

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932

ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

П. В. Бабаян, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой АИТУ РГРТУ им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4041-3101, e-mail: pvbradio@yandex.ru

Е. С. Жгутова, аспирант кафедры АИТУ РГРТУ им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4498-2694, e-mail: kozhina.e.s@rsreu.ru

Рассматривается задача оценивания точности совмещения изображений после компенсации геометрических преобразований. Целью работы являются разработка и общее описание алгоритма оценивания точности совмещения изображений, в котором характеристикой точности является корреляционная матрица параметров геометрических преобразований. Рассмотрены следующие виды преобразований: масштаба, подобия, аффинные, билинейные. Представлены экспериментальные исследования, целью которых было показать, как влияет выбор опорных точек на изображении на точность оценки параметров геометрического преобразования и затем на дальнейшее совмещение изображений. Для этих целей было разработано программное обеспечение, которое позволяет проводить экспериментальные исследования для различных видов преобразований. Полученные результаты можно учитывать при разработке алгоритмов стабилизации или алгоритмов выделения объектов для подвижных датчиков изображений, что позволит уменьшить количество ложных выделений за счет повышения точности совмещения изображений.

Ключевые слова: геометрические преобразования, совмещение изображений, оценка преобразования, евклидовы преобразования, преобразование подобия, аффинные преобразования, билинейные преобразования, корреляционная матрица, оценка точности совмещения изображений.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-110-119

Введение

Сложно представить жизнь человека без использования в своей деятельности систем технического зрения. Техническое зрение заменяет человеческие глаза там, где это необходимо: опасное производство, нанотехнологии, микроэлектроника, медицина и пр. [1]. Из года в год методы и алгоритмы обработки изображений модернизируются, повышается качество их работы, а также появляются новые решения и подходы [2]. Среди множества существующих задач, которые решают системы технического зрения, одной из самых сложных и до сих пор не до конца решенных является задача совмещения изображений, включающая в себя оценку геометрических преобразований [3]. Данная задача актуальна, прежде всего, для систем технического зрения, в которых датчик изображений, с которого принимается кадр, постоянно находится в движении [4]. В связи с этим изображение подвергается различным геометрическим искажениям [5]. Из-за движения при совмещении изображений появляется большое количество ошибок интерпретации изображений, что значительно влияет на эффективность выделения искомых объектов, поэтому качественное решение задачи определения параметров геометрических преобразований изображений является ключевым этапом для их дальнейшего анализа.

Существующие алгоритмы определения параметров геометрических преобразований можно разделить на следующие группы:

– глобальные (корреляционные) методы [6, 7]. Алгоритмы этой группы обрабатывают изображение полностью и сравнивают с заранее выбранным эталоном по заданной критериальной функции. Чем меньше изображение, тем быстрее работает алгоритм. Яркостные или геометрические изменения эталона могут привести к грубым ошибкам, также данные алгоритмы чувствительны к изменениям яркости, шумам. Помимо этого, не рекомендуется использовать глобальные методы для оценки некоторых видов преобразований, которые изменяют изображение неравномерно по всей площади;

– статистические методы [8, 9], среди которых выделяют подходы на базе пороговой обработки, байесовской сегментации, методы наращивания областей. Их работа основана на использовании априорной информации (как и для глобальных методов) о различии статистических свойств фона и объекта. Данные алгоритмы крайне чувствительны к изменению яркости и освещённости;

– локальные (структурные) методы [8, 10], которые, в свою очередь, можно разделить на метод оптического потока и методы оценки геометрических преобразований по опорным элементам (особые точки, опорные участки, многоэталонный алгоритм и пр.). Если говорить про метод оптического потока [11], то он позволяет определить смещение каждой точки изображения. Методами оценки геометрических преобразований по опорным элементам для каждого изображения ищут специальные точки, участки, линии, углы, описывают их окрестности и пытаются найти похожее описание на другом кадре. Методы на основе оптического потока используют все точки изображения, а методы опорных элементов – только определенные. Кроме того, для оптического потока может использоваться и низкоконтрастное изображение, в то время как для опорных элементов нужны ярко выраженные линии, углы, точки и пр.;

– методы машинного обучения и сверточные нейронные сети [12, 13]. Активно развивающаяся в последнее время область обработки изображений. Для работы требуется подготовленная база изображений с типовыми ситуациями. Сложность применения заключается по большей части именно в этом, так как развитие аппаратной составляющей уже позволяет реализовывать эти алгоритмы на ПЛИС;

Алгоритм, описанный в данной статье, основан на использовании опорных элементов [14]. Этот алгоритм распространен в системах технического зрения, работающих в реальном времени, и подробно описан в [3, 14]. В текущей работе в качестве опорных элементов авторы используют точки. После проведенного анализа существующей литературы по данной теме можно сделать вывод, что в данных работах авторы не исследовали оценку точности определения параметров геометрических преобразований.

Теоретическая часть

Совмещение изображений состоит из нескольких этапов, первый из которых – непосредственно определение численных параметров преобразования. Для каждого из рассматриваемых в статье геометрических преобразований существуют аналитические выражения, которые связывают координаты точек текущего и исходного изображений, и эти выражения применяются для составления системы уравнений для поиска их параметров. После этого параметры преобразования применяются к текущему кадру.

Ниже представлены этапы решения задачи оценки параметров геометрических преобразований:

1. Имеется математическая модель преобразования, связывающая координаты (x'_i и y'_i) точки текущего изображения и исходного (x_i и y_i). Здесь и далее i – порядковый номер опорной точки изображения, $i = \overline{1, N}$, где N – общее количество опорных точек. Параметры преобразования из математической модели образуют вектор $\mathbf{U}$, размер которого зависит от выбранного преобразования.

2. Координаты точек текущего изображения образуют вектор $\mathbf{Z}$, а координаты точек исходного изображения – матрицу $\mathbf{H}$.

3. Необходимо решить систему уравнений $\mathbf{H} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{Z}$, чтобы найти параметры вектора $\mathbf{U}$ [15]. Данное решение имеет вид:

– обозначим через $\hat{\mathbf{U}}$ оценку вектора $\mathbf{U}$. $\hat{\mathbf{U}}$ в соответствии с [15] можно найти из следующей формулы: $\hat{\mathbf{U}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Z}$.

– анализ точности сводится к определению математического ожидания $M[\hat{\mathbf{U}}] = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T M[\mathbf{Z}]$, вектора оценки $\hat{\mathbf{U}}$ и ее корреляционной матрицы $\mathbf{K}_U = M[(\hat{\mathbf{U}} - M[\hat{\mathbf{U}}]) \cdot (\hat{\mathbf{U}} - M[\hat{\mathbf{U}}])^T]$.

– выполняем следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_U &= M[(\hat{\mathbf{U}} - M[\hat{\mathbf{U}}]) \cdot (\hat{\mathbf{U}} - M[\hat{\mathbf{U}}])^T] = \\ &= M[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Z} - (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T M[\mathbf{Z}]) \cdot ((\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Z} - (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T M[\mathbf{Z}])^T] = \\ &= M[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{Z} - M[\mathbf{Z}]) \cdot ((\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{Z} - M[\mathbf{Z}]))^T] = \\ &= M[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{Z} - M[\mathbf{Z}]) \cdot (\mathbf{Z} - M[\mathbf{Z}])^T \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}] = \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T M[(\mathbf{Z} - M[\mathbf{Z}]) \cdot (\mathbf{Z} - M[\mathbf{Z}])^T] \cdot \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} = \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{K}_Z \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}. \end{aligned}$$

4. Если дисперсии определения координат опорных точек некоррелированы и равны, то выражение для определения корреляционной матрицы $\mathbf{K}_U$ выглядит следующим образом:

$$\mathbf{K}_U = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \cdot \sigma_z^2 = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \cdot \sigma_z^2,$$

где σ_z^2 – дисперсия оценки координат выбранных точек на изображении.

Чтобы оценить качество совмещения изображений в каждой его точке необходимо определить корреляционную матрицу для текущих координат (x'_i и y'_i). Для каждого преобразования промежуточные расчеты будут разными, но в конечном итоге корреляционная матрица $\mathbf{K}_Z$ будет иметь размер 2x2 и содержать значение дисперсии по каждой координате изображения (Dx , Dy) как по x так и по y , а также величину корреляции между ними (Kxy).

$$\mathbf{K}_Z = \begin{bmatrix} Dx & Kxy \\ Kxy & Dy \end{bmatrix}.$$

В общем виде вектор $\mathbf{Z}$ представлен ниже:

$$\mathbf{Z} = [x'_1 \quad y'_1 \quad \dots \quad x'_i \quad y'_i]$$

где x'_1 и y'_1 – координаты первой опорной точки на изображении, x'_i и y'_i – координаты i опорной точки на изображении.

Рассмотрим вид ковариационных матриц, а также векторов $\mathbf{U}$ и матриц $\mathbf{H}$ для различных видов геометрических преобразований.

Для преобразования масштаба, являющегося частным случаем аффинного преобразования, описываемого выражением:

$$\begin{aligned} x'_i &= \lambda \cdot x_i; \\ y'_i &= \lambda \cdot y_i, \end{aligned} \quad \mathbf{U} = [\lambda], \quad \mathbf{H} = [x_1 \quad y_1 \quad \dots \quad x_i \quad y_i]^T,$$

где x'_i и y'_i – координаты опорных точек текущего изображения, т.е. преобразованного, x_i и y_i – координаты опорных точек исходного изображения, λ – параметр, отвечающий за изменение масштаба (если значение больше 1, то изображение приближается, если меньше, то отдаляется).

Корреляционная матрица [16] определяется следующим образом:

$$\mathbf{K}_U = \frac{1}{\sum (x_i^2 + y_i^2)} \cdot \sigma_z^2.$$

Преобразование подобия описывается выражением:

$$\begin{aligned} x'_i &= \lambda \cdot \cos \varphi \cdot x_i + \lambda \cdot \sin \varphi \cdot y_i + \alpha; \\ y'_i &= -\lambda \cdot \sin \varphi \cdot x_i + \lambda \cdot \cos \varphi \cdot y_i + \beta, \end{aligned} \quad \mathbf{U} = [a \quad b \quad \alpha \quad \beta]^T, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & \cdots & x_i & y_i \\ y_1 & -x_1 & \cdots & y_i & -x_i \\ 1 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где φ – параметр, отвечающий за изменение угла на изображении, α и β – параметры смещения.

Корреляционную матрицу [17] можно найти с помощью выражения:

$$\mathbf{K}_U = \sigma_z^2 \cdot \text{diag}\left(\frac{1}{\sum (x_i^2 + y_i^2)}, \frac{1}{\sum (x_i^2 + y_i^2)}, \frac{1}{N}, \frac{1}{N}\right).$$

Для аффинного преобразования связь между координатами определяется из выражения:

$$\begin{aligned} x'_i &= a \cdot x_i + b \cdot y_i + \alpha; \\ y'_i &= c \cdot x_i + d \cdot y_i + \beta, \end{aligned} \quad \mathbf{U} = [a \quad b \quad \alpha \quad c \quad d \quad \beta]^T, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & 1 \end{bmatrix}.$$

где a, b, c, d – параметры, показывающие деформации изображения.

Корреляционная матрица [18] для данного преобразования представлена ниже:

$$\mathbf{K}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \vdots & \mathbf{O} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ \mathbf{O} & \vdots & \mathbf{T} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \sigma_z^2,$$

где $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \cdot \sum y_i & \sum x_i \\ \sum x_i \cdot \sum y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & N \end{bmatrix}$, $\mathbf{O}$ – нулевая матрица размером 3x3.

Для описания билинейного преобразования воспользуемся выражением:

$$x'_i = a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i y_i + a_4;$$

$$y'_i = b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i y_i + b_4,$$

$$\mathbf{U} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4]^T, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_1 y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & x_i y_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & x_i y_i & 1 \end{bmatrix}.$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ – коэффициенты преобразования.

Корреляционная матрица имеет следующий вид:

$$\mathbf{K}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \vdots & \mathbf{O} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ \mathbf{O} & \vdots & \mathbf{T} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \sigma_z^2,$$

где $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum x_i y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i^2 y_i & \sum x_i y_i^2 & \sum x_i^2 y_i^2 & \sum x_i y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum x_i y_i & N \end{bmatrix}$, $\mathbf{O}$ – нулевая матрица размером 4x4.

Следует отметить, что несмотря на то, что преобразования подобия и масштаба являются частными случаями аффинного преобразования, корреляционные матрицы $\mathbf{K}_U$ для них не являются частными случаями соответствующей корреляционной матрицы аффинного преобразования.

Таким образом, важнейшим фактором, влияющим на точность совмещения изображений, является размещение опорных элементов. Характер этого влияния будет проанализирован в следующем разделе.

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований использовалось стандартное изображение «cameraman.tiff» размером 256×256 (рисунок 1). К исходному изображению искусственно были применены преобразования: масштаба, подобия, аффинные и билинейные.

Цель проведения экспериментальных исследований – выявить зависимость точности совмещения изображений от расположения опорных точек на изображении.



Рисунок 1 – Исходное изображение

Figure 1 – Original image

Эксперимент проводился для двух вариантов выбора опорных точек, по которым оценивалось преобразование в кадре. Первый вариант (рисунок 2, а) жестко ограничивает зону выбора опорных точек, их выбор возможен только в центре изображения. Второй вариант (рисунок 2, б) не ограничивает зону выбора точек, и они могут располагаться по всему изображению.

Для каждого эксперимента приведены корреляционные матрицы и гистограммы дисперсии координат (Dx , Dy) в каждой точке изображения (рисунки 3-6).

Корреляционные матрицы для каждого эксперимента представлены ниже:

Первый вариант выбора опорных точек для каждого преобразования:

1) Масштаб $\mathbf{K}_U = 3.0486 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_z^2$,

2) Подобие $\mathbf{K}_U = \text{diag}(6.9850 \cdot 10^{-4}, 6.9850 \cdot 10^{-4}, 21.7877, 21.7877) \cdot \sigma_z^2$,

3) Аффинное $\mathbf{K}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \vdots & \mathbf{O} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{O} & \vdots & \mathbf{T} \end{bmatrix} \cdot \sigma_z^2$, где $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 5.4084 \cdot 10^{-4} & 3.2048 \cdot 10^{-4} & 0.0573 \\ 3.2048 \cdot 10^{-4} & 0.0011 & 0.0347 \\ 0.0573 & 0.0347 & 11.3260 \end{bmatrix}$, а

$\mathbf{O}$ – нулевая матрица размером 3×3.

4) Билинейное $\mathbf{K}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \vdots & \mathbf{O} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{O} & \vdots & \mathbf{T} \end{bmatrix} \cdot \sigma_z^2$, где

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.0620 & 0.0650 & 4.8860 \cdot 10^{-4} & 8.2318 \\ 0.0650 & 0.0700 & 5.1961 \cdot 10^{-4} & 8.7597 \\ 4.8860 \cdot 10^{-4} & 5.1961 \cdot 10^{-4} & 3.8913 \cdot 10^{-6} & 0.0652 \\ 8.2318 & 8.7597 & 0.0652 & 1.1052 \cdot 10^3 \end{bmatrix}, \text{ а } \mathbf{O} - \text{ нулевая матрица размером } 4 \times 4.$$



а (a)



б (b)

Рисунок 2 – Выбор опорных точек на изображении: а – зона выбора точек ограничена, б – выбор точек возможен по всей площади изображения

Figure 2 – Selecting reference points in the image: a – point selection area is limited, b – selection of points is possible over entire image area

Второй вариант выбора опорных точек для каждого преобразования:

1) Масштаб $\mathbf{K}_U = 2.1822 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_z^2$,

2) Подобие $\mathbf{K}_U = \text{diag}(1.4950 \cdot 10^{-5}, 1.4950 \cdot 10^{-5}, 0.7938, 0.7938) \cdot \sigma_z^2$,

3) Аффинное $\mathbf{K}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \vdots & \mathbf{O} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{O} & \vdots & \mathbf{T} \end{bmatrix} \cdot \sigma_z^2$, где $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 3.4111 \cdot 10^{-5} & 6.2296 \cdot 10^{-7} & 0.0052 \\ 6.2296 \cdot 10^{-7} & 4.4818 \cdot 10^{-5} & 0.0089 \\ 0.0052 & 0.0089 & 2.8084 \end{bmatrix}$, а

$\mathbf{O}$ – нулевая матрица размером 3×3 .

4) Билинейное $\mathbf{K}_U = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \vdots & \mathbf{O} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{O} & \vdots & \mathbf{T} \end{bmatrix} \cdot \sigma_z^2$, где

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.0013 & 9.8414 \cdot 10^{-4} & 6.9693 \cdot 10^{-6} & 0.1917 \\ 9.8414 \cdot 10^{-4} & 7.8675 \cdot 10^{-4} & 5.3008 \cdot 10^{-6} & 0.1481 \\ 6.9693 \cdot 10^{-6} & 5.3008 \cdot 10^{-6} & 3.7718 \cdot 10^{-8} & 0.0010 \\ 0.1917 & 0.1481 & 0.0010 & 28.9080 \end{bmatrix}, \text{ а } \mathbf{O} - \text{ нулевая матрица размером } 4 \times 4.$$

Проведенные экспериментальные исследования иллюстрируют характер влияния расположения опорных точек на качество совмещения изображений. По представленным рисункам 3 – 6 видно, что при ограничении зоны выбора точек точность совмещения изображений на порядок ниже (это видно по тому количеству точек, которое откладывается по горизонтальной оси гистограммы). Кроме того, данный вывод подтверждает и вид корреляционных матриц для каждого преобразования. Значения дисперсии координат для второго случая намного меньше, что говорит о том, что и ошибка при совмещении изображений будет меньше.

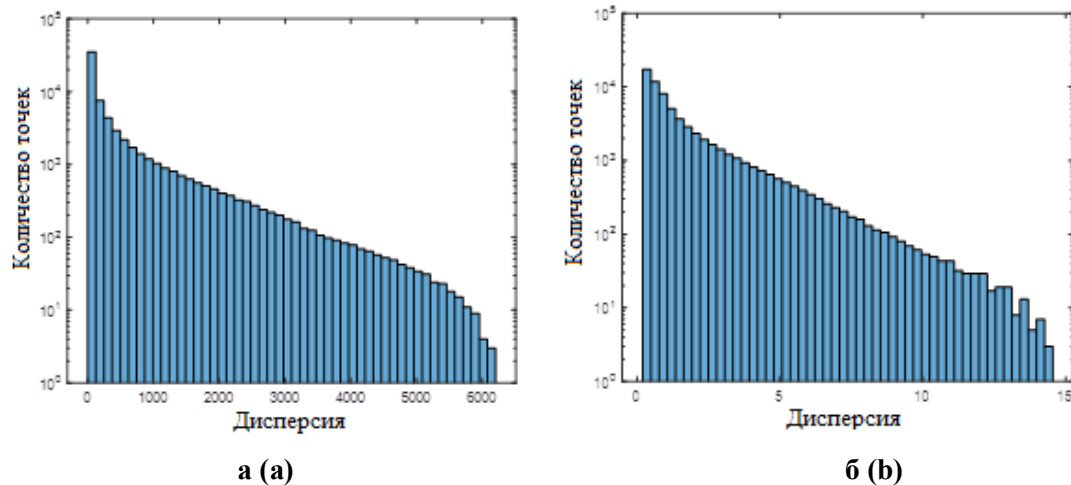


Рисунок 3 – Гистограмма значений дисперсии для изображений при преобразовании масштаба: а – для случая 1; б – для случая 2

**Figure 3 – Histogram of variance values for images during scale conversion:
a – for case 1; b – for case 2**

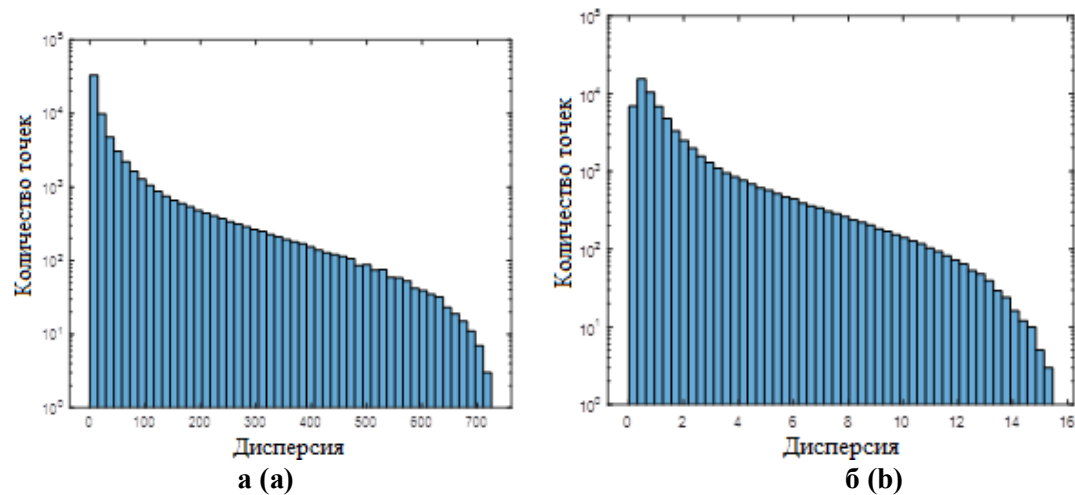


Рисунок 4 – Гистограмма значений дисперсии для изображений при преобразовании подобия: а – для случая 1; б – для случая 2

**Figure 4 – Histogram of variance values for images during similarity transformation:
a – for case 1; b – for case 2**

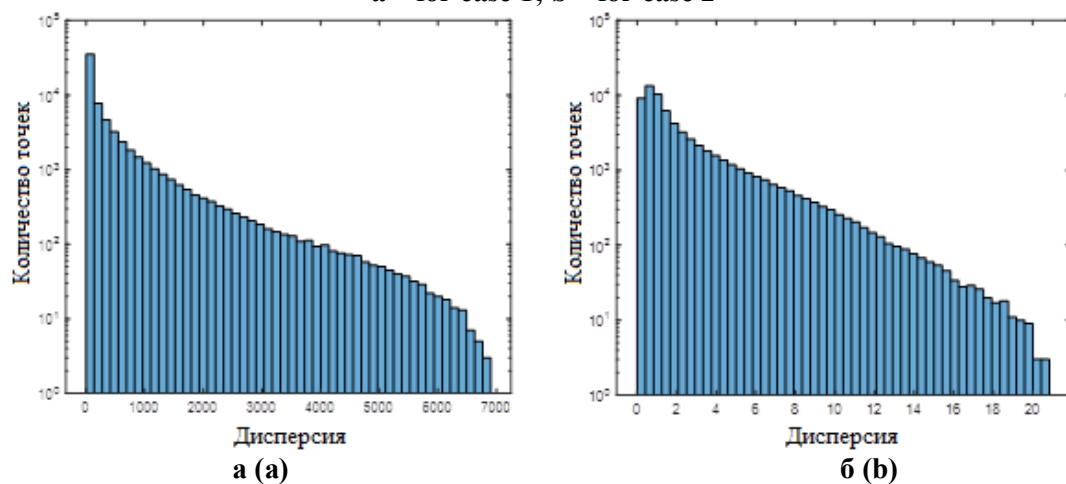


Рисунок 5 – Гистограмма значений дисперсии для изображений при аффинном преобразовании: а – для случая 1; б – для случая 2

**Figure 5 – Histogram of variance values for images with affine transformation:
a – for case 1; b – for case 2**

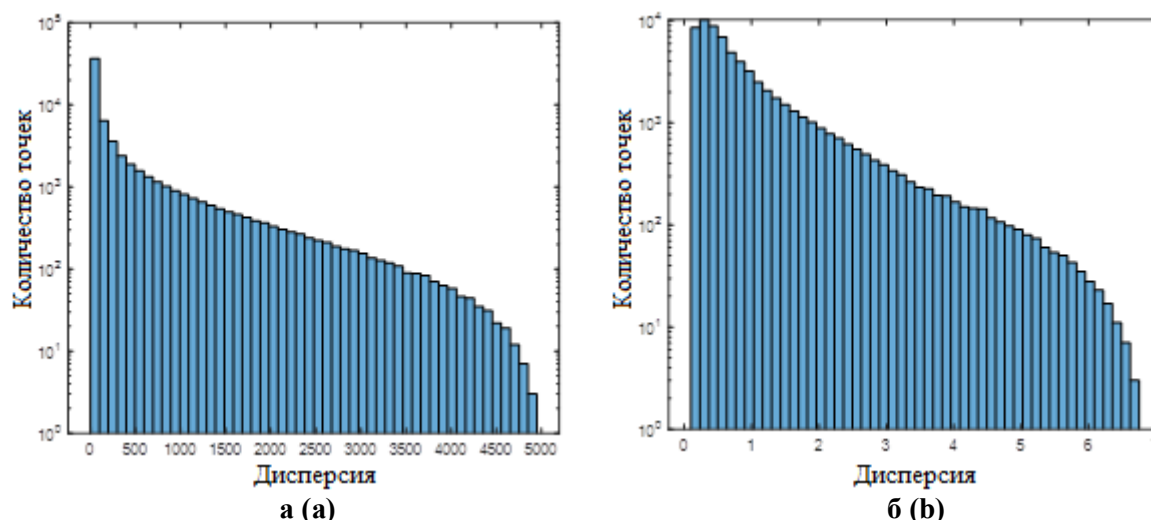


Рисунок 6 – Гистограмма значений дисперсии для изображений при билинейном преобразовании: а – для случая 1; б – для случая 2

Figure 6 – Histogram of variance values for images with bilinear transformation: a – for case 1; b – for case 2

Заключение

Предложен подход к оцениванию точности совмещения изображений, применимый для алгоритмов, основанных на выборе опорных точек. В теоретической части представлен порядок расчета корреляционной матрицы параметров преобразования, а также корреляционной матрицы ошибок совмещения для каждой точки изображения. Проведены сравнительные экспериментальные исследования, показывающие влияние расположения выбранных опорных точек на точность оценивания параметров геометрических преобразований, а также точность совмещения изображений. Результаты работы могут быть использованы при разработке алгоритмов выделения объектов при движущемся датчике изображений, стабилизации изображения.

Библиографический список

1. Хлудов И.В. Компьютерное зрение и его применение в медицине, автономных автомобилях и других областях // Актуальные исследования. 2023. № 30 (160). С. 17-19.
2. Zhang Y.J. Handbook of Image Engineering // Справочник по имиджевой инженерии. Springer, Singapore, 2021. С. 1963.
3. Стротов В.В. Оценивание параметров смещения изображения в задачах выделения движущихся объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 23. С. 30-37.
4. Бабаян П.В., Кожина Е.С. Автоматическое выделение и обнаружение движущихся объектов с использованием видеокамеры с изменяющимся полем зрения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 83. С. 84.
5. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Выделение движущихся объектов в последовательности мультиспектральных изображений при наличии геометрических искажений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 23. С. 42-48.
6. Овчинников А.Ю., Корепанов С.Е. Автоматическое слежение за объектом с использованием корреляционного метода // Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2020. 2020. С. 178-184.
7. He Z., Zhang Z., Jung C. Fast Fourier transform networks for object tracking based on correlation filter // IEEE Access. 2018. Т. 6. С. 6594-6601.
8. Бабаян П.В., Смирнов С.А., Муравьев В.С., Стротов В.В. Обработка изображений в системах обнаружения и сопровождения объектов. Классические методы: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 168 с.
9. Томакова Р.А., Ключникова О.Е., Барыбин Г.С. Алгоритм выбора метода сегментации наращиванием областей для сжатия изображений без потерь // Оптико-электронные приборы и

устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Распознавание-2019. 2019. С. 182-184.

10. **Стротов В.В.** Выбор опорных участков в многоэталонном алгоритме определения параметров геометрических преобразований изображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 2. С. 28.

11. **Щербаков В.В., Гарганеев А.Г., Шакиров И.В.** Алгоритм расчета оптического потока в задачах оценки параметров геометрических преобразований // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-1 (26). С. 265-270.

12. **Полетаева Н.Г.** Классификация систем машинного обучения // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2020. № 1. С. 5-22.

13. **Созыкин А.В.** Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. Т. 6. № 3. С. 28-59.

14. **Корепапов С.Е., Смирнов С.А., Стротов В.В.** Сравнение трех критериев работоспособности многоэталонного алгоритма оценки координат объектов // Цифровая обработка сигналов. 2016. Т. 3. С. 15.

15. **Коршунов Ю.М.** Математические основы кибернетики: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб и доп. М.: Энергоатомиздат. 1987. 496 с.

16. **Babayan P.V., Kozhina (Zhgutova) E.S.** A Study of the Automatic Object Extraction Algorithm on the Image Sequence Under Scaling Transformations // 2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). IEEE, 2023. С. 1-4.

17. **Babayan P., Kozhina (Zhgutova) E.** Accuracy of Image Registration During Similarity Transformation // International Conference on Machine Vision and Augmented Intelligence. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. С. 323-330.

18. **Babayan P.V., Kozhina (Zhgutova) E.S.** Estimation of the Accuracy of Determining the Parameters of Affine Transformations // 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). IEEE, 2024. С. 1-5.

UDC 004.932

ESTIMATION OF GEOMETRIC ACCURACY COMBINING IMAGES

P. V. Babayan, Ph.D. (in technical sciences.), associate professor, Head of the Department, RSREU named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-4041-3101, e-mail: pvbradio@yandex.ru

E. S. Zhgutova, post-graduate student, RSREU named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-4498-2694, e-mail: kozhina.e.s@rsreu.ru

*The paper considers the problem of estimating the accuracy of image alignment after compensation of geometric transformations. **The aim of the work** is to develop and provide a general description of an algorithm for estimating the accuracy of image alignment, in which the accuracy is characterized by a correlation matrix of geometric transformation parameters. The following types of transformations are considered: Euclidean, similarity, affine, bilinear. Experimental studies are presented, the purpose of which was to show how the choice of reference points in an image affects the accuracy of estimating the parameters of geometric transformation and then further alignment of images. For these purposes software has been developed that allows experimental studies for various types of transformations. The results obtained can be taken into account when developing stabilization algorithms or object selection algorithms for mobile image sensors, which will reduce the number of false selections by improving the accuracy of image alignment.*

Keywords: geometric transformations, image alignment, transformation estimation, Euclidean transformations, similarity transformation, affine transformations, bilinear transformations, correlation matrix, image alignment accuracy estimation.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-110-119

References

1. **Hludov I.V.** Komp'yuternoe zrenie i ego primeneniye v medicine, avtonomnykh avtomobilyah i drugih oblastyakh. *Aktual'nye issledovaniya*. 2023, no. 30 (160), pp. 17-19. (in Russian).
2. **Zhang Y.J.** Handbook of Image Engineering. *Spravochnik po imidzhevoj inzhenerii*. Springer, Singapore. 2021, 1963 p.
3. **Strotov V.V.** Ocenivaniye parametrov smeshcheniya izobrazheniya v zadachah vydeleniya dvizhushchihsya ob'ektov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2008, no. 23, pp. 30-37. (in Russian).
4. **Babayan P.V., Kozhina E.S.** Avtomaticheskoe vydelenie i obnaruzhenie dvizhushchihsya ob'ektov s ispol'zovaniem videokamery s izmenyayushchimsya polem zreniya. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023, no. 83, pp. 84. (in Russian).
5. **Alpatov B.A., Babayan P.V.** Vydelenie dvizhushchihsya ob'ektov v posledovatel'nosti mul'tispektral'nykh izobrazhenij pri nalichii geometricheskikh iskazhenij. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2008, no. 23, pp. 42-48. (in Russian).
6. **Ovchinnikov A.Yu., Korepanov S.E.** Avtomaticheskoe slezhenie za ob'ektom s ispol'zovaniem korrelyacionnogo metoda. *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii-STNO-2020*. 2020, pp. 178-184 (in Russian).
7. **He Z., Zhang Z., Jung C.** Fast Fourier transform networks for object tracking based on correlation filter. *IEEE Access*. 2018, vol. 6, pp. 6594-6601.
8. **Babayan P.V., Smirnov S.A., Murav'ev V.S., Strotov V.V.** Obrabotka izobrazhenij v sistemah obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob'ektov. *Klassicheskie metody: ucheb. posobie dlya vuzov*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom. 2024, 168 p. (in Russian).
9. **Tomakova R.A., Klyuchnikova O.E., Barybin G.S.** Algoritmy vybora metoda segmentatsii narashchivaniem oblastey dlya szhatiya izobrazhenij bez poter'. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemah raspoznavaniya obrazov i obrabotki izobrazhenij. Raspoznavanie-2019*. 2019, pp. 182-184. (in Russian).
10. **Strotov V.V.** Vybory opornykh uchastkov v mnogoetalonnom algoritme opredeleniya parametrov geometricheskikh preobrazovaniy izobrazhenij. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2009, no. 2, pp. 28. (in Russian).
11. **Shcherbakov V.V., Garganeev A.G., Shakirov I.V.** Algoritmy rascheta opticheskogo potoka v zadachah ocenki parametrov geometricheskikh preobrazovaniy. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 2012, no. 2-1 (26), pp. 265-270. (in Russian).
12. **Poletaeva N.G.** Klassifikatsiya sistem mashinnogo obucheniya. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*. 2020, no. 1, pp. 5-22. (in Russian).
13. **Sozykin A.V.** Obzor metodov obucheniya glubokikh nejronnykh setej. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika*. 2017, vol. 6, no. 3, pp. 28-59. (in Russian).
14. **Korepanov S.E., Smirnov S.A., Strotov V.V.** Sravnenie trekh kriteriev rabotosposobnosti mnogoeetalonno algoritma ocenki koordinat ob'ektov. *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2016, vol. 3, p. 15. (in Russian).
15. **Korshunov Yu.M.** *Matematicheskie osnovy kibernetiki: ucheb. posobie dlya vuzov*. – 3-e izd., pere-rab i dop. Moscow: Energoatomizdat. 1987. 496 p. (in Russian).
16. **Babayan P.V., Kozhina (Zhgutova) E.S.** Estimation of the Accuracy of Determining the Parameters of Affine Transformations. *2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. IEEE, 2024, pp. 1-5.
17. **Babayan P., Kozhina (Zhgutova) E.** Accuracy of Image Registration During Similarity Transformation. *International Conference on Machine Vision and Augmented Intelligence*. – Singapore: Springer Nature Singapore. 2023, pp. 323-330.
18. **Babayan P.V., Kozhina (Zhgutova) E.S.** A Study of the Automatic Object Extraction Algorithm on the Image Sequence Under Scaling Transformations. *2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. IEEE, 2023, pp. 1-4.