

Обработка и совмещение каналов изображения

Антон Конушин, Александр Сергеев, Влад Шахуро.

Мягкий дедлайн: 7 октября (6:00).

Жёсткий дедлайн: 14 октября (6:00).

1 Обзор задания

Первым цветным фотографом России является Михаил Сергеевич Прокудин-Горский, сделавший единственный цветной портрет Льва Толстого. Каждый его снимок представляет из себя три чёрно-белых фотопластины, соответствующие красному, зелёному и синему цветовым каналам. Сейчас коллекция его снимков находится в американской библиотеке конгресса, сканкопии фотопластинок доступны в интернете.

В данном задании мы предлагаем вам создать программу, которая будет совмещать изображения, полученные с фотопластинок Прокудина-Горского и, таким образом, познакомиться с базовыми операциями обработки изображений. Реализация базовой части программы выполняется в несколько этапов:

1. Загрузка и разделение изображения на цветовые каналы.
2. Удаление рамок плёнки.
3. Поиск наилучшего сдвига для совмещения каналов.
4. Постобработка: визуальное улучшение совмещённого изображения.

Возможны улучшения базового алгоритма. Они описаны после базовой части.

2 Базовая часть задания

За базовую часть задания можно получить **15** баллов, однако эта часть должна быть написана полностью. Получение баллов за бонусную часть невозможно, если базовая часть не написана полностью.

2.1 Загрузка и разделение изображения на цветовые каналы

Входное изображение представляют из себя три пластинки, соответствующие (сверху вниз) каналам B, G и R. На данном этапе нужно загрузить изображение из файла и разделить его на три канала, по трети высоты изображения на один канал.

2.2 Удаление рамок пленки

Можно заметить, что во многих изображениях в каналах со всех четырёх краев есть обрамление плёнки. Это обрамление может существенно ухудшить качество совмещения каналов. На данном этапе нужно реализовать детектор границ Canny, а затем с его помощью найти рамки плёнки и кадрировать изображение по этим границам.

Описание алгоритма работы детектора Canny:

1. *Сглаживание изображения.* Для уменьшения влияния шума изображение сглаживается с помощью фильтра Гаусса радиуса 5 и $\sigma = 1.4$. Поскольку изображение может быть довольно большого размера, для ускорения алгоритма кроме обычной фильтрации Гаусса нужно реализовать сепарабельную фильтрацию. Тестироваться будут оба вида фильтрации (см. параграф про аргументы командной строки). Обратите внимание, что сумма элементов в ядре фильтра Гаусса должна равняться 1 (т.е. ядро перед свёрткой нужно нормализовать).
2. *Вычисление градиентов.* Для сглаженного изображения I вычисляются производные по x и y — I_x и I_y . Это делается путём свертки I с ядрами Собеля K_x и K_y соответственно:

$$K_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad K_y = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Затем вычисляется модуль градиента по формуле

$$|G| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2},$$

и направление градиента по формуле

$$\theta(x, y) = \text{atan2}(I_y, I_x),$$

где atan2 — знаковый арктангенс, принимающий значения от $-\pi$ до π (эта функция есть в стандартной библиотеке).

3. *Подавление немаксимумов.* Для каждого пикселя выберем двух соседей (соседями считаются 8 пикселей вокруг данного пикселя): на первого показывает градиент (это можно определить по θ , будем считать, что на каждый соседний пиксель приходится по $\frac{\pi}{4}$ радиан и верхнему соседу соответствует ориентация на $(-\frac{\pi}{8}; \frac{\pi}{8})$ радиан, 0 — направление строго вверх), на второго показывает вектор, противоположный градиенту. Если модуль градиента текущего пикселя больше модулей градиентов соседей, то он остаётся без изменений. В противном случае модуль градиента пикселя подавляется (обнуляется).
4. *Отсечение по двум порогам.* На данном этапе производится сравнение модулей градиента с двумя заранее заданными числами (порогами), первое число меньше второго. Градиенты, меньшие по модулю первого порога, считаются незначительными и подавляются (обнуляются); градиенты, большие по модулю второго порога, считаются сильными, соответствующие им пиксели считаются границами и сохраняются в финальной карте границ; остальные градиенты считаются слабыми, вопрос включения соответствующих им пикселей в карту границ решается на следующем шаге алгоритма.
5. *Отслеживание границ по гистерезису.* Пиксель w со слабым градиентом объявляется границей и включается в финальную карту границ только в том случае, когда он лежит в одной связной компоненте с некоторым пикселем s , имеющим сильный градиент. Другими словами, w и s должны соединяться некоторой цепочкой пикселей-соседей со слабыми градиентами.

Предлагается придумать и реализовать *однопроходный* алгоритм (т.е. такой алгоритм, который обходит каждый пиксель карты градиентов по одному разу), выделяющий связные компоненты и решающий, какие пиксели со слабыми градиентами будут включаться в финальную карту границ.

Рассмотрим теперь поиск строк и столбцов пикселей, по которым будет обрезаться рамка изображения.

В случае верхней границы будем искать строку в некоторой близости от верхнего края изображения (например, 5% от его высоты).

Для каждой такой строки посчитаем количество принадлежащих ей пикселей границ, полученных с помощью детектора Canny. Среди этих чисел выберем два максимума. Этим максимумам будут соответствовать две строки. Из них выберем строку, наиболее удалённую от верхнего края изображения. Это делается потому, что в рамке изображения есть два перехода: от светлой подложки сканера к темной незасвеченной пленке, а потом уже к самому изображению. По выбранной строке и нужно обрезать изображение.

Для того, чтобы оба максимума не нашлись в непосредственной близости друг от друга (края пленки не соответствуют строго строкам изображения), необходимо реализовать подавление немаксимумов в некоторой окрестности: после обнаружения первой строки-максимума соседние к ней строки обнуляются, и после этого ищется второй максимум.

2.3 Поиск наилучшего сдвига для совмещения каналов

На этом этапе происходит совмещение каналов. Для того, чтобы совместить два изображения, будем сдвигать одно изображение относительно другого в некоторых пределах, например, от -15 до 15 пикселей. Далее, для перекрывающихся областей изображений посчитаем некоторую метрику. Оптимальным будет тот сдвиг, при котором метрика принимает наибольшее/наименьшее значение (в зависимости от метрики). Предлагается реализовать две метрики и выбрать ту, которая позволяет получить более качественный результат при совмещении:

1. Среднеквадратичное отклонение для изображений I_1 и I_2 :

$$MSE(I_1, I_2) = \frac{1}{width \cdot height} \sum_{x,y} (I_1(x, y) - I_2(x, y))^2,$$

где $width, height$ — ширина и высота изображений соответственно. Для нахождения оптимального сдвига нужно взять минимум по всем сдвигам.

2. Кросс-корреляция для изображений I_1 и I_2 :

$$I_1 \star I_2 = \sum_{x,y} I_1(x, y) I_2(x, y).$$

Для нахождения оптимального сдвига нужно взять максимум по всем сдвигам.

Совмещение больших изображений при таком подходе будет проходить очень медленно. Для ускорения совмещения предлагается реализовать пирамиду изображений. В пирамиде изображений исходное изображение последовательно уменьшается в k раз, например $k = 1.5$ или $k = 2$, до некоторого минимального размера (например, чтобы меньшая сторона была не меньше 400 пикселей в длину). Поиск оптимального сдвига начинается с самого маленького изображения, а затем на пути к исходному изображению уточняется на уменьшенных копиях изображения. Таким образом, оригинальное изображение совмещается не в диапазоне $-15 \dots 15$ пикселей, а в меньшем, уточненном с помощью уменьшенных копий изображения.

Для составления пирамиды необходимо реализовать функцию изменения размера изображения. Для вычисления промежуточных значений при масштабировании изображения нужно использовать билинейную интерполяцию.

2.4 Постпроцессинг: визуальное улучшение совмещенного изображения

На данном этапе к совмещенному изображению можно применить различные преобразования, который могут визуально улучшить изображение. Нужно реализовать три преобразования.

Серый мир Преобразование уравнивает средние яркости каналов R , G и B . Сначала подсчитываются средние яркости каналов S_R, S_G, S_B , затем каждый пиксель каналов R , G , B домножается на число

$$\frac{S}{S_R}, \frac{S}{S_G}, \frac{S}{S_B}$$

соответственно. Здесь $S = \frac{S_R + S_G + S_B}{3}$.

Повышение резкости Преобразование повышает резкость изображения. Достаточно применить ядро повышения резкости к изображению:

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{6} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{2}{3} & 4\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{6} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{6} \end{pmatrix}.$$

Автоконтраст Преобразование состоит в линейном растяжении яркости изображения. Для начала считается яркость изображения Y по формуле

$$Y = 0.2125 \cdot R + 0.7154 \cdot G + 0.0721 \cdot B.$$

Затем вычисляются параметры линейного растяжения Y и к каждому из каналов R , G и B применяется линейное растяжение с вычисленными параметрами. Искомое линейное растяжение канала Y должно быть устойчивым (т.е. при подсчёте параметров для линейного растяжения заданная доля пикселей в начале и в конце гистограммы должна не учитываться).

3 Бонусная часть задания

При желании, вы можете выбрать и реализовать любые пункты из бонусной части, однако получить можно максимум **5** баллов.

3.1 Бикубическая интерполяция (1 балл)

При масштабировании изображения должна быть возможность использовать бикубическую интерполяцию.

3.2 Обработка региона интереса (1 балл)

Совмещение каналов должно происходить так, чтобы поиск наилучшего соответствия происходил в заданной прямоугольной области изображений (т.е. метрики должны вычисляться на пересечении этих заданных областей). Область одна для всех трёх каналов и задаётся в координатах изображения *до обрезки* рамки, координаты области не выходят за границы красного канала. Если после обрезки изображения область выходит за границы изображения, программа должна сообщать об этом и заканчиваться с ошибкой. Каналы по-прежнему совмещаются целиком; предобработка и коррекция контрастности применяются также ко всему изображению, а не к региону интереса.

3.3 Поиск смещения с субпиксельной точностью (1 балл)

Поиск сдвига с субпиксельной точностью означает, что каждому пикселю соответствует k субпикселей (например, $k = 2$) и поиск сдвига

проводится с точностью до субпикселя. На практике достаточно увеличить масштабировать изображение в k раз и произвести обычный поиск сдвига, а затем совмещенное изображение уменьшить обратно в k раз.

3.4 Зеркальное дополнение изображения при фильтрации (2 балла)

В каркасе фильтруются только те пиксели, окрестности которых не выходят за границу изображения. Предлагается реализовать дополнение изображения по принципу зеркалирования. Баллы будут даваться только тем решениям, которые выполняют дополнение изображения до прохода фильтром по изображению.

3.5 Выравнивание баланса белого (3 балла)

Добавьте в этап постпроцессинга алгоритм выравнивания баланса белого, описанный в параграфе 4 статьи Chikane, Fuh: Automatic White Balance for Digital Still Cameras.

3.6 Медианная фильтрация и быстрая медианная фильтрация (3 балла)

Медианная фильтрация полезна для экспериментов с удалением импульсного шума. В данном задании нужно её реализовать. Это можно сделать тремя способами:

1. Обычная медианная фильтрация за $O(r^2)$ времени, где r — радиус окрестности, по которой берётся медиана. Фильтрация выполняется путём сортировки окрестности заданного радиуса каждого пикселя и выбора медианы в качестве нового значения пикселя.
2. Быстрая медианная фильтрация за $O(r)$ времени.
3. Быстрая медианная фильтрация за $O(1)$ времени.

Две последних фильтрации подробно и понятно описаны в статье Perreault et al: Median Filtering in Constant Time. Прочитайте статью и разберитесь в алгоритмах. Достаточно посмотреть описание линейного алгоритма в конце параграфа I и константного алгоритма, ему посвящен параграф II (мы не описываем его тут, разобраться — это часть задания).

За реализацию алгоритмов 1 и 2 или алгоритмов 1 и 3 можно получить **2** балла. За реализацию трёх алгоритмов можно получить **3** балла. За реализованный только пункт 1 баллы не даются. Обращаем ваше внимание на то, что реализации алгоритмов должны удовлетворять указанным сложностям, будет проводиться проверка корректности и скорости алгоритмов.

4 Среда программирования и устройство каркаса

Для упрощения выполнения задания под Windows вам предлагают файл `cygwin.exe`. Это самораспаковывающийся архив, в нём находится `cygwin` — среда программирования с `gcc`. Разархивируйте `cygwin.exe` и запустите сценарий `Cygwin.bat`. Откроется консоль и вы окажетесь в папке `/home/<username>`. Скопируйте в эту папку архив `align_project.tar.gz` с каркасом задания и разархивируйте командой `tar xvf align_project.tar.gz`; Разархивируйте в эту папку `align_project.exe` и зайдите в папку проекта, введя в консоли команду `cd align_project`. Запустите сценарий компиляции командой `make all`. В папке `build/bin` появятся исполняемые файлы. Их можно запустить из консоли командой `./build/bin/<имя файла>`. Удалить все скомпилированные файлы можно командой `make clean`.

Если вы используете Linux, то вам будет достаточно поставить `gcc` и GNU `make`.

- `src` — директория с исходным кодом в формате `.cpp`. Здесь особенно интересен файл `matrix_example.cpp`, в котором показан пример свертки с фильтром, суммирующим окрестность пикселя.
- `include` — директория с заголовочными файлами. Здесь интересны файлы `matrix.h` — объявление класса матрицы и `matrix.hpp` — шаблонная реализация этого класса.
- `externals` — директория с исходными кодами библиотек. Здесь же библиотеки компилируются. В каркасе есть только одна библиотека, с помощью которой загружаются изображения в формате BMP.
- `bridge` — директория, в которую добавляются заголовочные файлы и скомпилированные библиотеки для импорта в основной проект.

- `build/bin` — директория, в которой сохраняются выполняемые файлы компиляции (т.е. после того, как отработала команда `make all`).

Для проверки заданий используется компьютер с Core i7, 24Gb RAM с Gentoo Linux. Программы компилируются с помощью gcc версии не ниже 4.7. Этот компилятор выбран для кроссплатформенности (мы хотим, чтобы пользователи Windows и Linux имели равные права при выполнении данного задания).

Вы можете выполнить задание в Visual Studio, но при попытке в проверяющую систему ваш проект должен иметь сценарий компиляций на языке GNU make, а также без ошибок собираться с помощью gcc.

Ваша программа не должна выполнять никаких сетевых взаимодействий, в противном случае она будет дисквалифицирована без права пересдачи. Использовать параллелизм в рамках базового задания не рекомендуется — программа будет запускаться с выделением одного логического процессора. Это необходимо для того, чтобы мы могли сравнивать производительность ваших программ с точки зрения эффективности реализованных алгоритмов. Тем не менее, вы можете использовать SIMD-инструкции процессора в том случае, если программа проверяет наличие используемых инструкций во время выполнения. В противном случае решение будет возвращено на доработку.

5 Аргументы командной строки

В карке прописаны все необходимые опции программы, которые будут использоваться при автоматической проверке. Кроме полного алгоритма будет проверяться корректность операций, которые используются на различных этапах алгоритма (опции `--gaussian`, `--sobel-x` и т.п.). При решении заданий бонусной части вам надо будет добавить следующие опции:

`--bicubic-interp` после опции `--align`, которая будет включать бикубическую интерполяцию;
`--region-of-interest <pinrow> <pincol> <row_count> <col_count>` после опции `--align`, которая будет включать совмещение по региону интереса (формат опций такой же как и в функции `Matrix::submatrix`);
`--subpixel <k>` после опции `--align`, которая будет включать

субпиксельное совмещение изображений;

`--white-balance` в двух вариантах: после опции `--align` и отдельно для обработки обычных трехканальных изображений;
`--median <radius>`, `--median-linear <radius>`, `--median-const <radius>` — опции для сглаживания изображения медианным фильтром (используются только для обработки изображения).

6 Сдача и проверка заданий

Для сдачи задания выполните команду `make clean` в папке проекта, перейдите в папку выше командой `cd ..` и заархивируйте папку с проектом командой `tar cvzf solution.tar.gz align_project`. Полученный архив `solution.tar.gz` нужно послать в проверяющую систему. Исполняемые программы или скомпилированные библиотеки прикладывать в архив не нужно, сборка будет производиться на нашей стороне.

Определены два срока сдачи: мягкий дедлайн, после которого начинается начисление штрафных баллов (за первые двое суток по **-0.5** баллов, далее по **-1** баллу за сутки), и жесткий дедлайн, после которого сданные программы проверяться не будут. Такие сроки сдачи нужны для того, чтобы мы могли оперативно проверить ваши программы. Проверка проходит в два этапа:

1. Автоматизированный прогон вашей программы на тестах. Занимает от 1 дня до недели.
2. Личное собеседование по коду вашей программы и обсуждение реализованных алгоритмов. Время и аудитория, в которой будут проходить собеседования, будут сообщены отдельно.

Все задания проверяются только на нашем компьютере. Мы *не* будем смотреть выполненное задание на вашем ноутбуке.

Если на первом этапе программа не проходит тесты или обнаруживается, что базовая часть задания написана не полностью, то программа отправляется на доработку с начислением штрафных баллов. Максимальный срок доработки — неделя, начисляется по **-1** баллу за сутки. Если на каком-либо из этапов обнаруживается факт списывания или покупки задания, то данное задание аннулируется без права пересдачи и итоговая оценка за курс штрафует **-5** баллами (в случае списывания штрафуются все вовлеченные в списывание работы).