

Программно-аппаратные комплексы виртуального окружения – ключевые компоненты технологий виртуального инжиниринга

Н.Н. Шабров (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Мировое индустриальное общество в настоящее время вступает в новую фазу своего развития под названием *Industrie 4.0* (Германия) или *Industrial Internet* (США). Это обусловлено уровнем высокой конкуренции в промышленности в мире и, как следствие, поисками новых технологий производства. Создание конкурентоспособной продукции тесно связано с проблемами вычислительного обеспечения предсказательного моделирования прорывных технологий многомасштабных и мультидисциплинарных процессов на основе современных суперкомпьютерных вычислительных систем (*НРС*). Предполагается, что объемы данных, генерируемые пета/эксафлопсными вычислениями, достигнут уровня петабайт (10^{15}) и эксабайт (10^{18} байт). Это означает, что для анализа результатов петафлопсного моделирования в режиме *Real Time*, системы виртуального окружения являются едва ли не единственным эффективным средством осмысления огромного объема данных. Вместе с тем, такие системы являются важной компонентой **технологий виртуального инжиниринга**, которые представляют собой расширение доминирующих в настоящее время технологий цифрового инжиниринга. В предлагаемой работе обобщен и развит опыт создания и применения многоэкранных систем виртуального окружения для анализа результатов предсказательного моделирования сложных объектов науки и техники. Поддержка в части проведенных исследований осуществлялась в рамках гранта РФФИ № 13-07-12077 офи_м.

К основным вызовам XXI века можно отнести проблемы изменения климата, энергетики, освоения водных ресурсов, сохранения окружающей среды, подземной гидродинамики, атмосферы, гидросферы, проблемы процессов турбулентного горения в технических и природных системах, проблемы борьбы с последствиями стихийных бедствий или техногенных катастроф. Решить их можно лишь при условии вычислительного обеспечения прорывных технологий предсказательного моделирования на основе современных суперкомпьютерных вычислительных систем.

Существуют два типа задач предсказательного моделирования: **ординарные** и **экстраординарные**. Для ординарных задач есть гарантия получения решения средствами коммерческого программного кода многоцелевого назначения, что вполне обеспечивается набором моделей и численных схем этого кода. Решение экстраординарных задач невозможно обеспечить набором физических и математических моделей коммерческого

кода многоцелевого назначения в силу неадекватности используемых моделей или в силу неэффективного масштабирования вычислений. Для решения экстраординарных задач требуется разработка уникальных физических моделей и уравнений состояния объекта, разработка численных схем решения уравнений и, в итоге, создание проблемно-ориентированной специализированной (*in-house*) программной системы со всеми атрибутами, присущими современной системе, включая пре- и пост процессор, онлайн-справку (*on-line help*), средства формирования онлайн-отчета и т.д.

Мировые суперкомпьютерные центры петафлопсного класса предназначены в первую очередь для вычислительного обеспечения предсказательного моделирования при решении экстраординарных задач фундаментальной и прикладной науки – физики, биологии, химии, молекулярной динамики, аэродинамики гиперзвуковых летальных аппаратов, вычислительной механики материалов, моделирования многомасштабных процессов в техногенных системах и т.д.

Следует отметить, что общим мировым трендом в задачах вычислительного обеспечения прорывных технологий и в предсказательном моделировании на суперкомпьютерах является **разработка специализированных проблемно-ориентированных кодов**, эффективно использующих преимущества высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем с целью достижения максимального параллелизма.

Задачам вычислительного обеспечения прорывных технологий в России давно уделяется большое внимание. В марте 2016 года в федеральном исследовательском центре им. М.В. Келдыша (Москва) состоялся российско-германский семинар по вопросам суперкомпьютерных вычислений в решении фундаментальных и прикладных задач (*Supercomputing in scientific and industrial problems*) [1]. Семинар был организован двумя ключевыми фигурами в мировом суперкомпьютерном сообществе: профессором **М. Решем** (*Michael M. Resch*), директором ведущего суперкомпьютерного центра Европы – суперкомпьютерного центра университета Штутгарта (Германия), и академиком РАН **Б.Н. Четверушкиным** – научным руководителем одного из признанных лидеров суперкомпьютерных вычислений в России, Института прикладной математики РАН.

Научные школы суперкомпьютерных центров университета Штутгарта и Института прикладной

математики РАН объединяет общая стратегия в оценке и развитии – в ключе общемирового тренда – научных подходов при разработке и создании эффективных масштабируемых параллельных алгоритмов и технологий решения задач вычислительного обеспечения прорывных технологий. Научный руководитель федерального исследовательского центра им. М.В. Келдыша академик РАН Б.Н. Четверушкин обосновал приоритетное значение разработки эффективной программной среды исполнения параллельных приложений на сетках с числом узлов свыше миллиарда. Он привел примеры, когда формальное применение стандартных подходов в моделировании на суперкомпьютерах приводит к утрате преимуществ в быстродействии высокопроизводительной вычислительной системы. В этой связи была подчеркнута необходимость разработки нестандартных подходов и алгоритмов параллельных вычислений на суперкомпьютерных системах с числом ядер от 100 000 и выше и создания эффективных проблемно-ориентированных кодов. Директор суперкомпьютерного центра университета Штутгарта профессор Михаэль Реш, на примере задачи моделирования на микроструктурном уровне процессов затвердевания сплавов на сетках с числом свыше 10 миллиардов узлов, выполняемой на суперкомпьютере производительностью 7.42 Pflops, показал новые подходы в создании эффективных проблемно-ориентированных *in-house* кодов и новых средств анализа результатов моделирования.

Является общепризнанным, что анализ и визуализация потоков данных при моделировании на сверхбольших сетках требует создания как новых программных технологий анализа и визуализации, так и новых аппаратных средств визуализации. Это означает, что для анализа результатов пета- и эксафлопсного моделирования в режиме *Real Time*, системы виртуального окружения типа **CAVE 3D (Computer Aided Virtual Environment)** являются едва ли не единственным эффективным средством осмысления огромного объема данных и будут играть ключевую роль в ближайшем будущем.

Актуальность создания систем виртуального окружения типа *CAVE 3D* в настоящее время осознана всеми ведущими суперкомпьютерными центрами мира и крупными промышленными компаниями. Эти среды наиболее востребованы в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, авиационная, автомобильная, судостроительная, при анализе результатов моделирования сложных процессов газодинамики, химии, биологии, горения, геомеханики и т.д.

В последнее время системы *CAVE 3D* часто называют **центрами принятия решений (Immersive Decision Making)**. Уже сейчас системы виртуального окружения используются

в ведущих промышленных компаниях мира как место и средство принятия решений **путем погружения в исследуемый объект или процесс**. Именно в этих центрах целесообразно проводить совместные совещания разработчиков, решающих судьбу создаваемого ими изделия, когда можно в режиме *Real Time* протестировать параметры изделия на примере его виртуального образа.

Растущее внимание мирового сообщества вычислителей к технологиям анализа и визуализации на основе систем виртуального окружения убедительно показано тематикой заявленного в августе 2015 года в США регулярно проводимого симпозиума *Virtual Environments & Systems Symposium*, проводимого в рамках конференции *ASME International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering (CIE)*. В программе симпозиума **было объявлено 24 тематических направления технологий виртуального прототипирования**, которые покрывают многие области знаний.

Одним из приоритетов в области стратегических информационных технологий в России является построение отечественных суперкомпьютеров и **создание, на их базе, виртуальных моделей самолетов, автомобилей, кораблей, объектов энергетики, таких как АЭС, и других наукоемких техногенных систем**. Технологии визуализации в виртуальных средах в настоящее время претерпевают интенсивное развитие в сторону расширения интерактивной составляющей функциональности виртуальных сред, когда наблюдатель оперирует с виртуальным образом объекта так, как он оперировал бы с реальным физическим объектом. Составной частью современных систем виртуального окружения становится высокопроизводительный видеокластер, который выполняет часть вычислительной работы по обработке видеоизображения в режиме постпроцессинга. В перспективе видеокластеры примут на себя функции быстрой декомпрессии данных с использованием процессоров, установленных на графических ускорителях (*GPU*), функции реконструкции визуального представления объекта на основе редуцированных данных моделирования, параллелизации рендеринга и т.д. Системы типа *CAVE 3D* уже являются неотъемлемой частью инфраструктуры суперкомпьютерных (**СК**)

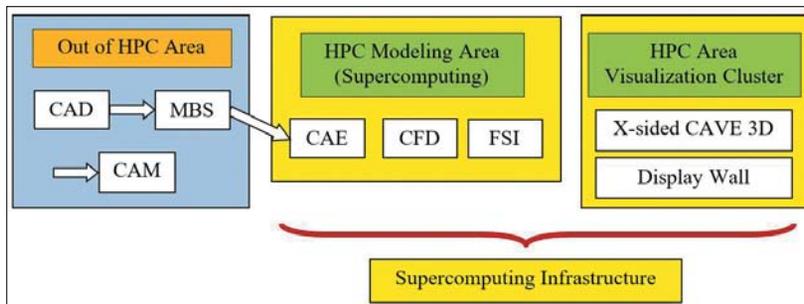


Рис. 1. Инфраструктура суперкомпьютерного центра

центров и используются при проведении полномасштабных фундаментальных и прикладных исследований в ведущих научных центрах и университетах и научных лабораториях Европы, США и Китая (рис. 1).

В настоящее время в мире существует более 100 крупномасштабных установок виртуальной реальности, которые находят применение в самых различных областях науки и техники, решая задачи как фундаментальных научных дисциплин, так и специализированных прикладных направлений на основе технологий **Virtual Engineering**. Такими системами располагает большинство ведущих компаний мира – *Boeing, Airbus, Ford, General Motors, BP* и другие. Следует отметить, что министерство обороны США ежегодно тратит на развитие систем виртуального окружения до 4 млрд. долларов. В профессиональных кругах признано, что системы *X-sided CAVE 3D* являются едва ли не единственным средством анализа огромных массивов данных уровня терабайт и петабайт, генерируемых *HPC*-системами.

В рамках стратегии **IESP (International Exascale Software Project)** запланировано глобальное развертывание в университетах и научно-исследовательских лабораториях мира крупномасштабных систем *X-sided CAVE 3D* с высоким разрешением для визуализации и анализа данных (до 200 мегапикселей). Ведущие университеты мира обновляют инфраструктуру своих СК-центров, устанавливая крупномасштабные системы виртуального окружения типа *CAVE 3D* с разрешением 200 млн. пикселей. К их числу относятся университет штата Айова, университет науки и технологий Саудовской Аравии, университеты Штутгарта и Ахена и др. На настоящий момент крупнейшая в Европе система *5-sided CAVE 3D* установлена в

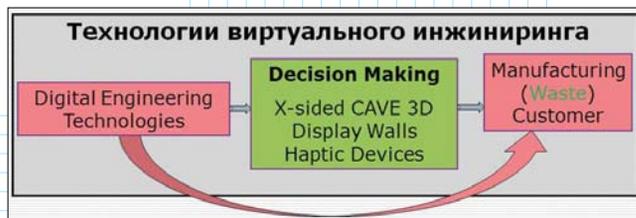


Рис. 3. Анализ виртуальной модели в Центре принятия решений перед началом производства изделия позволяет уменьшить количество брака

университете *RWTH (Ахен)* – она имеет боковой экран размером 5.25 м × 3.30 м.

Технологии **Virtual Engineering** представляют собой новую фазу развития технологий моделирования и анализа, и являются расширением технологий **Digital Engineering**, которые в настоящее время доминируют в мире при разработке наукоемких изделий машиностроения (в широком смысле). Среда **Virtual Engineering** определяется как открытая интерактивная функциональная среда, в которую интегрируется набор технологий виртуального прототипирования. Набор технологий виртуального прототипирования включает, в первую очередь, технологии создания геометрических моделей средствами *CAD*-систем, моделирования процессов (*Multibody Simulation – MBS, Fluid Structure Interaction – FSI, Computational Fluid Dynamics – CFD* и др.) в режиме распределенной работы группами исследователей (*Collaborative Work*), проведения анализа результатов моделирования средствами программно-аппаратных комплексов *3DiVR* и технологии принятия решений (рис. 2, 3).

Отличительных успехов в развитии технологий виртуального инжиниринга в Европе достигли научные центры университетов Штутгарта и Ахена [2–4], в которых наряду с существенным развитием аппаратной части систем виртуального окружения ведется разработка специализированного программного обеспечения *COVISE* и *ViSTA* для моделирования в виртуальных средах. К настоящему времени системы *COVISE* и *ViSTA* доступны пользователям в открытых кодах в рамках *LGPL* [5, 6].

При этом следует указать на распространенное заблуждение, что *CFD*- или *FSI*-технологии представлены исключительно коммерческим программным обеспечением. Создание конкурентоспособной продукции относится к разряду уникальных экстраординарных задач, решение которых осуществляется главным образом на основе корпоративного (*in-house software*) проблемно-ориентированного ПО, которое создается с учетом специфики задачи и

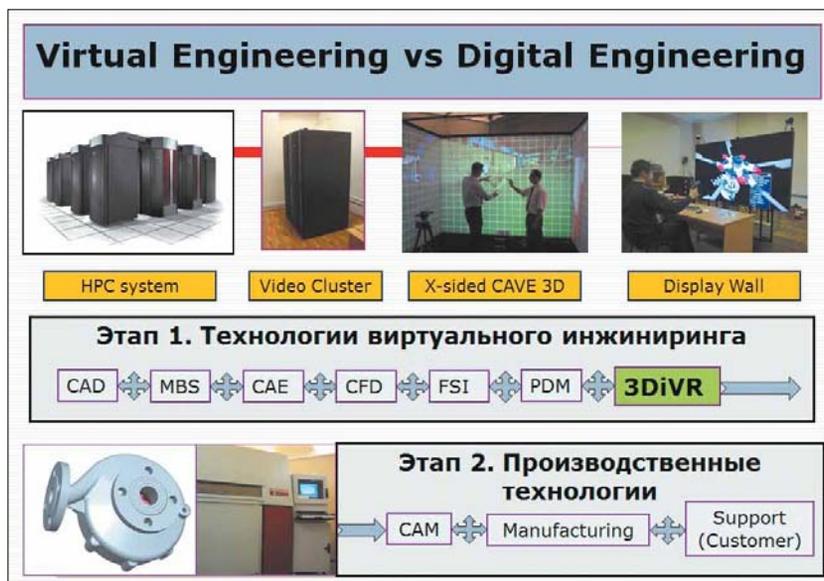


Рис. 2. Интеграция технологий цифрового инжиниринга и программно-аппаратного комплекса 3DiVR

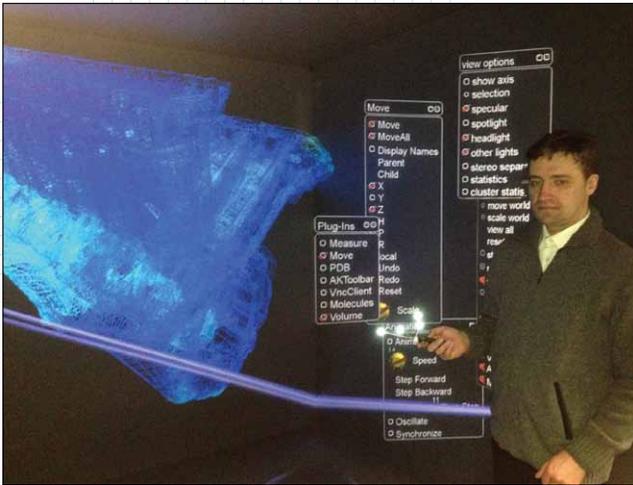


Рис. 4. Анализ результатов моделирования процессов средствами программно-аппаратного комплекса CAVE 3D

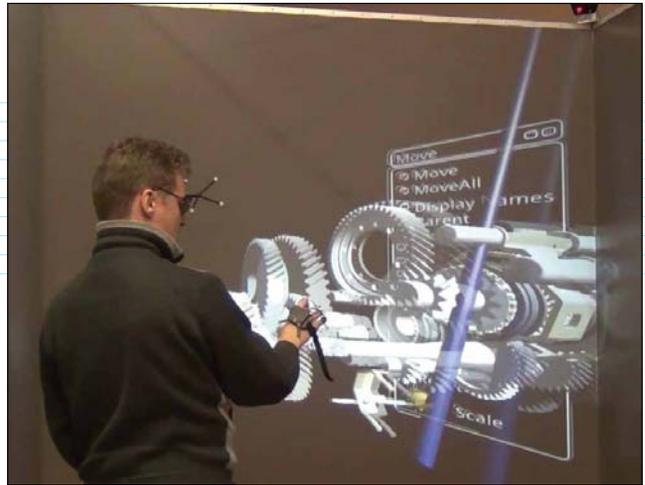


Рис. 5. Управление виртуальным объектом в среде CAVE 3D с помощью новой системы ввода и устройства Fingertracking

конкретной архитектуры вычислительной системы. Коммерческое ПО, в силу своей консервативной архитектуры и растущего отставания от темпов развития архитектуры аппаратных средств, недостаточно эффективно использует ресурсы многоядерных многопроцессорных вычислительных систем. В связи с этим крупные промышленные компании, выпускающие конкурентоспособную, наукоемкую и высокотехнологичную продукцию (автомобилестроение, авиастроение, машиностроение), для решения специализированных экстраординарных задач вынуждены инвестировать средства в разработку собственного специализированного программного обеспечения, которое и составляет новое наполнение технологий *Virtual Engineering*.

Главным отличием технологий *Virtual Engineering* от технологий *Digital Engineering* является вовлечение потенциала исследователя в новой фазе общего процесса проведения моделирования, анализа его результатов и принятия

решений средствами интерактивной среды виртуального окружения. При этом понимание результатов моделирования достигается естественным образом – путем полного погружения исследователя в киберпространство виртуального мира объекта и интерактивного взаимодействия с ним, как если бы это был реальный объект (рис. 4, 5). Технологии *Virtual Engineering* в настоящее время являются ключевыми для создания конкурентоспособной продукции машиностроения ведущими компаниями мира.

Первые в России установки систем виртуальной реальности для анализа результатов научных и прикладных исследований были созданы в МИФИ [7] и СПбПУ. Работы по созданию и развитию программного обеспечения для таких установок постоянно поддерживаются грантами РФФИ [8,9].

В 2007 году в СПбПУ на кафедре “Компьютерные технологии в машиностроении” (КТМ) был введен в эксплуатацию программно-аппаратный

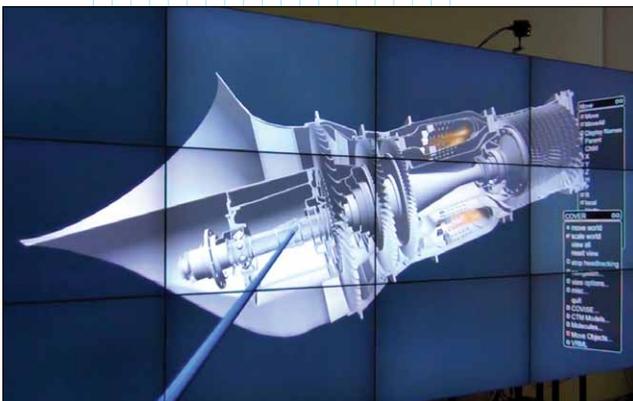


Рис. 6. Иллюстрация интерактивного анализа модели газотурбинного двигателя с использованием видеостены 12 LCD NEC 46" UN и оптической системы трекинга TrackPack2



Рис. 7. Иллюстрация интерактивного анализа модели дизеля с использованием видеостены 4 LCD NEC 46" UN и оптической системы трекинга TrackPack2



Рис. 8. Анализ результатов моделирования развития пожара в закрытом помещении средствами системы виртуального окружения CAVE 3D

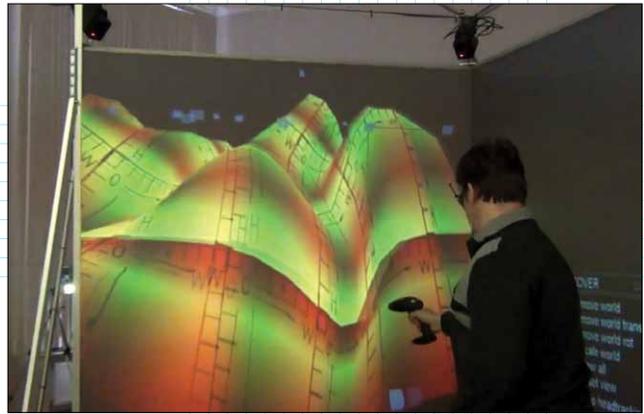


Рис. 9. Модификации поверхности виртуального объекта в системе виртуального окружения 3-sided CAVE 3D в режиме Real Time

комплекс виртуального окружения **3-sided CAVE 3D** с тремя просветными экранами, оптической трекинг-системой и многопроцессорным видеокластером. Этот комплекс является на сегодняшний день одним из немногих в России инструментов комплексного анализа сверхбольших моделей на основе технологий виртуальной реальности. Со временем функциональные возможности программно-аппаратного комплекса получили расширение – так, были введены в эксплуатацию две видеостены на базе LCD-мониторов NEC 46" UN.

Состав программно-аппаратного комплекса СПбПУ 3-sided CAVE 3D:

- проекционно-экранное оборудование, 3 просветных экрана и 6 проекторов;
- высокопроизводительный видеокластер с пиковой производительностью 1.4 Tflops на базе процессоров Quad Core Intel Xeon E5420, 2.50 GHz (144 ядра);
- высокоскоростное коммутационное оборудование Myrinet и Infiniband;
- оптическая трекинг-система, 6 инфракрасных камер ARTtrack2 (4 в верхней части киберпространства и 2 – в нижней);
- два устройства управления виртуальными объектами Flystick и Fingertracking;
- система видеоконференции для работы с удаленными клиентами;
- два узла на базе GPGPU-архитектуры и процессора Fermi;
- устройства хранения данных емкостью 24 Tb;
- видеостена с разрешением 2732x1536 на базе 4-х LCD-мониторов NEC 46" UN (рис. 7, 11);
- видеостена с разрешением 5464x2304 на базе 12-ти LCD-мониторов NEC 46" UN и с оптической трекинг-системой TrackPack2 с DTrack2 в комплекте с устройством управления Flystick2 (рис. 6).

С момента своего создания комплекс виртуального окружения 3-sided CAVE 3D СПбПУ активно используется в научных исследованиях в области

прикладной механики, газодинамики турбомашин, молекулярной динамики. Не остались в стороне и промышленные предприятия Санкт-Петербурга, среди которых в первую очередь следует отметить ОАО “Звезда” и ОАО “Силовые

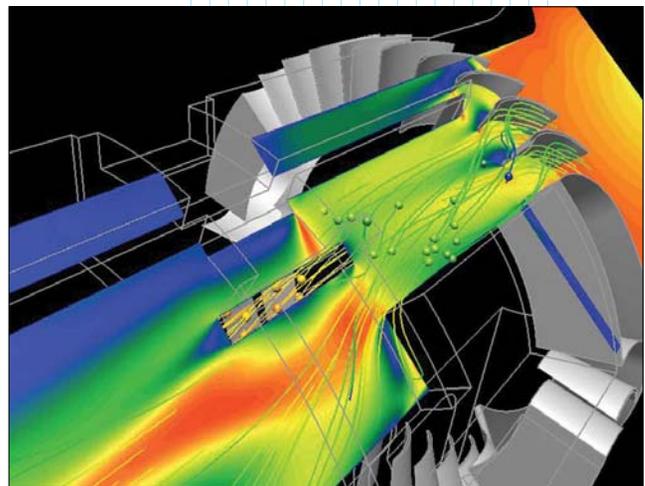


Рис. 10. Анализ результатов CFD-моделирования процесса охлаждения ротора электрогенератора с использованием видеостены 4 LCD NEC 46" UN

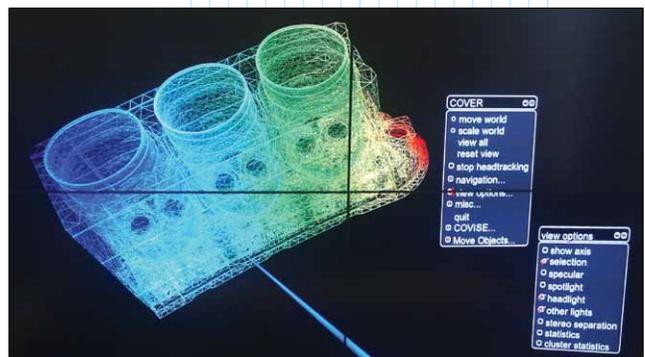


Рис. 11. Анализ результатов CAE для блока дизеля с использованием видеостены 4 LCD NEC 46" UN и оптической системы трекинга TrackPack2

машины”. Технологии виртуального прототипирования применяются этими предприятиями при анализе результатов предсказательного моделирования поведения новых конструкций двигателей, мощных паровых турбин и электрогенераторов.

Совместно с Институтом математического моделирования РАН выполнены уникальные работы (с использованием параллельных компьютерных технологий) по созданию программного обеспечения для интерактивной стереовизуализации изоповерхностей результатов моделирования на сверхбольших сетках (с числом узлов до 10^9) в режиме *Real Time* в системе *CAVE 3D* [10–12]. Рассматривается задача построения изоповерхности на нерегулярной сетке тетраэдров, в узлах которой задано скалярное поле. Реализации параллельных алгоритмов построения изоповерхностей выполнялись на основе многоядерной вычислительной архитектуры с использованием видеокластера производительностью 1.4 *Tflops* на базе процессора *Intel Quad Core Xeon*.

В качестве объекта технологий виртуального прототипирования может выступать любая цифровая модель – в том числе, и модели архитектурных объектов. Так на основе технологий виртуального прототипирования создана трехмерная интерактивная стереомодель для реконструкции утраченного объекта культурного наследия РФ – Павловского музыкального вокзала. Данный проект стал результатом сотрудничества кафедры КТМ СПбПУ, Государственного музея-заповедника “Павловск” и Фонда поддержки и развития ГМЗ “Павловск”.

Среди выполненных в последнее время работ по анализу результатов предсказательного моделирования средствами систем виртуального окружения следует отметить анализ моделирования разрушения и вылета фрагментов лопатки паровой турбины при анализе безопасности АЭС, анализ моделирования процессов горения в техногенных системах (рис. 8), анализ моделирования процесса охлаждения ротора мощного электрогенератора (рис. 10), анализ модели компоновки агрегатов авиационного газотурбинного двигателя, анализ результатов моделирования аэродинамики летательных аппаратов, алгоритм модификации поверхности виртуального объекта в режиме *Real Time* (рис. 9).

Программно-аппаратные комплексы виртуальной реальности в России, как и во всём мире, должны стать необходимым и естественным модулем в инфраструктуре современных исследовательских суперкомпьютерных центров. Следует отметить, что в отличие от быстро стареющего вычислительного оборудования, оборудование систем виртуального окружения стареет гораздо медленнее и может использоваться для нескольких поколений дорогостоящих высокопроизводительных вычислительных систем. 🍌

Литература

1. Supercomputing in scientific and industrial problems. German-Russian conference, March 9–11, 2016, Moscow, 31 p.
2. Wössner U., Kieferle J., Becker M. Interactive simulations – an intuitive way of making supercomputing resources available to the end user. *Aktuelle Trends in der Softwareforschung*, 2006, pp. 84–94.
3. Becker M., Wössner U. Tangible interfaces for interactive flow simulation. *The 2nd Russian-German Advanced Research Workshop on Computational Science and High Performance Computing*, 2005.
4. Childs H., Geveci B., Schroeder W., Meredith J., Moreland K., Sewell C., Kuhlen T., Bethel E.W. Research challenges for visualization software. *Computer*, 2013, pp. 34–42.
5. COVISE (Collaborative Visualization and Simulation Environment) // www.hlr.de/organization/vis/covise
6. ViSTA (Virtual Reality for Scientific Technical Applications) // www.itc.rwth-aachen.de/go/id/fqmo
7. Klimenko S., Nikitina L., Nikitin I. Real-time simulation of flexible materials in Avango Virtual Environment Framework. *Eurographics 2003 – Slides and Videos*. Eurographics Association, 2003.
8. Поляков С.В., Якобовский М.В. Геометрическое моделирование и визуализация в задачах современной электроники. *Научная визуализация*, 2009, т. 1, № 1, с. 19–65.
9. Алешин А., Афанасьев В., Брусенцев П., Ерёмченко Е., Клименко А., Клименко С., Никитин И., Никитина Л., Пестриков В., Сурин А., Сурина О. Актуальные информационные технологии: визуализация информации, виртуальное окружение, неогеография, осязаемые изображения. *Научная визуализация*, 2013, т. 5, № 4, с. 1–17.
10. Akayev A.A., Kuzin A.K., Orlov S.G., Chetverushkin B.N., Shabrov N.N., Iakobovski M.V. Generation of isosurface on Large Mesh. *Proceeding of the IASTED International Conference on Automation, Control, and Information Technology. Information and Communication Technology (ACIT-ICT 2010)*, Novosibirsk, Russia, 2010, pp. 236–240.
11. Shabrov N.N., Kuzin A.K., Orlov S.G., Chetverushkin B.N., Iakobovski M.V. Virtual prototyping modeling in the cave 3D environment. *ICAS Congress*, Saint Petersburg, 2014.
12. Shabrov N., Ispolov Y., Orlov S. Simulations of continuously variable transmission dynamics. *ZAMM*, 2014.

Об авторе:

Н.Н. Шабров – эксперт РФФИ РАН, работает в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, кафедра “Компьютерные технологии в машиностроении” (shabrov@rwwws.ru, www.ctmech.ru).