

Сравнение эффективности методов выделения контуров на изображениях дорожной поверхности в зависимости от размера и формата

А.А. Журавлев

Уральский федеральный университет

Аннотация: Оценка качества дорожного покрытия – одна из самых актуальных задач в мире. Для ее решения существует множество систем, которые в основном взаимодействуют с изображениями дорожного полотна. Они работают на основе как традиционных методов (не используется машинное обучение), так и на алгоритмах машинного обучения. Традиционные подходы, например, включают методы выделения контуров на изображениях, которые являются объектом данного исследования. Однако каждый из алгоритмов обладает определенными особенностями. Например, некоторые из них позволяют быстрее получить обработанную версию оригинальной фотографии. В качестве методов для анализа выбраны: «Алгоритм Кэнни», «Оператор Кирша», «Оператор Лапласа», «Алгоритм Марра-Хилдрета», «Оператор Прюитта» и «Оператор Собеля». Основным показателем эффективности в исследовании является среднее время получения обработанной фотографии. Исходный материал эксперимента - 10 различных изображений дорожного покрытия 5 размеров (1000x1000, 894x894, 775x775, 632x632, 447x447) в форматах bmp, jpg, png. В ходе исследования установлено, что «Оператор Кирша», «Оператор Лапласа» и «Оператор Прюитта» и «Оператор Собеля» имеют линейную зависимость $O(n)$, «Алгоритм Кэнни» и «Алгоритм Марра-Хилдрета» обладают квадратичным характером $O(n^2)$. Наилучшие результаты демонстрируют «Оператор Прюитта» и «Оператор Собеля».

Ключевые слова: сравнение, эффективность, метод, выделение контуров, изображение, фото, дорожная поверхность, зависимость, размер, формат.

Введение

Существует множество монографий [1, 2] и научных статей в различных журналах, посвященных оценке качества дорожного покрытия. Их можно разделить на две категории: использование алгоритмов машинного обучения [3] и применение традиционных методов [4]. Традиционные подходы включают методы выделения контуров на изображениях, которым и будет посвящено данное исследование. Одним из ключевых показателей любого метода является его производительность или скорость решения конкретной задачи, в нашем случае получение обработанного изображения. На этот показатель существенное влияние оказывает размер фотографии и,

возможно, ее формат. Чтобы однозначно утверждать, каким характером зависимости обладает определенный метод, необходим сравнительный анализ.

Цель работы – сравнение эффективности методов выделения контуров на изображениях в зависимости от размера и формата.

Материалом исследования являются фотографии 5 различных размеров и 3 форматов.

Научная новизна заключается в способе определения эффективности алгоритмов выделения контуров на изображениях.

В исследовании используется эмпирический метод, поскольку основными источниками результатов являются эксперимент и сравнение.

Задачи исследования:

1. Дать краткую информацию о выбранных для исследования методах.
2. Описать методологию эксперимента.
3. Продемонстрировать и описать полученные результаты.

Информация об анализируемых методах выделения контуров на изображениях

В качестве анализируемых методов выбраны: «Алгоритм Кэнни», «Оператор Кирша», «Оператор Лапласа» и «Алгоритм Марра-Хилдрета», «Оператор Прюитта», «Оператор Собеля». Информация о каждом из них представлена ниже.

Алгоритм Кэнни служит для обнаружения краев. Чтобы обнаружить широкий спектр краев на изображениях используется многоступенчатый подход. Для обработки применяются две следующие матрицы [5]:

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

Оператор Кирша используется для нахождения крайних точек с помощью 8 компас-направлений, представляющие матрицы [6]:

$$N = \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix} \quad NW = \begin{bmatrix} -3 & 5 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$$

$$SW = \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad SE = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} \quad NE = \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix}.$$

Оператор Лапласа выделяет области с быстрым изменением интенсивности, и поэтому часто используется для определения границ. Применяется Лапласиан, имеющий следующий вид [7]:

$$L = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Алгоритм Марра-Хилдрета используется для обнаружения краев в цифровых изображениях через их свертку с помощью Лапласиана функции Гаусса, представленного выше [8].

Оператор Прюитта служит для выделения границ изображений с помощью вычисления максимального отклика на множестве ядер свертки для нахождения локальной ориентации границы в каждом пикселе. Для обработки применяются следующие матрицы [9]:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Оператор Собеля используется для выделения границ на изображениях. Применяются такие же матрицы, как и в методе Кэнни [10].

Методология эксперимента

Экспериментальный компьютер имеет следующие параметры: оперативная память – 8 ГБ, канал оперативной памяти – одиночный, тип ОЗУ – DDR4, операционная система – Windows 10 Pro, тип системы – x64, процессор – Intel Core i5, частота процессора – 1,6 гигагерца. В качестве среды разработки выбрана Visual Studio 2022, язык программирования – C#. Для эксперимента используется центральный процессор.

Материал исследования - 10 фотографий 5 различных размеров (1000x1000, 894x894, 775x775, 632x632, 447x447) в форматах bmp, jpg и png. Размеры изображений подобраны таким образом, чтобы количество пикселей на изображении изменялось равномерно. Шаг изменения составляет 200000 пикселей. Если перевести размеры в пиксели, то получим: 1000000 (1000x1000), 800000 ($\approx 894 \times 894$), 600000 ($\approx 775 \times 775$), 400000 ($\approx 632 \times 632$), 200000 ($\approx 447 \times 447$).

Исследование по вычислению среднего времени получения обработанного изображения выбранными методами проводилось также в работе [4]. Однако в ней шаг изменения размера изображений неравномерный, что может немного исказить представление о характере функции зависимости. Также в этой работе проводится эксперимент только для одного формата (png), и не рассматривается метод «Оператор Лапласа». В текущем исследовании предлагается новый принцип определения эффективности методов, описанный в разделе «Обсуждение результатов».

Основные этапы эксперимента по определению среднего времени получения обработанной фотографии с помощью анализируемых методов:

1. Материалом исследования являются 10 изображений 5 различных размеров форматов bmp, jpg и png.

2. Для каждого алгоритма и формата фотографии проводится серия из 5 экспериментов, в ходе которых количество пикселей, содержащихся в

изображении, изменяется на 200000: 1000000, 800000, 600000, 400000, 200000. При этом исходные изображения для каждого эксперимента хранятся в отдельной компьютерной папке (всего 90 папок: 6 (методы) x 3 (форматы) x 5 (эксперименты)). Обработанные версии фотографий сохраняются в новую папку, которая расположена в том же месте, что и исходные изображения.

3. Среднее время получения обработанной фотографии находится как:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{общ}}}{N} \quad (1)$$

где $t_{\text{ср}}$ – среднее время получения обработанного изображения, $t_{\text{общ}}$ – общее время обработки всех фотографий, N – количество изображений (равно 10).

Результаты экспериментов

Пример исходного изображения и его обработанных версий с помощью каждого из выбранных методов выделения контуров представлен на рис. 1.

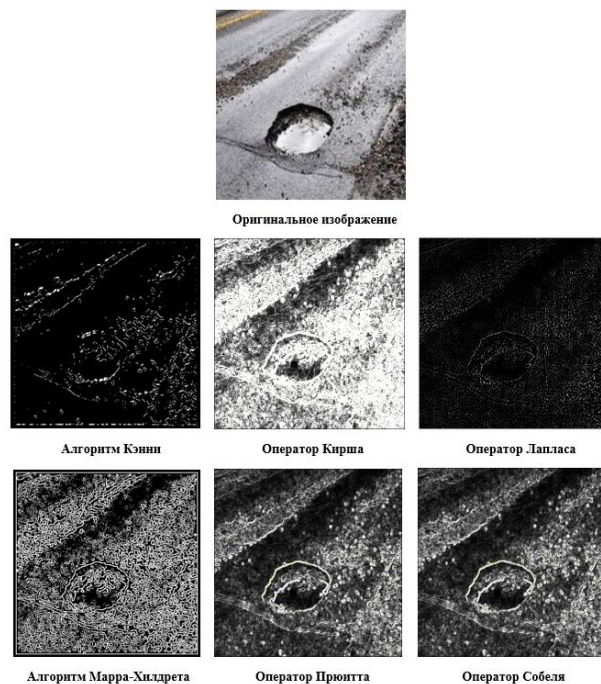


Рис. 1. – Исходное изображение и его обработанные версии

Результаты экспериментов по определению эффективности методов выделения контуров на изображениях с помощью предложенной методологии представлены в таблице 1.

Таблица № 1

Среднее время (в миллисекундах) получения обработанного изображения в зависимости от формата и размера в пикселях

PNG					
Метод	Размер изображения				
	200000	400000	600000	800000	1000000
Алгоритм Кэнни	550	1656	3944	6460	10348
Оператор Кирша	169	357	601	845	1066
Оператор Лапласа	63	137	223	304	394
Алгоритм Марра-Хилдрета	543	1533	3628	5844	9341
Оператор Прюитта	52	103	141	192	244
Оператор Собеля	52	101	149	190	245
JPG					
Метод	Размер изображения				
	200000	400000	600000	800000	1000000
Алгоритм Кэнни	578	1760	4037	6528	10565
Оператор Кирша	180	369	608	829	1052
Оператор Лапласа	64	144	234	318	414
Алгоритм Марра-Хилдрета	535	1590	3639	5878	9538
Оператор Прюитта	50	104	152	196	241
Оператор Собеля	49	103	148	195	248
BMP					
Метод	Размер изображения				
	200000	400000	600000	800000	1000000
Алгоритм Кэнни	600	1653	3820	6180	9932
Оператор Кирша	180	358	570	788	986
Оператор Лапласа	68	142	228	314	401
Алгоритм Марра-Хилдрета	578	1578	3617	5890	9577
Оператор Прюитта	48	106	147	202	250
Оператор Собеля	50	106	144	199	251

Для однозначного понимания характера зависимости конкретного метода выделения контуров от размера фотографии необходимо построить соответствующие графики для каждого формата (рис. 2).

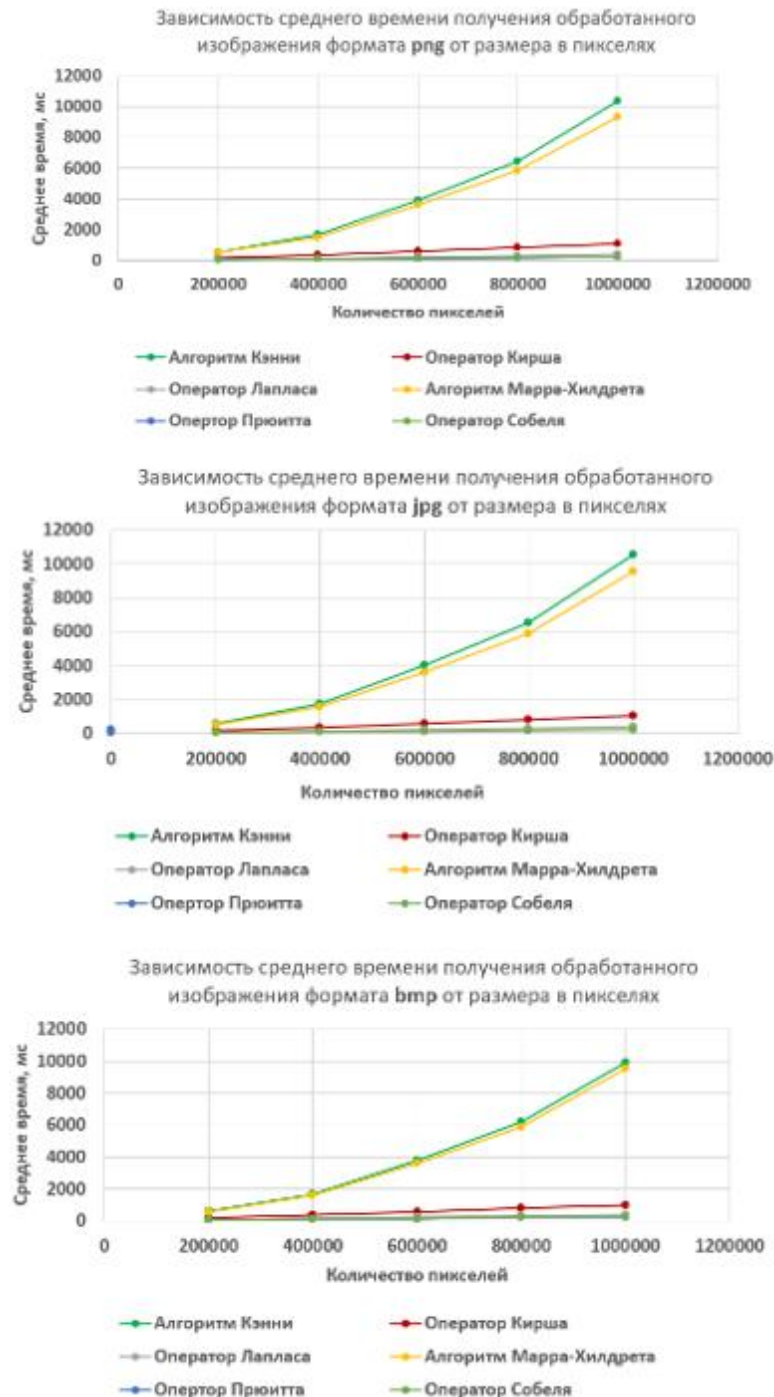


Рис. 2. – Графики зависимости среднего времени получения обработанного изображения форматов png, jpg, bmp от размера в пикселях

Обсуждение результатов

Как видно из графиков, «Оператор Кирша», «Оператор Лапласа», «Оператор Прюитта» и «Оператор Собеля» имеют линейную зависимость $O(n)$, «Алгоритм Кэнни» и «Алгоритм Марра-Хилдрета» обладают квадратичным характером $O(n^2)$ [11]. Для качественного представления полученных результатов в выбранной системе из 6 методов выделения контуров на изображениях рассчитаем их эффективность в зависимости от скорости нарастания функции для каждого из форматов таким образом, чтобы сумма эффективностей всех алгоритмов была равна 1 для каждого формата. Чтобы сумма равнялась 1, необходим коэффициент нормализации. Эффективность обратно пропорциональна скорости нарастания функции. Для вычисления эффективности нужны следующие формулы:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (2)$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость нарастания функции, Δx – разница максимального (x_{max}) и минимального (x_{min}) значения размера в пикселях, Δt – разница максимального (t_{max}) и минимального (t_{min}) абсолютного значения времени.

$$k_{\text{норм}} * \left(\sum_{i=1}^M \frac{1}{v_{\text{ср } i}} \right) = k_{\text{норм}} * \left(\sum_{i=1}^M \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} \right) = 1 \quad (3)$$

Выразим из формулы (3) коэффициент нормализации:

$$k_{\text{норм}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i}} \quad (4)$$

где $k_{\text{норм}}$ – коэффициент нормализации, $v_{\text{ср } i}$ – скорость нарастания функции определенного алгоритма, M – количество анализируемых методов выделения контуров (в нашем случае 6).

$$E = \frac{k_{\text{норм}}}{v_{\text{ср}}} = \frac{k_{\text{норм}} * \Delta x}{\Delta t} \quad (5)$$

где E – эффективность конкретного алгоритма.

$$E_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^F E_i}{F} \quad (6)$$

где $E_{\text{ср}}$ – средняя эффективность конкретного метода, E_i – эффективность алгоритма для определенного формата, F – количество форматов (равно 3).

Подставляя нужные значения в представленные формулы, получаем результаты, указанные в таблице 2 (значения округлены до 4 знаков после запятой).

Таблица № 2

Показатели эффективности выбранных методов выделения контуров на изображениях для форматов png, jpg и bmp

Формат	Методы выделения контуров					
	Алгоритм Кэнни	Оператор Кирша	Оператор Лапласа	Алгоритм Марра-Хилдрета	Оператор Прюитта	Оператор Собеля
PNG	0,0069	0,0756	0,2050	0,0077	0,3533	0,3515
JPG	0,0069	0,0792	0,1974	0,0077	0,3617	0,3471
BMP	0,0075	0,0862	0,2087	0,0077	0,3441	0,3458
Среднее значение	0,0071	0,08033	0,2037	0,0077	0,35303	0,34813

Наилучшими средними показателями эффективности обладают методы «Оператор Прюитта» (0,35303) и «Оператор Собеля» (0,34813).

Выводы

В ходе исследования проводилось сравнение эффективности методов выделения контуров на фотографиях дорожной поверхности в зависимости от размера и формата. Исходный материал – 10 изображений 5 различных размеров (1000x1000, 894x894, 775x775, 632x632, 447x447) в форматах bmp, jpg и png. Основной показатель эффективности - среднее время получения обработанной версии фотографии. В качестве методов для анализа выбраны: «Алгоритм Кэнни» «Оператор Кирша», «Оператор Лапласа», «Алгоритм

Марра-Хилдрета». «Оператор Кирша», «Оператор Лапласа», «Оператор Прюитта» и «Оператор Собеля» имеют линейную зависимость $O(n)$, «Алгоритм Кэнни» и «Алгоритм Марра-Хилдрета» обладают квадратичным характером $O(n^2)$. Наилучшие средние показатели эффективности имеют методы «Оператор Прюитта» (0,35303) и «Оператор Собеля» (0,34813).

Литература

1. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. - М.: ФИЗМАТКНИГА, 2010. - 672 с.
 2. Ерош И.Л., Сергеев М.Б., Соловьев Н.В. Обработка и распознавание изображений в системах превентивной безопасности: Учебное пособие - СПб. ГОУ ВПО СПбГУАП, 2012. - 154 с.
 3. Silva L.A., Leithardt V.R.Q., Batista V.F.L., González G.V., Santana J.F.D.P. Automated Road Damage Detection Using UAV Images and Deep Learning Techniques // IEEE Access. 2023, Vol. 11, pp. 62918–62931.
 4. Журавлев А.А. Сравнение эффективности классификации методов выделения контуров на примере изображений дорожного покрытия // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12, № 1, С. 23–28.
 5. Liang Justin. Canny Edge Detector. URL: justin-liang.com/tutorials/canny/
 6. Kirsch Compass Mask. URL: tutorialspoint.com/dip/kirsch_compass_mask.htm
 7. Fisher Robert, Perkins Simon, Walker Ashley, Wolfart Erik. Laplacian/Laplacian of Gaussian. URL: homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/log.htm
 8. Laplacian & Marr Hildreth Edge Detection. URL: southampton.ac.uk/~msn/book/new_demo/laplacian/
 9. Prewitt Operator. URL: tutorialspoint.com/dip/prewitt_operator.htm
 10. Sobel Operator. URL: tutorialspoint.com/dip/sobel_operator.htm
-

11. Analysis of Algorithms | Big-O analysis. URL: [geeksforgeeks.org/analysis-algorithms-big-o-analysis/](https://www.geeksforgeeks.org/analysis-algorithms-big-o-analysis/)

References

1. Vizil'ter Yu.V., Zheltov S.Yu., Bondarenko A.V., Ososkov M.B., Morzhin A.V. Obrabotka i analiz izobrazhenij v zadachax mashinnogo zreniya [Image processing and analysis in machine vision problems]. M.: FIZMATKNIGA, 2010. 672 p.
2. Erosh I.L., Sergeev M.B., Solovyov N.V. Obrabotka i raspoznavanie izobrazhenij v sistemah preventivnoj bezopasnosti: Uchebnoe posobie [Image Processing and Recognition in Preventive Security Sources: Tutorial]. GOU VPO SPbGUAP. 2012. 154 p.
3. Silva L.A., Leithardt V.R.Q., Batista V.F.L., González G.V., Santana J.F.D.P. IEEE Access. 2023, Vol. 11, pp. 62918–62931.
4. Zhuravlev A.A. XXI vek: itogi proshlogo i problemy` nastoyashhego plyus. 2023. Vol. 12, № 1, pp. 23-28.
5. Liang Justin. Canny Edge Detector. URL: justin-liang.com/tutorials/canny/
6. Kirsch Compass Mask. URL: tutorialspoint.com/dip/kirsch_compass_mask.htm
7. Fisher Robert, Perkins Simon, Walker Ashley, Wolfart Erik. Laplacian/Laplacian of Gaussian. URL: homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/log.htm
8. Laplacian & Marr Hildreth Edge Detection. URL: southampton.ac.uk/~msn/book/new_demo/laplacian/
9. Prewitt Operator. URL: tutorialspoint.com/dip/prewitt_operator.htm
10. Sobel Operator. URL: tutorialspoint.com/dip/sobel_operator.htm
11. Analysis of Algorithms | Big-O analysis. URL: [geeksforgeeks.org/analysis-algorithms-big-o-analysis/](https://www.geeksforgeeks.org/analysis-algorithms-big-o-analysis/)

Дата поступления: 10.04.2024 Дата публикации: 25.06.2024
