием таблиц предынтегрированного рендеринга в методе виртуальных выборок вместо обычной модели постклассификации.

Keywords: медицинская визуализация, научная визуализация, оценка качества, объёмный рендеринг, GPU, GPGPU.

1. ВВЕДЕНИЕ

Техника прямого объёмного рендеринга (Direct Volume Rendering, DVR) и, в том числе, техника испускания лучей (Ray Casting, RC) широко применяется для визуального анализа данных в научной и медицинской визуализации. Сегодня существует множество подходов, позволяющих производить объёмную визуализацию в реальном времени с использованием высокопроизводительных вычислений на GPU [ЕНК*06]. Помимо использования иерархических ускоряющих структур, обеспечивающих пропуск пустых областей для повышения производительности, существуют подходы, повышающие качество визуализации без значительного ущерба её производительности [EHMDM08], [KHW*09], [LYS*10].

Тем не менее, в литературе отсутствуют методы количественной оценки качества рендеринга, которые позволили бы сравнивать эффективность различных методов. Обычно исследователи ограничиваются демонстрацией полученных изображений, предоставляя человеку самому оценивать качество [MNB*00].

2. АРТЕФАКТЫ ОБЪЁМНОГО РЕНДЕРИНГА

Из-за более высокого качества и более высокой производительности в алгоритме DVR используют модель постклассификации, когда шаг классификации (раскраски) точек пространства происходит после шага интерполяции значения исходных данных. Однако использование данной модели приводит к значительному увеличению уровня артефактов выборки (*sampling artifacts* [KHW*09]). Регулярная структура этих артефактов на изображении

ликвидируется техникой *jittering* – случайным сдвигом стартовых позиций лучей [Sch05]. Повышение частоты выборки вдоль луча подавляет данные артефакты, снижая при этом производительность из-за увеличения общего числа выборок из данных. Для поддержания качественной и интерактивной визуализации массивов данных больших размеров (более 512^3 вокселей) или при использовании сложных передаточных функций, необходимо использование техник, повышающих точность интегрирования вдоль луча [EHMDM08], [KHW*09], [LYS*10].

Другой тип артефактов алгоритма DVR возникает на шаге интерполяции значения данных – *артефакты фильтрации* (*filtering artifacts*), которые заметны при использовании трикубической интерполяции. К сожалению, эти артефакты не могут быть зашумлены техникой *jittering*, как артефакты выборки, но они в значительной степени устраняются при трикубической интерполяции B-сплайнами [RtHRS08].

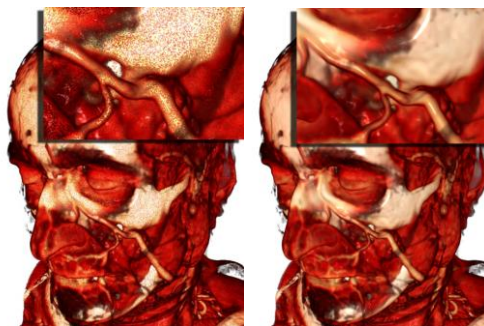


Рис. 1. Сравнение качества визуализации алгоритмом RC при частоте 1(слева) и 8 (справа) выборок на воксель.



Рис. 2. Сравнение качества визуализации алгоритмом RC с трилинейной (слева) и трикубической (справа) интерполяцией.

3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА RC

Для оценки артефактов выборки мы вычисляем ошибку в каждом пикселе. Для этого методом испускания лучей с применением техники случайного старта луча (*jittering*) производится рендеринг серии изображений с одного и того же ракурса. Таким образом, каждому пикселю соответствует серия RGB-значений. Степень разброса этих значений характеризует ошибку пикселя. Для вычисления ошибки пикселя использованы величины дисперсии (D) цвета в

цветовых пространствах YCbCr и HSL. Для каждого пикселя с координатами (x,y) дисперсия вычисляется следующим образом:

$$D(x, y) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left\| C_i(x, y) - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T C_j(x, y) \right\|^2$$

Здесь T – число изображений в серии, $C_i(x,y)$ – цвет пикселя с координатами (x,y) из i -ого изображения. Стоит отметить, что вместо математического ожидания в формуле может быть использован цвет пикселя изображения \tilde{C} (ground truth image), полученного с максимально возможной частотой выборки:

$$D(x, y) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left\| C_i(x, y) - \tilde{C}(x, y) \right\|^2$$

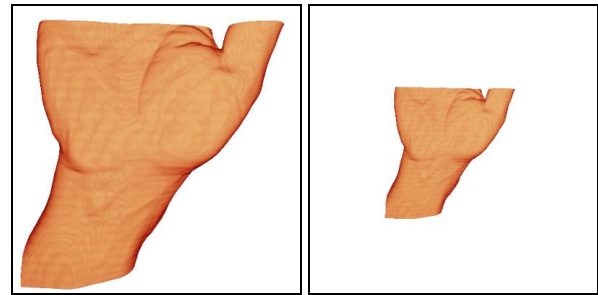
Для оценки ошибки изображения в целом использовано пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR – Peak Signal-to-Noise Ratio), которое используется в теории сигналов и для измерения уровня искажений при сжатии изображений с потерями. В объёмном рендеринге этот подход был использован ранее, но для оценки ухудшения качества при сжатии самих объёмных данных [GS04], а не для оценки артефактов рендеринга:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right); \quad MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} D(i, j).$$

$D(i,j)$ – дисперсия или квадратичная ошибка пикселя (i,j), качество которого мы оцениваем, MSE – среднеквадратическая ошибка изображения размером $m \times n$, MAX_I – максимально возможное значение пикселя, в нашем случае равное 1, N – количество нефоновых пикселей, которое в нашем случае, так как есть смысл игнорировать фоновые пиксели, которые не содержат шума и ошибка в них будет нулевая. На рисунке 4 видно, что если при вычислении MSE учитывать фоновые пиксели (в данном случае белые), то

при удалении камеры от объекта происходит увеличение PSNR. В случае игнорирования фоновых пикселей PSNR будет неизменным.

Таким образом, оценка качества визуализации проводится с помощью оценки дисперсии пикселей. Кроме того, можно оценивать качество каждого отдельного пикселя для построения PSNR-карт (Рис. 3). Понятие PSNR в итоге адаптировано для анализа качества изображений объёмного рендеринга.



PSNR: 20.5dB

PSNR: 25.7dB

Рис. 4. Значения PSNR в случае учёта фоновых пикселей.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Кроме частоты выборки в методе RC существует множество факторов, влияющих на качество и производительность визуализации: сам массив данных, ракурс, передаточная функция (transfer function), размер окна вывода, размер блоков декомпозиции данных, модель освещения, используемая интерполяция значения данных, модель видеокарты и т.д. К счастью некоторые из этих параметров не влияют на качество рендеринга (на уровень различного рода артефактов). Размер окна вывода влияет только на точность оценки PSNR. Зависимость между числом обрабатываемых пикселей и временем рендеринга почти линейна, как и между частотой выборки и временем рендеринга.

В экспериментах мы использовали 10 различных массивов объёмных данных (Рис.5). Декомпозиция данных проводилась на блоки размером 256^3 каждый, что является оптимальным с точки зрения производительности разбиением для используемой нами видеокарты (GeForce GTX 580 3Gb).

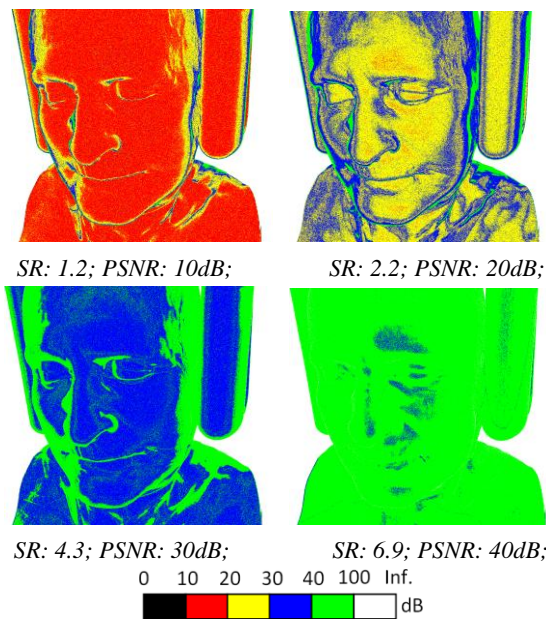


Рис. 3. Качество рендеринга при различных выборах частоты выборки SR

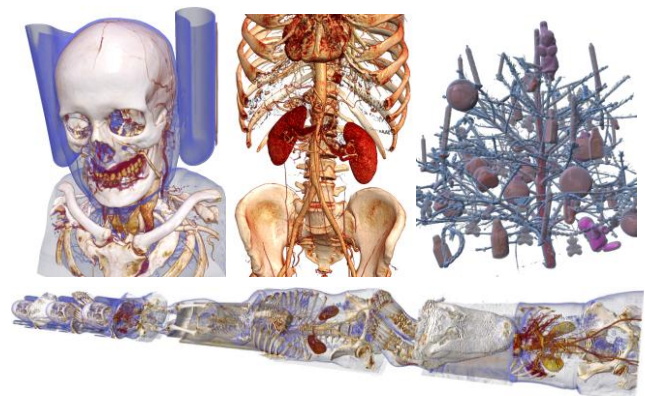


Рис.5. Примеры визуализации тестовых массивов данных размеров от 512x512x420 до 512x512x5382 (12-bit).

4.1 Отношение качество-производительность

При сравнении эффективности различных методов улучшения качества и/или производительности метода RC необходимо учитывать как производительность, так и получаемое качество. В наших экспериментах мы меняем частоту выборки вдоль луча (с 1 до 8 выборков на воксель), тем самым варьируя качество и производительность. В результате каждому методу рендеринга соответствует график (Рис.7-8), показывающий зависимость качества (PSNR) рендеринга от производительности.

Были использованы такие методы рендеринга, как: UDVR (неоптимизированный DVR), PDVR (предынтегрированный рендеринг [EHMDM08]), LVS и CVS (метод виртуальных выборок соответственно с линейной и кубической (рис.6) интерполяцией вдоль луча [LYS*10]), ASM (метод с адаптивным шагом луча), PLVS и PCVS (модификации методов LVS и CVS: вместо обычной постклассификации мы применяем предынтегрированную классификацию подобно методу PDVR).

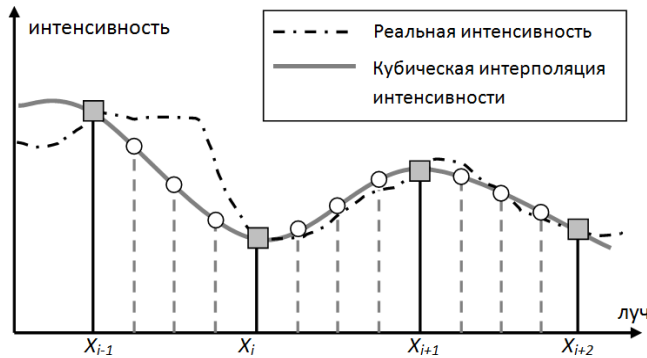


Рис.6. Виртуальные выборки (белые точки) при интегрировании вдоль луча в алгоритме Ray Casting.

Методы PLVS и PCVS предложены в данной работе, как альтернативы методу PDVR. На рисунке 6 сплошные вертикальные линии обозначают выборку значений из данных, пунктирные вертикальные линии показывают виртуальные выборки, увеличивающие точность интегрирования. Кроме интенсивности интерполируется также и градиент, что повышает точность интегрирования при использовании локального освещения в алгоритме.

При проведении экспериментов использовались различные опции, влияющие на качество и производительность: на подписях к диаграммам указано, была ли использована трикубическая фильтрация и/или локальное освещение. Диаграммы отображают усредненные результаты для разных исходных данных, ракурсов камеры, размеров окна вывода и передаточных функций. Каждая точка графика соответствует определённой длине шага луча, поэтому на усреднённой диаграмме каждая точка каждого графика – это пара чисел <средняя производительность, среднее качество>. Обобщив результаты, из диаграмм можно заключить следующее:

Предынтегрированный рендеринг (PDVR) оптимален в случаях отсутствия локального освещения, он во многом выигрывает благодаря высокой производительности, хотя в случаях использования локального освещения метод даёт недостаточно хорошее качество из-за грубости учёта локального освещения. Предынтегрированная таблица хранит результаты интегрирования без учёта затенения.

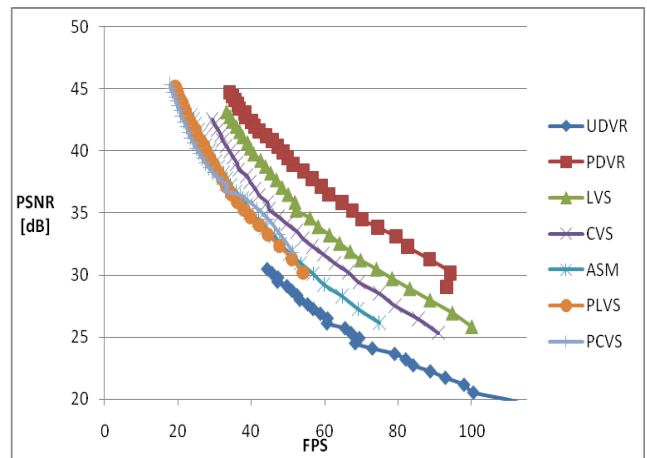


Рис.7. Диаграмма соотношений качество-производительность для случая без затенения и с трилинейной фильтрацией.

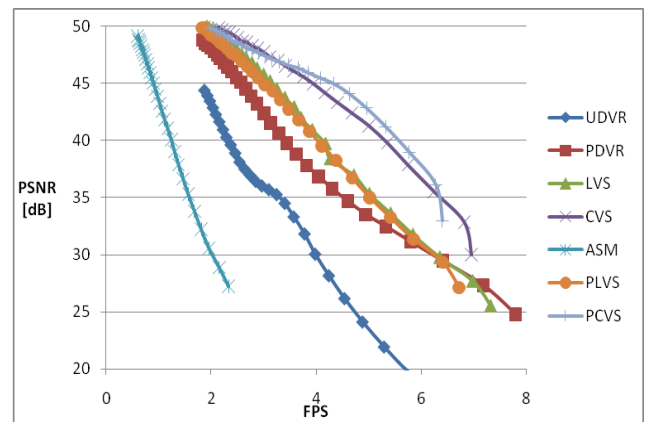


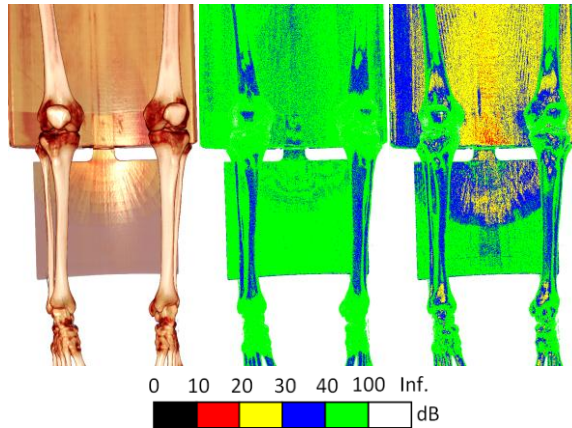
Рис.8. Диаграмма соотношений качество-производительность для случая с затенением и с трикубической фильтрацией.

Почти на всех полученных диаграммах метод UDVR неэффективен, что говорит о целесообразности оптимизации метода. Оценивая получаемое значение PSNR во внимание стоит принимать диапазон [30dB, 40dB], соответствующий приемлемому качеству рендеринга. В случае PSNR > 40dB артефакты выборки практически неразличимы.

Метод ASM хорошо показывает себя только в случае трилинейной фильтрации, т.к. выборки из данных производятся на каждом шаге, в отличие от методов LVS и CVS. Градиент также вычисляется на каждом шаге, поэтому метод даёт хорошее качество при использовании локального освещения. Однако из-за необходимости делать много выборок метод отстаёт по производительности. Таким образом, метод часто оптимален при использовании локального освещения при трилинейной фильтрации;

Методы виртуальных выборок (LVS, CVS) менее производительны, чем PDVR, поэтому во многих случаях ему уступают. Эти методы оптимальны в случае локального освещения при трикубической фильтрации, т.к. общее падение производительности из-за трикубической фильтрации делает накладные расходы на разбиение шага менее заметными.

Гибридные методы PLVS и PCVS хорошо работают в случаях трикубической интерполяции и локального освещения (рис.9). В этих случаях они превосходят метод PDVR. Благодаря разбиению шага методы дают лучшее качество при освещении. Благодаря предынтегрированной классификации, данные методы в большинстве случаев работают лучше методов разбиения шага без предынтеграции (LVS, CVS).



DVR Output; PSNR: 36.4dB; PSNR: 22.1dB;

Рис.9. Карты PSNR для метода предынтегрированного рендеринга без локального освещения (в середине) и с ним (справа); частота выборки: 2. Из-за грубого учёта затенения в предынтегрированном рендеринге возникают артефакты.

4.2 Оптимизация параметров алгоритма RC

Перед сравнением методов были проведены оптимизации их параметров: во всех методах за исключением UDVR и PDVR есть возможность выбора числа разбиений шага. Очевидно, что чем больше это число, тем выше будет качество этих методов, однако при этом будет падать производительность. Для каждого из этих методов были построены диаграммы соотношения качество-производительность (рис.10), где каждая линия соответствует числу разбиений шага луча.

Для подавляющего большинства случаев оптимальным является разбиение 3, причём для каждого из исследуемых методов. Использование менее чем трёх промежуточных шагов даёт слишком низкое качество изображения, которое не компенсируется даже уменьшением длины шага луча, тогда как, начиная с трёх делений, качество почти не улучшается, а производительность продолжает падать.

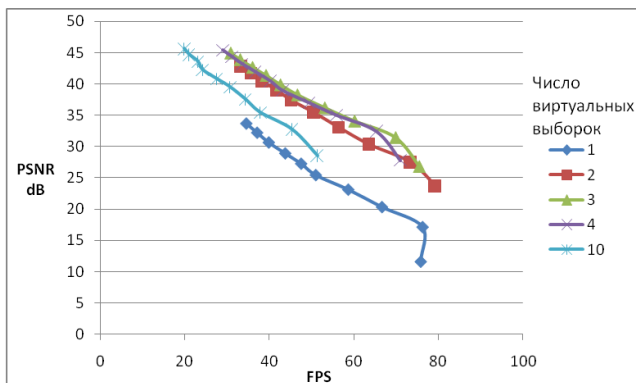


Рис.10. Соотношения качество-производительность для метода LVS с различным числом виртуальных выборок.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод оценки артефактов DVR, вызванных недостаточно малой длиной шага луча в методе испускания лучей. Хотя в ходе экспериментов не было выявлено RC-алгоритма, оптимального с точки зрения качества и производительности в любых условиях визуализации, метод оценки показал целесообразность оптимизации алгоритма объёмного рендеринга в терминах качества и производительности.

Предложены новые методы устранения артефактов постклассификации в алгоритме RayCasting, отличающиеся использованием предынтегрированной классификации в методе виртуальных выборок вместо постклассификации.

Использование отношения PSNR позволило привести уровень шума к логарифмической шкале в дБ. Оказалось, что диапазон значений от 30 до 40 дБ, используемый как правило для сжатия изображений и соответствующий приемлемому качеству сжатия с потерями, также соответствует приемлемому качеству при оценке качества в методе Volume Raycasting.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ № НШ-1960.2012.9 и Правительства РФ № 11.G34.31.0066.

6. ССЫЛКИ

- [EHK*06] Engel K., Hadwiger M., Kniss J., Rezkasama C., Weiskopf D.: Real-time volume graphics. Eurographics Association (2006), 112–114.
- [EHMDM08] El Hajjar J. F. et al. Second order pre-integrated volume rendering //Visualization Symposium, 2008. PacificVIS'08. IEEE Pacific. – IEEE, 2008. – С. 9-16.
- [GS04] Guthe S., Strasser W.: Advanced techniques for high-quality multi-resolution volume rendering. Computers & Graphics 28, 1 (2004), 51–58.
- [KHW*09] Knoll A., Hijazi Y., Westerteiger R., Schott M., Hansen C., Hagen H.: Volume ray casting with peak finding and differential sampling. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on 15, 6 (2009), 1571–1578.
- [MHB*00] Meissner M., Huang J., Bartz D., Mueller K., Crawford R.: A practical evaluation of popular volume rendering algorithms. In Proceedings of the 2000 IEEE symposium on Volume visualization (2000), ACM, pp. 81–90.
- [LYS*10] Lee, B., Yun, J., Seo, J., Shim, B., Shin, Y. G., & Kim, B. (2010). Fast high-quality volume ray casting with virtual samplings. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 16(6), 1525-1532.
- [RtHRS08] Ruijters D., Ter Haar Romeny B., Suetens P.: Efficient gpu-based texture interpolation using uniform b-splines. Journal of Graphics, GPU, and Game Tools 13, 4 (2008), 61–69.
- [Sch05] SCHARSACH H.: Advanced gpu raycasting. Proceedings of CESC 5 (2005), 67–76.