

УДК 519.687

Непомнящий П.В., Хельвас А.В., Юрин Д.В.
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПЕРЕРАСТРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА АППРОКСИМАЦИИ

Предложен алгоритм перерастирирования пиксельных изображений, с адаптивным выбором метода аппроксимации в зависимости от локального коэффициента сжатия. Исследованы погрешности различных видов аппроксимации.

Преобразование изображения с одной сетки раstra на другую, другими словами перерастирирование, используется во многих задачах по обработке изображений. Среди этих задач есть такие как исправление апертурных искажений камеры, перевод изображений со спутника в одну из стандартных географических проекций, проецирование изображений на поверхности различной формы при восстановлении трехмерных сцен [1], разномасштабная сегментация [2,3], поиск изображений по базам данных [4], совмещение снимков, полученных с разных положений и под разными углами с приведением их к одному масштабу.

В большинстве задач перерастирирование используется как вспомогательный этап, либо для предварительной обработки изображений, либо для обработки результатов. Вследствие этого, значимость перерастирирования часто преуменьшается,

и для осуществления этого процесса используются упрощенные алгоритмы, обеспечивающие малую точность, а также, многие преобразования производятся в несколько этапов, что приводит к накоплению ошибки. Примером этому может служить рекомендованная NASA процедура выравнивания разрешения скана прибора AVHRR спутников серии NOAA [5], осуществляемая выбрасыванием части точек изображения и повторением части других.

В данной работе описывается разработанный универсальный алгоритм перерастирования изображений, осуществляющий автоматический выбор оптимального для данного участка изображения способа аппроксимации и позволяющий выполнить произвольное преобразование за один этап.

Постановка задачи

Исходными данными для задачи являются изображение, которое требуется преобразовать, исходная система координат, связанная с изображением и преобразование вида:

$$x' = \varphi(x, y)$$

$$y' = \psi(x, y)$$

Это преобразование переводит исходную систему координат в результирующую. Преобразование может включать в себя повороты, растяжение или сжатие, формулы проекции изображения на трехмерную поверхность, в случае с географической проекцией – формулы перевода эллипсоида в плоскость, оно также может быть комбинацией всех этих преобразований.

На основе этих данных требуется осуществить перевод исходного изображения в тот вид, который оно будет из себя представлять после применения формул преобразований координат. Существенно важным условием является то, что как исходное, так и результирующее изображения являются

растровыми (дискретными), что вызывает необходимость аппроксимации пикселей выходного изображения.

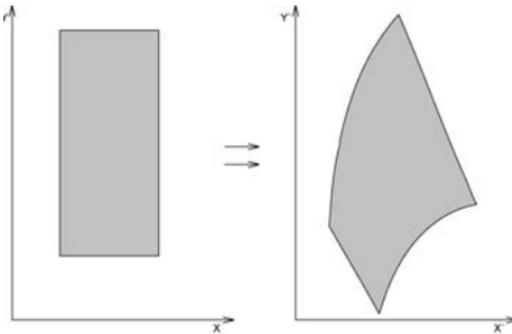


Рис. 1. Пример преобразования изображения из исходной системы координат в результирующую

Обнаружение границ результирующего изображения

Вначале алгоритм определяет границы области в результирующей системе координат, куда попадает после преобразования исходное изображение. Это делается для того, чтобы алгоритм перерастрирования впоследствии работал только с этой областью – в результате уменьшается количество необходимых вычислений за счет того, что не тратится время на обработку точек, куда заведомо не попадают

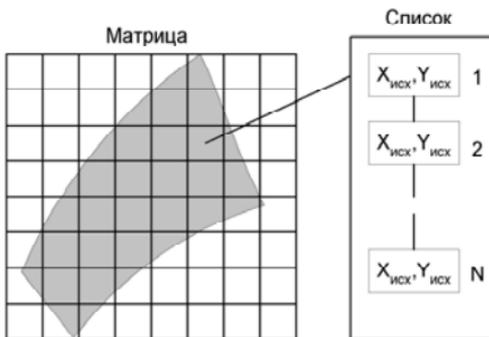


Рис. 2. Структура матрицы распределения. $X_{исх}$ и $Y_{исх}$ – координаты пикселя на исходном

после преобразования пиксели исходного изображения.

Все краевые точки исходного изображения преобразовываются к новой системе координат, в результате чего, при последовательном соединении этих точек прямыми, получается некий многоугольник, описывающий ту область, куда ляжет после проецирования исходное изображение (рис.1).

Следует обратить внимание на то, что этот многоугольник будет правильно описывать нужную область только если преобразование в этой области гладкое, без особых точек и разрывов. Это накладывает ограничение на преобразования, которые могут осуществляться данным алгоритмом – например, области в районе полюсов в проекции Меркатора должны быть отсечены, так как эти точки являются особыми для данной проекции.

Распределение пикселей исходного изображения по результирующему

Для получения результирующего изображения требуется аппроксимировать каждый пиксель области, на которую ложится преобразуемое изображение (граница этой области найдена на предыдущем этапе). Подготовительным этапом для этого является построение матрицы распределения пикселей исходного изображения по области результирующего изображения.

Около найденной области результирующего изображения, на которую ложится преобразуемое изображение, описывается прямоугольник. Создается матрица, равная по размеру этому прямоугольнику (высота и ширина прямоугольника задается в пикселях). Таким образом, каждому пикселю в прямоугольнике сопоставляется элемент матрицы, координаты которого равны координатам пикселя.

Элементы, которые содержит матрица, являются списками структур (рис. 2). В структуре содержатся координаты одного пикселя исходного изображения, по которым можно получить его точные координаты в результирующей системе координат. Изначально все списки в матрице пустые.

Матрица заполняется следующим образом: каждый пиксель исходного изображения проецируется на результирующее изображение, результатом чего являются его координаты

в результирующей системе координат. По этим координатам находится ближайший пиксель на результирующем изображении. По координатам этого пикселя определяется соответствующий ему элемент из матрицы, и в список, который содержится в этом элементе, добавляется структура с координатами этого пикселя на исходном изображении.

Так как преобразование в общем случае неравномерно, то спроецированные пиксели могут распределяться по выходной области также неравномерно, в зависимости от локального коэффициента сжатия и локального угла поворота. Поэтому и матрица будет заполнена неравномерно – в отдельных областях могут преобладать пустые элементы, в то время как в других – элементы со списками, состоящими из нескольких структур.

Аппроксимация пикселей результирующего изображения

Заполненная на предыдущем этапе матрица позволяет быстро найти ближайший к данному пикселю результирующего изображения спроецированный пиксель исходного изображения. Это делается обходом элементов матрицы, начиная с элемента, соответствующему данному пикселю и далее, по его соседям, с все увеличивающимся радиусом обхода, до тех пор, пока не будет найден первый непустой элемент, который и будет содержать структуру с данными о ближайшем спроецированном пикселе исходного изображения.

Кроме этого, по этой матрице можно быстро оценить коэффициент сжатия в локальной окрестности данного пикселя результирующего изображения. Для этого подсчитывается суммарное количество структур в списках, содержащихся в элементах матрицы, в элементе, соответствующем данному пикселю и его окрестности. Коэффициент сжатия равен отношению количества попавших в данную окрестность пиксе-

лей исходного изображения к количеству пикселей окрестности.

В ходе аппроксимации для каждой точки области результирующего изображения находится локальный коэффициент сжатия, в зависимости от которого производится выбор оптимального способа аппроксимации.

Обзор способов аппроксимации

Существует несколько способов аппроксимации пикселей результирующего изображения. Их можно разделить на две группы – первая включает способы, применимые для преобразований одного масштаба или растягивающих, а вторая – для сжимающих.

В первую группу входят:

- аппроксимация по ближайшему соседу – когда находится ближайший к центру аппроксимируемого пикселя результирующего изображения попавший на это изображение пиксель исходного изображения и его интенсивность присваивается аппроксимируемому пикселю;
- билинейная аппроксимация, в которой искомая интенсивность получается путем линейной аппроксимации с использованием интенсивностей четырех ближайших пикселей исходного изображения, попавших после преобразования в эту область;
- бикубическая аппроксимация – тот же принцип, что и в билинейной, но аппроксимация происходит кубическими полиномами с учетом шестнадцати ближайших пикселей.

Во вторую группу входят:

- аппроксимация по среднему, основанная на том, что при сжатии несколько пикселей исходного изображения переходят в один пиксель результирующего,

и интенсивность результирующего пикселя аппроксимируется средней интенсивностью исходных, что соответствует физической модели фотоприемников и человеческого зрения;

- аппроксимация по максимуму гистограммы – из цветов нескольких пикселей, попавших в один, выбирается наиболее часто встречающийся и его значение присваивается аппроксимируемому пикселю.

Из перечисленных методов два подходят для индексных изображений (в таких изображениях значение пикселя не имеет смысла интенсивности, а обозначает номер цвета из некоторой палитры доступных цветов), в которых после преобразования не должно образовываться новых цветов – это методы аппроксимации по ближайшему соседу и по максимуму гистограммы. Для изображений интенсивности применимы все способы аппроксимации, хотя последний (по максимуму гистограммы), по-видимому, не целесообразен, так как включает в себя некоторую разновидность фильтрации и не соответствует физическим моделям фотоприемных устройств.

Анализ способов аппроксимации

Для сравнения способов аппроксимации при преобразованиях в одном масштабе, тестируемое изображение подвергалось двадцатикратному повороту. Сравнялось три метода аппроксимации – по ближайшему соседу, билинейная и бикубическая. Аппроксимации по среднему и по максимуму гистограммы не применялись, так как при коэффициентах сжатия меньших или равных единице они вырождаются в аппроксимацию по ближайшему соседу. Визуальный анализ качества получившихся в итоге поворотов изображений показал, что наилучшие результаты показывает метод бикубической аппроксимации.

Для оценки разномасштабных преобразований было определено качество различных способов аппроксимации при различных коэффициентах сжатия. Тестовое изображение сжималось, с коэффициентами сжатия меняющимися от 10 до 0.5. Каждый раз сжатие проводилось с использованием пяти различных способов аппроксимации. После этого все полученные изображения, а также исходное, растягивались методом бикубической аппроксимации до одинакового размера, после чего считалась ошибка аппроксимации по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{W * H} \cdot \sum_{x,y} |I_{x,y}^0 - I_{x,y}|$$

Где $I_{x,y}^0$ - интенсивность пикселя с координатами (x,y) на исходном изображении, а $I_{x,y}$ - интенсивность пикселя (x,y) на экспериментальном изображении, W и H – ширина и высота изображения в пикселях. Результаты оценки представлены на графиках (рис. 3 и 4), где $K = \frac{1}{K_{сжатия}} * 100$ – коэф-

фициент растяжения в процентах. Из анализа получившихся результатов были сделаны следующие выводы: при коэффициентах сжатия 1.6 и меньше наилучшие результаты показывает бикубическая аппроксимация, а при больших – аппроксимация по среднему. Билинейная аппроксимация близка по качеству к бикубической, но все же немного хуже. Аппроксимация по ближайшему соседу значительно хуже бикубической и билинейной, кроме случаев когда коэффициент сжатия кратен размеру изображения – 0.5, 1, 2, 3, 4 – в этих случаях наблюдается резкое улучшение качества, что объясняется тем, что при преобразовании несколько точек точно попадают в один пиксель.

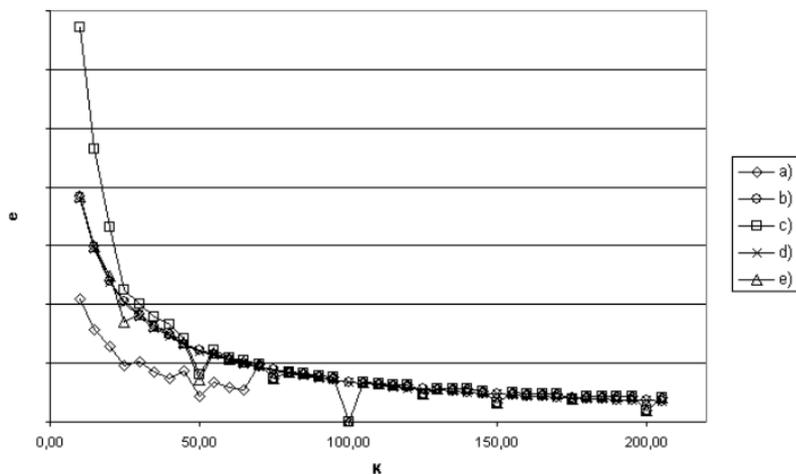


Рис. 3. График зависимости ошибки аппроксимации от коэффициента растяжения: а) аппроксимация по среднему, б) бикубическая аппроксимация, в) по максимуму гистограммы, д) билинейная, е) по ближайшему соседу

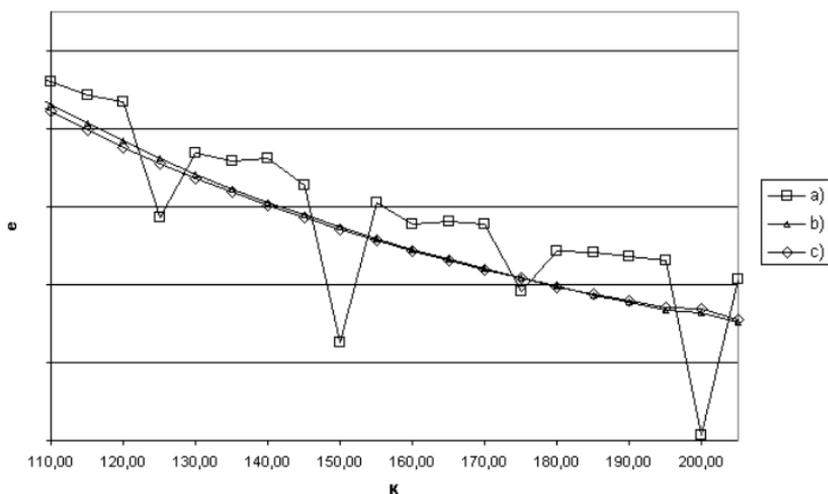


Рис. 4. График зависимости ошибки аппроксимации при коэффициенте растяжения больше единицы: а) аппроксимация по ближайшему соседу, б) билинейная, в) бикубическая В итоге для

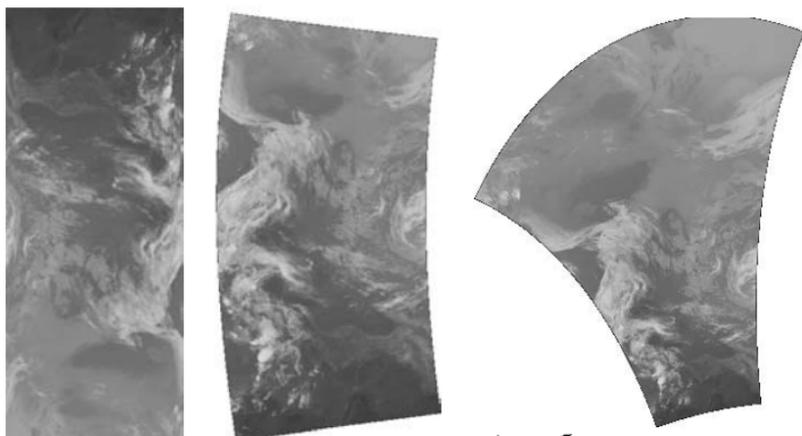
использования в алгоритме было выбрано два способа аппроксимации – бикубическая для коэффициентов сжатия 1.6 и менее, и по среднему, для больших коэффициентов сжатия.

Результаты

Изложенный в этой работе алгоритм лег в основу библиотеки классов, написанной на языке C++. Разработанная библиотека предоставляет интерфейс для перевода изображений полученных со спутника в одну из географических проекции.

Процезируемые изображения получаются со спутников серии NOAA в одном или нескольких спектральных каналах, и сильно искажены на краях. Разрешение снимка колеблется от километра на пиксель в середине снимка до шести километров на его краях, что обусловлено сферичностью Земли и особенностями фотоприемной аппаратуры [5]. Отсюда возникает необходимость перевода изображений в географическую проекцию с единым масштабом, для того, чтобы можно было совмещать снимки с контурной картой и друг с другом.

Разработанная библиотека поддерживает перевод в проекцию Меркатора (Mercator), поперечную проекцию Меркатора (Transverse Mercator), UTM (Universal Transverse Mercator), полярную стереографическую проекцию (Universal Polar Stereographic) [8]. Библиотека поддерживает обработку изображений с нескольких каналов одновременно, работает с RGB изображениями, позволяет совмещать несколько снимков на одном изображении в одной из поддерживаемых проекций. Набор проекций легко расширяем, путем добавления соответствующего новой проекции преобразования, реализуемого в виде класса C++, наследуемого от базового абстрактного класса AProjection.



а) исходное изображение

б) изображение в проекции UTM

в) изображение в проекции Меркатора

Рис. 5. Пример перевода изображения со спутника в географические проекции

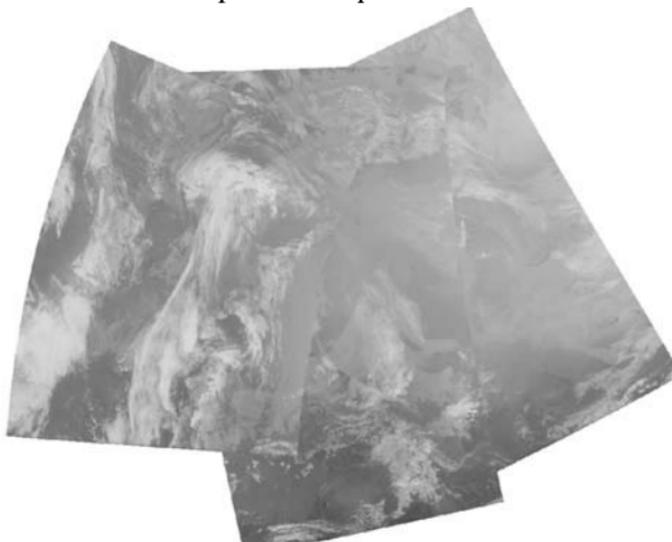


Рис. 6. Пример совмещения изображений из нескольких сеансов на одном в проекции UTM.

Результат преобразования спутникового изображения в полярную стереографическую проекцию и проекцию Мерка-

тора показан на рис. 5. На рис. 6 показан результат совмещения нескольких изображений в одной проекции.

В дальнейшем планируется разработка универсальной библиотеки использующей описанный алгоритм для осуществления не только проецирования спутниковых изображений, но и для устранения аппаратурных искажений камеры и для проецирования изображений на трехмерные поверхности в задаче восстановления трехмерных сцен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tony Jebara, Ali Azarbayejani and Alex Pentland.* 3D Structure from 2D Motion // IEEE Signal Processing Magazine — 16(3) — May 1999.
2. *J. Mao, A. Jain.* Texture classification and segmentation using multiresolution simultaneous autoregressive models // Pattern Recognition J — 25 (2) — 1992. — P.173-188.
3. *J.M. Morel, G. Koepfler, C. Lopez.* A multiscale algorithm for image segmentation by variational method // SIAM Journal on Numerical Analysis — 31(1) — February 1994 — P.282-299.
4. *W. Y. Ma and B. S. Manjunath.* NETRA: A toolbox for navigating large image databases // Proc. IEEE International Conference on Image Processing: Santa Barbara, California — Vol. I — Oct 1997 — P. 282-299.
5. *G. Goodrum, K.B. Kidwell, W. Winston.* NOAA KLM Users Guide — 1999.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — Кн.1 — 312 с., ил., Кн.2 — 480 с., ил.
7. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. — М. Радио и связь, 1987. — 296с.:ил.
8. Соловьёв А.Д. Математическая картография. — изд. Недра — Москва, — 1969.