

И. Г. Казанцев^{1}*

Детектор V-образных угловых точек на двумерных изображениях

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: kig@ooi.sccc.ru

Аннотация. Рассматриваются масштабируемые маски выделения V-образных углов на двумерных изображениях, применяемые при обработке скользящим по изображению окном. Матрицы масштабируемых масок больших размеров конструируются простым добавлением периферийных обрамляющих элементов к меньшим маскам, оставляя подматрицы неизменными. Вычислен коэффициент усиления шума для масок Кирша, масштабируемых масок, V-масок и традиционных усредняющих окон.

Ключевые слова: обработка изображений, скользящее окно, детектор V-углов

I. G. Kazantsev^{1}*

V-corner detector in 2d images

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kig@ooi.sccc.ru

Abstract. We consider scalable masks of the detection of V-like corners in the two-dimensional images used for processing by a sliding window on the image. We construct the large-size matrices of masks by simply adding rows, columns and sides of smaller masks, leaving the submatrices unchanged. Noise amplification coefficient is calculated for Kirsch masks, scalable masks, V-masks, and traditional averaging windows.

Keywords: image processing, sliding window, V-corner detector

Введение

В работе рассматриваются новые маски выделения углов на двумерных массивах изображений для применения в традиционном методе скользящих фрагментов, или окон [1]. Вершины угловых структур, или угловые точки, являются важной локальной особенностью изображения и принадлежат к классу так называемых доминантных, или характерных, точек. Углы используются как опорные точки в работе со стереопарами, как признаки в распознавании лиц (например, уголки глаз), отпечатков пальцев и букв в текстах. Недавний обзор методов выделения угловых структур можно найти в статье [2]. Работы [3], [4], [5] следует упомянуть как одни из первых детекторов углов. Важные приложения включают также калибровку камер, отслеживание движущихся объектов в робототехнике и машинном зрении [6], поиск следов морских судов на аэрокосмических изображениях [7]. В настоящее время развивается методика восстановления изображений по данным, представленным интегралами по V-образным ломаным, по-

добно интегралам по прямым и параметрическим кривым в преобразованиях Радо и Хафа [8].

Разработанная ранее двумерная масштабируемая модель угла [9] обладает наглядным свойством порождения масок произвольных размеров. Данная работа распространяет свойство делимости масштабируемых масок на матрицы меньшего размера того же класса на случай углов в форме ломаной V . Для сравнительного анализа вычислены коэффициенты усиления шума [10] для масок Кирша, масштабируемых масок, новых V -масок и усредняющих масок.

Двумерные маски угловых структур

Известно множество дифференцирующих масок, или дискретных ядер двумерной свертки [1], [2]. Среди подобных схем конструирования масок выделяется маска Кирша [3], моделирующая ориентированные границы при анализе текстур и угловых структур в видеоданных (рис. 1).

$$K^1 = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}, K^2 = \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}, K^3 = \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix}, \dots, K^8$$

Рис. 1. Маски Кирша размера 3×3 для углов в 90 градусов

Обобщение масок Кирша на размерности, большие 3×3 , в каждом случае нового размера требуют пересчета элементов матрицы. Для генерации угловых дифференцирующих масштабируемых масок W_n размеров $(2n-1) \times (2n-1)$, мы вводим единообразную дискретную модель угла с явно определяемыми границами (элементы a) между телом угла (элементы c) и фоном (элементы d) (рис. 2).

$$W^{\pi/2} = \begin{bmatrix} d & d & a & c & c \\ d & d & a & c & c \\ d & d & 0 & a & a \\ d & d & d & d & d \\ d & d & d & d & d \end{bmatrix}, W^{\pi/4} = \begin{bmatrix} d & d & a & c & a \\ d & d & a & a & d \\ d & d & 0 & d & d \\ d & d & d & d & d \\ d & d & d & d & d \end{bmatrix}, W^{3\pi/4} = \begin{bmatrix} d & d & a & c & c \\ d & d & a & c & c \\ d & d & 0 & c & c \\ d & d & d & a & c \\ d & d & d & d & a \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Модели иерархических масок $W^{\pi/2}$, $W^{\pi/4}$ и $W^{3\pi/4}$ размера 5×5 для углов в 90 , 45 и 135 градусов, соответственно

Обозначим $|A_n|$, $|C_n|$, $|D_n|$, и $|O_n| = 1$ количество элементов маски угла W_n со значениями a , c , d , и 0 , соответственно. Число всех элементов матрицы W_n равно $|W_n| = (2n-1)^2$. Вычисление значений $|A_n|$, $|C_n|$, $|D_n|$ дает нам:

$$|A_n| = 2(n-1), |C_n| = (n-1)^2, |D_n| = (n-1)(3n-1). \quad (1)$$

Дифференцирующее свойство маски записывается в виде

$$|A_n| a + |C_n| c + |D_n| d = 0. \quad (2)$$

С учетом (1) условие (2) принимает вид

$$2a + (n-1)c + (3n-1)d = 0. \quad (3)$$

Масштабируемость матриц выполняется для произвольных m :

$$2a + (m-1)c + (3m-1)d = 0. \quad (4)$$

Решение системы уравнений (3) и (4) приводит к соотношению в терминах d

$$(a, c, d) = (-d, -3d, d) = -d(1, 3, -1). \quad (5)$$

Минимальные взаимно простые числа $(a, c, d) = (1, 3, -1)$ выбраны в качестве элементов масштабируемой маски в 90 градусов. Выкладки, подобные уравнениям (1) - (5), дают маски для углов в 45 и 135 градусов [8], соответственно:

$$(a, c, d) = (3, 7, -1); (a, c, d) = (1, 5, -3). \quad (6)$$

На рис. 3 приводятся некоторые полученные таким способом маски.

$$Q = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 3 & 3 & 3 & 1 \\ \hline d & 1 & 3 & 1 & d \\ \hline & d & 0 & d & \\ \hline & & d & & \\ \hline & & & & \\ \hline \end{array}, \quad S = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & d & 1 & 3 & 3 \\ \hline & d & 1 & 3 & 3 \\ \hline & d & 0 & 1 & 1 \\ \hline & d & d & d & d \\ \hline & & & & \\ \hline \end{array}, \quad T = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & d & 3 & 7 & 3 \\ \hline & d & 3 & 3 & d \\ \hline & d & 0 & d & \\ \hline & d & d & & \\ \hline & & & & \\ \hline \end{array}, \quad U = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & & & d & 3 \\ \hline & & d & 3 & 7 \\ \hline & d & 0 & 3 & 3 \\ \hline & d & d & d & d \\ \hline & & & & \\ \hline \end{array}$$

Рис. 3. Масштабируемые маски углов в 90 (Q, S) и 45 (T, U) градусов.

В литературе неизвестно обобщение масок Кирша на матрицы размеров больших чем 3×3 . Попытка получить такие матрицы с сохранением оригинальной маски 3×3 в центре представлена в данной работе (рис. 4). Заметим, что возможны и другие варианты обобщенной маски Кирша.

$$K_{n=4}^{\pi/2} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 17 & 17 & 17 & 17 & 17 & 17 & 17 \\ \hline -7 & 11 & 11 & 11 & 11 & 11 & -7 \\ \hline -7 & -5 & 5 & 5 & 5 & -5 & -7 \\ \hline -7 & -5 & -3 & 0 & -3 & -5 & -7 \\ \hline -7 & -5 & -3 & -3 & -3 & -5 & -7 \\ \hline -7 & -5 & -5 & -5 & -5 & -5 & -7 \\ \hline -7 & -7 & -7 & -7 & -7 & -7 & -7 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 4. Масштабируемые маски Кирша размером 3×3 , 5×5 и 7×7 .

V-образные маски угловых структур

Масштабируемые маски W получаются в предположении, что тело угла является площадным двумерным объектом и заполняет область треугольника, состоящую из собственно угла и границы. На изображениях, однако, встречаются и углы в виде двух лучей (полос) с общей вершиной, на некотором фоне, обозначим их V . Угол в этом случае представляет собой ломаную V -линию. Возникает вопрос — можно ли построить масштабируемые маски V так же, как мы это сделали для W . Определим модель V -маски следующим образом (рис. 5).

$$V_3^1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline s & b & b & b & s \\ \hline b & s & b & s & b \\ \hline & b & 0 & b & \\ \hline & & b & & \\ \hline & & & & \\ \hline \end{array}, V_3^2 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline b & s & b & b \\ \hline b & s & b & b \\ \hline b & 0 & s & s \\ \hline b & b & b & b \\ \hline & & & \\ \hline \end{array}, \dots,$$

Рис. 5. Модель V -образной маски в 90 градусов.

Обозначим $|S_n|$, $|B_n|$ и $|O_n| = 1$ количество элементов маски со значениями s , b и 0 , соответственно. Количество всех элементов маски V_n равно $|V_n| = (2n-1)^2$. Вычислим значения $|S_n|$, $|B_n|$ в общем виде

$$|S_n| = 2(n-1), \quad |B_n| = (2n-1)^2 - 2(n-1) - 1, \tag{7}$$

и запишем условие дифференциальной маски:

$$|S_n| s + |B_n| b = 0. \tag{8}$$

Тогда имеем

$$2(n-1) s + 2(n-1)(2n-1) b = 0, \tag{9}$$

и получаем

$$s = - (2n-1)b. \tag{10}$$

Предполагая, что фоновые значения $b = -1$, получаем $s = (2n-1)$, см. пример для $n = 2$ ниже (рис. 6):

$$V_2^1 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 3 & -1 \\ \hline -1 & 0 & 3 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array}, V_2^2 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & 3 \\ \hline -1 & 0 & -1 \\ \hline -1 & -1 & 3 \\ \hline \end{array}, V_2^3 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline -1 & 0 & -1 \\ \hline 3 & -1 & 3 \\ \hline \end{array}, \dots, V_2^8,$$

Рис. 6. Пример V -образной маски размером 3×3 .

и для $n = 3$ (рис. 7):

$$V_3 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & & & -1 & 5 \\ \hline & & -1 & 5 & -1 \\ \hline -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ \hline & & -1 & 5 & -1 \\ \hline & & & -1 & 5 \\ \hline \end{array},$$

Рис. 7. Пример V -образной маски размером 5×5 .

Очевидно, что полученные V -маски не являются масштабируемыми, так как явно зависят от параметра n , как это видно из соотношения (10). Однако их можно модифицировать и сделать масштабируемыми, чтобы при увеличении размера матрицы её подматрицы меньшего размера оставались без изменений. Для этого нужно немного увеличить значения периметра s , чтобы сумма периметра стала равной нулю, как это имеет место в случае масштабируемых угловых масок W (рис. 8).

$$V_3^s = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & & & -1 & 7 \\ \hline & & -1 & 3 & -1 \\ \hline -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ \hline & & -1 & 3 & -1 \\ \hline & & & -1 & 7 \\ \hline \end{array}, V_4^s = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -1 & \dots & -1 & 1 & -1 & -1 & 11 \\ \hline \vdots & -1 & -1 & -1 & -1 & 7 & -1 \\ \hline \vdots & & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 \\ \hline \vdots & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ \hline \vdots & \dots & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 \\ \hline \vdots & -1 & & \dots & & 7 & -1 \\ \hline -1 & & & \dots & & & 11 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 8. Масштабируемые V -образные маски размером 5×5 и 7×7 .

Коэффициент усиления шума

В разделе представлены результаты расчета коэффициента усиления шума при использовании свертки с масками Кирша (K), масштабируемыми масками (W) и традиционной усредняющей маски (A). Для сравнения масок, маска Кирша обобщена, используя методику наращивания периферийных областей матрицы, подобную использованной при конструкции масштабируемых масок W . Коэффициент усиления шума σ^2 получен в работе [9, раздел 1.7] и равен сумме квадратов значений матрицы ядра свертки, нормированных так, что сумма их абсолютных величин приведена к единице. Тогда получаем

$$\sigma^2(V) = n / (4(n-1)(2n-1)). \quad (11)$$

$$\sigma^2(W) = (3n-2) / ((n-1)(3n-1)^2). \quad (12)$$

$$\sigma^2(K) = n(18n^2 - 10n - 7) / (3(n-1)(4n^2 - 1)^2). \quad (13)$$

$$\sigma^2(A) = 1 / (2n-1)^2. \quad (14)$$

Из соотношений (11) - (14) следует, что усиление шума σ^2 асимптотически убывает обратно пропорционально квадрату размера матрицы масок W , K , A . Маска V обладает меньшей помехоустойчивостью, коэффициент $\sigma^2(V)$ убывает обратно пропорционально размеру маски. Это можно объяснить площадным (для W , K , A) и линейным (для V) характером структур, заложенных в модели соответствующих ядер свертки. Некоторое представление о свойствах масок дает график (рис. 9). Для значений $n=2, 3, 4$ и соответственно окон размерами 3×3 , 5×5 и 7×7 , маски Кирша K более помехоустойчивы, чем масштабируемые маски W . В случае использования больших масок, коэффициенты усиления шума становятся мало различимы. Для количественного сравнительного анализа необходимы вычислительные эксперименты с различными классами изображений.

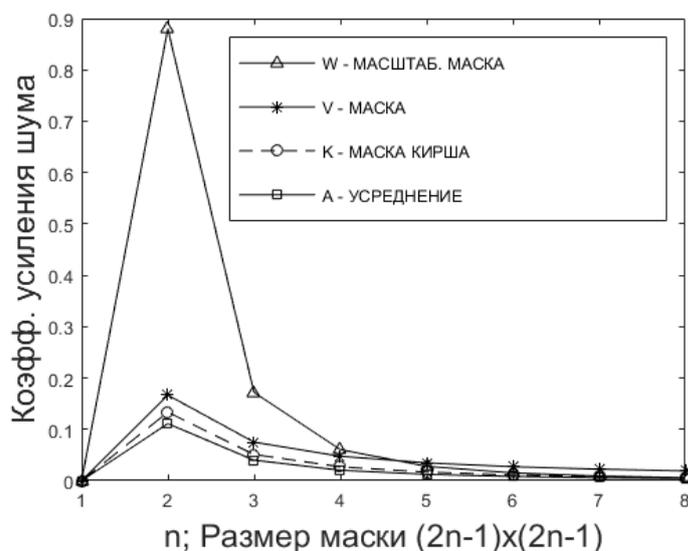


Рис. 9. Коэффициент усиления шума масок W , V , K , A

Заключение

В статье представлены результаты обобщения двумерных масштабируемых масок, используемых для выделения угловых структур изображений методом свертки скользящим окном, на случай V -образных углов, где внутренние точки углов имеют яркости фона. Приведены значения элементов масок и изложены принципы их вычисления. Кратко рассмотрены количественные аспекты помехоустойчивости. Дальнейшие исследования планируются в области создания алгоритмов, использующих масштабируемые конусные маски в обработке трехмерных цифровых изображений. Использование масок K , W и V на практике требует обширных вычислительных экспериментов. Это предмет будущих исследований.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0251-2021-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Zhang Y., Zhong B., Sun X. A Benchmark for the Evaluation of Corner Detector // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – P. 11984.
3. Kirsch R. Computer determination of the constituent structure of biological images // *Computers and Biomedical Research*. – 1971. – Vol. 4. – P. 315–328.
4. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // In C. J. Taylor, editors, *Proceedings of the Alvey Vision Conference*, 1988. – P. 147–151.
5. Rosten E., Porte R., Drummond T. Faster and Better: A Machine Learning Approach to Corner Detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2010. – Vol. 32 (1). – P. 105–119.
6. Kadyroldina A.T., Orazova A.Zh., Krasavin A.L., Kazantsev I.G., Dyomina I.A., Alontseva D.L. Development of new control algorithms for a robotic arm equipped with a 3D-scanning or machine vision system // *Bulletin of D. Serikbayev EKTU*. – 2022. – No. 1. – P. 39–59.
7. Del Prete R., Graziano M.D., Renga A. First Results on Wake Detection in SAR Images by Deep Learning // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – P. 4573.
8. Ambartsoumian G., Jebelli M. J. L. The V-line transform with some generalizations and cone differentiation // *Inverse Problems*. – 2019. – Vol. 35. – P. 034003.
9. Kazantsev I. G, Mukhametzhanova B. O., Iskakov K. T., Mirgalikyzy T. Detection of the Corner Structures in Images by Scalable Masks // *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. – 2020. – Vol. 14. – P. 73–84.
10. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.

© И. Г. Казанцев, 2023