

П. А. КАЧАНОВ, А. А. ЗУЕВ, К. Н. ЯЦЕНКО

## МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ

В статье рассматриваются методы и алгоритмы реализации проективных преобразований на графических ускорителях. Проводится разделение методов на два семейства: проецирование с одним и с несколькими центрами проекций. Сделан обзор и сравнение методов каждого семейства. Большое внимание уделяется методам с одним центром проецирования. Проводится оценка относительно возможности реализации и применения методов в системах реального времени.

**Ключевые слова:** проективные преобразования, графические ускорители, environment mapping, системы визуализации, системы реального времени.

**Введение.** К системе визуализации, которая является одной из основных частей имитационно-тренажерных комплексов военной техники, предъявляются достаточно жесткие требования, связанные не только с реалистичностью отображаемой сцены, но и с информативностью получаемого изображения. Одним из способов удовлетворения последнего требования является применение проективных преобразований. Классический метод получения изображений прямой перспективой на графических ускорителях реализован аппаратно, что подразумевает небольшие вычислительные затраты на его реализацию. Однако для получения других моделей преобразования необходима разработка новых алгоритмов и методов их реализации на графических ускорителях. Это в свою очередь влечет за собой увеличение потребления вычислительных средств, что в системах реального времени, коими являются тренажерные комплексы, в большинстве случаев является критическим фактором. Поэтому актуальным является вопрос поиска оптимального решения зависимости получения необходимого проективного преобразования и вычислительными ресурсами на его реализацию.

**Цель работы.** В данной статье рассматриваются методы и алгоритмы реализации проективных преобразований на графических процессорах. Проводится их сравнение и оценка относительно возможности и эффективности реализации в системах реального времени.

**Методика исследования.** Исследования в области непланарных или нелинейных проекций рассматриваются преимущественно между двумя различными видами проекций: проекции с одним центром проецирования (Single Projection Center - SCOP) [1] или с множественными центрами проекций (Multiple Projection Centers - MCOP) [2].

Проекция с одним центром. Для получения искажений или специальных проекций трехмерной сцены, точечная камера направляется в нескольких направлениях. В работе [3] предлагается процедура, которая базируется на вычислении новых абсолютных координат трансформированных через адаптивную матрицу проекций. Гибкая адаптивная проекционная система описана в работе [4], которая включает моделирование линейной, нелинейной и параметризованной проекций. В ней используется

алгоритм ray-casting и scanline rendering, в которых координаты полигона изменяются вертексным шейдером. Всеобщность системы делает сложным эффективное проецирование, особенно на больших сценах. Искажения, как подкатегории геометрической регистрации или деформирования изображений обсуждается в работах [5] и [6], где функции деформирования изображения применяются к каждому пикселю для определения его нового значения цвета.

Подход «сшивания» изображений для получения панорамы представлен в работе [7]. В работе [8] представлен метод который генерирует текстуры окружения полученные с фотографий сделанных с помощью сферических линз (fisheye). Несколько разделов посвященных нелинейным перспективным деформациям описаны в работе [9], исследованы так же таксономии линз [10]. Эти подходы используют регулярную меш текстурированную двумерной текстурой, которая содержит отрисованную сцену или изображение. Процесс перемещения вершин меша вместе с текстурой генерирует частичный эффект искажения. Эти подходы ограничены относительно величины получаемого угла обзора (FOV). Карпендейл исследовала использование деформации изображения в контексте информационной визуализации [11].

Приложения для видовых искажений в программах ray-tracing описано в работе [12], [13].

Проекция с несколькими центрами. В дополнение к рассмотренным выше проекциям, существуют непланарные проекционные поверхности, которые требуют нескольких перспектив, например, определенное число изображений из разных центров проекций [14]. Главная задача заключается в сохранении качества связности всей сцены, локальных искажений и результатов затенения из-за изменений в перспективе каждой проекции. Результаты исследований в этой области могут быть использованы для проведения независимого от наблюдателя рендеринга (View-independent rendering), получения необычных (экспрессивных) изображений или анимации. Отдельно от щелевых камер [15], представлены кубистские камеры, которые представляют много преобразований и точек наблюдения одновременно. Эта техника использует нелинейный ray tracing который управляет светом, но

© П. А. Качанов, А. А. Зуев, К. Н. Яценко, 2016

может приводить к некоторым артефактам.

Описана геометрия сцены и пользовательский интерфейс для позиционирования локальной и главной камер [16], для параметризуемого мультипроеекционного рендеринга, представляет средство для создания мультипроеекционных изображений и анимаций. В основе лежит алгоритм, который вычисляет пересечения объектов сцены, в которой каждый рендерится локальной камерой. Это обеспечивает управление искажениями и созданием сюрреалистических видов, но не может решить проблему освещения и затенения.

Метод Fresh Perspective [17] так же представляет интерактивный подход, который не может решить ни вопрос освещения, ни глобального сохранения связности сцены. Отличия содержатся в следующем: результирующее нелинейное проекционное изображение объекта потенциально находится под влиянием всех камер. На этом базируется метод RYAN [13]. Эта интерактивная система интегрируется в традиционный анимационный поток. Она искажает геометрию сцены до проецирования прямой перспективой. Результат получается в виде нелинейной проекции. Так же как и в работе [16], используется два вида камер: главная (традиционная линейная перспектива) и подчиненная (представляющая локальные линейные виды).

Освещение реализовано смешиванием освещения главной и подчиненной камер или установкой одной точки наблюдения для света.

На основании рассмотренных методов реализаций проективных преобразований можно говорить о том, что наиболее целесообразным является применение методов с одним центром проецирования.

**Результаты исследования.** Для визуализации трехмерной сцены на экране ее описание и математическая модель должны быть преобразованы в двумерное изображение (процесс синтеза изображения). Изображение представляет собой двумерную проекцию сцены трехмерных объектов, которые находятся в пределах объема ограниченного передней и задней плоскостями отсечения, и отображается на плоскости проекции (проекции вида) [18]. Синтез растрового изображения происходит на этапе растеризации графического конвейера. На рис.1 изображена схема работы графического конвейера типичного графического ускорителя. Стадии вершинной и пиксельной обработки реализуются на графическом ускорителе в виде микропрограмм, которые разрешают определить, что представляют собой входные и выходные данные для каждой стадии конвейера ускорителя и описывают обработку, которая происходит на ней.



Рис.1 – Схема графического конвейера

Как можно увидеть, обработка на уровне пикселей является последним этапом программируемой стадии конвейера, что дает возможность реализации разнообразных эффектов как этапа постобработки синтезированного изображения в виде микропрограммы.

Главной задачей пиксельной микропрограммы является вычисление финального цвета пикселя. С каждым пикселем может быть связано широкое разнообразие данных, согласно его расположению, которое, вычисленное с помощью вершинной микропрограммы и линейно интерполируется на этапе растеризации треугольников, которые определяют объекты сцены. Это разрешает изменять цвет пикселя соответственно освещению сцены, прибавлять отражение, налаживать тени. Так же с помощью пиксельной микропрограммы можно реализовать эффекты постобработки для всего изображения в целом, например, такие как яркость, контраст, насыщенность, изменение цвета, размывание. Такая универсальность микропрограмм также разрешает делать геометрические преобразования пространства, например геометрическое искривление пространства наблюдателя.

В современных системах визуализации нашли широкое применение методы, основанные на картах окружения (environment map). В работах [19] описаны разновидности и методы получения текстур окружения. Текстура окружения представляет собой текстуру, которая отображает значения в пространстве для всех направлений входящего и исходящего света относительно одной точки пространства. Поскольку она отображает информацию как 2D текстуру, то необходимо задать преобразование для переноса значения из пространства в координаты текстуры для получения конкретного отображения. В зависимости от вида преобразования различают: сферические, параболические и кубические карты (Рис.2).

Сферические карты построены по аналогии с идеально отражающей сферой. Изображение, получаемое на ее поверхности при проецировании ортогональной камерой, соответствует сферической карте.

Параболические карты, часто называемые еще двойными параболическими картами, аналогичны сферическим, однако используется кривая – парабола. Изображение, получаемое ортогональной камерой при

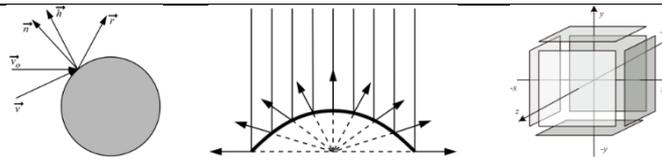


Рис.2 – Различные модели параметризаций карт окружения

направлении вида на отражающий параболоид содержит информацию о полусфере направленной к наблюдателю. Полное окружение сохраняется в двух отдельных текстурах, каждая из которых содержит информацию о полусфере.

Кубическая текстура состоит из шести независимых изображений, полученных перспективным проецированием из центра куба на каждую его грань.

На уровне реализации на графических ускорителях сферические и параболические текстуры получают с помощью геометрических шейдеров. Сцена состоит из тесселированных объектов и применение геометрических шейдеров приводит к изменению геометрии пространства сцены. На близких расстояниях такой подход не вызывает побочных явлений, однако с увеличением расстояния от камеры возникают артефакты и искажения. Поскольку мы ориентируемся на применение проекций в масштабных сценах, то данный подход является неудовлетворительным.

Использование кубической текстуры описано в работах [20], [21]. Кубические текстуры можно получить двумя способами: за один проход рендера или за несколько. Реализация за один проход обеспечивается структурой современных графических ускорителей, которые позволяют использовать технику «рендер в кубическую текстуру», суть которой состоит в дублировании каждого входного треугольника шесть раз и применении отдельного преобразования для каждой грани кубической текстуры. Каждый дублированный треугольник относится к соответствующему слою цели рендеринга. Реализация за несколько проходов базируется на создании шести виртуальных локальных камер с углом обзора FOV 90° и перспективного рендеринга в текстуру. Проведенные в работе [21] исследования показали уменьшение вычислительных затрат с использованием метода с одним проходом. Однако использование подобного подхода приводит к одновременному хранению в памяти графического ускорителя сразу шести текстур. В реальных системах визуализации, в которых происходит значительно больше вычислений связанных с увеличением реалистичности сцены, подобный расход ресурсов видеокарты может оказаться достаточно критичным.

Подобный метод используется и в работе [22]. Основным отличием от предыдущего метода является создание кусочной проекции, которая состоит из нескольких перспективных проекций с использованием «щелевой камеры».

**Выводы.** На основании рассмотренных методов реализации проективных преобразований, можно заключить, что в своем большинстве они не могут

быть применены в системах визуализации реального времени для отображения масштабных сцен, в которых важна информация, которая находится на большом удалении от камеры. Метод с использованием кубических текстур может быть применен при условии, если кроме визуализации дополнительно не производится массивные вычисления. В дальнейшем предлагается реализовывать необходимые проекционные преобразования в виде пиксельных шейдеров, как эффект постобработки, используя классическое перспективное проецирование, внедрение которых в уже существующую систему не потребует значительного изменения ее основной структуры и позволит выполнить требования к получению необходимого проекционного преобразования с удовлетворительными вычислительными затратами.

**Список литературы:** 1. *Carlbom I.* Planar Geometric Projections and Viewing Transformations / *I. Carlbom, J. Paciorek* // ACM Computing Surveys (CSUR). – 1978. – Vol.10, Issue 4. – 465–502 pp. 2. *Rademacher P.* Multiple-Center-of-Projection Images / *P. Rademacher, G. Bishop* // In SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – New York, NY, USA. ACM Press, 1998. – 199–206 pp. 3. *Bayarri S.* Computing Non-Planar Perspectives in Real Time / *S. Bayarri* // Computers & Graphics. – Elsevier, 1995. – Vol. 13, Issue 3. – 431–440 pp. 4. *Brosz J.* Single Camera Flexible Projection / *J. Brosz, F. Samavati, M. Sheelagh, T. Carpendale, M. Sousa* // In NPAR '07: Proceedings of the 5th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering. – New York, NY, USA. ACM Press, 2007. – 33–42 pp. 5. *Glasbey C.* A Review of Image Warping Methods / *Journal of Applied Statistics*, 25, 1989. – 155–171 pp. – Режим доступа : <http://www.bioss.ac.uk/people/chris/warp.pdf>. – Дата обращения : 20 мая 2015. 6. *Gustafsson A.* Interactive Image Warping / *A. Gustafsson* // [Master's Thesis]. Helsinki University of Technology. – 1993. – Режим доступа : <http://www.gson.org/thesis/warping-thesis.pdf>. – Дата обращения : 20 мая 2015. 7. *Szeliski R.* Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps / *R. Szeliski, H.-Y. Shum* // In SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. – 251–258 pp. 8. *Turkowski K.* Making Environment Maps from Fisheye Photographs / *K. Turkowski*. – 1999. – Режим доступа : <http://www.worldserver.com/turk/quicktimevr/fisheye.html>. – Дата обращения : 3 марта 2014. 9. *Yang Y.* Nonlinear Perspective Projections and Magic Lenses: 3D View Deformation / *Y. Yang, J. Chen, M. Beheshti* // Computer Graphics and Applications, IEEE. – 2005. – Vol.25, Issue 1. – 76–84 pp. 10. *Neumann P.* Taxonomy of Discrete Lenses / *P. Neumann, S. Carpendale* / Technical Report No. 2003-734-37. – Department of Computer Science, University of Calgary. – Режим доступа : [http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann\\_2003\\_TFD.pdf](http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann_2003_TFD.pdf). – Дата обращения : 3 марта 2014. 11. *Carpendale M.* A Framework for Unifying Presentation Space / *M. Carpendale, C. Montagnese* // In UIST '01: Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology. – New York, NY, USA. ACM Press, 2001. – 61–70 pp. 12. *Groller M.* A Distortion Camera for Ray Tracing / *M. Groller, P. Acquisti* // In Visualization and Intelligent Design in Engineering and Architecture. – Elsevier Science Publishers, 1993. 13. *Coleman P.* RYAN: Rendering Your Animation Nonlinearly projected / In NPAR. – 2004. Режим доступа : <http://www.dgp.toronto.edu/~patrick/papers/ryanNpar2004/ryanPaper.pdf>. – Дата обращения : 26 мая 2014. 14. *Wood D.* Multiperspective Panoramas for Cel Animation / *D. Wood*,

A. Finkelstein, J. Hughes, C. Thayer, D. Salesin // In SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. – 243–250 pp. **15.** Glassner A. S. Cubism and Cameras: Free-form Optics for Computer Graphics / A. Glassner // Technical report, Microsoft Research, 2000. – Режим доступа : <http://research.microsoft.com/pubs/69753/tr-2000-05.pdf> – Дата обращения : 26 май 2014. **16.** Agrawala M. Artistic Multiprojection Rendering / M. Agrawala, D. Zorin, T. Munzner // In 11th Eurographics Workshop on Rendering. – Brno, Czech Republic, 2000. – 125–136 pp. **17.** Singh K. A Fresh Perspective. / K. Singh // In Graphics Interface, 2002. – 17–24 pp. **18.** Projection Transform (Direct3D 9) / Programming Guide for Direct3D 9. – Режим доступа : <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/bb147302>

**Bibliography (transliterated):** **1.** Carlbom, I., Paciorek, J. “Planar Geometric Projections and Viewing Transformations.” *ACM Computing Surveys (CSUR)*. Vol.10. Issue 4. 1978. 465–502. Print. **2.** Rademacher, P., Bishop, G. “Multiple-Center-of-Projection Images.” In *SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA. ACM Press, 1998. 199–206 pp. Print. **3.** Bayarri, S. “Computing Non-Planar Perspectives in Real Time.” *Computers & Graphics*. Elsevier, 1995. Vol. 13, Issue 3. 431–440. Print. **4.** Brosz, J., Samavati, F., Sheelagh, M., Carpendale, T., Sousa, M. “Single Camera Flexible Projection” In *NPAR '07: Proceedings of the 5th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*. New York, NY, USA. ACM Press, 2007. 33–42. Print. **5.** Glasbey, C. “A Review of Image Warping Methods.” *Journal of Applied Statistics*, 25, 1989. 155–171 pp. Web. 20 May 2015 <<http://www.bioss.ac.uk/people/chris/warp.pdf>>. **6.** Gustafsson, A. “Interactive Image Warping” [Master’s Thesis]. *Helsinki University of Technology*. 1993. Web. 20 May 2015 <<http://www.gson.org/thesis/warping-thesis.pdf>>. **7.** Szeliski, R., Shum, H.-Y. “Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps” In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. 251–258. Print. **8.** Turkowski, K. “Making Environment Maps from Fisheye Photographs.” 1999. Web. 3 March 2014 <<http://www.worldserver.com/turk/quickttimevr/fisheye.html>>. **9.** Yang, Y., Chen, J., Beheshti, M. “Nonlinear Perspective Projections and Magic Lenses: 3D View Deformation.” *Computer Graphics and Applications*, IEEE. – 2005. Vol.25, Issue 1. 76–84 pp. Print. **10.** Neumann, P., Carpendale, S. “Taxonomy for Discrete Lenses.” Technical Report No. 2003-734-37. *Department of Computer Science, University of Calgary*. Web. 3 March 2015 <[http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann\\_2003\\_TFD.pdf](http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann_2003_TFD.pdf)>. **11.** Carpendale, M., Montagnese, C. “A Framework for Unifying Presentation Space.” In *UIST '01: Proceedings of the 14th annual ACM*

(v=vs.85).aspx. – Дата обращения : 20 мая 2015. **19.** Heidrich W. View-independent environment maps / W. Heidrich, H. – P. Seidel // In *HWWS '98: Proc. of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*, 1998. – 39–45 pp. **20.** Trapp M. A Generalization Approach for 3D Viewing Deformations of Single-Center Projections / M. Trapp, J. Döllner // *GRAPP*, 2008. – 163–170 pp. **21.** Trapp M. Generalization of single-center projections using projection tile screens / M. Trapp, J. Döllner // *Computer Vision and Computer Graphics. Theory and Applications*. – Springer, 2008. – 55–69 pp. **22.** Lorenz H. High-Quality Non-planar Projections Using Real-Time Piecewise Perspective Projections / H. Lorenz, J. Döllner // *VISIGRAPP (Selected Papers)*, 2009. – 45–58 pp.

*symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA. ACM Press, 2001. 61–70. Print. **12.** Groller, M., Acquistio, P. “A Distortion Camera for Ray Tracing” In *Visualization and Intelligent Design in Engineering and Architecture*. Elsevier Science Publishers, 1993. Print. **13.** Coleman, P. “RYAN: Rendering Your Animation Nonlinearly projected” In *NPAR*. 2004. Web. 26 May 2015 <<http://www.dgp.toronto.edu/~patrick/papers/ryanNpar2004/ryanPaper.pdf>>. **14.** Wood, D., Finkelstein, A., Hughes, J., Thayer, C., Salesin, D. “Multiperspective Panoramas for Cel Animation” In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. 243–250. Print. **15.** Glassner, A. “Cubism and Cameras: Free-form Optics for Computer Graphics” *Technical report, Microsoft Research*, 2000. Web. 26 May 2014 <<http://research.microsoft.com/pubs/69753/tr-2000-05.pdf>>. **16.** Agrawala, M., Zorin, D., Munzner, T. “Artistic Multiprojection Rendering” In *11th Eurographics Workshop on Rendering*. Brno, Czech Republic, 2000. 125–136. Print. **17.** Singh, K. “A Fresh Perspective.” In *Graphics Interface*, 2002. 17–24. Print. **18.** Programming Guide for Direct3D (Projection Transform (Direct3D 9)). Web. 3 March 2014 <[https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/bb147302\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/bb147302(v=vs.85).aspx)>. **19.** Heidrich, W., Seidel, H. – P. “View-independent environment maps” In *HWWS '98: Proc. of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*, 1998. 39–45 pp. Print. **20.** Trapp, M., Döllner, J. “A Generalization Approach for 3D Viewing Deformations of Single-Center Projections” *GRAPP*, 2008. 163–170. Print. **21.** Trapp, M., Döllner, J. “Generalization of single-center projections using projection tile screens” *Computer Vision and Computer Graphics. Theory and Applications*. Springer, 2008. 55–69. Print. **22.** Lorenz, H., Döllner, J. “High-Quality Non-planar Projections Using Real-Time Piecewise Perspective Projections” *VISIGRAPP (Selected Papers)*, 2009. 45–58. Print.

Посмунила (received) 05.11.2015

**Качанов Петр Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057) 70-76-101; e-mail: kpa@kpi.kharkov.ua

**Kachanov Peter Alexeyevich** – Doctor of technical sciences, Full Professor, head of the department "Automation and Control in Technical Systems", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) 70-76-101; e-mail: kpa@kpi.kharkov.ua

**Зув Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах»; тел.: (057) 70-76-842; aaz12345@inbox.ru.

**Zuev Andrey Aleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Automation and Control in Technical Systems"; tel.: (057) 70-76-842; e-mail: aaz12345@inbox.ru.

**Яценко Константин Николаевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант, ассистент кафедры «Автоматика и управление в технических системах»; тел.: +380969655159; e-mail: knyatsenko@gmail.com.

**Yatsenko Konstantin Nikolaevich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student; tel.: +380969655159; e-mail: knyatsenko@gmail.com.