

Зашивка дыр в объединённом наборе триангуляционных сеток*

А.П. Кудряшов, В.А. Бобков
kudryashovA@dvo.ru | bobkov@dvo.ru

Владивосток, Россия, Институт автоматизации и процессов управления, ДВО РАН

Предложен алгоритм зашивки дыр при построении 3D модели по дальностным данным. Алгоритм основан на диффузном размытии воксельного пространства с построением неявной весовой функции, как вдоль нормалей, так и вдоль линии наблюдения в октантном воксельном пространстве. Описан алгоритм текстурирования модели, учитывающий взаимное перекрытие исходных сеток.

Ключевые слова: воксельное пространство, трехмерная реконструкция, триангуляционная оболочка, зашивка отверстий, октодереве, диффузное размытие, текстурирование.

Patching holes in the joint set of triangulation grids*

A.P. Kudryashov, V.A. Bobkov

Vladivostok, Russia, Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS

We present a method for building and texturing a continuous watertight mesh using a hole filling algorithm based on volume diffusion. A multilevel octree-based technique with the weight function being built along both the normal and line of view is proposed. A parallelized computational procedure for a multicore processor is presented which enables significant reduction in computation time.

Keywords: voxels, 3D reconstruction, meshing, filling holes, octree, volume diffusion, texturing.

1. Введение

Дальностные данные, получаемые с помощью стереокамер, лазерных дальномеров или методами компьютерного зрения по серии изображений часто используются для построения трехмерных моделей реальных сцен и объектов. Эти данные могут быть представлены в виде облака точек в трехмерном пространстве или в виде триангуляционной поверхности. Наряду с задачей объединения этих триангуляционных сеток, подразумевающей построение единой связной оболочки без дублирования участков поверхности, видимых с нескольких видов, возникают задачи зашивки дыр и нанесения текстуры на финальную модель. Под дырами подразумеваются участки, где должна быть поверхность, но по каким либо причинам она не была построена ни на одном из видов.

Важным требованием к алгоритмическому решению задачи является высокая скорость обработки данных и экономное использование оперативной памяти, поскольку для насыщенных сцен со сложными объектами может потребоваться много видов с большим количеством описывающих треугольников (порядка $10^6 - 10^7$).

Как показывает анализ известных работ, в основном, применяются два подхода для решения задачи объединения триангуляционных сеток и зашивки дыр на этих сетках. В первом подходе объединение и зашивка ведется непосредственно на самой

триангуляционной сетке [1]. Его основной недостаток – генерация взаимопересекающихся поверхностей при работе над сетками, имеющими сложную, составную топологию.

Другой подход основан на использовании воксельной структуры пространства сцены. Эффективная реализация такого подхода была предложена в работе [2]. Основным преимуществом предложенного решения является сведение исходной задачи к известной задаче построения изоповерхности в скалярном поле. Этим же коллективом разработчиков был предложен и метод зашивки дыр [3], использующий диффузное размытие построенной весовой функции внутри воксельной структуры. Недостатками данного метода можно его считать высокую ресурсоемкость, а также артефакты на результирующей модели [3, fig.10]. В работах других авторов предлагается использовать октодереве [5], чтобы сократить время работы, а также альтернативный метод расчета весовой функции [6], направленный на зашивку дыр. Однако проблема артефактов, по-прежнему, остается, а время обработки даже небольших объемов (ок. 40 млн. вокселей) может занимать несколько часов.

Предлагаемый в настоящей статье метод построения единой целостной трехмерной модели основывается на подходе, предложенном в [2] и [3], а также на более ранней работе авторов [4], и направлен на преодоление указанных недостатков. 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 опти-

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант 15-07-00341, Программы «Дальний Восток» (проект 15-I-4-025) и опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-07-20347

мизация вычислений за счет эффективной структурной организации данных; в) достигается высокая скорость обработки данных за счет реализации параллельных вычислений на многоядерных процессорах.

2. Описание метода

В начальной версии программы был реализован метод, предложенный в [3] с использованием октодерева и оптимизацией из [4], поскольку реальное заполнение воксельного пространства значениями весовой функции составило только 5-12% от всего объема. Предполагалось, что такая реализация позволила бы сократить затраты памяти на порядок, что в свою очередь дало бы возможность повысить размерность воксельного пространства, и таким образом повысить детализацию финальной модели при использовании того же объема оперативной памяти. Однако повышение детализации привело к невозможности зашивать большие дыры на модели за разумное количество итераций. Наряду с этим появились артефакты, связанные с ростом поверхности в неправильном направлении (т.н. «выросты»). Данный недостаток был описан в оригинальной статье [3]. На рис.1 показаны оба типа дефектов.

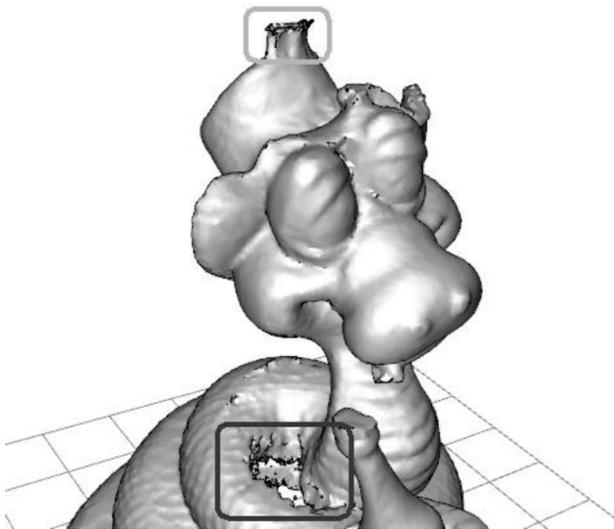


Рис. 1: Дефекты оригинального метода.

Для решения этой проблемы был предложен метод построения весовой функции не вдоль линии взгляда, а вдоль нормали к каждому треугольнику. Такой метод позволяет избавиться от части артефактов, но порождает другие, возникающие, в основном, на больших перегибах поверхности (рис.3). Объединение значений весовых функций обоих методов в одном пространстве значений также не дало желаемого улучшения.

Одновременно с проблемой «выростов» решалась и задача зашивки больших дыр. При небольшой размерности воксельного пространства дыры зашиваются, но при увеличении размерности, даже при пропорциональном увеличении количества итераций размытия, зашивка не выполняется. Поэтому был рассмотрен вариант реализации диффузии с использованием воксельного пространства меньшей размерности с последующим пересчетом его на исходную размерность. Анализ и эксперименты показали, что оптимальным является переход на 4 верхних уровня октодерева (с уменьшением исходной детализации в 4096 раз). Именно на верхнем уровне выполняется основное количество операций размытия с вычислительной производительностью на 3 порядка выше, чем на самом нижнем уровне октодерева. Затем осуществляется перенос зашитой поверхности с верхнего на нижний уровень. Это позволяет решить проблему зашивки больших дыр, но остается проблема «выростов». Для ее решения был предложен гибридный метод, согласно которому на нижнем уровне поверхность строится методом «по взгляду», на втором уровне поверхность строится «по нормальям», а затем производится диффузия на верхних уровнях с последующим поэтапным переносом данных на более детальные уровни. Предложенный подход позволил избавиться от дефектов обоих типов. Текстурирование конечной модели выполняется с использованием фотоизображений исходных видов. Задача нанесения текстуры сводится к поиску для каждого треугольника участка на одном из видов, который был бы наблюдаем соответствующей камерой с наименьшим углом к его нормали. В общем случае, для нахождения такого треугольника требуется перебор всех треугольников и проверка их на перекрытие (сложность n^2), но используя индексирование треугольников [4], можно понизить сложность поиска до n .

3. Алгоритмическая реализация

Используемые сокращения: $L1$ - самый детальный уровень октодерева (нижний), $L4$ - наименее детальный уровень (верхний). $L2, L3$ - промежуточные уровни.

- 1) Строим на уровне $L2$ весовую функцию методом нормалей.
- 2) Перенос данных на уровень $L3$ с применением межуровневой диффузии.
- 3) Фиксируем воксели, образующие поверхность на $L2$, остальные обнуляем.
- 4) Перенос данных на уровень $L4$ с применением межуровневой диффузии.
- 5) Фиксируем воксели, образующие поверхность на $L3$, остальные обнуляем.
- 6) Диффузное размытие на уровне $L4$.
- 7) Перенос данных с $L4$ на $L3$, за исключением фиксированных вокселей $L3$.

- 8) Диффузное размытие на уровне L3.
- 9) Перенос данных 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. 2 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.
- 18) Наносим текстуру на финальную модель.

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 [3]). Весовая функция строится 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 ближайшего треугольника j -ой поверхности. Треугольник находится проецированием координат вокселя в массив индексов треугольников I . Расстояние d_j берется на луче, направленном из центра проекций O_i в точку V_i , и является величиной со знаком (отрицательное для точек, находящихся за поверхностью, и положительное для точек перед поверхностью (рис.2 а)). В качестве весовой функции $W(V_i)$ 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. Весовая функция $W(V_i)$ линейно убывает до нуля в пределах окрестности, причем для вокселей перед поверхностью размер этой окрестности выбран в данной реализации 5 вокселям, а за поверхностью - 2. Такой выбор области определения весовой функции направлен на предотвращение возникновения ложных поверхностей в областях с большими пере-

гибами поверхности. Поскольку весовая функция для каждого вокселя для каждого вида считается независимо, проход по вокселям легко параллелится на многопроцессорной архитектуре.

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.2 б). Весовая функция строится 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 -ой поверхности. Весовая функция $W(V_i)$ линейно убывает до нуля в пределах окрестности.

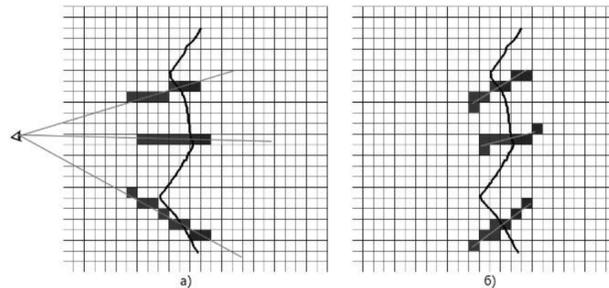


Рис. 2: Заполнение вокселей значениями весовой функции а) по линии наблюдения, б) по нормальям.

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.3). Количество итераций будет равно максимальному радиусу зашивки дыр. Далее, для каждого значения нефиксированного вокселя $D(V_i)$ находим новое значение равное значению $D(V_i) \times 0.25$ и сумме значений соседних 6 вокселей с коэффициентом 0.125 (рис.4). Поскольку, весовая функция для каждого вокселя рассчитывается независимо, то проход по вокселям легко параллелится на многопроцессорной архитектуре.

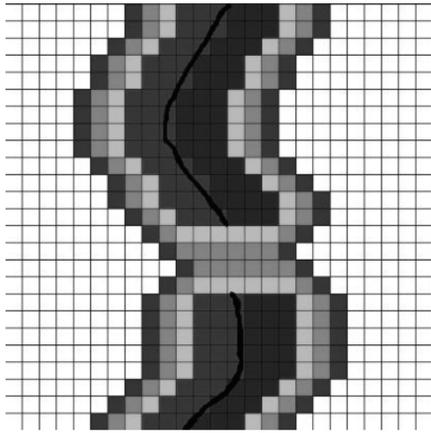


Рис. 3: Добавление пустых вокселей в октодерево. Разрыв должен быть заполнен вокселями, в которых будет происходить диффузное размытие.

3.4 Межуровневое диффузное размытие при переходе на верхние уровни октодерева

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 воксель, что недостаточно для операции диффузного размытия. Поэтому был разработан 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 октодерева

Очевидно, что при диффузном размытии на верхних уровнях октодерева получаемая поверхность будет иметь низкую детализацию. Поэтому для построения финальной поверхности необходимо перенести данные с верхних уровней октодерева 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 переносим с верхних уровней только достроенную поверхность.

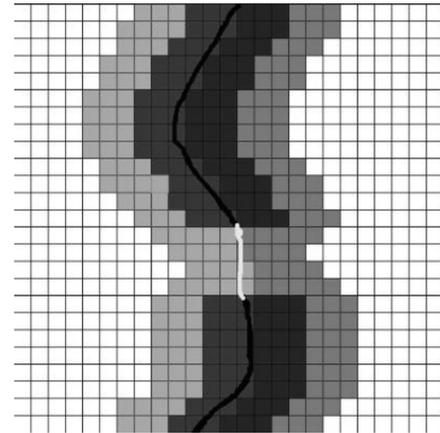


Рис. 4: Диффузное размытие. Белым цветом показана новая поверхность, построенная на месте перехода от отрицательных значений весовой функции к положительным.

4. Результаты

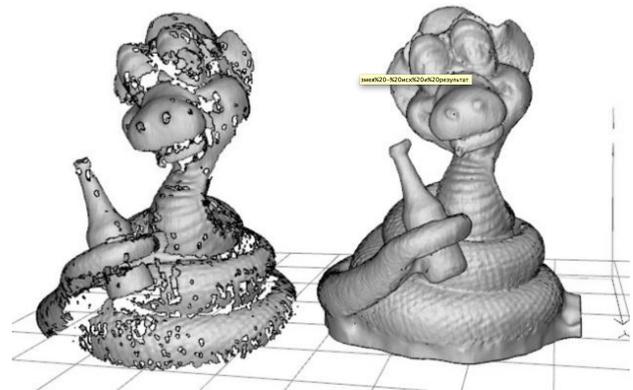


Рис. 5: Простое объединение и объединение с зашивкой дыр. Модель «Змея».

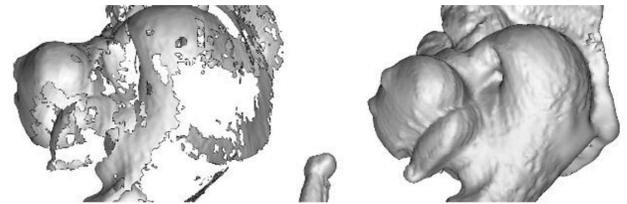


Рис. 6: Те же модели более детально.

Для получения сравнительных оценок эффективности предложенного метода были проведены вычислительные эксперименты на реальных сценах (рис. 5-8), полученных с помощью трехмерного сканера RangeVision 3D. Параметры используемого вычислительного оборудования: процессор IntelCorei5 3,0 ГГц, 4 Гб оперативной памяти. Использование многоядерности позволило увеличить

скорость работы в среднем в 2,5 раза, по сравнению с однопроцессорным вариантом.

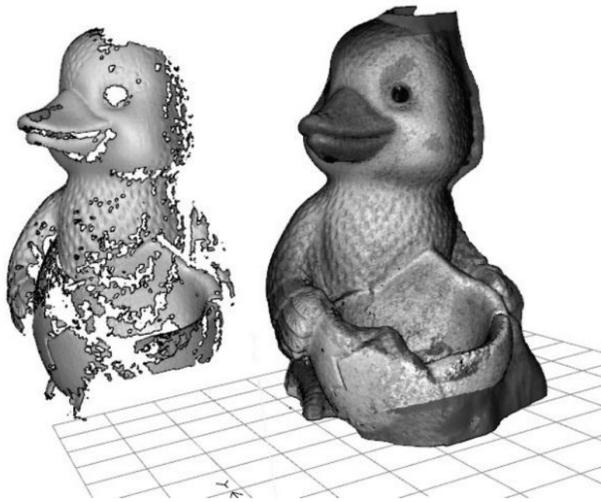


Рис. 7: Простое объединение и объединение с зашивкой дыр и текстурированием. Модель «Утка».

5. Заключение

В работе представлен метод построения связной триангуляционной трехмерной модели сцены с зашивкой дыр по множественному набору пространственных данных, основанный на воксельном подходе. Тестирование на реальных данных показало, что предложенные алгоритмические решения и структура данных с использованием октодерева, индексации треугольников, гибридного вычисления весовой функции и диффузного размытия позволили существенно повысить качество визуализации и производительность метода в сравнении с аналогами [3,5,6]. Дополнительное ускорение получено за счет использования многоядерности центрального процессора и применения параллельных вычислений.

Литература

- [1] Wei Zhao, Shuming Gao, Hongwei Lin. A robust hole-filling algorithm for triangular mesh // International Journal of Computer Graphics. Volume 23 Issue 12, November 2007. – pp.987–997.
- [2] Brian Curless, Marc Levoy. A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images // Computer Graphics (SIGGRAPH '96 Proceedings). 1996. – pp.303-312.
- [3] James Davis, Stephen R. Marschner, Matt Garr, Marc Levoy. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion // First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Padua, Italy, June 19-21, 2002.
- [4] Бобков В.А., Кудряшов А.П. Воксельный метод построения триангуляционной поверхности по множеству видов // Информатика и системы управления, №2, 2012, С.31-38.
- [5] Joshua Podolak, Szymon Rusinkiewicz. Atomic Volumes for Mesh Completion // Symposium on Geometry Processing, July 2005.
- [6] Amitesh Kumar, Alan M. Shih. Hole Patching in Unstructured Mesh Using Volumetric Diffusion // 19th International Meshing Roundtable, Springer-Verlag, Research Note, October 3-6 2010.