

УДК 621.385.833

М. Р. Гафаров, кандидат технических наук, инженер
МИП ООО «Программно-аппаратные системы»
Р. М. Гафаров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»
Е. С. Полтанова, магистрант кафедры «Вычислительная техника»
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ

В работе рассматривается метод определения линейных искажений изображений, главной частью которых являются преобразования взаимного сдвига, поворота и масштаба.

Ключевые слова: изображение, преобразование, сдвиг, поворот, масштаб, гистограмма.

Во многих алгоритмах и информационных технологиях обработки изображений применяют процедуры совмещения изображений. Одной из проблем для практической реализации совмещения являются взаимные отличия изображений сдвигом, поворотом и масштабом, причем наибольшие трудности возникают при одновременном воздействии указанных преобразований, а также при большом разбросе их параметров. Актуальной задачей является разработка надежного метода определения трансформирующего преобразования $T: Z \rightarrow Z'$ (Z, Z' – сравниваемые изображения) в условиях неизвестного пространственного их рассогласования и установления соответствий между ними.

Существует ряд методов пространственного совмещения изображений, каждый из которых обладает теми или иными достоинствами и недостатками. Методы определения параметров преобразования T можно подразделить на два основных класса: методы площадного сопоставления (area based matching) и методы, основанные на выделении примитивных объектов и характерных точек (feature based matching). Методы первой группы далее будем называть интегральными, поскольку информация о параметрах преобразования извлекается путем анализа всего изображения. Чаще всего интегральные методы описания геометрических преобразований основываются на указании их инвариантов, вычислении взаимной корреляции, подходах, использующих преобразование Фурье, и т. д. [1, 2].

Существенным недостатком интегральных методов является возможность их применения лишь при определенных условиях идеализации, например, чтобы анализируемые изображения обладали четко выраженной границей перехода от изображения объекта к фону, которая позволяла бы вести интегрирование только в пределах преобразуемой части изображения. Часто объектом является общая перекрывающаяся часть двух изображений, а фоном – те их части, которые не попадают в область перекрытия. В данном случае границы условны и неизвестны. Кроме того, интегральные методы восприимчивы к нелинейным яркостным искажениям и деформациям объекта, что тоже отражается на результатах вычисления параметров преобразования. Обобщая недос-

татки интегральных методов, можно сказать, что они обусловлены заданием ограниченного числа инвариантов только для определенной группы преобразований. Если же на изображение воздействуют другие преобразования, обусловленные помехами, фоном, то результаты вычислений искажаются.

Методы второй группы основаны на выделении характерных или особых точек и соотнесении этих точек друг с другом на разных изображениях [3, 4] – назовем их локальными. Локальные методы используют факт того, что геометрические искажения воздействуют только на положение полутонов, но не воздействуют на их величину. Главный фактор, ограничивающий применение локальных методов для изображений, связан с появлением неопределенности при отождествлении заданной точки одного изображения с одноименной точкой другого изображения и большой вероятностью грубой ошибки идентификации этих точек. Неоднозначность возникает, поскольку на сложных изображениях, как правило, имеется несколько точек со сходными окрестностями и мера сходства в них принимает экстремальные значения. Такая картина обусловлена сходной локальной структурой изображаемого объекта и фона, наличием сходных деталей на самом объекте, яркостными искажениями, помехами и т. д.

В работе [5] предлагается метод статистической дифференциации для определения параметров линейного преобразования сдвига и поворота изображений на основе синтеза свойств локальных и интегральных методов, которые определяют их достоинства. В нем применяется локальный способ вычисления параметров геометрического преобразования, их обобщенный анализ и дифференциация результатов с помощью гистограмм. Повышение достоверности получаемых результатов достигается путем внесения в них большой избыточности за счет массовых вычислений искомым параметров по множеству точек изображений. Для сокращения перебора при вычислениях используется инвариантное свойство отрезков сохранять длину при сдвигах и поворотах плоскости изображения, что позволяет разбить все множество пар выделенных особых точек на классы эквивалентности по расстоянию между ними.

Данная работа является обобщением метода статистической дифференциации для случая, когда изображения Z и Z' одновременно отличаются не только сдвигом и поворотом, но и масштабом. При указанных преобразованиях в основу вычислений может быть положено инвариантное свойство сохранения подобия треугольников в Z и Z' . Исходя из этого предлагается все множество выделенных особых точек изображения Z разбить на триады – треугольники – и в дальнейшем вычислять параметры преобразования, устанавливая соответствия с подобными треугольниками на изображении Z' .

Всего из k точек можно образовать $n = C_k^3 = \frac{k(k-1)(k-2)}{6}$ треугольников. Обозначим множество таких треугольников $Q = \{q_j\}, j = 1 \dots n$. Каждый треугольник можно характеризовать координатами вершин $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, длинами сторон a, b, c , углами α, β , прилегающими к наибольшей из сторон, отношениями двух сторон к наибольшей из сторон $a/c, b/c$ и типами вершин, определяемых как $s_1 = \text{sign}(h(x_1, y_1)), s_2 = \text{sign}(h(x_2, y_2)), s_3 = \text{sign}(h(x_3, y_3))$, где h – функция детектора особых точек (рис. 1).

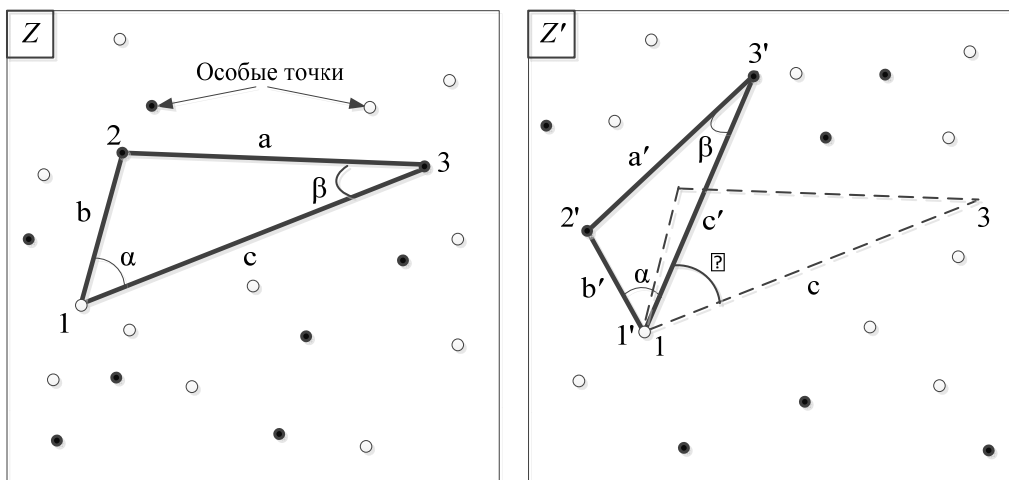


Рис. 1. Сопоставление треугольников на изображениях

Заметим, что все рассматриваемые треугольники имеют определенную нумерацию вершин, подразумевая, что вершины занумерованы цифрами 1, 2, 3. Определяется самая длинная сторона треугольника и выполняется процедура перенумерации вершин в соответствии с их положением относительно этой стороны треугольника. После перенумерации самая длинная сторона образована вершинами 1–3, сторона 2–3 – вторая по длине, а сторона 1–2 – самая короткая.

Треугольники могут отличаться ориентацией. Ориентация – это направление обхода («по» или «против» часовой стрелки), определяемое указанным порядком вершин: от 1 к 2, затем к 3, затем обратно к 1. Два гомотетичных треугольника (стороны которых соответственно параллельны) ориентированы одинаково, треугольники, получающиеся друг из друга поворотом, – тоже, а треугольники, симметричные относительно прямой, ориентированы противоположно друг другу. Для определения ориентации можно использовать знак векторного произведения двух сторон треугольника:

$$o = \text{sign}(x_{12}y_{13} - x_{13}y_{12}), \quad (1)$$

где $x_{12} = x_2 - x_1, y_{12} = y_2 - y_1, x_{13} = x_3 - x_1, y_{13} = y_3 - y_1$.

Объем полного перебора треугольников при сопоставлении их на изображениях Z и Z' равняется n^2 и практически не приемлем по двум основным причинам. Во-первых, обычно на изображении выделяется порядка $k=30 \dots 100$ значимых особых точек и значение $n^2 = C_k^3 = \left(\frac{k(k-1)(k-2)}{6}\right)^2$ в некото-

рых задачах может вызвать значительную вычислительную проблему. Во-вторых, самое главное, порождает недопустимо большой уровень шумов на гистограмме распределения вычисляемых параметров преобразования. Объем перебора можно значительно сократить, предварительно разбив множество Q на классы эквивалентных треугольников $Q = \bigcup_{j=0}^v \Lambda_j$. Треугольники $q, q' \in \Lambda_j$ считаются эквивалентными, если они:

- 1) подобны, т. е. $\alpha = \alpha', \beta = \beta'$ или $\frac{a}{c} = \frac{a'}{c'}$, $\frac{b}{c} = \frac{b'}{c'}$;
- 2) имеют одинаковую ориентацию;
- 3) имеют совпадающие типы вершин, т. е. $s_1 = s'_1, s_2 = s'_2, s_3 = s'_3$.

С практической точки зрения каждое из подмножеств Λ_j удобно представить в виде линейного списка, причем указатель u_j на его начало является элементом одномерного массива U . Элемент списка λ содержит координаты наибольшей стороны треугольника $\langle (x_1, y_1), (x_3, y_3) \rangle$. В качестве индекса в массиве U используется кодовое слово J , состоящее из следующих полей (рис. 2):

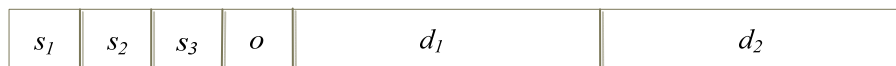


Рис. 2. Формат кодового слова J

Значения d_1 и d_2 меньше или равны 0,5, поэтому они масштабируются и преобразуются к целому типу. В результате выполнения указанных действий для изображений Z и Z' формируются два массива U и U' , позволяющие для некоторого кодового слова $J = j$ по указателям $u_j = u'_j$ сопоставить два множества подобных треугольников $\Lambda_j \subset Q$ и $\Lambda'_j \subset Q'$, принадлежащих одному классу эквивалентности. Схема выделения показана на рис. 3.

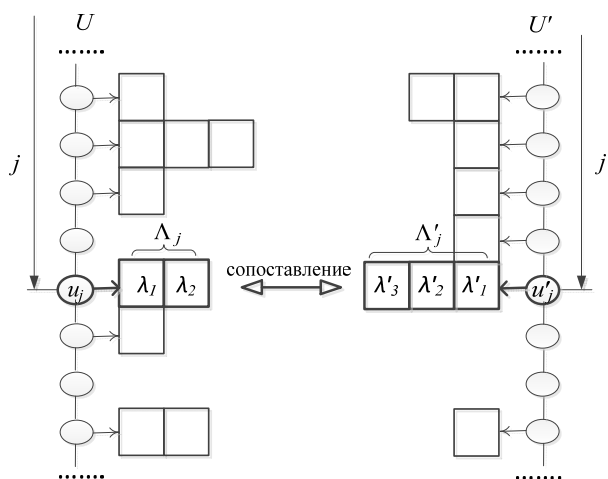


Рис. 3. Схема выделения треугольников одного класса эквивалентности

- 1) s_1, s_2, s_3 – битовые поля, определяемые знаками функции $h(x, y)$ на вершинах треугольника;
- 2) o – битовое поле, определяющее ориентацию треугольника;
- 3) d_1, d_2 – относительные длины сторон 1–2 и 2–3 треугольника, где $d_1 = \frac{a}{c}$, $d_2 = \frac{b}{c} - 0,5$.

Основной этап вычислений связан с непосредственной оценкой параметров преобразований сдвига, поворота и масштаба по методу статистической дифференциации. Вначале выполняется цикл сопоставления подобных треугольников при линейном нарастании значений J по условию $(\Lambda_j \neq \emptyset) \& (\Lambda'_j \neq \emptyset)$. Для каждой пары сопоставляемых треугольников λ и λ' вычисляется их взаимный поворот φ как угол между векторами \vec{c} и \vec{c}' :

$$\varphi = (\vec{c} \wedge \vec{c}') = \arccos \left(\frac{x_{13}x'_{13} + y_{13}y'_{13}}{\sqrt{(x_{13}^2 + y_{13}^2)(x'_{13}^2 + y'_{13}^2)}} \right), \quad (2)$$

где $x_{13} = x_3 - x_1$, $y_{13} = y_3 - y_1$, $x'_{13} = x'_3 - x'_1$, $y'_{13} = y'_3 - y'_1$; и масштабный коэффициент μ как отношение наибольших сторон треугольников:

$$\mu = \frac{c}{c'} = \frac{\text{dist}(x_1, y_1, x_3, y_3)}{\text{dist}(x'_1, y'_1, x'_3, y'_3)}. \quad (3)$$

Вычисленные значения φ и μ накапливаются в гистограмме G_φ и G_μ соответственно. На рис. 4, а и б приведены характерные формы гистограмм G_φ и G_μ , получающихся после сопоставления всех треугольников.

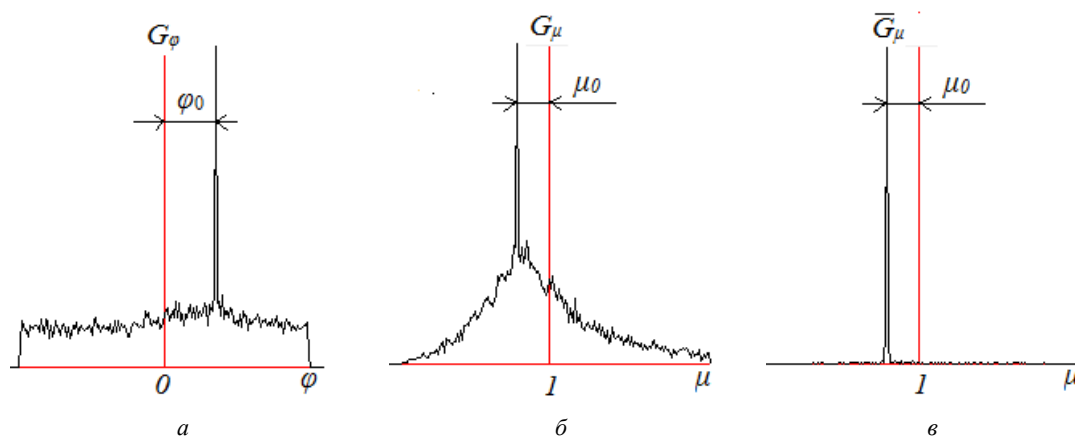


Рис. 4. Формы гистограмм G_φ , G_μ и \bar{G}_μ

Можно заметить, что «шумовые» значения параметров в гистограммах распределены по-разному – в G_φ они распределены практически равномерно по всему диапазону возможных поворотов, а в G_μ существенно неравномерно, что говорит о неравномерности функции плотности распределения отношения случайных величин, коим здесь является масштабный коэффициент. Для последующего анализа наиболее предпочтительна форма гистограммы G_φ , поэтому предлагается определять параметры преобразования последовательно – вначале строить гистограмму G_φ и определить угол поворота как соответствующий максимуму гистограммы: $\varphi_0 = \arg \max(G_\varphi)$, а затем масштабный коэффициент μ_0 по результатам сопоставления тех треугольников, которые определили «пик» на гистограмме G_φ , т. е. с углами взаимного поворота равными φ_0 . Пример такой гистограммы приведен на рис. 4, в. Множество таких треугольников содержат мало «шумовых», поэтому гистограмма \bar{G}_μ имеет ярко выраженный «пик» и существенно малый уровень «шума». Аналогично, по этому же множеству треугольников, определяются параметры взаимного сдвига изображений с использованием ранее вычисленных значений φ_0 и μ_0 . Гистограмма G_{Δ} двумерная, и вектор сдвига $\bar{\Delta}_0(\Delta_{0x}, \Delta_{0y})$ определяется по положению ее максимума $\bar{\Delta}_0 = \arg \max(G_{\Delta})$.

Экспериментальная проверка предлагаемого метода проводилась как на искусственно синтезированных, так и на реальных изображениях в формате 256×256 пикселей и градациями полутонов в диапазоне 0,255 с моделированием их рассогласования по сдвигу, повороту и масштабу (рис. 5)

В экспериментах точность вычисления поворота составляла $\pm 0,5$ градусов, сдвига ± 1 пиксель, масштабного коэффициента 0,01. Диапазон поворотов составлял ± 90 градусов, диапазон сдвигов – ± 128 пикселей, масштабного коэффициента – 0,5...2. Работоспособность метода при различных сочетаниях значений параметров геометрического рассогласования и уровня помех на изображениях оценивалась отношением сигнал/шум на гистограммах G_φ , G_μ и \bar{G}_μ :

$$w = \frac{\max(G)}{u_f}, \text{ где } u_f \text{ – средний уровень «шумов»,}$$

обусловленных ложными значениями вычисляемого параметра. Исследования показали устойчивую работу предлагаемого метода.



Рис. 5. Пример изображений с выделенными особыми точками. Знаком + показаны положительные, а о – отрицательные экстремумы функции $h(x, y)$

Основным ограничивающим фактором, влияющим на точность вычисления геометрических параметров рассогласования, является доля правильно идентифицированных соответственных точек в перекрывающихся частях изображений, а также качество работы детектора особых точек при значительных взаимных отличиях по сдвигу, повороту и масштабу и уровню яркостных искажений.

Библиографические ссылки

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – 790 с.
2. Мясников Е. В. Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31. – № 3. – С. 77–82.
3. Краснобаев А. А. Обзор алгоритмов детектирования простых элементов изображения и анализ возможности их аппаратной реализации. – М.: РАН Ордена Ленина, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, 2005.
4. Левашкина А. О., Поринев С. В. Методы поиска изображений на основе теории визуального внимания: монография. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – 196 с.
5. Гафаров М. Р., Гафаров Р. М. Метод статистической дифференциации для определения сдвига и поворота изображений // Интеллектуальные системы в производстве: научно-практический журнал. – 2013. – № 2 (22). – С. 130–133.

M. R. Gafarov, PhD in Engineering, “Software and hardware systems, Ltd”
R. M. Gafarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU
E. S. Poltanova, Master’s degree student, Kalashnikov ISTU

Determination of geometrical images parameters using statistical differentiation

This paper describes the method of determining the linear image distortions, the main part of which is the transformation of mutual shift, rotation and scale.

Keywords: image transformation, shift, rotation, scale, histogram.

Получено: 10.03.15