

УДК 519.673

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ МОРСКОГО ДНА ВОКСЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

В.А. Бобков, А.П. Кудряшов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН¹

Для трехмерной реконструкции подводной сцены используется множественный набор карт глубин, получаемых с помощью стереоизображений. Данные стереоизображения получены откалиброванной видеостереокамерой, для которой известны внутренние и внешние параметры. Для реконструкции используется воксельный подход, подразумевающий перевод имеющихся карт глубин в единое воксельное пространство сцены. Каждый воксель представляет собой значение неявной функции, накапливаемой по мере добавления туда новых видов. Используя диффузное размытие, можно получить усредненные значения функции в соседних пустых вокселях. Результирующая поверхность формируется с помощью алгоритма марширующих кубиков. Алгоритмическая база служит повышению вычислительной производительности метода и качеству генерируемой триангуляционной модели. Использование метода индексной карты в виде текстуры позволило избежать многочисленных переборов, что ускорило работу воксельного алгоритма на порядок. Использование разных уровней октантного дерева для диффузного размытия значений неявной функции позволяет быстро и правдоподобно зашивать большие дыры в модели. Рассмотрена вычислительная схема многопроцессорной обработки данных, основанная на реализации двухуровневого параллелизма.

ВВЕДЕНИЕ

Трехмерная реконструкция сложных сцен по изображениям необходима для наглядного представления и визуального анализа больших объемов видеоданных, получаемых автономным подводным роботом при выполнении им различных рабочих миссий. Одним из эффективных методов построения 3D моделей сложных сцен по множеству видов является воксельный метод, предложенный в работе [1] и впоследствии развитый в других работах. Под видами здесь понимаются изображения для разных точек наблюдения и связанные с ними дальностные данные. Дальностные данные могут быть получены различными способами, включая использование лазерных 3D сканеров [2], непосредственно измеряющих расстояния до видимых точек, или обработку изображений методами компьютерного зрения для получения так называемых карт глубин. Такой подход был применен в [3] для реконструкции и визуализации

протяженных подводных сцен. Однако существенными недостатками воксельного метода являются его высокая ресурсоемкость, а также артефакты на результирующей модели [5]. В работах других авторов предлагается использовать октодерево [6], чтобы сократить время работы, а также альтернативный метод расчета весовой функции [7], направленный на зашивку дыр. Но проблема артефактов по-прежнему остается, а время обработки даже небольших объемов становится неприемлемым.

Предлагаемый в настоящей статье метод построения единой целостной трехмерной модели основывается на подходе, предложенном в [1, 5 и 6], а также на результатах более ранних работ авторов [8, 9] и направлен на преодоление указанных недостатков. Работа выполнялась в контексте решения авторами более общей задачи по созданию трехмерных моделей на множественных последовательностях изображений. Вклад

авторов состоит в разработке оригинального алгоритма, в котором: а) построение гибридной весовой функции осуществляется в октантном воксельном пространстве как вдоль нормалей, так и вдоль линии наблюдения; б) обеспечивается оптимизация вычислений за счет эффективной структурной организации данных; в) достигается высокая скорость обработки данных за счет реализации параллельных вычислений на многоядерных процессорах.

1. Метод 3D реконструкции

Задача формулируется следующим образом. Имеются n пар видов, полученных со стереокамеры, установленной на подводном аппарате. Для отработки алгоритма используется модельная виртуальная среда с симуляцией подводного аппарата (рис. 1). Для каждой пары видов на предварительном этапе была построена видимая поверх-

¹ 690041, Владивосток, ул. Радио, 5. Тел.: (423) 231-37-76. E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

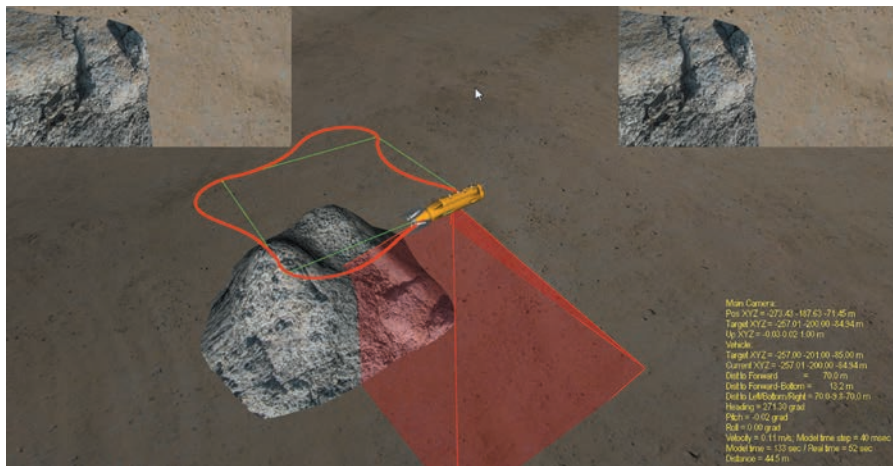


Рис. 1. Модельная сцена с подводным аппаратом, снимающим морское дно

ность в виде карты глубин. Цель – построить единую текстурированную триангуляционную оболочку с минимальным количеством дыр, возникающих из-за ненаблюдаемости части фрагментов сцены, которая и будет являться трехмерной триангуляционной моделью сцены.

Метод работает в воксельном пространстве сцены, представленном в виде октодеревя. Используется непрерывная неявная функция $D(\mathbf{V}_i)$, представленная значениями в узлах воксельной решетки. Подробное описание алгоритма построения $D(\mathbf{V}_i)$ представлено ниже, в частях 3.1 и 3.2.

В качестве весовой функции $W(\mathbf{V}_i)$ берется скалярное произведение вектора нормали к поверхности и вектора направления на точку наблюдения. Такой выбор исходит из предположения, что при корреляционном подходе к определению расстояния до поверхности степень неопределенности для наклонных поверхностей выше, чем для поверхностей, наблюдаемых под прямым углом.

Для вычисления D и W используются следующие инкрементальные правила:

$$D_{j+1}(\mathbf{V}_i) = [W_j(\mathbf{V}_i)D_j(\mathbf{V}_i) + w_{j+1}(\mathbf{V}_i)d_{j+1}(\mathbf{V}_i)] / [W_j(\mathbf{V}_i) + w_{j+1}(\mathbf{V}_i)],$$

$$W_{j+1}(\mathbf{V}_i) = W_j(\mathbf{V}_i) + w_{j+1}(\mathbf{V}_i),$$

где i – номер вокселя, а j – номер вида, d_{j+1} – расстояние от вокселя до поверхности, w_{j+1} – скалярное произведение нормали к поверхности и вектора направления на точку наблюдения.

Весовая функция $W(\mathbf{V}_i)$ – константа для всех вокселей до видимой поверхности (для данного вида), а для вокселей за поверхностью линейно убывает до нуля в пределах ε -окрестности. Такой выбор области определения весовой функции направлен на предотвращение возникновения ложных поверхностей.

В результате последовательной обработки всех видов каждому вокселю присваиваются значение интегральной функции расстояния $D(\mathbf{V}_i)$ (величина со знаком) и значение интегральной весовой функции $W(\mathbf{V}_i)$. Тогда построение изоповерхности $D(\mathbf{V}_i) = 0$ и является решением нашей задачи. Преимуществом сведения исходной задачи к такой постановке является то, что построение изоповерхности скалярного поля, заданного на воксельной решетке, можно выполнить с помощью известного алгоритма марширующих кубиков [4].

При построении единой поверхности в ней могут образовываться дыры, из-за того что некоторые части сцены ненаблюдаемы с камер подводного аппарата. На

этапе построения функции $D(\mathbf{V}_i)$ необходимо произвести диффузное размытие значений этой функции, получив некоторые усредненные значения в соседних пустых вокселях (см. разд. 3.3). Применив диффузное размытие достаточное количество раз, можно построить поверхность, которой изначально не было в исходных данных.

Для экономии памяти был реализован метод, предложенный в [1 и 3] с использованием октодеревя и оптимизацией из [6], поскольку реальное заполнение воксельного пространства значениями весовой функции составило только 5–12% от всего объема. Такая реализация позволяет сократить затраты памяти на порядок, что, в свою очередь, дает возможность повысить размерность воксельного пространства и таким образом повысить детализацию финальной модели при использовании того же объема оперативной памяти.

Текстурирование модели происходит методом последовательной проекции каждого треугольника на все виды, откуда он наблюдается, и выбором вида с наибольшей площадью проекции.

2. Индексация треугольников

Предполагается, что для каждого из видов определены параметры камеры. Вначале создается воксельное пространство сцены. Для определения границ сцены просматриваются все узлы исходных сеток и находятся максимальные и минимальные значения по всем координатам. Размерность воксельного пространства задается пользователем. Она определяет детализацию результирующей трехмерной сцены.

Заметим, что наиболее ресурсоемкой частью представленного выше метода является определение расстояний от вокселей до

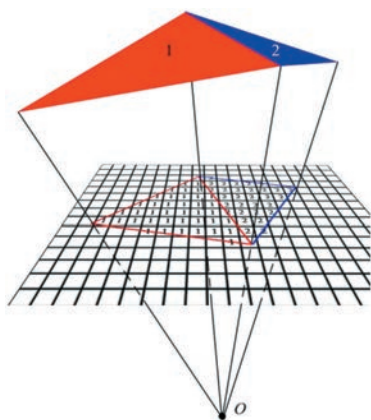


Рис. 2. Индексация пикселей изображения

ближайшей поверхности при формировании скалярного поля. Вычислительная трудоемкость возникает из-за необходимости перебора всех треугольников с вычислением соответствующих расстояний. Чтобы избежать избыточных вычислений, предлагается механизм с предварительной индексацией всех треугольников сетки каждого вида (рис. 2). Для этого используется само изображение этого вида.

Построим проекционную матрицу каждого i -го вида по формуле:

$$H_i = \begin{pmatrix} c_{11}^i f & c_{12}^i f & c_{13}^i \\ c_{21}^i f & c_{22}^i f & c_{23}^i \\ c_{31}^i f & c_{32}^i f & c_{33}^i \\ c_{41}^i f & c_{42}^i f & c_{43}^i \end{pmatrix}$$

где c_{kl}^i – элементы матрицы камеры i -го вида, а f – фокус.

Тогда можно спроецировать каждый треугольник исходной сетки i -го вида на i -е изображение по формуле: $P_{tex}^i = H_i \times P$, где P – координаты точки в трехмерном пространстве. В результате каждый пиксель изображения приобретает индекс, указывающий на принадлежность к определенному треугольнику. Такая процедура возможна, поскольку исходная сетка для каждого вида является «видимой», т.е. не содержит невидимых на этом виде граней. Все неиндексированные пиксели приравниваются к одному значе-

нию. Использование индексов при последующей работе алгоритма позволяет избежать полного перебора по всем треугольникам каждого вида и существенно уменьшает время работы алгоритма. Данный алгоритм может быть распараллелен по видам, поскольку они вычисляются независимо друг от друга.

3. Зашивка дыр в моделях

При небольшой размерности воксельного пространства дыры хорошо зашиваются с использованием диффузии на нижнем уровне октодерев, но при увеличении размерности новая поверхность может иметь дефекты или дыры вообще могут не зашиваться даже при пропорциональном увеличении количества итераций размытия. Поэтому было принято решение при диффузии использовать воксельное пространство меньшей размерности, а затем пересчитать его на большее, с учетом существующей поверхности. Был рассмотрен вариант использования верхних уровней октодерев. Анализ и эксперименты показали, что оптимальным является переход на 4 уровня октодерев (с уменьшением исходной детализации в 4096 раз). Именно на этом уровне проводится основное количество операций размытия, которые происходят на 3 порядка быстрее, чем на самом

нижнем уровне октодерев. Затем осуществляется перенос зашитой поверхности с верхнего на нижний уровень. Это позволило решить проблему зашивки больших дыр, но осталась проблема «выростов». Поэтому был предложен гибридный метод, согласно которому на нижнем уровне поверхность строится методом «по взгляду», на втором уровне поверхность строится по нормальям (рис. 3), далее производится диффузия на верхних уровнях, а затем поэтапно данные переносятся на более детальные уровни.

3.1. Метод объединения сеток, использующий весовую функцию по линии наблюдения

Данный метод следует оригинальному воксельному методу [1], в котором для каждого вокселя строится непрерывная неявная функция $D(V_i)$. Отличием является повышение быстродействия за счет использования индексированного массива индексов треугольников (подробнее см. в [6]). Весовая функция конструируется как взвешенная сумма получаемых для n видов расстояний $d_1(V_i)$, $d_2(V_i)$, ..., $d_n(V_i)$ от вокселя V_i до ближайшего треугольника j -й поверхности. Треугольник находится проецированием координат вокселя в массив индексов треугольни-

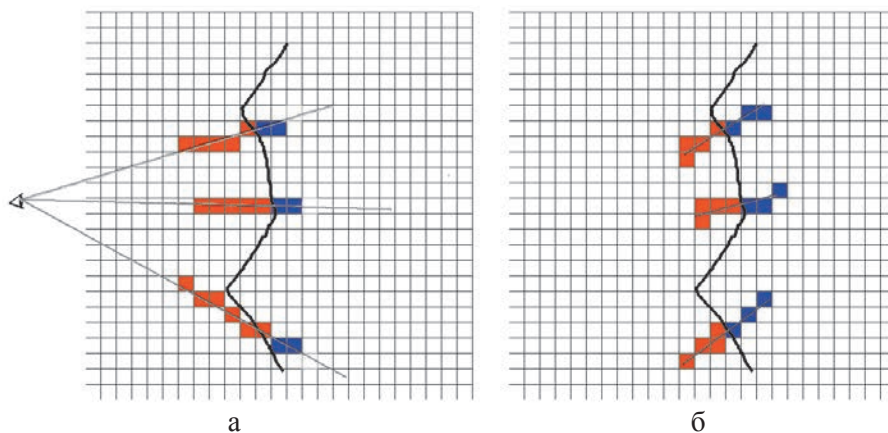


Рис. 3. Заполнение вокселей значениями весовой функции: а – по линии наблюдения, б – по нормальям

ков I . Расстояние d_j берется на луче, направленном из центра проекций O_i в точку V_j , и является величиной со знаком (отрицательным для точек, находящихся за поверхностью, и положительным для точек перед поверхностью (рис. 3, а)). В качестве весовой функции $W(V_j)$ берется скалярное произведение вектора нормали к поверхности и вектора направления на точку наблюдения. Такой выбор исходит из предположения, что при корреляционном подходе к определению расстояния до поверхности степень неопределенности для наклонных поверхностей выше, чем для поверхностей, наблюдаемых под прямым углом. Весовая функция $W(V_j)$ линейно убывает до нуля в пределах окрестности, причем для вокселей перед поверхностью размер этой окрестности выбран в данной реализации равным 5 вокселям, а за поверхностью – 2. Такой выбор области определения весовой функции направлен на предотвращение возникновения ложных поверхностей в областях с большими перегибами поверхности. Поскольку весовая функция для каждого вокселя каждого вида считается независимо, проход по вокселям можно распараллелить на число процессоров.

3.2. Метод объединения сеток с весовой функцией по нормальям

В отличие от вышеописанного метода непрерывная неявная функция $D(V_i)$ строится вдоль нормали каждого треугольника на 3 вокселя в каждую сторону от поверхности треугольника (рис. 3, б). Весовая функция конструируется как взвешенная сумма получаемых для n видов расстояний $d_1(V_i), d_2(V_i), \dots, d_n(V_i)$ от вокселя V_i до каждого треугольника j -й поверхности. Весовая функция $W(V_i)$ линейно убывает до нуля в пределах окрестности.

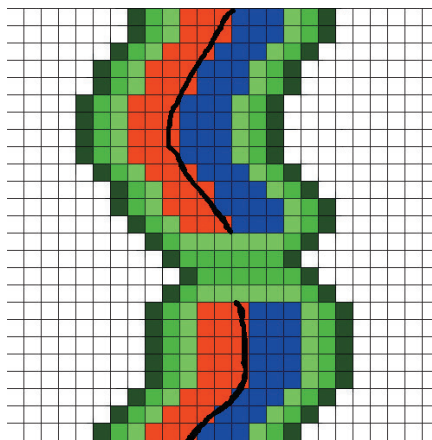


Рис. 4. Добавление пустых вокселей в октодереву. Разрыв должен быть заполнен вокселями, в которых будет происходить диффузное размытие

3.3. Диффузное размытие

Диффузное размытие необходимо для заполнения пустых вокселей значениями с соседних (непустых) вокселей, по этим значениям и будет строиться новая поверхность. Поскольку вся работа происходит в октодереве, то пустых вокселей в памяти не содержится и их необходимо задать. Для этого итеративно проходим по занятым вокселям и добавляем все соседние (рис. 4). Количество итераций будет равно максимальному радиусу зашивки дыр. Далее, для каждого значения нефиксированного вокселя $D(V_i)$ находим новое значение, равное значению $D(V_i) * 0,25$ и сумме значений соседних 6 вокселей с коэффициентом 0,125 (рис. 5). Поскольку весовая функция для каждого вокселя рассчитывается независимо, то проход по вокселям можно разделить на количество процессоров.

3.4. Межуровневое диффузное размытие при переходе на верхние уровни октодеревы

При переходе сразу на 4 уровня вверх по октодереву, т.е. при уменьшении детализации в 16 раз по каждому измерению, значения весовой функции, которые распространялись от поверхности на 3 вокселя, будут занимать всего один

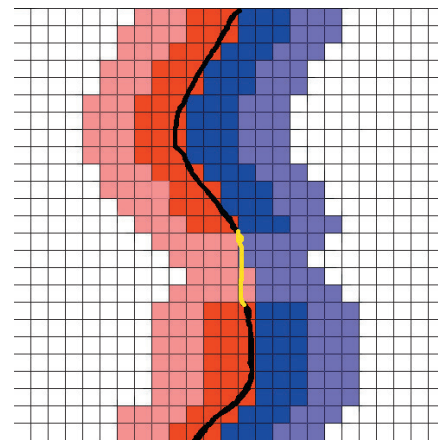


Рис. 5. Диффузное размытие. Белым цветом показана новая поверхность, построенная на месте перехода от отрицательных значений весовой функции к положительным

воксель, что недостаточно для операции диффузного размытия. Поэтому был предложен алгоритм перехода с уровня на уровень для сохранения необходимых данных. При переходе на один уровень вверх значения в вокселях на верхнем уровне должны браться не только как усредненные по значениям восьми вокселей, занимающих тот же объем на нижнем уровне, но и значениями 24-х прилегающих вокселей, т.е. по 4 с каждой из 6 сторон. Эта операция позволяет заполнить часть пустых вокселей на каждом верхнем уровне и не допускает «схлопывания» данных.

3.5. Переход на нижние уровни октодеревы

Очевидно, что при диффузном размытии на верхних уровнях октодеревы получаемая поверхность будет иметь низкую детализацию. Поэтому для построения финальной поверхности необходимо перенести данные с верхних уровней октодеревы на нижние, не потеряв зашитую поверхность и не внося искажений в существующую. Для этого перед переносом данных необходимо очистить нижний уровень (кроме самого детального) от всех значений вокселей, не прилегающих к поверхности, остальные воксели зафиксировать. Данные с

верхнего уровня записываем только в пустые воксели нижнего уровня. Таким образом, мы сохраняем уже построенную поверхность, а с верхних уровней переносим только достроенную поверхность.

3.6. Алгоритмическая реализация

Используемые сокращения: L1 – самый детальный уровень октодеревя (нижний), L4 – наименее детальный уровень (верхний). L2, L3 – промежуточные уровни.

1. Строим на уровне L2 весовую функцию методом нормалей.

2. Переносим данные на уровень L3 с применением межуровневой диффузии.

3. Фиксируем воксели, образующие поверхность на L2, остальные обнуляем.

4. Переносим данные на уровень L4 с применением межуровневой диффузии.

5. Фиксируем воксели, образующие поверхность на L3, остальные обнуляем.

6. Диффузное размытие на уровне L4.

7. Переносим данные с L4 на L3, за исключением фиксированных вокселей L3.

8. Диффузное размытие на уровне L3.

9. Переносим данные с L3 на L2, за исключением фиксированных вокселей L2.

10. Диффузное размытие на уровне L2.

11. Очищаем L2 от вокселей, не прилегающих к поверхности.

12. Строим на уровне L1 весовую функцию методом по направлению взгляда. Все воксели перед поверхностью являются фиксированными, поскольку перед наблюдаемой поверхностью заведомо нет другой поверхности.

13. Переносим данные с L2 на L1, за исключением фиксированных вокселей L1.

14. Диффузия на уровне L1 – устраняем артефакты и сглаживаем переход. Две итерации по всему октодереву с разными весовыми коэффициентами для существующей и для построенной поверхности.

15. Чистим L1 от вокселей, не прилегающих к поверхности.

17. Строим поверхность методом марширующих кубиков.

4. Вычислительные эксперименты

Для получения сравнительных оценок эффективности предложенного метода были проведены вычислительные эксперименты на модельных сценах 1 (см. рис. 1) и 2 (см. рис. 2). Параметры используемого вычислительного оборудования: процессор Intel i5 3,3 ГГц, 24 Гб оперативной памяти, графическая плата NVidia GeForce 9600GT. Результаты вы-

числительных экспериментов приведены в таблице и на рис. 6–11. Как видно из таблицы, время выполнения практически не зависит от сложности сцены (количество исходных треугольников), что подтверждает эффективность реализованного механизма индексации. Также на рис. 8, 12 представлена работа алгоритма зашивки дыр. Предложенный механизм индексации при реализации алгоритма на центральном процессоре ускоряет вычисления в 12–18 раз. Использование многоядерности дает ускорение в 1,5–2,2 раза. Таким образом, суммарное ускорение оценивается в 18–40 раз.

Большая разница между исходным и результирующим количеством треугольников объясняется значительным количеством дублирующихся треугольников в исходных данных.

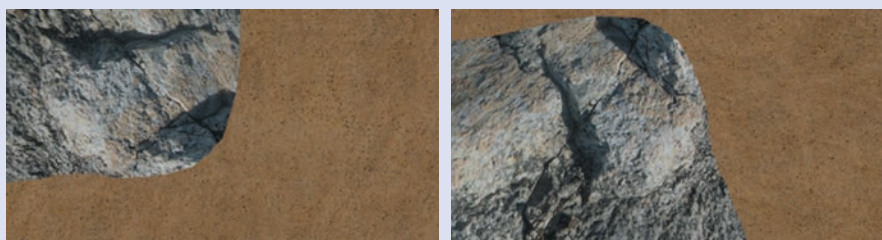


Рис. 6. Исходные виды (1-й и 134-й из 300) сцены 1 (см. рис. 1)



Рис. 7. Реконструкция сцены 1 по 300 видам без зашивки дыр

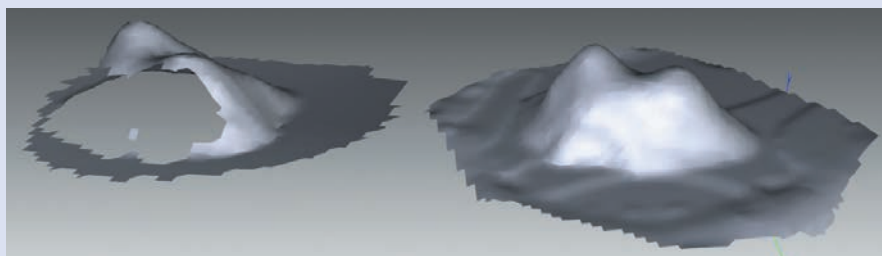


Рис. 8. Сравнение фрагментов модели сцены 1. Слева без зашивки дыр, справа с зашивкой

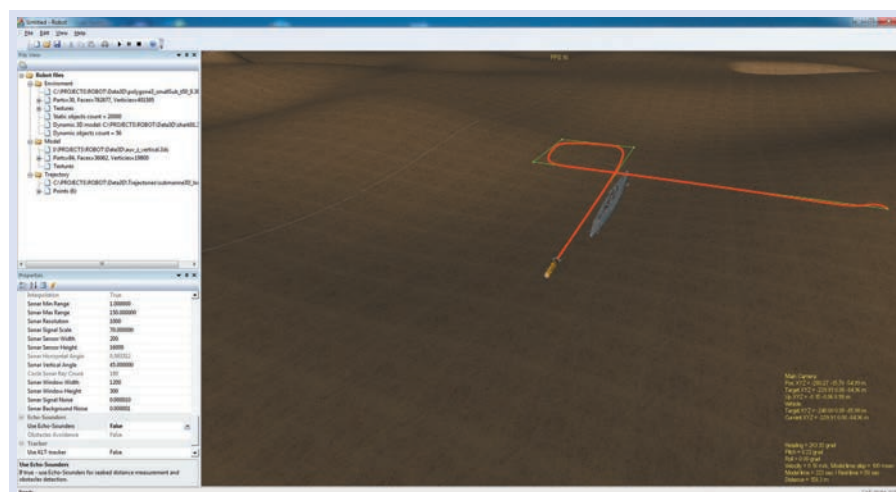


Рис. 9. Общий вид сцены 2 и траектория движения подводного аппарата

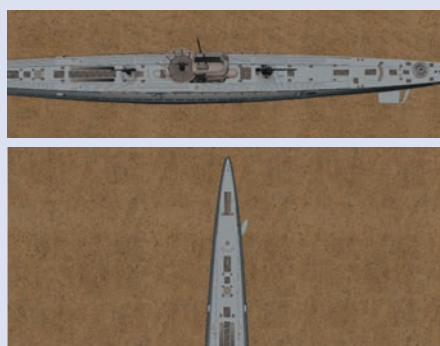


Рис. 10. Исходные виды сцены 2 (181-й и 345-й из 646)

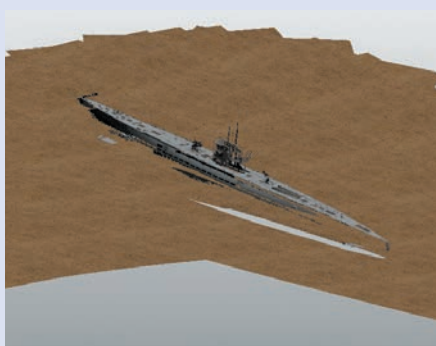


Рис. 11. Реконструкция сцены 2



Рис. 12. Сравнение фрагментов модели 2. Снизу без зашивки дыр, сверху с зашивкой

Время вычисления, с

Сцена	Кол-во видов	Исходное кол-во треугольников	Размерность воксельного пространства	Время, с	Результирующее кол-во треугольников
Модельная сцена 1	300	14,3 млн	512 ³	73	524 тыс.
			1024 ³	514	2,5 млн
Модельная сцена 2	646	38,8 млн	512 ³	86	257 тыс.
			1024 ³	618	1,6 млн

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод построения трехмерной модели морского дна по множественному набору карт глубин, полученных

по стереоизображениям, основанный на воксельном подходе. Тестирование на модельных данных показало, что предложенные алгоритмические решения и структура данных с использованием октоде-

рева, индексации треугольников, гибридного вычисления весовой функции и диффузного размытия позволили существенно повысить качество визуализации и производительность метода в сравнении с аналогами. Дополнительное ускорение получено за счет использования многоядерности центрального процессора и применения параллельных вычислений. В дальнейшем планируется тестирование метода на реальных данных подводной съемки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-07-00341).

ЛИТЕРАТУРА

1. Curless B., Levoy M. A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images // Computer Graphics: Proc. of the 23rd annual conf. on Comp. graphics and interactive techniques. New Orleans, USA, 1996. P. 303–312.
2. Stoyanov T., Mojtahedzadeh R., Andreasson H., Achim J. Comparative evaluation of range sensor accuracy for indoor mobile robotics and automated logistics applications // Robotics and Autonomous Systems. 2013. Vol. 61. Issue 10. P. 1094–1105.
3. Johnson-Roberson M., Pizarro O., Williams S.B., Mahon I. Generation and visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys // Journal of Field Robotics: Special Issue: Three-Dimensional Mapping. 2010. Vol. 27. Part 3. Issue 1. P. 21–51.
4. Seitz S., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R. A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms: Vision and Pattern Recognition // IEEE Computer Society Conference. 2006. Vol. 1. P. 519–526.
5. Davis J., Marschner S.R., Garr M., Levoy M. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion // First International Symposium on 3D Data Processing: Visualization and Transmission. Padua, Italy, 2002. P. 34–45.
6. Podolak J., Rusinkiewicz S. Atomic Volumes for Mesh Completion // Symposium on Geometry Processing. Vienna, Austria, 2005.
7. Kumar A., Shih A.M. Hole Patching in Unstructured Mesh Using Volumetric Diffusion // 19th International Meshing Roundtable. Pennsylvania, USA: Springer-Verlag, 2010. P. 224–241.
8. Бобков В.А., Кудряшов А.П. Воксельный метод построения триангуляционной поверхности по множеству видов // Информатика и системы управления. 2012. № 2. С. 31–38.
9. Кудряшов А.П., Черкашин А.С. Построение единой триангуляционной поверхности по набору видов с зашивкой дыр // Информатика и системы управления. 2015. № 1. С. 36–40.