

УЛУЧШЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА ГАБОРА

В.Ю. Гудков, А.В. Бойцов

Представлен метод фильтрации изображений отпечатков пальцев на основе фильтра Габора. В задачах верификации, идентификации и классификации отпечатков пальцев обычно требуется улучшить исходные изображения отпечатков для более надежного распознавания особых точек. Одним из вариантов улучшения отпечатка является его фильтрация с помощью фильтра Габора. Он эффективен для изображений, имеющих периодическую структуру. Однако из-за различной ориентации линий на разных участках изображений отпечатков фильтр Габора нуждается в параметризации. Модифицированный фильтр Габора, построенный с учетом поля направлений изображения, позволяет решить эту проблему. Кроме того, предложенный в статье расчет когерентности позволяет выделить наиболее ясные сегменты изображения, которые являются областями интереса для алгоритмов дальнейшей обработки отпечатка.

Ключевые слова: улучшение изображений, фильтр Габора, поле направлений, когерентность, отпечатки пальцев.

Введение

На изображении отпечатка пальца обычно выделяют признаки, такие как петли, дельты и завитки, необходимые для идентификации изображения (рис. 1). Однако на необработанном изображении вследствие различных помех (грязь, складки и т. п.) линии отпечатков могут искажаться, что влечет за собой ошибки в распознавании признаков. Для устранения подобных ошибок изображение улучшают. При этом снижается зашумленность изображения, а модель, рассчитываемая по нему, становится более достоверной. В литературе для улучшения изображений отпечатков пальцев наиболее часто используются методы на основе фильтра Габора, который учитывает периодическую структуру изображений [1, 2]. Поскольку классическая реализация фильтра достаточно универсальна, применяются его модифицированные варианты, учитывающие особенности изображений отпечатков пальцев [3–5]. В данной статье рассматривается реализация параметризованного фильтра Габора, подходящего для улучшения изображений, содержащих кривые линии и завитки, которые присутствуют на изображениях отпечатков пальцев.



Рис. 1. Особые точки отпечатка пальца (O – петля, Δ – дельта)

1. Постановка задачи

Классический вид фильтра Габора представляет собой функцию

$$h(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \cos 2\pi f(x \sin \theta + y \cos \theta), \quad (1)$$

где x, y – координаты точки; σ – стандартное отклонение предполагаемого нормального распределения; f – частота; θ – ориентация фильтра (параметры σ и f относятся к маске фильтра, а угол θ – к ориентации маски над изображением).

Формула представляет собой произведение гауссиана и периодической функции, что предполагает улучшение монотонных областей периодических изображений [6]. Для применения фильтрации необходимо знать перечисленные выше параметры фильтра Габора. В случае с отпечатками пальцев предполагают, что периодичность линий и стандартное отклонение согласуются

в основном с локальными характеристиками изображения. Экспериментальным путем выбраны следующие значения:

$$\sigma = 7, \\ f = 10.$$

Это означает, что коэффициенты убывают от центра окружности по радиусу длиной 7 точек примерно в 8 раз, а через 10 точек изображение периодически повторяется.

Однако линии отпечатков могут иметь различную ориентацию на разных участках изображения, поэтому необходимо найти ориентацию линий внутри каждого обрабатываемого сегмента. Таким образом, модифицированный фильтр будет являться функцией от трех параметров $h(x, y, \theta)$.

2. Построение поля направлений

Поиск ориентации линий сегмента реализован по алгоритму, описанному Базеном [1]. Основная идея алгоритма заключается в том, что градиент изображения, соответствующий перепадам цветов от белого к черному, будет перпендикулярен линиям на отпечатках пальцев. Для того чтобы противоположно направленные векторы не компенсировали друг друга при усреднении, рассчитываются так называемые квадратурные градиенты [1]. Их направления усредняются в каждой области изображения, после этого рассчитываются соответствующие углы ориентации линий отпечатков пальцев.

Для каждого пикселя изображения существует 2 градиента, которые удобно записывать в векторной форме $[G_x(x, y) \quad G_y(x, y)]^T$. Вектор градиентов можно описать следующей формулой:

$$\begin{bmatrix} G_x(x, y) \\ G_y(x, y) \end{bmatrix} = \text{sign}(G_x) \nabla I(x, y) = \text{sign} \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \right) \begin{bmatrix} \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $I(x, y)$ – яркость пикселя изображения с координатами (x, y) .

В данном случае направление вектора градиентов выбирается согласно направлению градиента по x , поэтому углы ориентаций векторов будут находиться в промежутке $\left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$.

Однако усреднение углов градиентов может привести к компенсации векторов градиента, которые соответствуют противоположным краям линий на отпечатках. Поэтому вторым шагом является расчет квадратурных градиентов $[G_{sx} \quad G_{sy}]^T$ по формуле, предложенной Базеном [1]:

$$\begin{bmatrix} G_{sx} \\ G_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x^2 - G_y^2 \\ 2G_x G_y \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Квадратурные градиенты представляют собой векторы, модуль которых соответствует квадрату модуля градиента, а угол направления – удвоенному углу направления градиента, что позволяет избежать эффекта компенсации векторов градиентов на противоположных границах линий.

Затем значения квадратурных градиентов усредняются в сегментах изображения (например, 8×8 пикселей):

$$\begin{bmatrix} \overline{G_{sx}} \\ \overline{G_{sy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w G_{sx} \\ \sum w G_{sy} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Таким образом, для каждого сегмента можно рассчитать угол направления квадратурного градиента по формуле

$$\Phi = \frac{1}{2} \angle(\overline{G_{sx}}, \overline{G_{sy}}). \quad (5)$$

Это позволит определить угол, под которым направлены градиенты в данном сегменте изображения. Чтобы рассчитать значения угла направления линий отпечатков пальцев, нужно прибавить или отнять 90° :

$$\theta = \begin{cases} \Phi - \frac{\pi}{2}, & \Phi > 0; \\ \Phi + \frac{\pi}{2}, & \Phi \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Для того чтобы убедиться в правильности расчета, можно изобразить поле направлений в виде линий (рис. 2). Поскольку направление линий являлось последним неизвестным параметром фильтра, после вычисления поля направлений изображение можно фильтровать.

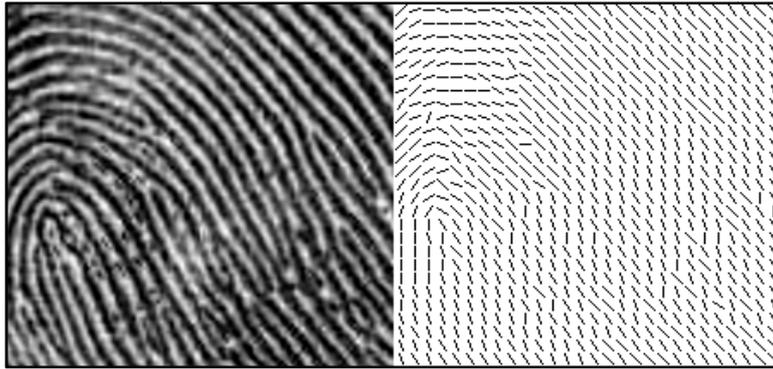


Рис. 2. Участок отпечатка пальца и соответствующее ему поле направлений

3. Фильтрация

Для фильтрации вычисляются матрицы фильтров (сегменты 15×15), которые соответствуют всем возможным направлениям линий в диапазоне от 0 до 255. Рассчитав значения в каждой ячейке матрицы, необходимо убедиться, что сумма всех ее элементов равна нулю. Для этого из матрицы вычитается среднее арифметическое ее элементов. Кроме того, для нормализации значений, матрица делится на сумму элементов в ней.

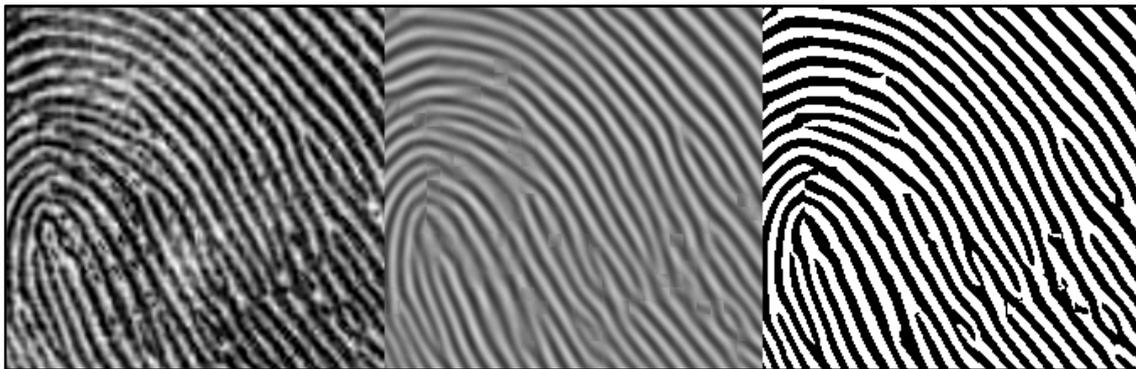


Рис. 3. Исходное, фильтрованное и бинаризованное изображения

При фильтрации выполняется свертка исходного изображения с ядром фильтра. Для каждого пикселя используется ядро, соответствующее заданному локальному углу направления линий. Отклик фильтра может иметь отрицательные значения, поэтому для визуализации откликов к ним прибавляют 127 (среднее значение яркости серого изображения). Также к фильтрованному изображению применяется пороговое преобразование, после чего линии отпечатков становятся бинарными (рис. 3).

4. Расчет когерентности

При фильтрации обрабатывается все изображение, хотя не все фрагменты относятся к отпечатку пальца. Для того чтобы выделить области, относящиеся к изображениям линий, рассчитывается когерентность фрагментов на основе поля направлений. Когерентность является вещественным числом от 0 до 1, которое определяет степень согласованности направлений градиентов в некоторой области W по формуле

$$\text{Coh} = \frac{|\sum_W [G_{sx} \ G_{sy}]^T|}{\sum_W |G_{sx} \ G_{sy}|^T}. \quad (7)$$

Высокая когерентность означает высокую сонаправленность градиентов данной области. На основе вычисленных значений по (7) строится поле когерентностей, которое позволяет выделить на изображении фрагменты, относящиеся к линиям отпечатков (рис. 4). Когерентность считается высокой, если она превосходит значение 0,5. Пример изображения с отмеченной высокой коге-

рентностью представлен на рис. 5. Белым и черным цветом отмечены линии отпечатков пальцев, серым – области низкой когерентности.

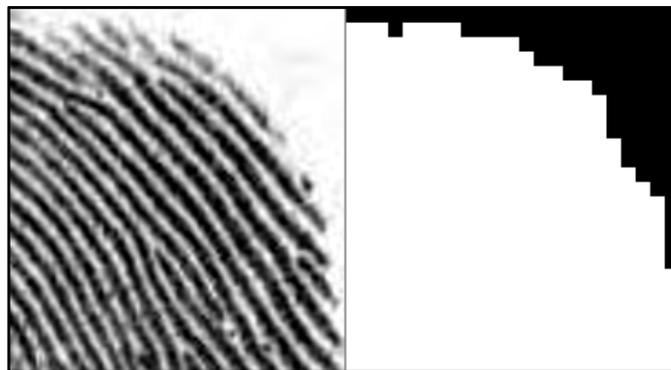


Рис. 4. Край отпечатка и соответствующая маска высокой когерентности



Рис. 5. Исходное изображение и фильтрованное изображение с отметкой когерентности

Заключение

Применение фильтра Габора улучшает изображение. На нем контрастно выделяются линии отпечатков, убираются шумы. Бинаризованное изображение удобно для дальнейших преобразований: скелетизации и поиска особых точек на отпечатках. Использование когерентности позволяет выделить область интереса, в которой выполняют дополнительные вычисления.

Недостатком алгоритма является представление кривой линии в виде набора направлений в каждом сегменте, что может послужить причиной нечеткостей отклика фильтра в областях искривления и завитках. С другой стороны, повышение дискретизации, связанное с уменьшением размера сегмента, влечет за собой большую погрешность в определении средней ориентации линий каждого сегмента.

Программа улучшения изображения фильтром Габора написана на языке C++ в кроссплатформенной среде Qt Creator без использования сторонних библиотек, связанных с обработкой изображений. Программа является прототипом рабочей версии без оптимизации алгоритма по времени работы. Алгоритм может быть ускорен путем использования дискретного преобразования Фурье в процедуре свертки, а также параллельной обработке сегментов изображения.

Литература/References

1. Bazen A.M. Fingerprint Identification – Feature Extraction, Matching, and Database Search, Ph.D. Dissertation. Univ. of Twente, Enschede, The Netherlands, 2002. 187 p.
2. Maltoni D., Maio D., Jain A.K., Prabhakar S. Handbook of Fingerprint Recognition. New York, Springer-Verlag, 2003. 510 p.
3. Hong L., Wan Y., Jain A.K. Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, pp. 777–789.

-
4. Yang J.W., Liu L.F., Jiang T.Z., Fan Y. A Modified Gabor Filter Design Method for Fingerprint Image Enhancement. *Pattern Recognition Letters*, 2003, vol. 24, no. 12, pp. 1805–1817.
 5. Wang W., Li J., Huang F., Feng H. Design and Implementation of Log-Gabor Filter in Fingerprint Image Enhancement. *Pattern Recognition Letters*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 301–308.
 6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с. [Gonzales R., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* (Digital Processing of the Images). Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p.]

Гудков Владимир Юльевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, (г. Челябинск); diana@sonda.ru.

Бойцов Антон Владимирович, магистрант кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, (г. Челябинск); AntonBoytsov@gmail.com.

Поступила в редакцию 20 декабря 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”
2015, vol. 15, no. 1, pp. 128–132

ENHANCEMENT OF FINGERPRINT IMAGES USING GABOR FILTER

V. Yu. Gudkov, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*
diana@sonda.ru,

A. V. Boytsov, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*
AntonBoytsov@gmail.com

The paper deals with fingerprint image filter method using Gabor filter. Enhancement is often required in verification, identification and classification problems as a pre-processing step for robust feature extraction. Gabor filter is one of the most efficient methods to enhance images with periodic structure. However, Gabor filter needs parameterization due to different line orientations at different regions of fingerprint images. Modified Gabor filter, designed considering direction field of the image, can solve this problem. In addition, calculation of coherence allows to select the clearest image segments, which are considered as regions of interest for further calculations.

Keywords: image enhancement, Gabor filter, direction field, coherence, fingerprint.

Received 20 December 2014