

РЕСТАВРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ СТРУКТУРЫ

© 2009 г. Н. Н. Красильников, доктор техн. наук;

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

E-mail: nnk_k23@aanet.ru

Рассмотрено представление изображений в виде композиции контурных, градиентных и фактурных компонентов, а также особенности восприятия зрительной системой человека этих компонентов. Сформулированы принципы обработки и сжатия изображений, основанные на использовании такого представления. Приведены результаты экспериментов, показывающие, что методы обработки, использующие данный подход, позволяют получать лучшие результаты, чем традиционно используемые методы.

Коды OCIS: 100.6890, 3000.30200.

Поступила в редакцию 19.05.2008.

Введение

Известно, что скорость зрительного восприятия согласно [1-3] составляет 50–70 дв. ед/с. Из этого следует, что при просмотре десятиминутного цветного видеоролика при параметрах разложения 720×576 и 25 кадрах в секунду зрительная кора получает и обрабатывает около 5,25 Кб двоичных единиц информации. Вместе с тем, для того чтобы записать этот ролик без сжатия, при этих же параметрах разложения потребуется около 18,7 Гб памяти. Различие в количестве двоичных единиц, необходимых для представления видеоролика, и количестве двоичных единиц, обрабатываемых зрительной системой, составляет $(3,5-4,9) \times 10^6$ раз. Из приведенного примера следует, что только очень небольшая часть информации, содержащаяся в изображении наблюдаемой сцены, используется зрительной системой человека при его рассматривании, в то время как остальная ее часть либо вообще не используется, либо используется, но в незначительной степени. Другими словами, не вся информация, содержащаяся в изображении, для зрительной системы человека равноценна и поэтому реализуется. В настоящее время эта особенность зрительного восприятия частично используется в методах сжатия с потерями информации, а также при обработке изображений с целью их реставрации.

При наблюдении сцены свет, попадая на сетчатку глаз, создает на них изображения составляющих ее объектов. Многочисленные исследования зрительной системы показали, что наиболее важную информацию об изображениях объектов содержат их контуры. Другие компоненты изображения, та-

кие как, например, градиентные или фактурные, играют меньшую роль. Рассмотрим причины, которыми обусловлено такое положение, и продемонстрируем возможности практического использования особенностей восприятия изображений зрительной системой при их обработке. С этой целью представим изображение в виде композиции контурных, градиентных и фактурных компонентов.

Представление изображений в виде контурных, градиентных и фактурных компонентов

Контурные компоненты. Под контурными компонентами будем понимать линии, которые определяют положения границ на изображении, при пересечении которых значения яркости и/или цвета изменяются скачком. Контурные компоненты представляют собой проекции на сетчатки глаз оболочек объектов, составляющих сцену, т. е. поверхностей, отделяющих объекты от окружающего их пространства. Форма контурных компонентов определяется формами оболочек самих объектов, а также расстояниями и ракурсами, под которыми они рассматриваются. При этом форма контурных компонентов не зависит ни от расположения, ни от интенсивности, ни от спектрального состава источников света, освещающих наблюдаемую сцену. Константность, а следовательно, и информативность контурных компонентов велика. Этим объясняется тот хорошо известный факт, что зрители легко узнают изображаемые объекты по контурному рисунку.

Контурные компоненты, как известно, играют основную роль при опознавании изображений объек-

тов, составляющих сцену, а также при определении их взаимного положения зрительной системой. Исследования зрительной коры высокоорганизованных животных показали, что в ней имеются так называемые сверхсложные рецептивные поля, посредством которых реализуются механизмы выделения элементов контуров, таких как углы, дуги и т. д. Эти механизмы иногда называют детекторами.

Важность контуров подтверждается исследованиями Ярбуса, который показал, что зрительная ось при наблюдении изображений фиксируется преимущественно в районе контуров.

Контурные компоненты обладают двумя важными свойствами.

1. Поскольку между оболочками реальных объектов, составляющих сцену, и окружающим их пространством за редкими исключениями имеются резкие границы, то их проекции, т. е. изображения объектов, также имеют четкие световые и цветовые границы (контур), отделяющие их от фона, на котором они наблюдаются. Размытие световых границ в реальных изображениях, с которым приходится встречаться на практике, обычно обусловлено несовершенством аппаратуры или ее плохой настройкой. Поэтому обработка изображений практически любых объектов, заключающаяся в замене размытых границ резкими границами, будет восприниматься зрительной системой как улучшение качества их воспроизведения.

2. Как правило, оболочки реальных объектов, за исключением отдельных изломов, носят гладкий, незазубренный характер. Из этого следует, что контуры в изображениях также являются гладкими.

Градиентные компоненты определим как области изображения, ограниченные контурами, каждая точка которых представляет значение сглаженной, плавно изменяющейся яркости и/или цвета. Константность этих компонентов ниже, чем константность контурных компонентов, так как распределение яркости в них зависит не только от коэффициентов отражения поверхностей объекта, т. е. от свойств самого объекта, но также от взаимного расположения наблюдаемого объекта и точки наблюдения (съемки), а также от условий освещения объекта, которые могут сильно варьироваться. По этой причине при опознавании изображений объектов, составляющих сцену, а также при определении их взаимного положения зрительной системой градиентные компоненты, как правило, играют меньшую роль.

Фактурные компоненты определим как области, каждая точка которых представляет величину отклонения яркости и/или цвета изображения от значения, определяемого соответствующим градиентным компонентом.

Термин фактура, который мы здесь намеренно вводим, отличается от общепринятого термина текстура. Здесь и далее под фактурой будем понимать текстуру, из которой предварительно удалены и отнесены к контурному компоненту все световые и цветовые границы, если они имеются. Поясним сказанное примером текстуры, на которой изображена кирпичная кладка. В нашем определении эта текстура разделяется на контурный компонент, на котором изображены границы кирпичей, и фактурный компонент, характеризующий неоднородность поверхности кирпичей. Как будет видно далее, такое представление в ряде случаев оказывается более удобным. Разделение изображения на компоненты, подобные описанным выше, неоднократно предпринималось ранее, в частности, при разработке методов сжатия изображений [4].

Проведенные исследования показали, что фактурные компоненты носят шумовой характер. При наблюдении реальных объектов, как правило, имеющих фактуру, зрительная система человека лишь частично использует информацию, содержащуюся в фактурном компоненте. Согласно гипотезе Юлеша зрительная система легко различает два шумовых рисунка только в том случае, если они отличаются между собой плотностями вероятности первого порядка или спектральными интенсивностями (энергетическими спектрами) при одинаковых плотностях вероятностей первого порядка. В противном случае для их различения требуется поэлементное сравнение рисунков [5]. Таким образом, при наблюдении объектов зрительная система человека не использует информацию, заключенную в конкретной реализации их фактур, а использует лишь информацию, заключенную в спектральных интенсивностях и в меньшей степени заключенную в распределениях плотностей вероятностей первого порядка фактур наблюдаемых объектов [4, 6]. Другими словами, зритель не замечает замены одной реализации фактуры другой реализацией, если спектральная интенсивность и плотность вероятности первого порядка новой фактуры совпадают со спектральной интенсивностью и плотностью вероятности первого порядка прежней. Из этого следует, что при передаче или при сохранении изображений объектов их фактуры можно не передавать (не сохранять), а генерировать при их воспроизведении в виде шума, статистические характеристики которого совпадают со статистическими характеристиками фактур передаваемого (сохраняемого) изображения [4].

По некоторым экспериментальным данным, фактуры обладают фрактальными свойствами, т. е. при увеличении изображения их статистические характеристики остаются неизменными.

Восприятие изображений зрительной системой человека

Зрительная система предназначена для наблюдения и опознавания не любых, произвольных распределений яркости и/или цвета, а таких распределений, которые могут соответствовать реальным объектам, а следовательно, распределений, которые можно представить композицией контурных, градиентных и фактурных компонентов. Можно предположить, что в зрительной системе человека при анализе наблюдаемых изображений эти компоненты обрабатываются раздельно.

При наблюдении сцен и их изображений зрительная система человека “выделяет” на них контурные, градиентные и фактурные компоненты, представляющие те или иные объекты или их части. При этом зрительная система “из опыта знает”, какими могут и должны быть контурные, градиентные и фактурные компоненты изображения, представляющие ту или иную часть объекта. Если эти компоненты отличаются от тех, какими они должны быть, это воспринимается как искажение изображения. Примерами таких искажений являются размытие световых границ, наличие шума, присутствие посторонних узоров в виде муарового рисунка, обусловленного шумом пространственной дискретизации; наличие ложных контуров, вызванных недостаточным количеством уровней квантования, и т. д. Как дефект изображения воспринимается также отсутствие фактуры на объектах, где она ожидается, например, на лице человека. Лица на таких изображениях выглядят кукольными.

Как уже было отмечено, не все части изображения для зрительной системы человека являются семантически равноценными. На семантически значимых участках изображения малейшие искажения легко замечаются, в то время как значительные искажения других, семантически малозначимых участков остаются незамеченными. Этот факт хорошо известен и используется при сжатии изображений. Например, в методе сжатия JPEG-2000 предусмотрена поддержка кодирования отдельных областей изображения (глаза и т. д.) с лучшим качеством.

Из изложенного непосредственно следует, что при воспроизведении изображения, для того чтобы оно было оценено зрительной системой как совершенное, необходимо с малой погрешностью воспроизводить положения и резкость световых границ; в меньшей степени это относится к точности воспроизведения градиентных компонентов и еще в меньшей степени к точности воспроизведения фактурных компонентов. Проиллюстрируем сказанное примерами.

Экспериментальные исследования, выполненные с использованием изображений широкого круга объектов, показали, что локальные искажения контурных компонентов более заметны, чем искажения нелокального характера. Так, например, при сжатии окружности (изменение масштаба) в одном из направлений пороговое значение, при котором данный вид искажений становится едва заметным, составляет около $\Delta D/D = 0,04$, где D – диаметр окружности, ΔD – приращение диаметра. В случае же локальных искажений контурного компонента (в рассматриваемом примере окружности) уже при $\Delta D/D = 0,0004$ они хорошо заметны [7]. Близкие величины имеют пороговые значения локальных искажений контурных компонентов для изображений других объектов, например, для портретов и архитектурных ансамблей.

Неправильное воспроизведение градиентных компонентов нелокального характера, в том числе изменение яркости и цвета вдоль контурных компонентов, которое обычно обусловлено нелинейностью световой характеристики (например, при контрастировании изображения), воспринимается наблюдателем как изменение условий освещения наблюдаемой сцены, а не как искажение изображения, если только эти искажения не чрезмерно велики. Так, например, если световая характеристика отображающей системы описывается степенной функцией с показателем степени γ , то нелинейность этой характеристики при $0,9 \leq \gamma \leq 1,1$ несмотря на то, что она велика, может считаться вполне допустимой. В случае если ошибки воспроизведения градиентных компонентов носят локальный характер, они хорошо заметны на изображении и воспринимаются как помеха.

При воспроизведении фактурных компонентов, как уже отмечалось, их можно заменять реализациями шума, статистические характеристики которых совпадают со статистическими характеристиками соответствующих фактурных компонентов.

Рассмотренный подход к структуре изображений подсказывает естественный путь для разработки методики оценки качества их воспроизведения. Особенностью этой методики должен быть учет различной “чувствительности” зрения к искажениям контурных, градиентных и фактурных компонентов, о чем было сказано выше.

Коррекция изображений, основанная на их представлении в виде композиции контурных, градиентных и фактурных компонентов

Классические методы коррекции изображений основаны на использовании фильтрации (обработке) искаженных изображений, целью которой явля-

ется попиксельное приближение обработанного изображения к неискаженному образцу. Примером таких методов является фильтрация зашумленных изображений с использованием фильтра Винера, фильтра Бакуса–Гильберта и т. д. Основным недостатком этих методов является то, что в них либо совсем не учитываются свойства зрительной системы, как это имеет место в первом случае, либо учитываются, но в малой мере, как это имеет место во втором случае. Следствием такого подхода является малая эффективность указанных методов. Однако этого недостатка можно в значительной степени избежать, если при коррекции воспользоваться представлением изображений в виде композиции контурных, градиентных и фактурных компонентов. В этом случае обработка изображения должна включать в себя два этапа:

- на первом этапе в искаженном изображении производится обнаружение контурных, градиентных и фактурных компонентов;
- на втором этапе обнаруженные искаженные компоненты заменяются их неискаженными версиями, т. е. осуществляется их регенерация.

Проведенные эксперименты показали, что особенностью рассматриваемого метода коррекции является наличие порогового эффекта в отношении шума, который проявляется при малых отношениях сигнала к шуму. В качестве иллюстрации приведем два примера реализации описанного метода коррекции изображений.

Фильтрация зашумленных изображений. Выше было отмечено, что классические методы фильтрации зашумленных изображений, такие как фильтрация посредством фильтра Винера, не дают скольконибудь удовлетворительных результатов. В качестве примера на рис. 1в приведен результат фильтрации зашумленного изображения, показанного на рис. 1а, посредством фильтра Винера.

Сопоставляя изображение на рис. 1в с исходным не зашумленным изображением, приведенным на рис. 2а, видим, что изображение после его фильтрации с применением фильтра Винера по-прежнему содержит заметный остаточный уровень шума, структура которого стала более крупной, и, кроме того, световые границы на профильтрованном изображении стали заметно размытыми. Немного лучше оказывается результат фильтрации с использованием фильтра Бакуса–Гильберта.

Однако если при фильтрации зашумленного изображения использовать описанный выше метод, основанный на представлении изображения в виде композиции контурных, градиентных и фактурных компонентов, и по отдельности фильтровать контурные компоненты, градиентные компоненты и регенерировать описанным выше способом фактурные компоненты, можно получить неплохие результаты [8]. При этом фильтрация должна выполняться в описанной далее последовательности.

Вначале на изображении должны быть найдены контурные, градиентные и фактурные компоненты.

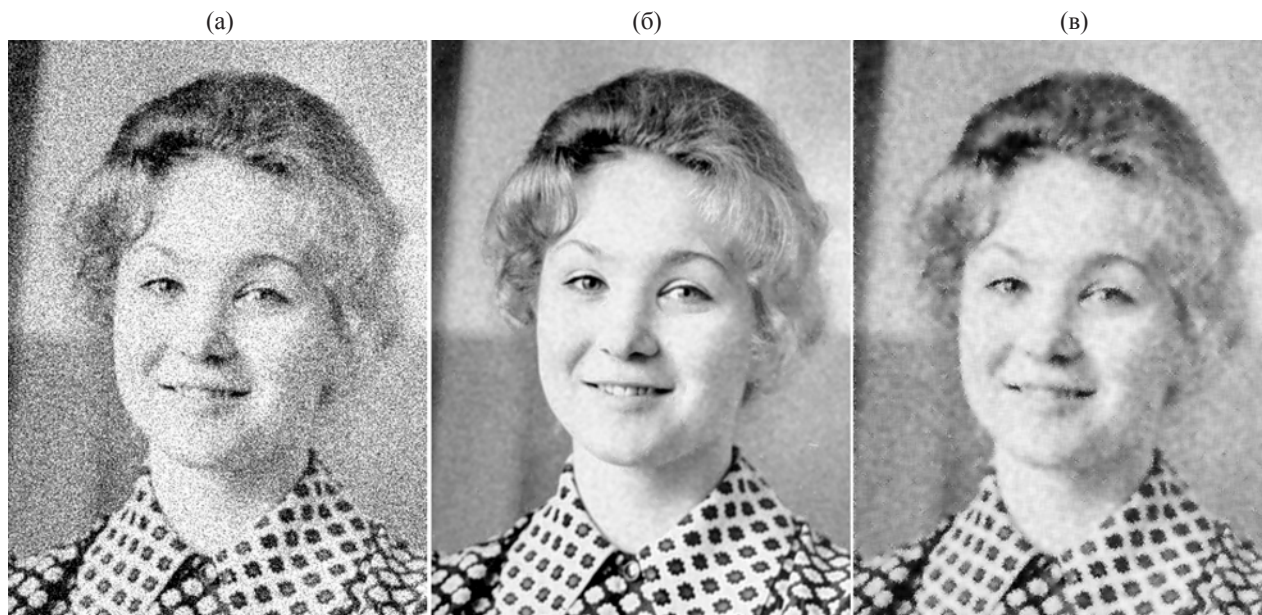


Рис. 1. Иллюстрация фильтрации зашумленного изображения. а – зашумленное изображение, б – изображение, полученное в результате фильтрации зашумленного изображения описанным методом; в – результат фильтрации зашумленного изображения с применением фильтра Винера.

При этом необходимо экспериментально определить, какие самые малые перепады яркости следует учитывать при выделении контуров во время обработки изображений. После этого необходимо выполнить анизотропную фильтрацию контурных компонентов в целях ослабления шума, при этом импульсная функция фильтра должна представлять собой узкое окно, ориентированное все время вдоль контура [4]. Форма окна на участках изгиба контура должна адаптироваться к форме контура и тоже изгибаться. Затем выполняется фильтрация градиентных компонентов. При этом посредством низкочастотной фильтрации сглаживаются флуктуации яркости на гладких участках изображения. На заключительном этапе обрабатываются фактурные компоненты изображения. Для этого из зашумленного изображения выделяют фактурные компоненты путем вычитания из него градиентных компонентов в областях, занятых градиентными компонентами. Естественно, что выделенные таким образом фактурные компоненты также искажены шумом. Обозначим спектральные интенсивности зашумленных фактурных компонентов через $S_n(\omega_x, \omega_y)$, где ω_x и ω_y – круговые пространственные частоты, n – номер фактурного компонента. Зная спектральную интенсивность шума, наложенного на изображение, которую обозначим $S_N(\omega_x, \omega_y)$, легко найдем спектральную интенсивность n -го незашумленного фактурного компонента как

$$S_{Fn}(\omega_x, \omega_y) = S_n(\omega_x, \omega_y) - S_N(\omega_x, \omega_y).$$

Так как зрительная система при идентификации фактур реагирует на них как на шумовой рисунок, не

различая конкретных реализаций, и слабо чувствительна к плотности вероятности первого порядка, то такой способ определения характеристик фактур в целях их последующей регенерации в дальнейшем не приводит к заметным для зрителя искажениям.

Для иллюстрации работы описанного метода фильтрации зашумленных изображений был выполнен следующий эксперимент. Было взято изображение портрета, показанного на рис. 2а, и на него был наложен квазибелый гауссов шум. При этом отношение перепада сигнала от черного до белого к среднеквадратическому значению шума составляло 5. На рис. 1а показано это изображение с наложенным на него шумом. Далее была проведена описанная выше обработка. Параметры обработки были следующими:

- при фильтрации контурных компонентов использовалась протяженная импульсная функция размером 1×5 пиксела. При этом к контурным компонентам относились компоненты, образуемые перепадами интенсивности в 16 и более квантовых уровней;
- при фильтрации градиентных компонентов применялась прямоугольная импульсная характеристика размером 3×3 пиксела, при этом фильтрация осуществлялась последовательно два раза;
- фактурный компонент был получен описанным выше способом.

На рис. 1б показано изображение, полученное в результате фильтрации зашумленного изображения описанным методом. Сопоставление рис. 1б и 1в показывает, что при использовании описанной ме-



Рис. 2. Иллюстрация коррекции размытого изображения. а – исходное неискаженное изображение, б – размытая версия изображения, в – результат коррекции размытого изображения

тодики имеет место сильное ослабление гауссова шума, но при этом резкость границ на изображении сохраняется, в то время как использование винеровской фильтрации (рис. 1в) при сравнительно небольшом ослаблении шума приводит к заметному размытию границ. Кроме того, при винеровской фильтрации структура остаточного шума становится более крупной вследствие того, что в его спектре ослабляются высокочастотные компоненты, что, как известно, увеличивает при прочих равных условиях его заметность.

Коррекция размытых границ изображений.

При коррекции размытых изображений с использованием описанного выше метода вначале на изображении находятся контурные, градиентные и фактурные компоненты, которые заменяются их регенерированными версиями. При этом такие детали, как тонкие линии, представляются двумя контурными компонентами, имеющими скачки интенсивности противоположного характера с обеих сторон линий и дополнительные граничные компоненты на концах линий. Для правильной регенерации величины скачков интенсивности на контурных компонентах (особенно на тонких линиях) необходимо располагать информацией о степени размытости изображения (об импульсной характеристике эквивалентного размывающего фильтра), которая обычно легко определяется. При выделении контурных компонентов необходимо также опытным путем определить пороговые значения скачков интенсивности, при превышении которых пиксел следует считать принадлежащим контурному компоненту. Не останавливаясь подробно на алгоритме коррекции размытых границ изображений, который очевиден, отметим, что такой подход к коррекции в ряде случаев реализован в коммерческих приложениях. Хорошей иллюстрацией этому может служить приложение **PhotoZoom Pro 2.1.4**, предназначенное для изменения размера изображений. Но это приложение можно также использовать и для коррекции размытых границ изображения без его увеличения, что демонстрируется рис. 2. В данном случае при выделении контурного компонента использовался S-Spline XL. Априорное знание резкости и гладкости контурных компонентов, о котором было сказано выше, используется также при увеличении изображений. При проведении эксперимента, результаты которого показаны на рис. 2, исходное изображение (рис. 2а) предварительно было размыто фильтром, импульсная характеристика которого

имела вид
$$h_1(k, n) = k_0 \exp \left[-\frac{k^2 + n^2}{2^2} \right],$$
 где k и n – со-

ответственно расстояние между строками и столбцами в изображении, а k_0 – нормирующий множитель.

Заключение

Таким образом, описанный подход к реставрации изображений можно кратко сформулировать следующим образом. Вначале выполняется анализ корректируемого изображения, в результате которого на изображении обнаруживаются границы, участки градиентного изменения интенсивности, фактуры, и, если имеется шум, то оценивается его спектральная интенсивность. Затем обнаруженные границы заменяются их резкими версиями, градиентные области, поврежденные шумом, заменяются их профильтрованными версиями и, наконец, на них наносится сгенерированная фактура.

Представление изображений в виде композиции контурных, градиентных и фактурных компонентов может быть также эффективно использовано в целях их сжатия, поскольку оно позволяет представлять ряд данных с меньшей точностью без заметного снижения качества их воспроизведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sziklai G. Some studies in the speed of visual perception // Trans. IRE Inform. Theory. 1956. IT-2. P. 125–135.
2. Глезер В.Д., Цуккерман И.И., Цыкунова Т.М. О пропускной способности зрения // Техника кино и телевидения. 1961. № 3. С. 27–32.
3. Цуккерман И.И. Цифровое кодирование телевизионных изображений. М.: Радио и связь, 1981. 239 с.
4. Kunt M., Ikonomopoulos A., Kocher M. Second-Generation Image-Coding Techniques // Proc. IEEE. 1985. V. 73. № 4. P. 549–574.
5. Прэтт У.К., Фожра О.Д., Гагалович А. Применение моделей стохастических текстур для обработки изображений // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 5. С. 54–64.
6. Красильников Н.Н., Мироненко Е.П., Красильникова О.И. Коэффициент эффективности зрительной системы человека при произвольных ракурсах наблюдения трехмерных объектов // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 10. С. 63–68.
7. Красильников Н.Н., Мироненко Е.П. Исследование погрешностей восприятия формы при наблюдении 3D-объектов // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 5. С. 18–23.
8. Ce Liu, Richard Szeliski, Sing Bing Kang, C. Lawrence Zitnick, William T. Freeman. Automatic Estimation and Removal of Noise from a Single Image / IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006. October. P. 1–34.