Коррекция геометрических искажений цифровых изображений, полученных с биометрического сканера отпечатков пальцев

А. Г. ГРИЖЕБОВСКАЯ
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
e-mail: a_gree@mail.ru

А. В. МИХАЛЁВ
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
e-mail: aamikhalev@mail.ru

Л. П. ДМИТРИЕВА
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
e-mail: lyudmila.dmitrieva-msu@mail.ru

УДК 004.932

Ключевые слова: биометрия, распознавание, отпечаток пальца, обработка изображений, геометрические искажения.

Аннотация

Качество изображений отпечатков пальцев является важным при распознавании в биометрических системах. Геометрические искажения и разный масштаб изображений могут ухудшать распознавание. В работе исследуются, анализируются и разрабатываются алгоритмы коррекции искажений и масштаба изображений, которые вносятся биометрической системой или считывателем отпечатков пальцев. Для математической модели пространственных искажений используется полиномиальная модель второго порядка. Для коррекции яркости отдельных точек изображения применяется бикубическая интерполяция.

Abstract

A. G. Grizhebovskaya, A. V. Mikhalev, L. P. Dmitrieva, Geometric distortion correction of images received from biometric fingerprint devices, Fundamentalnaya i prikladnaya matematika, vol. 23 (2020), no. 3, pp. 75—81.

The quality of fingerprint images is very important for recognition and identification in biometric systems. Geometric distortions and different image scales may worsen fingerprint recognition. It is necessary to adjust distortions and scale in biometric finger capture systems. Algorithms for correcting distortions and scale are investigated, analyzed, and developed in this paper. A polynomial model of second order is used as a mathematical model of spatial distortions. To correct the brightness of image points, bicubic interpolation is used.

Фундаментальная и прикладная математика, 2020, том 23, № 3, с. 75—81.
© 2020 *Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ»*

Биометрический сканер отпечатков пальцев — это устройство, которое позволяет получить снимок или изображение пальца руки человека. Полученные изображения отпечатков пальцев далее могут дополнительно обрабатываться, потом распознаваться или храниться в биометрической системе.

Основные характеристики цифровых изображений, полученных со сканера, следующие [4].

Разрешение. Измеряется количеством точек или пикселей на дюйм, обозначается dpi.

Размер изображения. Обычно измеряется в миллиметрах или дюймах.

Динамический диапазон. Измеряется в количестве оттенков серого цвета, которыми кодируется каждый пиксель изображения, обычно используется 256 оттенков серого цвета.

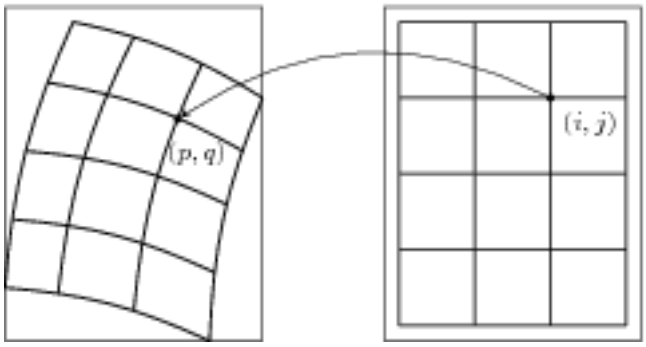
Геометрическая точность. Определяется максимальными геометрическими искажениями по каждому из направлений x или y.

Качество изображения. Используются некоторые численные аспекты для определения качества изображений, полученных с биометрического сканера. Используется отношение сигнал/шум SNR (Signal-to-Noise Ratio), контрастность изображения и другие оценки.

Биометрические сканеры отпечатков пальцев должны удовлетворять определённым требованиям, установленным стандартам и могут быть сертифицированы. Это необходимо для того, чтобы качество получаемых цифровых изображений отпечатков пальцев было достаточно высоким для применения с целью распознавания. Также необходима возможность применения сканеров разных производителей в биометрических системах. В настоящее время существуют следующие стандарты для биометрических сканеров отпечатков, которые удовлетворяют стандартам по качеству изображений ФБР (FBI Image Quality Specifications): EBTS/F (Electronic Biometric Transmission Specification) и PIV (Personal Identity Verification) [3, 5].

Одним из важных требований биометрических стандартов является соответствие критериям геометрической точности. В данной работе исследуется коррекция геометрических искажений на изображениях, полученных с биометрического сканера. Искажения для каждого отдельного образца сканера могут отличаться, требуется калибровка каждого сканера. Для калибровки может применяться тест-объект с нанесёнными на него точками в виде узлов сетки, координаты узлов и масштабный коэффициент известны. Для описания и коррекции искажений в данной работе применяется полиномиальная модель искажений [2,7]. Рассматривается полиномиальная модель второго порядка, также может использоваться модель четвёртого порядка.

На рис. 1 показано исходное и результирующее преобразованное изображение. Исходное изображение представляет собой изображение, полученное с оптического сканера отпечатков пальцев, оптическая система сканера вносит искажения, линии сетки являются искривлёнными. Преобразованное изображение — это изображение, для которого геометрические искажения скоррек-



Исходное изображение Результирующее изображение

Рис. 1. Схема коррекции геометрических искажений

тированы. Таким образом, на вход системы поступает исходное изображение с искажениями, на выходе получаем скорректированное изображение. Каждой точке (i, j) восстановленного изображения соответствует точка (p, q) первоначального искривлённого изображения. Таким образом, обратное преобразование скорректированного изображения в исходное можно описать отображением точек (i, j) в точки (p, q):

$$p = f(i, j), \tag{1}$$

$$q = g(i, j). \tag{2}$$

Задача коррекции изображения сводится к нахождению преобразований $f(i, j)$, $g(i, j)$. Для каждой точки (i, j) результирующего изображения находим точку (p, q) на исходном изображении. Рассчитывается яркость изображения в точке (p, q) методом билинейной или бикубической интерполяции, анализируются яркости соседних точек. Данное значение соответствует яркости точки (i, j) результирующего изображения.

В качестве модели искажений рассмотрим полиномиальную модель второго порядка

$$p' = a_0 + a_1 i + a_2 j + a_3 i^2 + a_4 ij + a_5 j^2, \tag{3}$$

$$q' = b_0 + b_1 i + b_2 j + b_3 i^2 + b_4 ij + b_5 j^2, \tag{4}$$

где (p', q') — полиномиальная оценка координат исходного изображения, (a_i, b_i) — фиксированные коэффициенты, (p_k, q_k), (i_k, j_k) — координаты точек на исходном изображении и контрольные точки, k — номер точки на изображении.

Набор координат точек (p_k, q_k) и коэффициентов полиномов (a_i, b_i) представим в векторном виде, n — количество узлов сетки:

$$p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix}, \quad q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & i_1 & j_1 & i_1^2 & i_1 j_1 & j_1^2 \\ 1 & i_2 & j_2 & i_2^2 & i_2 j_2 & j_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & i_n & j_n & i_n^2 & i_n j_n & j_n^2 \end{pmatrix}.$$

Среднеквадратичная ошибка аппроксимации будет минимальна [2, с. 95] тогда, когда

$$a = C^- p, \quad b = C^- q,$$

где C^- — обобщённая обратная матрица матрицы C.

Таким образом, задача нахождения коэффициентов (a_i, b_i) для последующего восстановления изображения по формулам (3), (4) сводится к нахождению матрицы C^-, при этом число узлов сетки должно быть больше числа полиномиальных коэффициентов. Аналогичным образом строится полиномиальная модель четвёртого порядка, которая может применяться для получения большей точности коррекции геометрических искажений.

Для вычисления обобщённой обратной матрицы в данной работе применяется LU-разложение, L — нижняя треугольная матрица, U — верхняя треугольная матрица. Используется алгоритм нахождения обратной матрицы, входящий в программный пакет `nrutil` на языке программирования C++ [6, 8].

Для каждой точки изображения (i, j) вычисляется полиномиальная оценка (p', q') по формулам (3), (4). Далее вычисляется яркость точки методом билинейной или бикубической интерполяции [1, 2, 7, 9]:

$$G(x, y) = \sum_{k,l} F(k, l) h(x - k, y - l),$$

где $G(x, y)$ — интенсивность или яркость точки (x, y) на восстановленном изображении, $F(k, l)$ — яркость точки (k, l) на исходном изображении, $h(x, y)$ — ядро интерполяции.

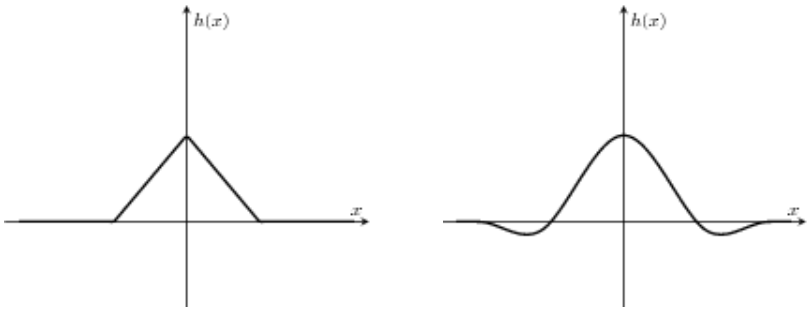
Примеры ядер интерполяции приведены на рис. 2.

Формула кубической интерполяции для одномерного случая:

$$h(x) = \begin{cases} 1 - (a+3)x^2 + (a+2)|x|^3, & \text{если } |x| < 1, \\ a(|x| - 1)(|x| - 2)^2, & \text{если } 1 \leqslant |x| < 2, \\ 0, & \text{если } 2 \leqslant |x|, \end{cases} \tag{5}$$

где a — параметр, $a < 0$.

В данной работе применялась бикубическая интерполяция для двумерного случая. Для вычисления яркости каждой точки использовались яркости



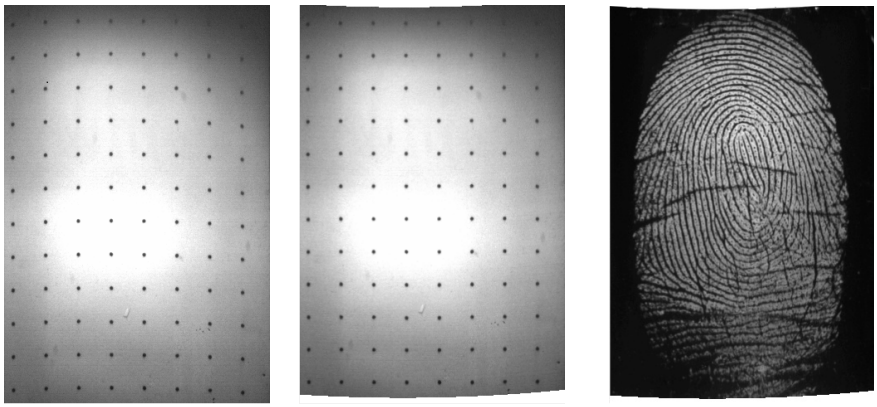
Линейная интерполяция Кубическая интерполяция

Рис. 2. Примеры ядер интерполяции для одномерного случая

16 соседних точек. Наилучший экспериментальный результат был получен при $a = -0{,}8$ и $a = -1$. При обработке изображения параметр a подбирался таким образом, чтобы яркость и контраст преобразованного изображения соответствовали исходному изображению. Данный метод интерполяции позволяет удовлетворить данному требованию, таким образом, яркость и контраст изображения дополнительно не корректируются.

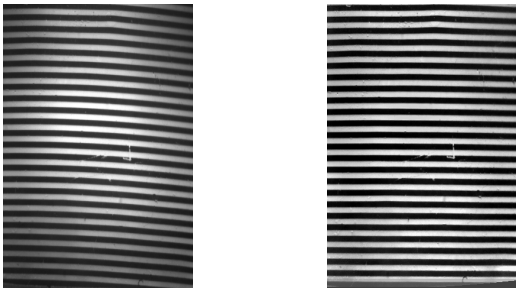
Примеры исходных и результаты коррекции биометрических изображений приведены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 представлены изображения координатной сетки, которые могут применяться для калибровки сканера; корректируются геометрические иска-



Исходное изображение Коррекция изображения Коррекция изображения отпечатка пальца

Рис. 3. Примеры изображений



Исходное изображение Коррекция изображения

Рис. 4. Примеры изображений

жения и масштаб. На рис. 4 показан пример коррекции изображения с горизонтальными полосами, такой тест-объект может применяться для анализа и тестирования на соответствие геометрических искажений биометрическому стандарту PIV [3, 5].

Заключение

Предложенная методика может применяться для коррекции масштаба и геометрических искажений изображений, полученных с оптического сканера отпечатков пальцев биометрической системы в реальном времени. Для каждого образца сканера получен набор коэффициентов $a_0, \ldots, a_5$ и $b_0, \ldots, b_5$. Данные коэффициенты являются постоянными, вычисляются в вещественном типе и используются для коррекции каждой точки изображения по формулам (3)—(5). Данный метод даёт возможность откалибровать разные сканеры однотипно, с одинаковым масштабом. Это позволяет распознавать или хранить изображения, которые были получены с разных сканеров, использовать их в разных биометрических системах.

Литература

[1] Маркелов К. С. Модель повышения информативности цифровых изображений на базе метода суперразрешения // Инженерный вестн. — 2013. — Вып. 3. — С. 525—542.

[2] Прэтт У. Цифровая обработка изображений. — М.: Мир, 1982.

[3] Image quality specifications for single finger capture devices. — 2006. — `https://www.fbibiospecs.cjis.gov/Document/Get?fileName=pivspec.pdf`.

[4] Maltoni D., Maio D., Jain A. K., Prabhakar S. Handbook of Fingerprint Recognition. — New York: Springer, 2009.

[5] Nill N. B. Test procedures for verifying image quality requirements for personal identity verification (PIV) single finger capture devices. — 2007. — https://www.mitre.org/publications/technical-papers/test-procedures-for-verifying-image-quality-requirements-for-personal-identity-verification-piv-single-finger-capture-devices.

[6] Numerical recipes. — http://numerical.recipes/com/storefront.html.

[7] Pratt W. K. Digital image processing: PIKS Scientific Inside. — Wiley, 2007.

[8] Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007.

[9] Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. — Berlin: Springer, 2010.