

УДК 681.3.069, 681.324

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ
В ШИРОКОЭКРАННЫХ СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

А.А. Безгодов, А.С. Загарских, А.В. Бухановский

Рассматриваются особенности компьютерного моделирования и интерактивной визуализации динамики морских объектов на нерегулярном волнении для задач исследовательского проектирования в судостроении применительно к широкоэкранным системам виртуальной реальности СПбГУ ИТМО.

Ключевые слова: интерактивная визуализация, стереоизображение, сетки, привязанные к камере, морфологическое сглаживание.

Введение

Современный уровень высокопроизводительных технологий компьютерного моделирования характеризуется стремительным ростом объемов расчетных данных, что затрудняет их практическую интерпретацию и анализ. Несмотря на то, что отдельные предметные области допускают применение формальных методов, эффективно снижающих размерность исходных данных, основным подходом к отображению результатов моделирования сложных объектов и систем является научная визуализация, обеспечивающая «погружение» исследователя в моделируемое явление с возможностью всестороннего наблюдения и анализа воспроизводимых закономерностей реального мира. Эффект «погружения» может быть усилен за счет применения интерактивных технологий, отображающих реакцию моделируемого объекта на разнообразные внешние воздействия, инициируемые пользователем. Такой подход, получивший название виртуальной реальности (VR), развивается в тесной связке с вычислительными технологиями компьютерного моделирования и служит основой для создания современных систем поддержки принятия решений в области проектирования сложных технических систем и комплексов, в частности – морских судов и объектов океанотехники [1].

Специфика исследовательского проектирования морских объектов состоит в неопределенности и неполноте информации об их поведении в экстремальных ситуациях, совокупно вызванных воздействием внешней среды, инициируемых им опасных ситуаций (например, интенсивным обледенением) и внутренних дестабилизирующих факторов (смещения груза, затопления отсеков и пр.). При этом развитие аварийной ситуации происходит по различным сценариям, которые не могут быть в общем случае сведены к ограниченному набору типовых случаев. Поскольку натурные испытания для их изучения не представляются возможными, а физический эксперимент в опытовом бассейне экономически не оправдан на этапе исследовательского проектирования, основным инструментом поддержки принятия решений становятся численные модели динамики морских объектов [2], позволяющие количественно воспроизвести их поведение под воздействием реалистичных внешних возмущений. Это, в свою очередь, открывает определенные перспективы для применения технологий VR.

В работе рассматриваются особенности компьютерного моделирования и интерактивной визуализации динамики морских объектов для задач исследовательского проектирования в судостроении применительно к системе VR Центра ситуационного моделирования и визуализации (ЦСМВ) СПбГУ ИТМО. Система имеет недеполяризующий стерео-экран обратной проекции размером 3,35×2,0 м, изображение на котором формируется посредством шести HDTV DLP-проекторов Rohag Projectiondesign, управляемых специализированной системой обработки стереоизображения. Собственно создание и подготовка изображения выполняются на рабочей станции HP Z800, оснащенной видеокартой nVidia Quadro FX 5800. Интерактивное взаимодействие с наблюдателем в системе VR обеспечивается с помощью манипулятора с шестью степенями свободы производства 3dConnexion серии Space Pilot. Допускается использование купольных поворотных камер AXIS AX0245 для отслеживания перемещения наблюдателя относительно моделируемого объекта.

Метод моделирования динамики морского объекта на нерегулярном волнении

Реалистичная визуализация в реальном времени требует применения адаптированных моделей и методов компьютерного моделирования динамики морских объектов, ориентированных на воспроизведение основных качественных эффектов с разумным уровнем точности для широкого диапазона условий эксплуатации. Поскольку структура традиционных моделей в форме идеализированных уравнений движения [3] существенно различается для воспроизведения разных экстремальных ситуаций (что ограничивает области их применения), в работе использован прямой метод, основанный на вычислении главных сил и моментов непосредственным интегрированием по мгновенной погруженной поверхности корпуса объекта S :

$$\mathbf{F} = - \left[\iint_S p \mathbf{n} dS \right] - \left[\iint_S \boldsymbol{\eta} dS \right] + \mathbf{D}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = - \left[\iint_S (p \mathbf{n}) \times (\mathbf{r} - \mathbf{p}) dS \right] - \left[\iint_S \boldsymbol{\eta} \times (\mathbf{r} - \mathbf{p}) dS \right], \quad (2)$$

где \mathbf{D} – весовое водоизмещение объекта; p – давление воды в точке; \mathbf{n} – нормаль к поверхности; \mathbf{r} – радиус-вектор точки поверхности в глобальных координатах; \mathbf{p} – положение объекта в пространстве, определяемое шестью степенями свободы; $\boldsymbol{\eta}$ – демпфирующая сила, действующая на единицу поверхности корпуса объекта. В первом приближении демпфирующую силу допустимо рассматривать пропорциональной скорости \mathbf{V} перемещения корпуса судна и модуля косинуса угла между нормалью и направлением потока; коэффициент пропорциональности определяется экспериментально по записям затухающих колебаний.

В каждый момент времени t граница погруженной поверхности $S(t)$ определяется исходя из мгновенного профиля взволнованной поверхности моря, задаваемой моделью Лонге-Хиггинса [4], идентифицируемой по частотно-направленному спектру волнения $E(u, v)$, где u, v – волновые числа. Несмотря на относительно слабую сходимость модели, ее достоинством является возможность наглядной гидродинамической интерпретации с точки зрения определения волновых давлений в терминах вертикальных смещений Δz частиц жидкости на глубине z_0 :

$$p(t, x, y, z_0) = [\Delta z(t, x, y, z_0) - z_0] \rho g, \quad (3)$$

где

$$\Delta z(x, y, z, t) = \sum_i \sum_j e^{\sqrt{u^2 + v^2} z} a_{ij} \cos(u_i x + v_j y - \omega(u_i, v_j) t + \phi_{ij}). \quad (4)$$

Здесь a_{ij} – коэффициенты модели Лонге-Хиггинса; ϕ_{ij} – равномерно распределенные случайные фазы; $\omega = \omega(u, v)$ – дисперсионное соотношение для волн малой амплитуды, ρ – плотность воды.

Аналитическое вычисление значений (1)–(2) при заданных характеристиках входных воздействий (3)–(4) возможно только для модельной формы корпуса, например, задаваемой эллипсоидом вращения. В общем случае при произвольной геометрии морского объекта соответствующие интегралы рассчитываются численно по квадратурным формулам типа Маркова с локально распределенными случайными узлами, перестраиваемыми на каждом шаге t .

Значения главных сил (1) и моментов (2) в каждый момент времени t позволяют определить скорости и перемещения произвольной точки корпуса объекта. При этом модель (1–4) является достаточно удобной для целей интерактивной визуализации: она позволяет в реальном времени с достаточной точностью воспроизводить динамику морских объектов с учетом всех шести степеней свободы. Дополнительно, выражения (1)–(2) достаточно легко модифицируются путем добавления сил и моментов, вызванных как внешними воздействиями (ветровой шквал, удар разрушающейся волны и пр.), так и динамическими аспектами (перекладка руля, работа движителя). Как следствие, это позволяет придать задаче управления процессом визуализации в рамках (1)–(2) ясную физическую интерпретацию: нестационарные изменения режимов движения объекта (например, поворот на заданный курс) осуществляются путем приложения виртуальных сил, направление и интенсивность которых задается наблюдателем посредством манипулятора системы ВР.

Технология визуализации взволнованной поверхности моря

Технологии визуализации движения самого объекта в соответствии с заданной траекторией $\mathbf{p}(t)$ в настоящее время достаточно хорошо проработаны и не нуждаются в детальном обсуждении. Однако для создания эффекта «погружения» в системе ВР необходимо дополнительно отображать визуально бесконечную водную поверхность, простирающуюся от точки наблюдения до горизонта. С этой целью была применена технология неравномерных сеток, привязанных к камере [5]. Она позволяет компоновать сеточную область из трех частей (рис. 1).

Область А (дно) используется для маркировки буфера трафарета при отображении раздела сред, область В (так называемая область интенсивного волнения) применяется для отображения собственно волн в соответствии с моделью (4), а область С (область горизонта) находится достаточно далеко от наблюдателя; в ней видимой высотой волн в процессе визуализации можно пренебречь. В процессе визуализации центр такой сетки всегда находится под или над камерой. Поворот камеры на ориентацию сетки в пространстве не влияет. Вертикальная координата вершин в области В модифицируется вершинным шейдером в соответствии с расчетными значениями по (3). При этом высота волн плавно уменьшается по мере увеличения расстояния от наблюдателя. Таблица предрасчитанных ординат взволнованной поверхности передается в вершинный шейдер как трехмерная текстура. Дополнительно при закрасивании водной поверхности учитывается частичное отражение Френеля (только небо, рис. 2, В), и частичное

преломление с затуханием по глубине (рис. 2, С). В рамках используемой технологии визуализации камера может находиться не только над водой, но и под водой, а также на границе сред. Для корректного отображения границы сред при визуализации морской поверхности применяется эффект затуманивания, рис. 2, А.

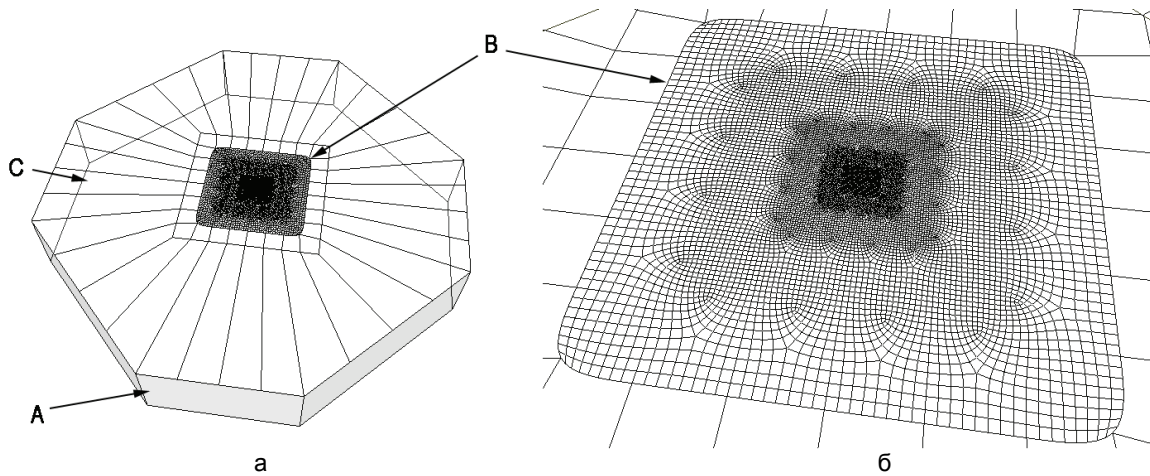


Рис. 1. Сетка для отображения морской поверхности: общая структура сетки (а), сетка области интенсивного волнения (б); А – дно; В – область интенсивного волнения; С – область горизонта

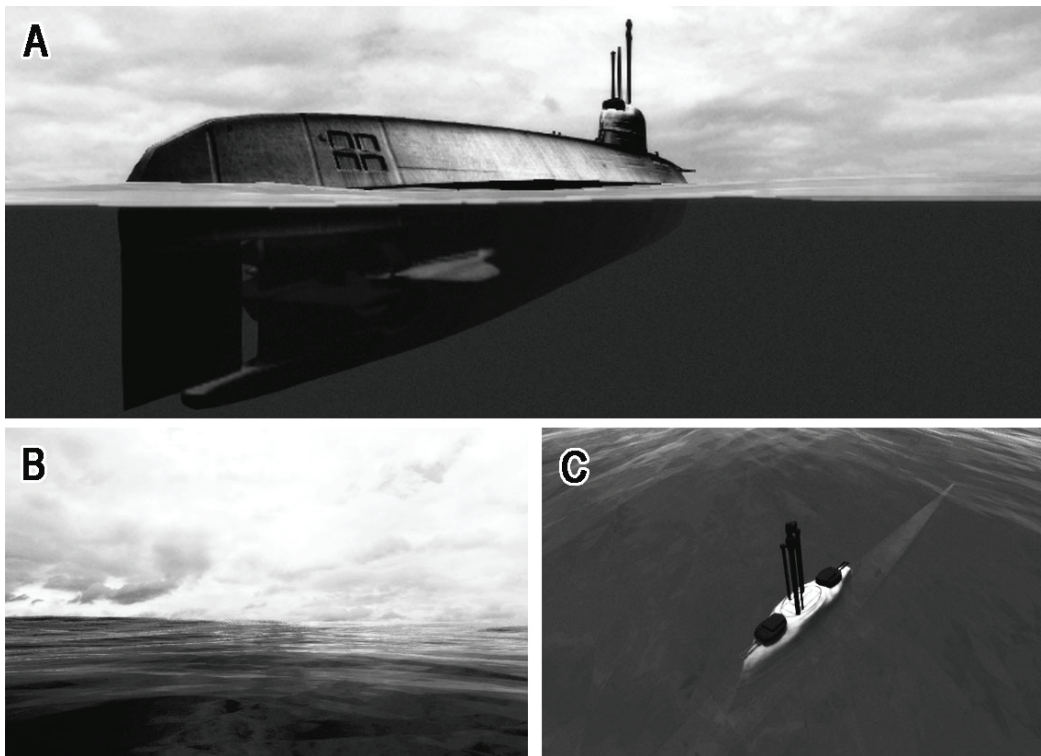


Рис. 2. Эффекты визуализации водной поверхности: раздел сред (А); отражение Френеля (В); затухание по глубине (С)

Дополнительным аспектом отображения визуальных свойств водной поверхности является воспроизведение расходящихся корабельных волн при движении плавучего морского объекта. Поскольку нелинейная задача расчета корабельных волн в полной постановке является существенно более ресурсоемкой по сравнению с моделью (1)–(4), для создания визуального эффекта используется упрощенная модель, основанная на решении линейного уравнения колебаний на регулярной сетке. Начальное возмущение формируется в точке первого (по курсу) пересечения корпуса объекта и водной поверхности. Результат решения уравнения как набор значений в текстуре передается в вершинный шейдер, и высота колебаний добавляется к высоте волн. В тех областях, где скорость частиц колеблющейся поверхности выше определенного значения, поверхность моря окрашивается в белый цвет, что создает визуальный эффект пенообразования.

Адаптация технологии визуализации для широкоэкранный системы виртуальной реальности

Технология визуализации динамики морского объекта с обеспечением эффекта «погружения» реализована в форме программной системы на языке Microsoft Visual C++. В качестве графического API используется OpenGL 3.3. Для компиляции шейдеров применяется библиотека nVidia Cg Compiler. Данная система не предъявляет существенных требований к аппаратному обеспечению визуализации и может использоваться даже на обычной рабочей станции с соответствующей видеокартой. Однако ее адаптация к особенностям системы ВР дает возможность поддерживать синтез стереоизображения с использованием расширения `GL_EXT_quad_buffer`. В данном случае используются четыре экранных буфера: Back Left, Back Right, Front Left, Front Right, что, в свою очередь, позволяет выбирать правый или левый буфер экрана с целью создания раздельного изображения для восприятия левым и правым глазом наблюдателя (с применением соответствующих очков).

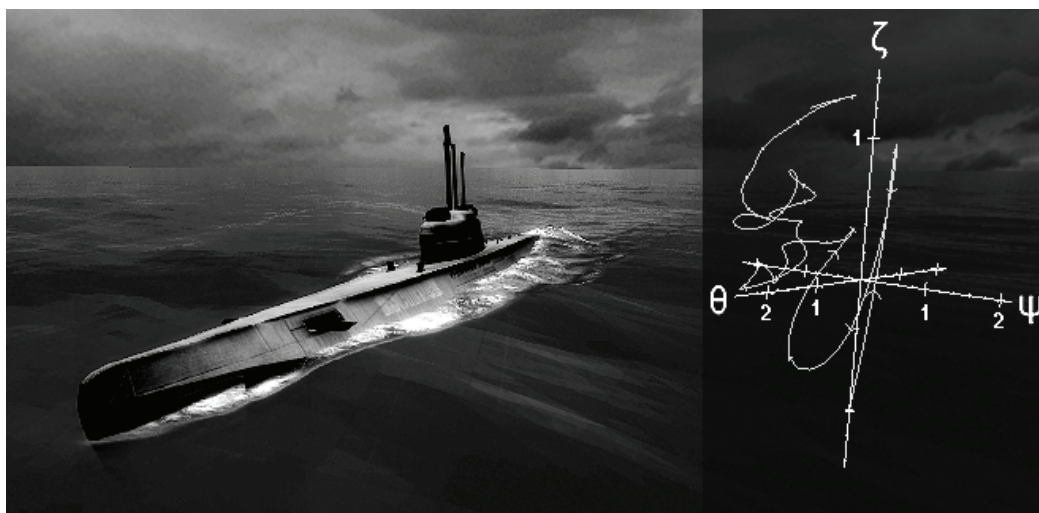


Рис. 3. Исследование режимов качки морского объекта (с отображением трехмерной фазовой диаграммы крен–дифферент–возвышение центра тяжести)

В широкоэкранных системах ВР остро встает проблема «ступенчатости» изображений, которая обусловлена конечным размером пикселя. Например, для экрана системы ВР ЦСМВ СПбГУ ИТМО размер пикселя при разрешении 1920×1080 будет составлять около 2 мм, что визуально ощутимо на небольшом расстоянии от экрана. Чтобы избавиться от этого эффекта и сделать изображение более реалистичным, применен метод морфологического сглаживания (Morphological Antialiasing, MLLA) [6]. Данный метод заключается в нахождении *L*-образных форм на ступенчатых разрывах непрерывностей в изображении и их размывии. Его можно условно разделить на три этапа. На первом этапе находятся все разрывы непрерывностей в изображении, на втором этапе рассчитывается длина найденных непрерывностей (что необходимо для расчета уровня сглаживания пикселей), а на третьем этапе происходит собственно поиск всех *L*-образных форм и их сглаживание.

Особенностью применения технологий ВР для решения задач исследовательского проектирования является возможность одновременного наблюдения динамической сцены и характеризующих ее физических и математических абстракций в форме диаграмм и графиков. В широкоэкранный системе ВР допустимо формировать эти графики непосредственно в основной рабочей области экрана; для этого может использоваться отдельная группа проекторов. На рис. 3 в качестве примера приведен образ экрана с одновременным отображением трехмерной фазовой диаграммы крен–дифферент–возвышение центра тяжести, привязанной к локальной системе координат.

Заключение

Разработанная технология интерактивной визуализации и программное решение на ее основе обеспечивают достаточно реалистичное воспроизведение динамики морских объектов в системе ВР ЦСМВ СПбГУ ИТМО. При этом эффект «присутствия» не ограничивается только визуальным восприятием: при позиционировании камеры на корпусе судна при интенсивной качке наблюдатель ощущает ухудшение обитаемости (эффект «морской болезни»).

Работа выполнена при поддержке проектов «Интеллектуальная система навигации и управления морским динамическим объектом в экстремальных условиях эксплуатации», «Интеллектуальные технологии поддержки процессов исследовательского проектирования судов и технических средств освоения океана» и «Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики корабля в экстремальных условиях эксплуатации» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2007–2013 годы.

Разработанная система применяется в рамках проекта по реализации постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Литература

1. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Под ред. Ю.И. Нечаева. – СПб: ГМТУ, 2001. – 352 с.
2. Бухановский А.В., Иванов С.В., Нечаев Ю.И. Виртуальное моделирование динамики судна на морском волнении в интеллектуальных тренажерах // Искусственный интеллект. – 2004. – Вып. 3. – С. 350–359.
3. Fonseca N., Guedes Soares C. Comparison of numerical and experimental results of nonlinear wave-induced vertical ship motions and loads // Journal of Marine Science and Technology. – 2002. – V.6. – № 4 – P. 193–204.
4. Лонге-Хиггинс М.С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности // В кн.: Ветровые волны. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – С. 112–230.
5. Mittring M. «Finding Next Gen – CryEngine 2» / in book: Advanced Real-Time Rendering in 3D Graphics and Games Course // ACM SIGGRAPH – 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1281671], своб.
6. Reshetov A. Morphological Antialiasing // Proc. of High Performace Graphics. – 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://visual-computing.intel-research.net/publications/papers/2009/mlaa/mlaa.pdf], своб.

Безгодов Алексей Алексеевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, НИИ НКТ, аспирант, demurgh@gmail.com

Загарских Александр Сергеевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, alazar.az@gmail.com

Бухановский Александр Валерьевич

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, НИИ НКТ, доктор технических наук, директор, avb_mail@mail.ru