

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ СВЕРТКИ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ И ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРАХ

Болашенко В.С., студент гр.250502

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Перцев Д.Ю. – канд. техн. наук

Аннотация. В данной работе проводится сравнение эффективности операций свертки изображения на центральном процессоре и на графическом процессоре с использованием технологии NVidia CUDA. Рассматриваются операторы Собеля и Превитта, фильтр Гаусса. Выполняется расчет сложности алгоритмов свертки на тестовой выборке изображений и анализ результатов.

Ключевые слова. Свертка изображения, ядро свертки, оператор Собеля, оператор Превитта, фильтр Гаусса, сепарирование, центральный процессор, графический процессор.

Свертка – это математическая операция, которая применяется для преобразования данных с помощью ядра (ядро свертки, маска свертки, фильтр свертки). Применительно к изображению формула свертки записывается следующим образом [1]:

$$(f * g)(x, y) = \sum_m \sum_n f(x - m, y - n) \cdot g(m, n), \quad (2)$$

где f – исходное изображение;

g – ядро свертки размером $M \times N$;

(x, y) – координаты пикселя изображения.

Примерами операций свертки изображения являются операторы Собеля и Превитта для выделения границ объектов (при этом используется два фиксированных ортогональных ядра размерностью 3×3) и фильтр Гаусса для размытия изображения.

Ядра Превитта имеют следующий вид:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Классическим вариантов оператора Собеля являются следующие ядра:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Данные маски по отдельности позволяют выделить края по определенным осям. Результирующее значение пикселя находится по следующей формуле [2]:

$$M(x, y) = |g_x| + |g_y|, \quad (6)$$

где $M(x, y)$ – значение пикселя в точке (x, y) ;

g_x – результат применения ядра G_x к пикселю (x, y) ;

g_y – результат применения ядра G_y к пикселю (x, y) .

Фильтр Гаусса имеют матрицу произвольного нечетного размера $M \times M$ и рассчитывается по следующей формуле:

$$G_{\sigma} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

где σ – вещественная константа, определяющая ширину колокола;

x, y – координаты матрицы относительно ее середины.

Расчет сложность операторов Собеля и Превитта:

$$O(f * g) = O(H \cdot W \cdot M \cdot M) = O(H \cdot W \cdot 3 \cdot 3) = O(9 \cdot H \cdot W), \quad (8)$$

где H, W – размеры изображения;

M – размер ядра свертки.

Расчет сложности фильтра Гаусса:

$$O(f * g) = O(H \cdot W \cdot M \cdot M) = O(M^2 \cdot H \cdot W), \quad (9)$$

где H, W – размеры изображения;

M – размер ядра свертки фильтра Гаусса.

Для ускорения вычисления свертки изображения можно использовать сепарабельность. Сепарабельность свертки означает, что двумерное ядро можно представить как произведение двух одномерных ядер [3]. В результате сепарирования двумерная свертка (1) может выполняться как две последовательные свертки:

$$(f * g)(x, y) = \sum_m \sum_n f(x - m, y - n) \cdot g(m, n) = \sum_m g_x \cdot \sum_n g_y \cdot f(x - m, y - n). \quad (10)$$

Двумерное ядро свертки $G(m, n)$ размером $M \times N$ является сепарабельным, если его можно выразить как:

$$G(m, n) = G_x(m) \cdot G_y(n), \quad (11)$$

где $G_x(m)$ – одномерный фильтр для горизонтальной оси;

$G_y(n)$ – одномерный фильтр для вертикальной оси.

Ядро оператора Собеля (4) можно разложить как:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Ядро оператора Превитта (2) раскладывается следующим образом:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Функция Гаусса (7) раскладывается следующим образом:

$$G_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-y^2}{2\sigma^2}}. \quad (14)$$

Расчет сложности сепарированных операторов Собеля и Превитта имеет вид:

$$\begin{aligned} O(f * g) &= O(H \cdot W \cdot M + H \cdot W \cdot M + H \cdot W) = \\ O(2 \cdot H \cdot W \cdot M + H \cdot W) &= O(2 \cdot H \cdot W \cdot 3 + H \cdot W) = \\ O(6 \cdot H \cdot W + H \cdot W) &= O(7 \cdot H \cdot W), \end{aligned} \quad (15)$$

где H, W – размеры изображения;

M – размер ядра свертки, для операторов Собеля и Превитта он равен трем.

Эффективность применения сепарированных операторов:

$$\frac{9 \cdot H \cdot W}{7 \cdot H \cdot W} = \frac{9}{7} = 1,28. \quad (16)$$

Расчет сложности сепарированного фильтра Гаусса:

$$O(f * g) = O(H \cdot W \cdot M + H \cdot W \cdot M) = O(2 \cdot M \cdot H \cdot W). \quad (17)$$

где H, W – размеры изображения;

M – размер ядра свертки фильтра Гаусса.

Эффективность применение сепарированного фильтра:

$$\frac{M^2 \cdot H \cdot W}{2 \cdot M \cdot H \cdot W} = \frac{M}{2}. \quad (18)$$

В таблице 1 приведен расчет эффективности для некоторых фильтров Гаусса. При этом видно, что с увеличением ядра свертки эффективность сепарирования ядра возрастает.

Таблица 1 – Расчет эффективности сепарированного фильтра Гаусса

Размер фильтра	Эффективность
3	1,5
5	2,5
7	3,5
9	4,5

В таблице 2 представлены характеристики ЭВМ, на которой проводились замеры времени обработки изображений.

Таблица 2 – Характеристики ЭВМ

Центральный процессор	AMD Ryzen 7 3750H
Размер оперативной памяти, ГБ	16
Графический процессор	NVIDIA GeForce GTX 1650

Анализ эффективности выполнялся с использованием восьми изображений с различными размерами, замеры для каждого изображения выполнялись пять раз и бралось среднее значение. Для фильтра Гаусса размер матрицы свертки равен девяти.

На рисунке 1 представлен график оценки эффективности вычислений на графическом процессоре (ГП) над центральным процессором (ЦП) в зависимости от количества пикселей изображения. Эффективность рассчитана как отношение времени выполнения на ГП к времени на ЦП.

На рисунке 2 представлен график эффективности сепарированного ядра над стандартным. Эффективность рассчитана как отношение времени выполнения свертки с сепарированным ядром к времени выполнения свертки со стандартным ядром.

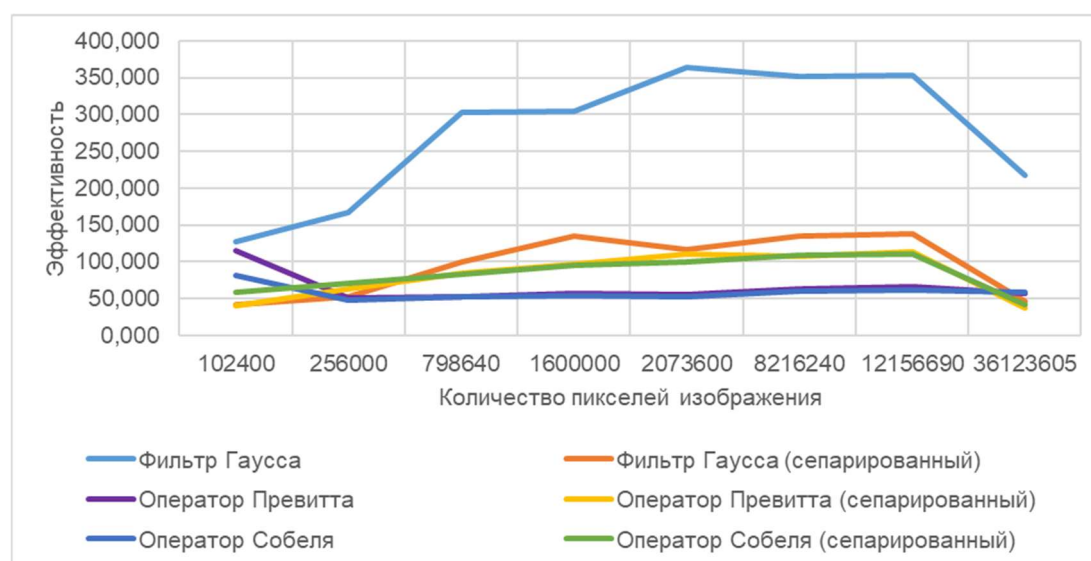


Рисунок 1 – Эффективность графического процессора над центральным процессором

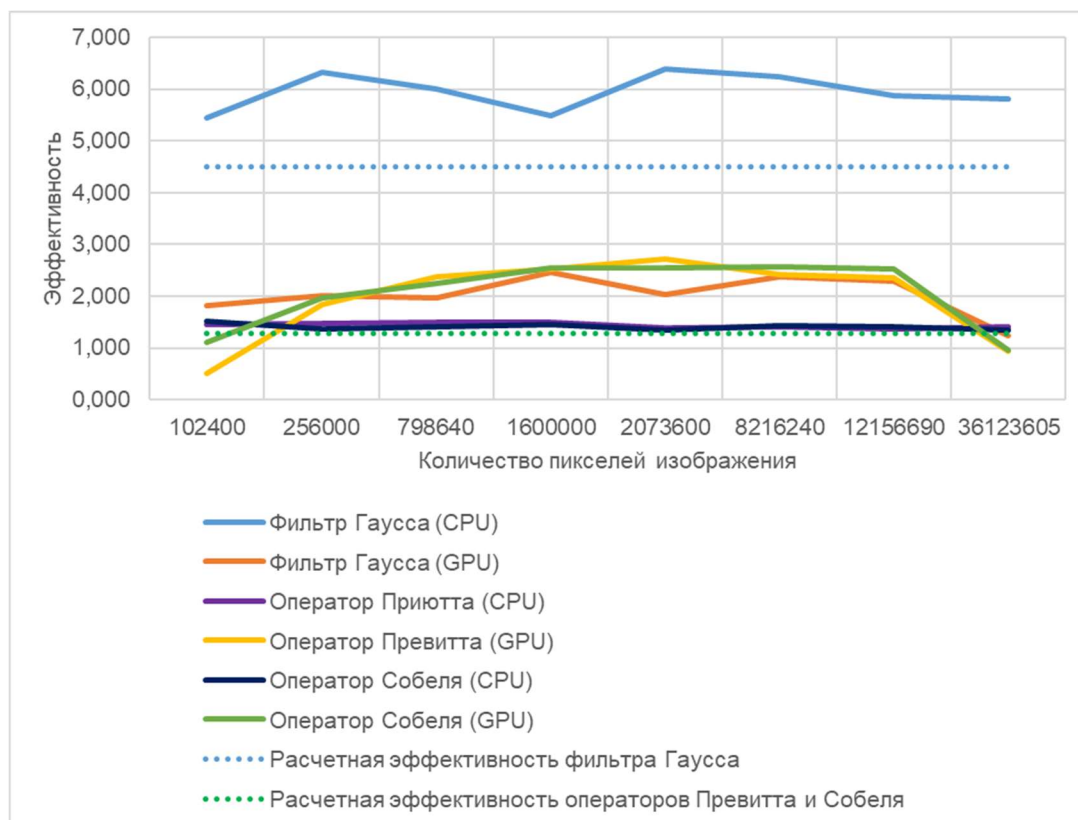


Рисунок 2 – Эффективность свертки с сепарированным ядром над стандартной сверткой

Как показано на рисунке 1, вычисления на графическом процессоре намного эффективнее (в 50-350 раз), чем вычисления на центральном процессоре. Можно наблюдать, что использование сепарированного ядра свертки на маленьком и большом изображениях менее эффективно, чем стандартное ядро. Для маленького изображения это связано с накладными расходами на запуск ядер и неоптимальным выбором блоков потоков. Для большого изображения можно выделить следующие причины: ограничение пропускной способности памяти ГП и усложнение вычислений.

На рисунке 2 видно, что эффективность сепарированных ядер Собеля и Превитта на ЦП примерно совпадает с рассчитанным ранее значением по формуле (16). На ГП эффективность операторов оказалась выше рассчитанной на всех изображениях, кроме маленького и большого. Это связано с неоптимальным выбором блока потоков для маленького изображения и ограничением пропускной способности памяти.

Сепарированный фильтр Гаусса на центральном процессоре в реальных условиях оказался эффективнее, чем было рассчитано ранее по формуле (18), чему способствовало кэширование, которое предоставляет быстрый доступ к данным. Сепарированный фильтр Гаусса на графическом процессоре дает незначительный прирост скорости, однако на большом изображении эффективность снижается по той же причине, что и с операторами выделения краев.

Таким образом, можно сделать вывод, что перенос обработки изображения на графический процессор во много раз ускоряет процесс, что позволяет реализовать обработку потокового видео. Однако реализация вычислений на графическом процессоре является более сложной, чем на центральном процессоре, так как требует от разработчиков специализированных знаний и опыта. При реализации вычислений на ЦП сепарирование ядер свертки дает значительный прирост в скорости обработки изображения с применением свертки.

Список использованных источников:

1. Старовойтов, В.В. Получение и обработка изображений на ЭВМ : учеб.-метод. пособие / В.В. Старовойтов, Ю.И. Голуб. – Минск : БНТУ, 2018. – 204 с.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Изд. 3-е. – М. : Техносфера, 2012. – 1104 с.
3. Gonzalez, R.C. Digital image processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. – 4-th edition. – New York : Pearson, 2017 – 1019 p.

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF CONVOLUTION OPERATIONS ON CENTRAL AND GRAPHICS PROCESSORS

Balashenka V.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Pertsau D. Y. – PhD in Technical Science

Annotation. This paper compares the efficiency of image convolution operations on a CPU and on a GPU using NVidia CUDA technology. Sobel and Prewitt operators and Gaussian filter are considered. The complexity of convolution algorithms is calculated on a test sample of images and the results are analyzed.

Keywords. Image convolution, convolution kernel, Sobel operator, Prewitt operator, Gaussian filter, separation, CPU, GPU.