

Сшивка изображений при построении фотографических карт морского дна

А. Н. КАМАЕВ*, С. И. СМАГИН

Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

*Контактный e-mail: kamaev_an@mail.ru

Решается задача сшивки фотографических изображений при построении карт морского дна на основе известных положений и ориентаций камеры автономного необитаемого подводного аппарата и расположения характерных (особых) точек на дне. Рассматриваются два алгоритма: простая сшивка, когда участок дна, видимый на каждом изображении, аппроксимируется плоскостью, и сшивка на основе трехмерной модели дна.

Ключевые слова: сшивка изображений, bundle adjustment, автономный необитаемый подводный аппарат, фотографическая карта, трехмерная модель.

Введение

Фотографические карты дна или мозаики используются морскими исследователями в области биологии, археологии, геологии, экологии. Они применяются при поиске и обследовании затонувших объектов, а также для мониторинга подводных сооружений и коммуникаций.

Построение фотографических карт дна — сложный, многоэтапный процесс, требующий больших вычислительных ресурсов. Одним из важных этапов этого процесса является совмещение отдельных перекрывающихся снимков дна, получаемых с автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), в единое полотно карты. Основная сложность этого этапа состоит в том, что высота, с которой получают снимки, достаточно мала и сопоставима с перепадами высот дна. Это в свою очередь приводит к искажениям, обусловленным эффектом параллакса, из-за чего отдельные изображения очень сложно совместить и требуются нетривиальные подходы к смешению цветов точек этих изображений [1, 2].

Причина возникновения искажений, вызванных параллаксом, кроется в том, что плоская модель связи изображений [3], используемая при их позиционировании и ориентировании, не может с нужной точностью описать реальное дно. Поэтому привлекательной является возможность расчета полной трехмерной структуры сцены при решении задачи построения фотографической карты. Под трехмерной структурой сцены будем понимать пространственное положение и ориентацию камеры в моменты получения сшиваемых изображений, а также положение характерных (особых) точек дна, видимых на двух и более изображениях одновременно.

Для расчета трехмерной структуры сцены в задачах компьютерного зрения обычно используется метод bundle adjustment (BA) [4, 5]. Благодаря тому, что на каждом

изображении видна лишь небольшая часть характерных точек дна, применение алгоритмов, описанных в работе [6], позволяет за разумное время вычислять положение и ориентацию десятков тысяч изображений и координаты миллионов точек [7]. Используя полученные в результате применения метода ВА параметры, необходимо корректно совместить все изображения и смешать цвета их пикселей в единой фотографической карте. Поскольку решение задачи с помощью ВА находится в трехмерном пространстве, а не в плоскости создаваемой карты, процедура проецирования каждой точки изображения на фотографическую карту оказывается неопределенной и стандартные методики совмещения здесь не работают.

В статье рассмотрены два алгоритма сшивки изображений, использующие рассчитанную с помощью ВА трехмерную структуру сцены:

- алгоритм простой сшивки, он применим в случае незначительных перепадов высот дна, поскольку подвержен искажениям, вызванным эффектом параллакса;
- алгоритм, основанный на трехмерной модели дна, позволяющий сшивать изображения без потери четкости даже в случае значительных перепадов высот дна.

Применение этих алгоритмов дает возможность получения качественной фотографической карты без привлечения сложных процедур смешения цветов пикселей изображений.

1. Постановка задачи

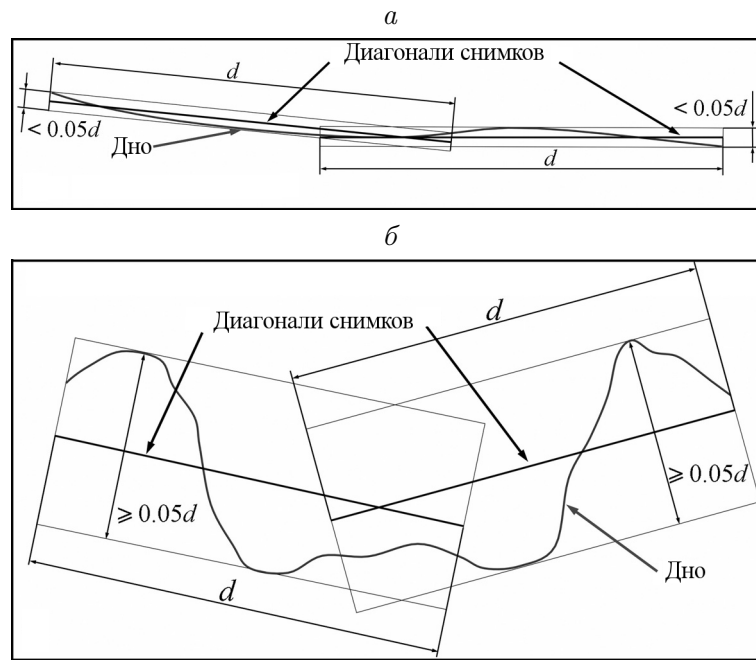
Предположим, что имеются M изображений морского дна, полученных с помощью камеры, установленной на АНПА и направленной вертикально вниз. Все линзовые искажения устранены, фокусное расстояние f камеры в пикселях известно. На плоскости каждого изображения определена прямоугольная система координат с началом в его центре. Для каждого изображения даны его ширина w_j и высота h_j в пикселях, $j = 1, 2, \dots, M$.

В результате вычисления трехмерной структуры сцены [7] для каждого j -го изображения в глобальной системе координат определяются положение $\mathbf{C}_j = (C_{j1}, C_{j2}, C_{j3})$ и ориентация (матрица поворота размерности 3×3) R_j камеры АНПА в момент получения этого изображения, $j = 1, 2, \dots, M$. Также определяется положение характерных точек дна $\mathbf{X}_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3})$, видимых на двух и более изображениях, $i = 1, 2, \dots, N$, где N — количество таких точек.

Используя \mathbf{C}_j , R_j и \mathbf{X}_i в качестве исходных данных, необходимо спроецировать пиксели каждого j -го изображения на общую плоскость, заданную уравнением $X_3 = 0$, в глобальной системе координат. Плоскость $X_3 = 0$ необходимо поставить в соответствие с изображением — фотографической картой морского дна. Цвет каждого пикселя данного изображения нужно определить как некоторую взвешенную сумму цветов проекций пикселей входных изображений на плоскость $X_3 = 0$. Коэффициенты взвешенной суммы должны выбираться так, чтобы исключить появление швов между изображениями на фотографической карте.

2. Перепад высот рельефа дна

Рельеф дна может иметь плавный или резкий перепад высот (рис. 1). Для плавного перепада характерны малые изменения высот на площади дна, охватываемой одним

Рис. 1. Перепады рельефа дна: *a* — плавный; *b* — резкий

снимком. Плавным будем считать такой перепад, при котором изменение высот не превышает 0.05 от диагонали снимка d (рис. 1, *a*). Большой перепад будем называть резким (рис. 1, *b*).

В случае плавного перепада высот участок дна, охватываемый каждым изображением, может быть аппроксимирован плоскостью без потери четкости результирующей фотографической карты. Алгоритм, использующий такую аппроксимацию, назовем алгоритмом простой сшивки. При резком перепаде высот такая аппроксимация неприемлема и требуется алгоритм, основанный на трехмерной модели дна, учитывающий колебания рельефа в пределах одного снимка.

3. Алгоритм простой сшивки

3.1. Построение аппроксимирующей плоскости

Для удобства введем множество целочисленных векторов $\{\mathbf{K}_j\}_{j=1}^M$, $\mathbf{K}_j = (K_{j1}, K_{j2}, \dots, K_{jN_j})$, где K_{jl} — номера характерных точек дна, видимых на j -м изображении, а N_j — количество этих точек. Участок дна, видимый на j -м изображении, может быть аппроксимирован плоскостью, проходящей через центр масс $\bar{\mathbf{X}}_j = (\bar{X}_{j1}, \bar{X}_{j2}, \bar{X}_{j3})$ характерных точек, видимых на j -м изображении:

$$\bar{\mathbf{X}}_j = N_j^{-1} \sum_{l=1}^{N_j} \mathbf{X}_{K_{jl}}.$$

Определим единичную нормаль $\mathbf{n}_j = (n_{j1}, n_{j2}, n_{j3})$ к аппроксимирующей плоскости равенством

$$\mathbf{n}_j = \operatorname{argmin}_{|\mathbf{n}|=1} \sum_{l=1}^{N_j} (\mathbf{n}(\mathbf{X}_{K_{jl}} - \bar{\mathbf{X}}_j))^2. \quad (1)$$

Решение задачи (1) может быть найдено либо с помощью сингулярного разложения матрицы $A_j = (a_{jli}) = (X_{K_j i} - \bar{X}_{ji})$, $l = 1, 2, \dots, N_j$, $i = 1, 2, 3$ (здесь \mathbf{n}_j — правый сингулярный вектор, соответствующий минимальному сингулярному числу этой матрицы [4]), либо с использованием одного из известных методов минимизации. Задачу минимизации можно решать относительно зенитного и азимутального углов нормали n_j , записав (1) в сферической системе координат.

Определив нормаль n_j , запишем уравнение аппроксимирующей плоскости:

$$\mathbf{n}_j(\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}_j) = 0. \quad (2)$$

3.2. Оценка точности построения плоскости

Построенная плоскость (см. подразд. 3.1) не всегда подходит для аппроксимации. Более того, плоскость не может быть построена однозначно, когда точки, видимые на j -м изображении, лежат на прямой линии. Кроме того, если проекции всех характерных точек \mathbf{X}_k , $k \in \mathbf{K}_j$, на j -е изображение сосредоточены на малой его площади, то аппроксимирующая плоскость в большинстве случаев будет построена с недостаточной точностью.

Введем коэффициент $\eta_j = s_j / (w_j h_j)$, который показывает, насколько хорошо проекции характерных точек \mathbf{X}_k распределены по j -му изображению. Здесь через s_j обозначена площадь выпуклой оболочки, образованной этими проекциями. Выпуклую оболочку для набора точек можно построить, используя алгоритм быстрой оболочки (quickhull) [8], а s_j вычислить как сумму площадей составляющих ее треугольников.

Чем больше значение коэффициента η_j , тем выше вероятность того, что рассчитанная плоскость (см. подразд. 3.1) хорошо аппроксимирует поверхность дна, видимую на изображении. В результате практических экспериментов определен порог $\eta_j = 0.3$, при η_j ниже этого значения необходимо использовать альтернативный метод построения плоскости.

3.3. Альтернативный метод построения плоскости

В случае, когда коэффициент $\eta_j < 0.3$, требуется иной способ решения. Такой способ можно получить, если предположить, что плоскость, аппроксимирующая участок дна, видимый на изображении с номером j , перпендикулярна оптической оси камеры, с которой это изображение получено. Такое предположение имеет право на существование, так как АНПА передвигается преимущественно параллельно дну с незначительными углами крена и дифферента. Поэтому в большинстве случаев оптическая ось камеры и плоскость дна почти ортогональны. Особенно это справедливо для случая с плавным перепадом высот дна, который рассматривается в задаче простой шивки.

Вектор, определяющий направление оптической оси камеры в момент получения j -го изображения, — третий столбец матрицы R_j . Данный вектор используется в качестве нормали к аппроксимирующей плоскости в альтернативном подходе:

$$\mathbf{n}_j = \mathbf{R}_{j3}^T.$$

Подстановка заданной таким образом нормали в уравнение (2) преобразует его к виду

$$\mathbf{R}_{j3}^T(\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}_j) = 0. \quad (3)$$

3.4. Функции проекции

После того как аппроксимирующая плоскость определена, для обеспечения процесса сшивки необходимо найти две функции, задающие взаимно-однозначное соответствие между координатами точек в системе j -го изображения и координатами точек на j -й аппроксимирующей плоскости в глобальной системе координат:

$$\mathbf{f}_j(\mathbf{x}) = \mathbf{C}_j + t_j(\mathbf{x})R_j(\mathbf{x}|f)^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_j^{-1}(\mathbf{X}) = \text{diag}(f, f, 1) (R_j^T | -R_j^T \mathbf{C}_j) (\mathbf{X}|1)^T, \quad (5)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$, $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)$ и удовлетворяют (2) или (3); $\text{diag}(f, f, 1)$ — диагональная матрица с элементами f , f и 1 на главной диагонали, а функция $t_j(\mathbf{x})$ определяется в результате подстановки вектора $\mathbf{f}_j(\mathbf{x})$ в уравнение (2) или (3).

Функция (4) используется для определения границ проекции j -го изображения на плоскость $X_3 = 0$, а функция (5) — для вычисления цветов пикселей фотографической карты (см. ниже разд. 5).

4. Алгоритм сшивки на основе трехмерной модели дна

4.1. Построение трехмерной модели рельефа дна

Для реализации процедуры сшивки изображений на основе трехмерной модели дна необходимо построить эту модель. Модель состоит из известных наборов характерных точек \mathbf{X}_i , $i = 1, 2, \dots, N$, и треугольных граней. Построим триангуляцию проекций точек \mathbf{X}_i на плоскость $X_3 = 0$, удовлетворяющую условию Делоне. Для этого воспользуемся алгоритмом с динамическим кэшированием поиска, описанным в работе [9]. Набор T из n получившихся в результате триангуляции целочисленных векторов $\mathbf{t}_k = (t_{k1}, t_{k2}, t_{k3})$, $k = 1, 2, \dots, n$, в совокупности с вершинами \mathbf{X}_i образует трехмерную модель. Здесь t_{kl} , $l = 1, 2, 3$, — номера вершин k -й треугольной грани модели.

Из набора T следует исключить грани, у которых хотя бы одно из ребер длиннее некоторого заранее выбранного порогового значения. Это значение выбирается близким к половине средней длины диагонали участка дна, охватываемого одним снимком. Как правило, это величина около одного метра. Большие грани часто появляются на краях модели и существенно снижают ее точность, поэтому от них необходимо избавиться.

4.2. Процедура проецирования

Так как поверхность, видимая на j -м изображении, в случае сшивки на основе трехмерной модели представлена не одной аппроксимирующей плоскостью, а некоторым количеством треугольных граней, функция (4) не может быть применена. Поэтому будем определять прямоугольные границы зоны на плоскости $X_3 = 0$, куда проецируется j -е изображение, через координаты крайней левой, крайней правой, крайней верхней и крайней нижней точек (направления указаны для вида сверху на плоскость $X_3 = 0$), входящих в грани, содержащие точки \mathbf{X}_k , $k \in \mathbf{K}_j$.

Для определения координат точки j -го изображения, соответствующей точке на поверхности модели, вместо использования функции (5) будем рисовать треугольные грани, заданные набором T и вершинами \mathbf{X}_i . Для этого воспользуемся стандартным ал-

горитмом растеризации из библиотеки OpenGL, поддерживаемым всеми современными графическими ускорителями. Грани будем рисовать в ортографической проекции с применением камеры, направленной вертикально вниз. Использование вершинных и фрагментных шейдеров позволит вычислять не только цвет, но и дополнительные данные, необходимые для корректного смешения цветов, даваемых пересекающимися изображениями (см. разд. 5).

Для рисования граней необходимо знать (передавать в графический ускоритель) лишь координаты характерных точек \mathbf{X}_i , набор T и текстурные координаты, соответствующие каждой точке. Неизвестные текстурные координаты могут быть найдены путем проецирования точек \mathbf{X}_i на изображения с помощью функции (5), если отбросить условие удовлетворения \mathbf{X}_i уравнениям (2) и (3).

5. Устранение швов на стыках изображений

Заключительной подзадачей процедуры сшивки является такое смешение входных изображений, спроецированных на плоскость $X_3 = 0$, которое приводит к бесшовной фотографической карте морского дна. Использование трехмерной структуры сцены при сшивке позволяет избавиться от проблемы двойных контуров и использовать наиболее простые и быстрые методы для смешения. Рассмотрим применение метода, описанного в [10, 11], для алгоритма простой сшивки и алгоритма, основанного на трехмерной модели дна.

Предположим, что в точку $\mathbf{P} = (P_1, P_2)$ фотографической карты дна проецируются пиксели с изображений j_1, j_2, \dots, j_n , где n — количество изображений, на которых видна точка \mathbf{P} , а все номера изображений попадают в интервал $[1; M]$. Соответствующие точке \mathbf{P} евклидовы координаты на изображениях $\mathbf{p}_{j_l} = (p_{j_l1}, p_{j_l2})$, $l = 1, 2, \dots, n$, для алгоритма простой сшивки найдем по однородным координатам $\mathbf{f}_{j_l}^{-1}(P_1, P_2, P_{j_l3}(\mathbf{P}))$, вычисленным по формуле (5), где $P_{j_l3}(\mathbf{P})$ определяется из (2) как

$$P_{j_l3}(\mathbf{P}) = \bar{X}_{j_l3} - \sum_{k=1}^2 n_{j_lk} (P_k - \bar{X}_{j_lk}) / n_{j_l3}$$

или по аналогии из (3), если в качестве \mathbf{n}_{j_l} используется вектор $\mathbf{R}_{j_l3}^T$. Для алгоритма сшивки на основе трехмерной модели \mathbf{p}_{j_l} вычисляются при рисовании треугольников как координаты фрагментов перед выполнением фрагментного шейдера (см. подразд. 4.2). Обозначим через $\mathbf{c}_{j_l}(\mathbf{p}_{j_l})$ вектор, описывающий цвет точки \mathbf{p}_{j_l} (обычно цвет представляется как вектор из трех или четырех компонент: цветовые модели RGB, HSV, LAB, CMY, CMYK, YUV и др.). Тогда цвет \mathbf{P} -й точки фотографической карты определяется выражением

$$\mathbf{c}_P = \left(\sum_{l=1}^n k_{j_l} \right)^{-1} \sum_{l=1}^n k_{j_l} \mathbf{c}_{j_l}(\mathbf{p}_{j_l}). \quad (6)$$

Здесь k_{j_l} — коэффициент вклада каждого изображения в цвет точки \mathbf{P} фотографической карты дна. Этот коэффициент вычисляется следующим образом:

$$k_{j_l} = (\min(0.5w_{j_l} - p_{j_l1}, p_{j_l1} + 0.5w_{j_l}, 0.5h_{j_l} - p_{j_l2}, p_{j_l2} + 0.5h_{j_l}))^\gamma. \quad (7)$$

Коэффициент k_{j_i} имеет максимальное значение в случае, когда точка \mathbf{p}_{j_i} находится в центре, и минимальное, когда точка находится на границе изображения. Коэффициент γ показывает, насколько резко спадает k_{j_i} при движении точки \mathbf{p}_{j_i} к краю изображения. Чем выше γ , тем уже граница смешения перекрывающихся изображений и тем четче область перекрытия. Однако при слишком высоких значениях γ шов между изображениями начинает выделяться. В данной работе $\gamma = 4$.

Использование смещения (6) позволяет формировать фотографическую карту дна, последовательно добавляя в нее новые изображения. Этот процесс можно описать следующим алгоритмом.

Шаг 1. Формируем две карты одинакового размера: фотографическую карту и карту коэффициентов. Изначально обе карты заполняются нулями.

Шаг 2. Пока есть входные изображения, для каждого из них выполняем шаг 3, иначе переходим к шагу 5.

Шаг 3. Определяем границы области, в которую проецируется входное изображение на фотографической карте с помощью функции (4), подставляя туда координаты угловых точек изображения, либо по координатам вершин треугольников (см. подразд. 4.2).

Шаг 4а. Для всех точек из определенной на шаге 3 области, проецирующихся на входное изображение, находим цвет, даваемый рассматриваемым изображением, и соответствующий ему коэффициент (7). Цвет добавляем к фотографической карте, а коэффициент — к карте коэффициентов. Переходим к шагу 2.

Шаг 4б. С помощью OpenGL отрисовываем все грани, видимые на рассматриваемом изображении, в цветовой буфер, при этом соответствующие коэффициенты (7) помещаем в альфа-канал. Цветовые компоненты из буфера добавляем к фотографической карте, а альфа-канал — к карте коэффициентов. Переходим к шагу 2.

Шаг 5. Делим компоненты цветового вектора каждой точки фотографической карты на значение соответствующего коэффициента в карте коэффициентов.

Шаги 4а и 4б приведенного алгоритма являются альтернативными и соответствуют простой сшивке (см. разд. 3) либо сшивке на основе модели (см. разд. 4). Если для хранения фотографической карты и карты коэффициентов недостаточно места в оперативной памяти, карту следует разбить на прямоугольные блоки и обрабатывать каждый блок по отдельности.

6. Результаты тестирования алгоритмов сшивки

Исходные данные для тестирования. Для тестирования алгоритмов сшивки использовались два набора фотографий. Один набор — 1044 фотографии дна с плавным перепадом высот, полученные с АНПА. Другой набор — изображения синтетического рельефа (рис. 2), полученные с помощью суммирования двумерных шумовых функций Перлина [12] различных частоты и амплитуды. Для такого рельефа характерны резкие перепады высот. На рис. 2 также показана сгенерированная траектория АНПА, проходящая по области с наибольшим перепадом высот. По мере прохода по траектории (обозначена линией) АНПА сделал 3318 снимков (точки). Модель рельефа построена с позиции каждого снимка, а каждый снимок был сохранен. Для синтетических и реальных данных рассчитана трехмерная структура сцены (положение и ориентация камер, положение точек дна).

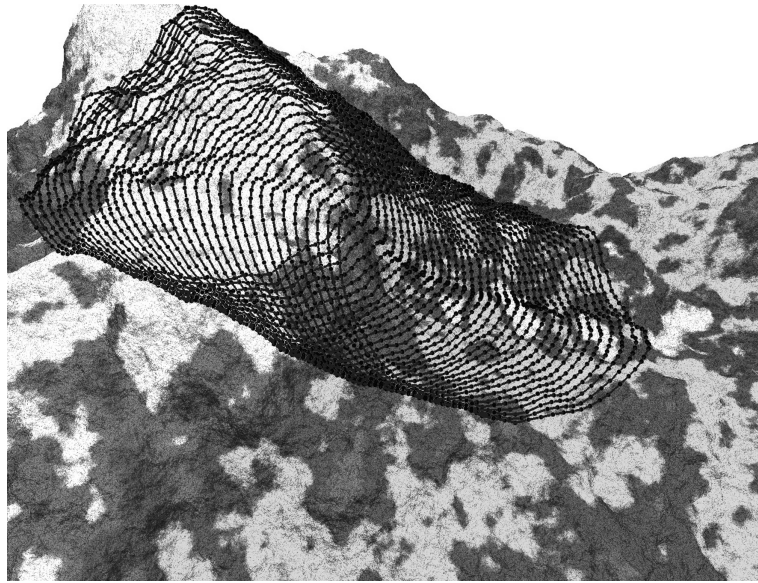


Рис. 2. Синтетические данные для тестирования алгоритмов сшивки

Плавный перепад высот. Применим алгоритм простой сшивки и алгоритм сшивки на основе трехмерной модели к реальным данным, представляющим изображения дна с плавным перепадом высот. На рис. 3, *а* отражен результат простой сшивки, а на рис. 3, *б* — результат сшивки на основе трехмерной модели. Для обоих методов по-

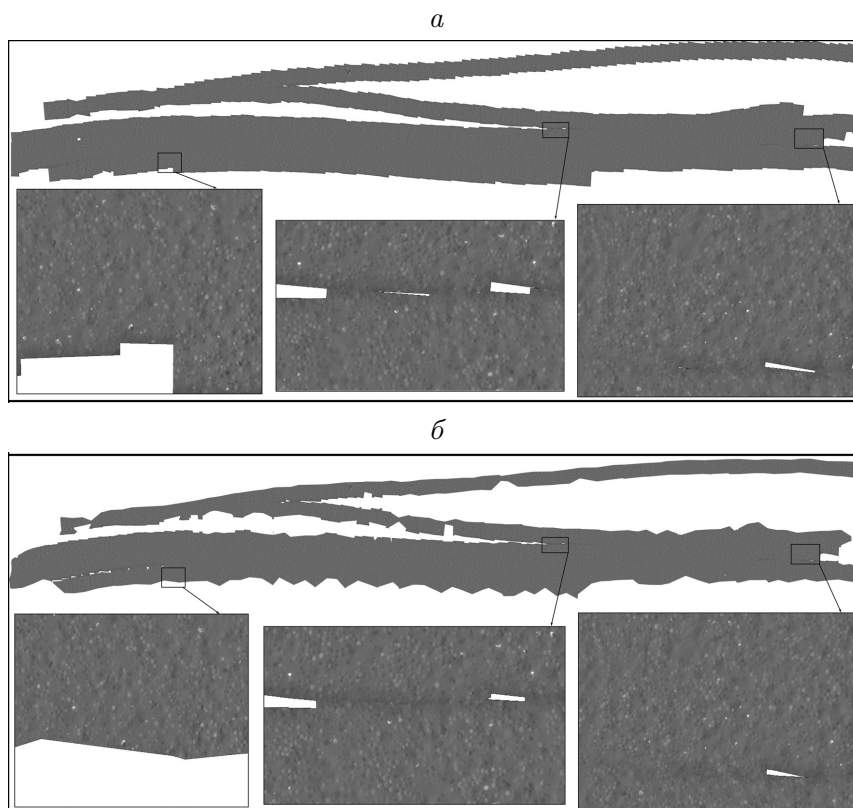


Рис. 3. Применение алгоритмов сшивки к изображениям реального дна: *а* — метод простой сшивки; *б* — алгоритм, построенный на основе трехмерной модели дна

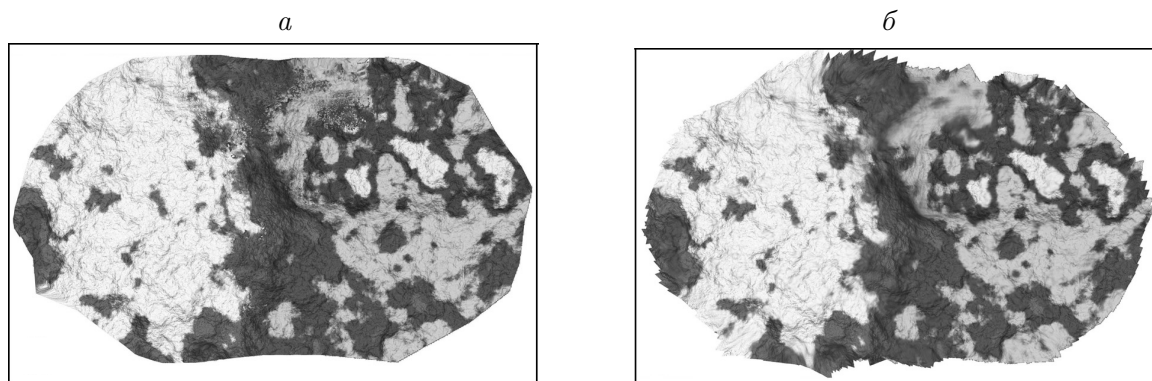


Рис. 4. Карты, построенные с применением алгоритмов сшивки на синтетических данных: *a* — на основе трехмерной модели дна; *б* — методом простой сшивки

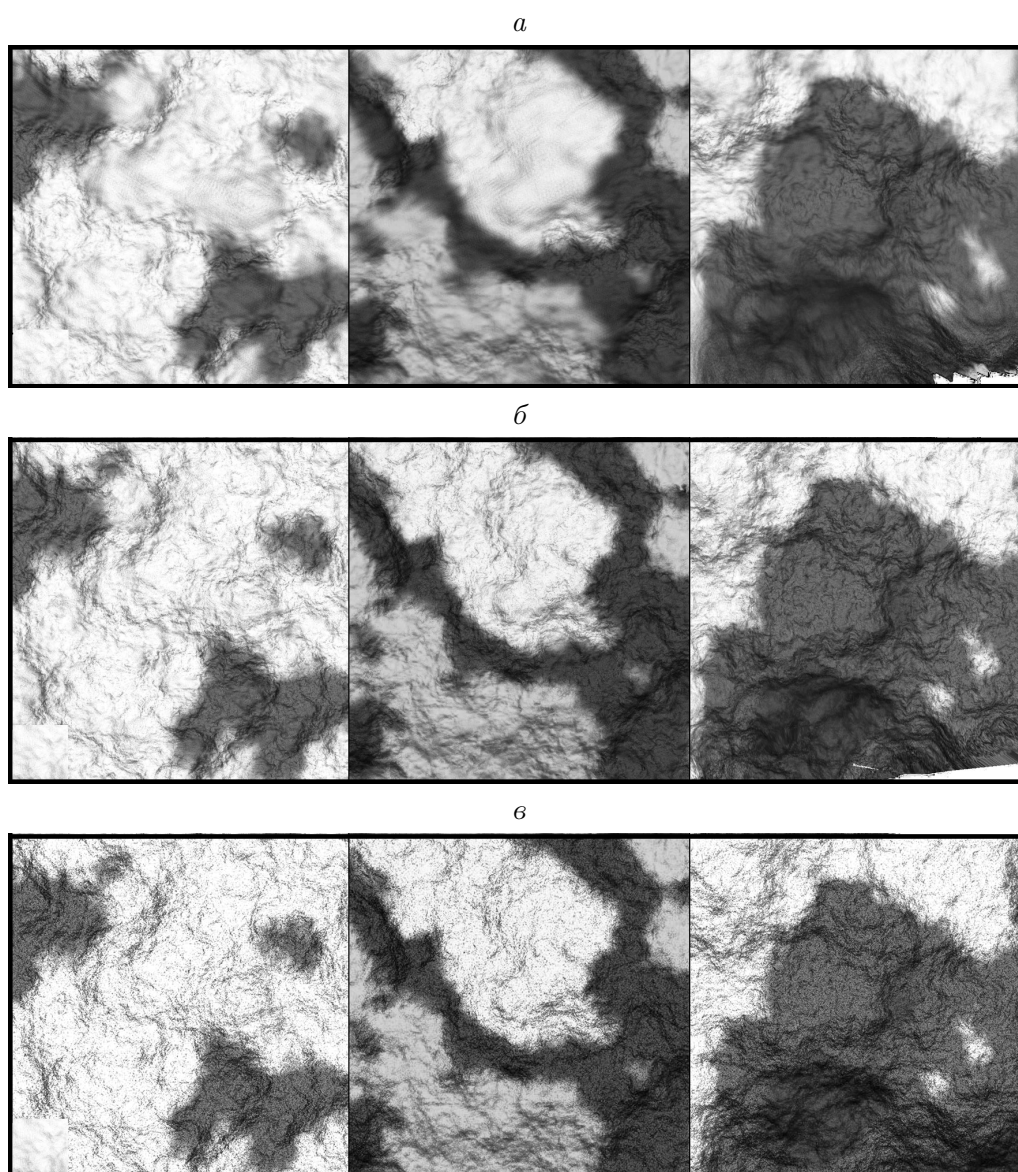


Рис. 5. Фрагменты карты синтетического дна, полученные методом простой сшивки (*a*), на основе трехмерной модели (*б*) и эталонные (*в*)

казаны приближенные фрагменты фотографической карты. На фрагментах не видно швов между изображениями. Оба метода сшивки дают четкую фотографическую карту и могут быть наложены друг на друга практически пиксель в пиксель.

Резкий перепад высот. Рассмотрим применение алгоритмов сшивки на синтетических данных, отражающих резкий перепад высот дна. Карты, полученные в результате применения приведенных выше алгоритмов, представлены на рис. 4. На рис. 4, а хорошо заметно, что карта, построенная на основе трехмерной модели, имеет более высокую четкость, чем карта, построенная методом простой сшивки. Для демонстрации неприменимости метода простой сшивки при составлении карт дна с резкими перепадами высот на рис. 5 приведены по три увеличенных фрагмента построенных карт, полученных с использованием метода простой сшивки, на основе трехмерной модели и эталонной карты. Фрагменты, соответствующие простой сшивке, выглядят смазанными и искаженными. Это особенно заметно на стыках изображений. Фрагменты (б) значительно четче и идентичны фрагментам эталонной карты.

Заключение

Решение задачи построения фотографической карты в трехмерном пространстве с применением описанных в статье алгоритмов сшивки позволяет получать четкую фотографическую карту без использования сложных процедур смешения изображений. Предложенные алгоритмы применимы к любому количеству изображений и при этом гарантируют минимальное время сшивки. За счет использования аппаратной процедуры рисования на графическом процессоре алгоритм сшивки на основе трехмерной модели дна имеет такую же скорость работы, как и алгоритм простой сшивки. Алгоритм простой сшивки имеет смысл использовать лишь при плавном перепаде рельефа дна, когда необходимо получить полное отображение входных изображений на фотографическую карту. В остальных случаях предпочтительнее использовать алгоритм сшивки на основе трехмерной модели.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-31-00187 мол_а и № 16-07-00156) и комплексной программы фундаментальных исследований ДВО РАН “Дальний Восток” (проект № 15-I-4-071).

Список литературы / References

- [1] Prados, R., Garcia, R., Gracias, N., Escartin, J., Neumann, L. A novel blending technique for underwater giga-mosaicing // IEEE Intern. J. of Oceanic Eng. 2012. Vol. 37, No. 4. P. 626–644.
- [2] Prados, R., Garcia, R., Neumann, L. Image blending techniques and their application in under-water mosaicing. Springer, 2014. 107 p.
- [3] Elibol, A., Gracias, N., Garcia, R. Efficient topology estimation for large scale optical mapping // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2013. Vol. 82. 88 p.
- [4] Hartley, R., Zisserman, A. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge Univ. Press, 2004. 673 p.
- [5] Szeliski, R. Computer vision: Algorithms and applications. Series Title: Texts in Computer Science. London: Springer-Verlag, 2011. 812 p.

- [6] **Камаев А.Н.** Исследование алгоритмов упорядочивания коэффициентов систем линейных алгебраических уравнений, возникающих в задачах компьютерного зрения // Информатика и системы управления. 2013. Т. 3(37). С. 32–44.
Kamaev, A.N. Investigation of algorithms for ordering the coefficients of systems of linear algebraic equations in computer vision problems // Inform. Sci. and Control Systems. 2013. Vol. 3(37). P. 32–44. (In Russ.)
- [7] **Камаев А.Н.** Создание панорамных карт подводного дна на основе больших массивов изображений // Тр. Междунар. конф. “ГрафиКон’2013”. Владивосток, 2013. С. 298–301.
Kamaev, A.N. Seabed mosaics creation based on large images arrays // Proc. of the Intern. Conf. “GraphiCon’2013”. Vladivostok, 2013. P. 298–301. (In Russ.)
- [8] **Barber, C.B., Dobkin, D.P., Huhdanpaa, H.** The quickhull algorithm for convex hulls // ACM Transact. on Math. Software. 1996. Vol. 22, No. 4. P. 469–483.
- [9] **Скворцов А.В.** Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во ТГУ, 2002. 128 с.
Skvortsov, A.V. Delaunay triangulation and its application. Tomsk: TGU, 2002. 128 p. (In Russ.)
- [10] **Chen, C.-Y., Klette, R.** Image stitching — comparisons and new techniques // Proc. of the Comput. Anal. of Images and Patterns. Ljubljana, 1999. P. 615–622.
- [11] **Uyttendaele, M., Eden, A., Szeliski, R.** Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics // Proc. of the IEEE Comput. Soc. Conf. on CVPR. Kauai, 2001. P. 509–516.
- [12] **Lagae, A., Lefebvre, S., Cook, R. et al.** A survey of procedural noise functions // Comput. Graphics Forum. 2010. Vol. 29, No 8. P. 2579–2600.

Поступила в редакцию 20 апреля 2016 г.

Image stitching for construction of seabed mosaics

KAMAIEV, ALEKSANDR N.* , SMAGIN, SERGEY I.

Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, 680000, Russia

*Corresponding author: Kamaev, Aleksandr N., e-mail: kamaev_an@mail.ru

Purpose. Seabed mosaics are built of tens of thousands of images obtained by the AUV at a small distance from the bottom. The height of the survey is limited by the power of the AUV lighting equipment and the transparency of the water and is often comparable with the differences in the heights of the bottom. This leads to strong distortions caused by parallax, which makes standard stitching methods inapplicable to the construction of photographic maps of the bottom with a complex relief.

Methodology. The article proposes to consider the problem of constructing seabed mosaics as a problem of 3D reconstruction. Two approaches to stitching images are described: simple stitching and based on a 3D bottom model. With simple stitching, the relief represented by each image is approximated by a plane that is then projected onto the common plane of the seabed mosaic. When stitching based on a 3D model, the bottom section model is first constructed using the Delaunay triangulation, and then each triangle of the model is projected onto the plane of the map using a graphic accelerator GPU. To mix colors, a simple method of weighting the pixels of images is used, depending on their distance from the edges of the image.

Findings. Stitching algorithms proposed in the paper were tested on images obtained by both real AUV and synthetic images. This allowed us to verify efficiency of stitching algorithms for conditions of a highly complex relief. In combination with simple color blending techniques, proposed algorithms have shown their practical efficiency. The stitching algorithm, based on the 3D model demonstrated its robustness to distortions caused by parallax.

Originality/value. The main advantage of described approach is an absence of necessity to use computationally consuming, nontrivial color blending techniques while constructing seabed mosaics in the case of complex bottom relief.

Keywords: image stitching, bundle adjustment, AUV, seabed mosaic, 3D model.

Acknowledgements. The research was supported by RFBR (grants No. 16-31-00187, No. 16-07-00156) and Complex Program for Fundamental Research Far East Division of RAN “Far East” (project No. 15-I-4-071).

Received 20 April 2016