

Rodzin Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: srodzin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Software Engineering; professor.

Bozhenyuk Alexander Vitalyevich – e-mail: avb002@yandex.ru; the Department of Information and Analytical Security System; professor.

Nuzhnov Evgeny Vladimirovich – e-mail: evnuzhnov@sfedu.ru; the Department of Computer-Aided Design Systems; professor.

УДК 004.932.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-158-168

К.О. Север, К.Н. Алексеев, И.И. Турулин

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛИМОГО ДВУМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА НА ПЛИС

В современных системах видеонаблюдения, в которых широко распространено использование технологий компьютерного зрения, наиболее важной информацией на изображении являются данные о контурах объектов и выделение мелких деталей. К системам предъявляются жесткие требования, такие как: высокая скорость обработки информации с большого количества камер одновременно, работа в условиях плохого освещения объекта и под воздействием внешних шумов (электромагнитных полей, коротких помех от высоковольтных линий передач). Поэтому совершенствование методов обработки изображения с применением устройств распараллеливания вычислений и построения многопоточной системы является актуальной задачей. В данной работе для обработки изображения на ПЛИС разработан и смоделирован анизотропный фильтр высоких частот 3×3 . Описан алгоритм его построения в виде разделимого векторного представления. Дано подробное описание о разработке эффективного разделимого двумерного цифрового фильтра для повышения резкости и выделение границ объектов RGB-изображений. Фильтр основан на синтезе предложенного анизотропного фильтра высоких частот 3×3 и градиентного фильтра Собеля. Спроектирована соответствующая структурная схема фильтра. По результатам обработки искаженного изображения можно сделать вывод о том, что разработанный фильтр обладает свойством более равномерной детализации и выделения объектов на изображении и менее подвержен гауссовскому шуму по сравнению с градиентным фильтром Собеля и фильтром высоких частот Лапласа. Разработана схема конвейера фильтра на ПЛИС для обработки одной плоскости RGB изображения. За счет использования разделимых фильтров предложенная реализация практически в 2 раза оптимальнее по числу выполняемых операций сложения/вычитания, чем прямая реализация градиентного фильтра Собеля 3×3 и анизотропного фильтра высоких частот 3×3 .

Обработка изображений; двумерные цифровые фильтры; фильтр высоких частот; фильтр Собеля; ПЛИС; резкость.

K.O. Sever, K.N. Alekseev, I.I. Turulin

IMPLEMENTATION OF AN EFFICIENT SEPARABLE VECTOR DIGITAL FILTER ON FPGA

In modern video surveillance systems, in which the use of computer vision technology is widespread, the most important information in the image is data on the contours of objects and the highlighting of small details. The systems are subject to stringent requirements, such as: high speed of processing information from a large number of cameras simultaneously, operation in conditions of poor lighting of the object and under the influence of external noise (electromagnetic fields, short interference from high-voltage transmission lines). Therefore, improving image processing methods using parallel computing devices and building a multi-threaded system is an urgent task. In this work, a 3×3 anisotropic high-pass filter is designed and simulated for image processing on an FPGA. An algorithm for its construction in the form of a separable vector representation is described. A detailed description is given of the development of an effective separable two-dimensional digital filter for sharpening and highlighting the boundaries of objects in RGB images. The filter is based on the synthesis of the proposed 3×3 anisotropic high-pass filter and the Sobel gradient filter. The corresponding block diagram of the filter has been designed. Based on the results of processing the distorted image, we can conclude that the developed filter has the property of more uniform detailing and high-

lighting of objects in the image and is less susceptible to Gaussian noise compared to the Sobel gradient filter and the Laplace high-pass filter. A filter pipeline circuit has been developed on an FPGA for processing one plane of an RGB image. Due to the use of separable filters, the proposed implementation is almost 2 times more optimal in terms of the number of addition/subtraction operations performed than the direct implementation of a 3x3 Sobel gradient filter and a 3x3 anisotropic high-pass filter.

Image processing; two-dimensional digital filters; high pass filter; Sobel filter; FPGA; sharpness.

Введение. В системах видеонаблюдения видеоизображение играет ключевую роль в передаче информации. Одной из актуальных и требующих больших вычислительных ресурсов задач является извлечение данных из видеоизображения с использованием технологии компьютерного зрения в условиях плохого освещения объекта или воздействия внешних шумов и других факторов [1].

Применение системы компьютерного зрения в различных областях [2, 3], таких, как промышленность, робототехника, авионика и интеллектуальные видеосистемы для безопасности города, позволяет решать ряд задач, например:

- ◆ автоматическая проверка детали или конечного продукта на наличие дефектов для контроля качества;
- ◆ осуществление слежения за ношением средств индивидуальной защиты работниками на опасных производствах;
- ◆ обеспечение автономной навигации без вмешательства человека для различных видов транспортных средств – воздушных, наземных и подводных;
- ◆ помощь оператору при управлении в условиях плохой видимости;
- ◆ выделение границ транспортных объектов на изображениях, включая номерные знаки для обнаружения, распознавания и отслеживания объектов в реальном времени [4].

Также примером применения технологии компьютерного зрения являются телевизионные системы наблюдения (ТВСН) [5]. ТВСН используются для контроля и оценки ситуации в зонах, опасных для присутствия человека (например, реакторный зал атомной электростанции) [6] или для охраны объектов (в любых условиях). Такие системы обеспечивают надежный мониторинг вне зависимости от погоды, освещенности, времени суток и других помех и могут работать на расстоянии до 25–30 км.

Для всех вышеописанных систем, которые определяют объекты на цифровых изображениях, наиболее важной информацией являются данные о контурах объектов [7] и выделение мелких деталей на изображении.

Одновременно с этим немаловажным является удовлетворение требований к высокой скорости обработки информации, а также малого размера, веса и энергопотребления устройства. Так как в ТВСН используется обработка данных с большого количества камер одновременно [8], применение ПЛИС для распараллеливания вычислений и построения многопоточной системы является наилучшим решением.

ПЛИС – это программируемая логическая интегральная схема, специальный класс устройств, которые позволяют разработчику проектировать вычислительное устройство под любой алгоритм, учитывая его особенности. Такая архитектура обеспечивает лучшее решение задачи за счет распараллеливания вычислений [9]. Гибкость ПЛИС позволяет разработчику создать многопоточную систему обработки информации, что делает ПЛИС оптимальным выбором для задач обработки изображений [10, 11].

В данной работе предлагаются:

- ◆ анизотропный фильтр высоких частот 3x3 для эффективной реализации на ПЛИС;
- ◆ разделимый двумерный цифровой фильтр (РДЦФ) для построения на ПЛИС, повышающий резкость и выделяющий границы объектов. Алгоритм данного фильтра построен на синтезе предложенного анизотропного фильтра высоких частот 3x3 и градиентного фильтра Собеля (рис. 1);
- ◆ эффективная (в части вычислительной сложности) реализация разработанного РДЦФ на ПЛИС.

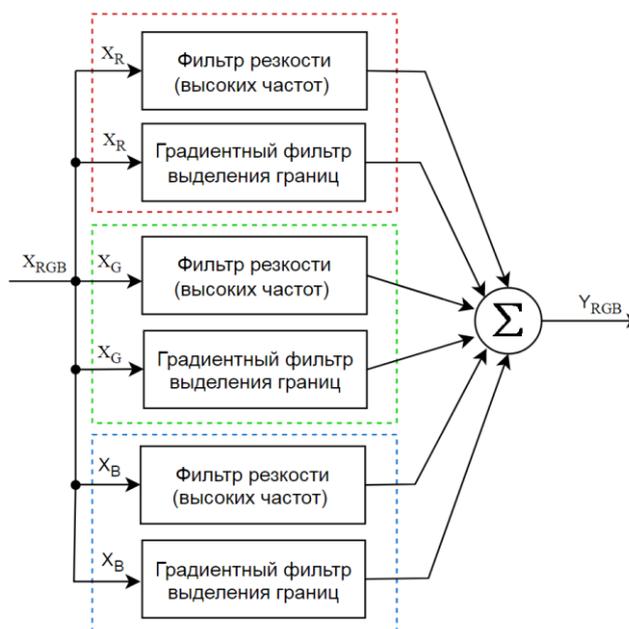


Рис. 1. Структурная схема РДЦФ для повышения резкости и выделения границ объектов при обработке RGB-изображений

Цель работы: повышение резкости и выделение границ объектов при обработке RGB-изображений.

Задачи работы:

1. Для исходного RGB-изображения необходимо смоделировать фильтр размытия, матрица которого заполняется по нормальному (гауссовому) закону.
2. Разработать и смоделировать анизотропный фильтр высоких частот 3×3 и произвести обработку размытого изображения.
3. Смоделировать градиентный фильтр Собеля и произвести обработку размытого изображения.
4. Разработать и смоделировать разделимый двумерный цифровой фильтр (РДЦФ) и произвести обработку размытого изображения.
5. Для оценки качества фильтрации – сравнить градиентный фильтр Собеля, разработанный анизотропный фильтр высоких частот 3×3 и разработанный РДЦФ.
6. Разработать эффективную реализацию созданного РДЦФ на ПЛИС.

Градиентный фильтр выделения границ. Одной из ключевых задач цифровой обработки изображений является определение объектов, а именно – выделение их контура. Контур на цифровых изображениях – это границы объектов или линий, на которых происходит резкий перепад яркости изображения. Они представляют собой набор точек, где яркость изображения резко меняется.

Переход изображения с полным обзором к изображениям контуров основных объектов значительно упрощает процесс обработки данных, так как сильно сокращается объем обрабатываемой информации [12].

Один из методов выделения контуров на изображении – это вычисление градиента изображения с использованием различных матриц свертки, за которым следует сравнение значений градиента в каждой точке изображения с определенным порогом. Эти методы основаны на свойстве разрывности сигнала яркости. Они выделяют резкие изменения на изображении, при этом сглаженные изменения подавляются. Такие методы выделения пикселей изображения называют детекторами краев [13].

Оптимальным способом обнаружения разрывов является обработка изображения с использованием скользящей маски (пространственная фильтрация).

Градиентный фильтр выделения границ относится к первой производной дискретной функции. В обработке изображений первые производные реализуются через модуль градиента. Для функции $f(x, y)$ градиент f в точке (x, y) определяется как двумерный вектор-столбец [14]:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \approx |G_x| + |G_y| \quad (1)$$

В качестве масок для определения составляющих градиента используются операторы Робертса, Превитта, Собеля и Щарра с размером 3x3 (рис. 2). Основное требование к каждой маске градиентного фильтра заключается в том, чтобы сумма ее коэффициентов была всегда равна нулю. Это гарантирует нулевой отклик операторов первой производной на областях изображения с фиксированным уровнем яркости.

0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	+1
0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	+1
0	0	+1	0	+1	0	+1	+1	+1	-1	0	+1
а						б					
-1	-2	-1	-1	0	+1	-3	-10	-3	-3	0	+3
0	0	0	-2	0	+2	0	0	0	-10	0	+10
+1	+2	+1	-1	0	+1	+3	+10	+3	-3	0	+3
в						г					

Рис. 2. Горизонтальные и вертикальные операторы: а – Робертса; б – Превитта; в – Собеля; г – Щарра [15]

Для определения дискретного приближения уравнения (1) представим маску фильтрации 3x3 как область изображения с коэффициентами $z_1 \dots z_9$ (рис. 3).

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

Рис. 3. Область изображения размером 3x3 элемента

Тогда реализация градиентного оператора Собеля (рис. 2,в) описывается следующим выражением:

$$\nabla f \approx |z_7 + 2z_8 + z_9| - |z_1 + 2z_2 + z_3| + |z_3 + 2z_6 + z_9| - |z_1 + 2z_4 + z_7| \quad (2)$$

Но если разделить горизонтальные и вертикальные операторы 3×3 (рис. 1,в) на отдельные вертикальные (1×3) и горизонтальные (3×1) векторы (рис. 4), то это позволит сократить количество операций умножения при реализации фильтра на ПЛИС, заменив их на арифметические операций сложения/вычитания [16].

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline +1 & +2 & +1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline -1 \\ \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

а

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & +1 \\ \hline -2 & 0 & +2 \\ \hline -1 & 0 & +1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

б

Рис. 4. Реализация разделимого фильтра Собеля для оператора: а – горизонтального; б – вертикального

После анализа работы всех представленных операторов (рис. 2) сделан вывод, что наилучшим градиентным фильтром для реализации на ПЛИС является оператор Собеля, так как он обладает следующими преимуществами:

- ♦ весовые коэффициенты со значением 2 данного фильтра позволяют подчеркнуть более детально контуры объектов;
- ♦ операция свертки кратна степени числа 2, что позволяет заменить операцию умножения на побитовый сдвиг влево;
- ♦ возможность разделения оператора 3×3 (рис. 2,в) на отдельные вертикальные (1×3) и горизонтальные (3×1) векторы (рис. 5).

Фильтр резкости (высоких частот). Основная задача улучшения резкости заключается в выделении мелких деталей на изображении и улучшении тех, что могли быть размыты (расфокусированы) по причине ошибок или недостатков самого процесса регистрации данных [17].

Расфокусирование изображения происходит за счет потери деталей и резкости из-за смещения значений пикселей вблизи друг от друга, усреднения значений пикселей по окрестности или при размытии (по нормальному гауссовому закону). Для увеличения резкости изображения можно использовать методы обратной обработки – применение операций пространственного дифференцирования [18].

Пространственное дифференцирование изображения позволяет увеличить контраст и четкость границ объектов, так как оператор дифференцирования выделяет перепады яркости в изображении. Однако такие фильтры также могут увеличить шумы на изображении, поскольку даже незначительные изменения яркости в пикселях будут усилены.

Эффективность оператора дифференцирования в точке изображения зависит от степени различия значений пикселей в данной точке. Чем больше различие в значениях, тем сильнее будет отклик оператора дифференцирования. Именно поэтому дифференцирование изображения может как улучшить резкость границ объектов, так и усилить шумы, присутствующие на изображении [19–21].

Фильтры резкости (высоких частот) относятся к операторам второй производной. Определяются они как разность соседних значений первой производной. Простейшим оператором, основанным на данных производных, является оператор Лапласа – двумерный лапласиан, дискретное представление которого имеет следующий вид:

$$\nabla^2 f = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y) \quad (3)$$

Маска фильтра дискретного представления двумерного лапласиана представлена на рис. 5.

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Рис. 5. Область изображения размером 3×3 элемента

Одним из преимуществ двумерного лапласиана является то, что он представляет собой изотропный фильтр, отклик которого не зависит от направления неоднородностей на изображении [22]. Также он обладает свойством инвариантности к повороту изображения, что означает, что при повороте изображения и последующем применении фильтра результат будет точно таким же, как и после применения фильтра до поворота.

Но реализовать векторное разделение изотропного фильтра невозможно, поэтому разработан и предложен анизотропный фильтр высоких частот 3х3, представленный на рис. 6.

-1	-2	-1
+2	+4	+2
-1	-2	-1

а

-1	+2	-1
-2	+4	-2
-1	+2	-1

б

Рис. 6. Оператор фильтра высоких частот 3х3: а – вертикальный, б – горизонтальный

Для создания многопоточной обработки изображения в ПЛИС и уменьшения числа операций умножения, вертикальное и горизонтальное ядро фильтра высоких частот 3х3 разделяются на отдельные вертикальные (1х3) и горизонтальные (3х1) векторы.

-1	-2	-1
+2	+4	+2
-1	-2	-1

а

1
-2
1

x

-1	-2	-1
----	----	----

-1	+2	-1
-2	+4	-2
-1	+2	-1

б

1
2
1

x

-1	2	-1
----	---	----

Рис. 7. Реализация разделимого анизотропного фильтра высоких частот 3х3 для оператора: а – горизонтального; б – вертикального

Моделирование и оценка качества фильтрации. Для моделирования фильтра размытия и последующей фильтрации используем исходное изображения «Автоматриаль».

Двумерный фильтр размытия, матрица которого заполняется по нормальному (гауссовскому) закону [23], выражается формулой:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где x – расстояние от центра по горизонтальной оси;

y – расстояние от центра по вертикальной оси;

σ – среднеквадратичное отклонение распределения Гаусса.

Исходное изображение «Автомостраль» обрабатываем фильтром размытия с величиной среднеквадратичного отклонения распределения $\sigma=1$. Размытое изображение (рис. 8,а) обрабатываем тремя различными фильтрами: анизотропным фильтром высоких частот 3×3 , градиентным оператором Собеля и РВЦФ. Результаты фильтраций искаженного изображения «Автомостраль» представлены на рис. 8.

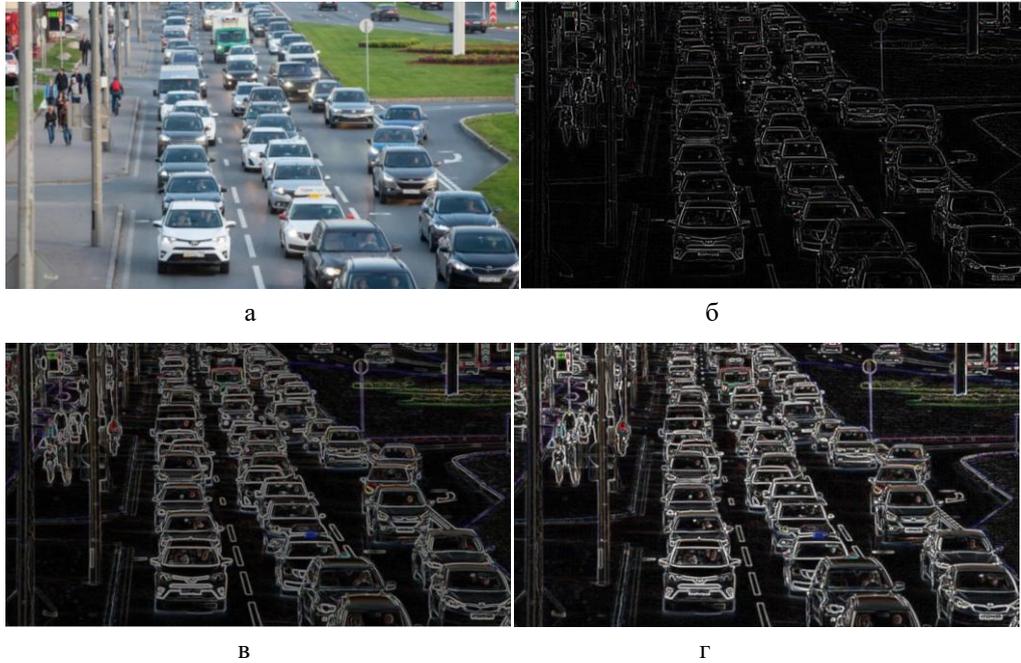


Рис. 8. Изображение: а – с фильтром размытия $\sigma = 1$; б – обработанное анизотропным фильтром высоких частот 3×3 ; в – обработанное градиентным оператором Собеля; г – обработанное РВЦФ

Реализация РДЦФ на ПЛИС. Алгоритм РДЦФ построен на синтезе предложенного векторного разделимого анизотропного фильтра высоких частот (рис. 7) и векторного разделимого фильтра Собеля (рис. 4).

Наиболее оптимальной при реализации на ПЛИС является конвейерная схема, позволяющая обрабатывать данные последовательно в темпе их поступления. Схема конвейера РДЦФ для одного канала представлена на рис. 9.

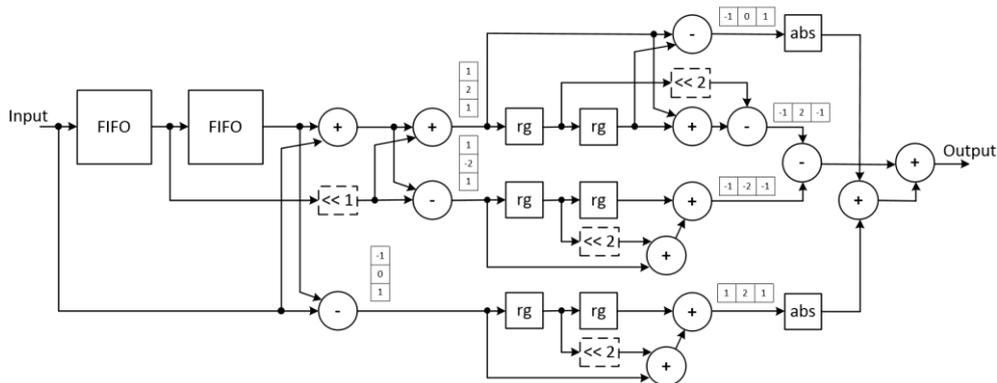


Рис. 9. Схема конвейера РДЦФ для одной плоскости RGB изображения

Число каналов данных является критическим ресурсом при реализации параллельных вычислений на ПЛИС, поэтому было принято решение выполнять буферизацию двух строк в блоках FIFO (First In, First Out – первым пришел – первым ушел), использующих внутреннюю память ПЛИС, что позволит имитировать поступление данных в виде плавающего окна размера 3×1 [24]. В таком режиме используется всего два канала данных: один входной и один выходной.

Предполагается, что изображение поступает на вход схемы *Input* последовательно, пиксель за пикселем.

Для сокращения аппаратных затрат было оптимизировано число операций умножения (по минимуму): так, умножение на 2 было заменено на операцию логического сдвига влево на 1 бит, а операция умножения на 4 – логический сдвиг влево на 2 бита. Также оптимизированы по минимуму одинаковые операции, выполняющие умножение одних и тех же исходных данных на одни и те же коэффициенты.

Блоки *rg* представляют собой регистры для синхронизации потоков данных. Операции возведения в квадрат и вычисления квадратного корня (1) являются вычислительно-трудоемкими и требуют сравнительно много аппаратного ресурса ПЛИС, поэтому вместо вычисления корня из суммы квадратов выполняется операция взятия модуля числа *abs* (только для фильтра Собеля) и суммирование результатов всех вычислений. Такой подход, хотя и обладает некоторой погрешностью вычислений [25], позволяет значительно уменьшить используемый аппаратный ресурс ПЛИС, за счет чего можно увеличить степень распараллеливания фильтра, а значит и результирующую производительность.

Схема была реализована в ПЛИС Xilinx Kintex UltraScale KU095 [26]. Ввиду относительной простоты конвейерной схемы была достигнута тактовая частота ее работы 500 МГц. Используемые аппаратные ресурсы ПЛИС при реализации схемы для одного и трех каналов приведены в табл. 1. Для ускорения фильтрации имеется возможность распараллелить схему по данным, причем производительность системы будет увеличиваться линейно.

Таблица 1

Используемые аппаратные ресурсы ПЛИС при реализации схемы

Использовано ресурсов	BRAM	LUT	FF
на 1 канал	2	146	226
на 3 канала	6	438	678

При прямой конвейерной реализации градиентного фильтра Собеля 3×3 число суммирований равно 11 для каждого канала входного изображения. Прямая конвейерная реализация анизотропного фильтра высоких частот 3×3 составляет 17 операций сложения. Итого, суммарно для прямой реализации РДЦФ требуется 28 операций сложения.

На конвейерную реализацию разделимого фильтра Собеля (1×3 и 3×1) необходимо 7 операций суммирования; анизотропного фильтра высоких частот 3×3 – 9 операций суммирования. Итого, для разделимой реализации РДЦФ требуется 17 операций сложения. Однако после оптимизации одинаковых сложений при параллельной обработке всех вертикальных компонент фильтра удалось оптимизировать РДЦФ до 14 операций сложения/вычитания. Таким образом, ввиду использования разделимых фильтров предложенная реализация практически в 2 раза оптимальнее по числу выполняемых операций сложения/вычитания.

Заключение. В результате в данной работе был разработан и смоделирован анизотропный фильтр высоких частот 3×3 . Описан алгоритм его построения в виде разделимого векторного представления.

Разработан и смоделирован разделимый двумерный цифровой фильтр (РДЦФ) для повышения резкости и выделения границ объектов. Разработанный фильтр детально подчеркивает объекты изображения и менее подвержен гауссовскому шуму по сравнению с градиентным фильтром Собеля и фильтром высоких частот Лапласа. Возможности фильтра продемонстрированы на примере тестового искаженного изображения «Автоматгистраль».

Разработана схема конвейера РДЦФ на ПЛИС. За счет использования разделимых фильтров (рис. 4 и 7) предложенная реализация практически в 2 раза оптимальнее по числу выполняемых операций сложения/вычитания, чем прямая реализация градиентного фильтра Собеля 3×3 и анизотропного фильтра высоких частот 3×3 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Краснящих А.В.* Обработка оптических изображений. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 129 с.
2. *Кудрявцев Н.Г., Фролов И.Н.* Практика применения компьютерного зрения и элементов машинного обучения в учебных проектах: учеб. пособие. – Горно-Алтайск: БиЦ ГАГУ, 2022. – 180 с.
3. *Bradski G., Kaehler A.* Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. – O'ReillyMedia, 2008. – 556 p.
4. *Дзюба В.Г., Дзюба А.В.* Алгоритм распознавания предупреждающих дорожных знаков // Электроника и связь. – 2009. – № 6. – С. 13-17.
5. *Алексеев С.А., Волхонский В.В., Суханов А.В.* Телевизионные системы наблюдения. Основы проектирования. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.
6. *Домьяновски В.* Библия видеонаблюдения. Цифровые и сетевые технологии. – 2-е изд. – М.: Ай-Эс-Пресс, 2006. – 480 с.
7. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
8. *Волхонский В. В.* Телевизионные системы наблюдения. – 2-е изд., доп. и перераб. – СПб.: Экополис и культура, 2005. – 168 с.
9. *Кистрин А.В., Костров Б.В., Никифоров М.Б., Устюков Д.И.* Проектирование цифровых устройств: учебник. – М.: Курс: ИНФРА-М, 2017. – 352 с.
10. *Chaithra.N.M., Reddy K.V.R.* Implementation of Canny Edge Detection Algorithm on FPGA and displaying Image through VGA Interface // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2013. – Vol. 2, Issue-6. – P. 243-247.
11. *Escobar F.A., Chang X., Valderrama C.* Suitability Analysis of FPGAs for Heterogeneous Platforms in HPC // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2016. – Vol. 27, No. 2. – P. 600-612.
12. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
13. *Старовойтов В.В., Голуб Ю.И.* Цифровые изображения: от получения до обработки. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – 202 с.
14. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
15. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
16. *Martin Králik, Libor Ladányi.* Canny edge detector algorithm optimization using 2d spatial separable convolution // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 36-43.
17. *Приоров А.Л., Апальков И.В., Хрящев В.В.* Цифровая обработка изображений: учеб. пособие. – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – 235 с.
18. *Яне Б.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
19. *Грузман И.С., Киричук В.С. и др.* Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
20. *Шапиро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
21. *Селянкин В.В., Скороход С.В.* Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 82 с.
22. *Мартыанова А.В.* Использование изотропных фильтров в обработке изображений // Информация: передача, обработка, восприятие. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 34-41.
23. *Шлезингер М.И.* Математические средства обработки изображений. – К.: Наукова думка, 1989. – 200 с.
24. *Donald G. Bailey.* Design for Embedded Image Processing on FPGAs. – John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011 – 482 p.
25. *Zhang Y.Y., Wang P.S.P.* A modified parallel thinning algorithm // Intern. Conf. on Pattern Recognition, Rome, Italy, 14–17 Nov. 1988. – Rome, 1988. – P. 1023-1025.
26. Архитектура UltraScale и техническое описание продукта: обзор. – Режим доступа: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds890-ultrascale-overview> (дата обращения: 15.05.2024).

REFERENCES

1. *Krasnyashchikh A.V.* Obrabotka opticheskikh izobrazheniy [Optical image processing]. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2012, 129 p.
2. *Kudryavtsev N.G., Frolov I.N.* Praktika primeneniya komp'yuternogo zreniya i elementov mashinnogo obucheniya v uchebnykh proektakh: ucheb. posobie [The practice of using computer vision and machine learning elements in educational projects: a tutorial]. Gorno-Altaysk : BITS GAGU, 2022, 180 p.
3. *Bradski G., Kaehler A.* Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'ReillyMedia, 2008, 556 p.
4. *Dzyuba V.G., Dzyuba A.V.* Algoritm raspoznavaniya preduprezhdayushchikh dorozhnykh znakov [Algorithm for recognizing warning road signs], *Elektronika i svyaz'* [Electronics and Communications], 2009, No. 6, pp. 13-17.
5. *Alekseev S.A., Volkhonskiy V.V., Sukhanov A.V.* Televizionnye sistemy nablyudeniya. Osnovy proektirovaniya [Television surveillance systems. Basics of design]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2015, 126 p.
6. *Dom'yanovski V.* Bibliya videonablyudeniya. Tsifrovye i setevye tekhnologii [The CCTV Bible. Digital and network technologies]. 2nd ed. Moscow: Ay-Es-Es-Press, 2006, 480 p.
7. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy: ucheb. posobie [Computer processing and image recognition: textbook]. Saint Petersburg SPbGU ITMO, 2008, 192 p.
8. *Volkhonskiy V.V.* Televizionnye sistemy nablyudeniya [Television surveillance systems]. 2nd ed. Saint Petersburg: Ekopolis i kul'tura, 2005, 168 p.
9. *Kistrin A.V., Kostrov B.V., Nikiforov M.B., Ustyukov D.I.* Proektirovanie tsifrovyykh ustroystv: uchebnyk [Design of digital devices: textbook]. Moscow: Kurs: INFRA-M, 2017, 352 p.
10. *Chaithra.N.M., Reddy K.V.R.* Implementation of Canny Edge Detection Algorithm on FPGA and displaying Image through VGA Interface, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2013, Vol. 2, Issue-6, pp. 243-247.
11. *Escobar F.A., Chang X., Valderrama C.* Suitability Analysis of FPGAs for Heterogeneous Platforms in HPC, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2016, Vol. 27, No. 2, pp. 600-612.
12. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy: ucheb. posobie [Computer processing and image recognition: textbook]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2008, 192 p.
13. *Starovoytov V.V., Golub Yu.I.* Tsifrovye izobrazheniya: ot polucheniya do obrabotki [Digital images: from acquisition to processing]. Minsk: OIPI NAN Belarusi, 2014, 202 p.
14. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy [Computer processing and image recognition]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2008, 192 p.
15. *Gonsales R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 1104 p.
16. *Martin Králik, Libor Ladányi.* Canny edge detector algorithm optimization using 2d spatial separable convolution, *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2021, Vol. 21, No. 4, pp. 36-43.
17. *Priorov A.L., Apal'kov I.V., Khryashchev V.V.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy: ucheb. posobie [Digital image processing: tutorial]. Yaroslavl': YarGU, 2007, 235 p.
18. *Yane B.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 584 p.
19. *Gruzman I.S., Kirichuk V.S. i dr.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie [Digital image processing in information systems: a tutorial]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 352 p.
20. *Shapiro L., Stokman Dzh.* Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006, 752 p.
21. *Selyankin V.V., Skorokhod S.V.* Analiz i obrabotka izobrazheniy v zadachakh komp'yuternogo zreniya: ucheb. posobie [Analysis and processing of images in computer vision tasks: a tutorial]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, 82 p.
22. *Mart'yanova A.V.* Ispol'zovanie izotropnykh fil'trov v obrabotke izobrazheniy [Using isotropic filters in image processing], *Informatsiya: peredacha, obrabotka, vospriyatie* [Information: transmission, processing, perception]. Ekaterinburg: UrFU, 2016, pp. 34-41.
23. *Shlezinger M.I.* Matematicheskie sredstva obrabotki izobrazheniy [Mathematical tools for image processing]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 200 p.
24. *Donald G. Bailey.* Design for Embedded Image Processing on FPGAs. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011, 482 p.
25. *Zhang Y.Y., Wang P.S.P.* A modified parallel thinning algorithm, *Intern. Conf. on Pattern Recognition, Rome, Italy, 14–17 Nov. 1988*. Rome, 1988, pp. 1023-1025.
26. Архитектура UltraScale i tekhnicheskoe opisanie produkta: obzor [UltraScale Architecture and Product Datasheet: Overview]. Available at: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds890-ultrascale-overview> (accessed 15 May 2024).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Север Константин Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: sever@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Алексеев Кирилл Николаевич – e-mail: kalekseev@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; к.т.н., доцент.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Sever Konstantin Olegovich – Southern Federal University; e-mail: sever@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; post-graduate student.

Alekseev Kirill Nikolaevich – e-mail: kalekseev@sfedu.ru; the Department of Computer Science; cand. of eng. sc.; associate professor.

Turulin Igor Ilyich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-168-176

В.А. Цыганков, О.А. Шабалина, А.В. Катаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗМЕРА ПОПУЛЯЦИИ НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Исследованы способы определения размера популяции в генетическом алгоритме и изучена зависимость между количеством особей и скоростью работы алгоритма. Описываются методы определения оптимального количества особей в популяции разными методами: в зависимости от размера хромосом, для древовидного типа хромосом, при наличии фактора зашумленности и по методу соседнего элемента с выставлением максимальной и минимальной границы. Данные, полученные по выполнению каждого метода, отличаются между собой, по причине этого произведена оценка с целью проверить точность теоретических данных, сравнив их с экспериментальными. Для проведения экспериментов была разработана программа на графической платформе «Unity» с возможностью изменения количества особей в популяции. После получения результатов было проведено сравнение экспериментальных данных с данными, полученными на основе методов определения размера популяции в генетическом алгоритме из первой части работы. Эксперимент показал, что оптимальный размер популяции лежит в диапазоне 100-160 особей. При уменьшении их количества время выполнения поставленной задачи начинает существенно увеличиваться, а при увеличении за расчетный предел – сокращение времени выполнения не соответствует затрачиваемым вычислительным ресурсам. Сами полученные экспериментальные данные имеют наименьшую погрешность с методом, используемым древовидное представление хромосом. Результаты исследования могут быть использованы для выбора размера популяции при обучении для достижения лучшего соотношения затрачиваемой вычислительной мощности к скорости обучения, а определенный в процессе работы метод может помочь в теоретических расчетах.

Генетический алгоритм; размер популяции; метод определения размера популяции; имитационная модель; хромосома; коэффициент зашумленности; оптимизация; объект с изменяемым поведением; неигровой персонаж; мутация.

V.A. Tsygankov, O.A. Shabalina, A.V. Kataev

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF POPULATION SIZE ON THE PERFORMANCE OF A GENETIC ALGORITHM

The paper investigates ways to determine the population size in a genetic algorithm and studies the relationship between the number of individuals and the speed of the algorithm. Methods for determining the optimal number of individuals in a population by different methods are described: depending on the size of the chromosomes, for a tree-like type of chromosomes, in the presence of a noise factor and by the method of a neighboring element with a maximum and minimum boundary. The data obtained by performing each method differ from each other, for this reason, an assessment was made in order to verify the accuracy of theoretical data by comparing them with experimental ones. To conduct experiments, a pro-