

# Технология сопоставления изображений по критерию согласованности отсчетов фрагментов изображений

В.А. Фурсов<sup>1,2</sup>, А.В. Гаврилов<sup>1</sup>, Е.В. Гошин<sup>1</sup>, К.Г. Пугачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** Рассматривается задача нахождения соответственных точек на разноразмерных изображениях. Задача решается в рамках площадного подхода, основанного на сопоставлении фрагментов изображений в окрестности сопоставляемых точек. Предложен новый критерий соответствия фрагментов изображения, основанный на принципе согласованности оценок. Важным достоинством метода является возможность сопоставления весьма малых фрагментов изображения. Приводятся результаты экспериментов на тестовом изображении «Tsukuba», иллюстрирующие высокую надежность метода сопоставления.

## 1. Введение

Задача сопоставления отсчетов разноразмерных изображений [1] одной сцены является едва ли не самой востребованной в технологиях обработки изображений. Нахождение соответственных точек или шаблонов на различных изображениях одной сцены обычно является важнейшим этапом технологий локализации и распознавания объектов, построения цифровых моделей местности, идентификации моделей систем формирования изображений и др.

Известны, по крайней мере три подхода к решению задачи поиска соответствий: площадной (сопоставляются фрагменты изображений), функциональный (сопоставляются значения точек, краев, областей) и реляционный (используются символические описания изображений). Наиболее широко используется площадной подход. В этом методе фрагмент одного изображения, так называемого шаблона, ищется во втором изображении. Обычно шаблон задается центральным пикселем, поэтому размеры его сторон являются нечетными номерами. Шаблон сравнивается с участками того же размера на втором изображении. Ограниченный участок сравнения обычно называют областью или окном поиска. Для каждой позиции шаблона в области поиска рассчитывается значение критерия подобия. Соответствующей точкой в центре шаблона является точка, в которой достигается максимальные или минимальное значение критерия подобия.

В настоящей работе предлагается и исследуется новый критерий подобия фрагментов, основанный на идее согласованного оценивания, обсуждавшейся в работах [2], [3].

## 2. Постановка задачи

Пусть заданы два дискретных изображения  $F_1$  и  $F_2$ . Зададим, например, на первом изображении фрагмент  $J \times K$  с отсчетами  $F_1(j, k)$ , для центральной точки которого надо найти соответствующую точку на втором изображении ( $J, K$  – нечетные). На втором изображении зададим область поиска  $M \times N$ .

Пусть  $\mathbf{f}_1$  – вектор, полученный некоторой разверткой, например, по столбцам или строкам, отсчетов  $F_1(j, k)$  фрагмента  $J \times K$  первого изображения, а вектор  $\mathbf{f}_2(m, n)$  составлен из такого же числа отсчетов  $F_2(j, k)$  при заданном сдвиге  $(m, n)$  в области поиска второго изображения. Известны следующие критерии соответствия точек.

Нормированный коэффициент корреляции. Точка с координатами  $(m, n)$  в области поиска является соответствующей для точки, в окрестности которой на первом изображении задан фрагмент  $J \times K$ , если

$$(\hat{m}, \hat{n}): Q(\hat{m}, \hat{n}) = \max_{\forall m, n} Q(m, n), \tag{1}$$

где

$$Q(m, n) = \frac{\langle \mathbf{f}_1 \mathbf{f}_2(m, n) \rangle}{\|\mathbf{f}_1\| \|\mathbf{f}_2(m, n)\|},$$

а  $\langle * \rangle$  и  $\|*\|$  – обозначают скалярное произведение и норму векторов  $\mathbf{f}_1$  и  $\mathbf{f}_2(m, n)$ .

Наряду с максимумом нормированного коэффициента корреляции (1) в качестве меры подобия фрагментов часто используют норму разности векторов  $\mathbf{f}_1$  и  $\mathbf{f}_2(m, n)$  ( $L_1$  и/или  $L_2$ ):

$$Q(m, n) = \|\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2(m, n)\|. \tag{2}$$

При этом для определения координат соответствующих точек ищется минимум критерия:

$$(\hat{m}, \hat{n}): Q(\hat{m}, \hat{n}) = \min_{\forall m, n} Q(m, n).$$

Коррелятор (1) (Хоброу, 1950) исторически первый, и до сих пор наиболее популярный, критерий подобия при решении задачи поиска соответствий в рамках площадного подхода. В рамках этого подхода основная проблема – выбор размеров сопоставляемых фрагментов и области поиска. Ясно, чем меньше область поиска, тем меньше вычислительные затраты на сопоставление. Уменьшения области поиска можно добиться путем предварительного совмещения изображений в среднем. При этом размеры области будут определяться различиями локальных сдвигов соответствующих точек по полю изображений. Известно, что различия локальных сдвигов связаны с относительными различиями расстояний различных участков сцены до регистрирующих камер.

Если размеры области поиска определены, важно правильно выбрать размеры сопоставляемых фрагментов. Представляется, что надежность сопоставления точек должна возрастать при увеличении размеров сопоставляемых фрагментов. Однако, вследствие проективных искажений, фрагменты одноименных участков сцены на разноракурсных изображениях могут существенно различаться. Поэтому, с точки зрения инвариантности к проективным искажениям, размер фрагмента должен быть небольшим. Однако при этом возрастает вероятность похожих функций распределения яркости на различных фрагментах (например, на текстурных изображениях).

Поэтому актуальна задача построения новых критериев подобия малых фрагментов, учитывающих более «тонкие» различия функций распределения яркости, чем нормированный

коэффициент корреляции (1) и нормы разностей векторов (2). Далее мы излагаем метод, направленный на преодоление этого недостатка.

### 3. Метод

#### 3.1 Критерий сопоставления

В рамках сформулированной выше задачи рассматриваем два дискретных изображения  $F_1$  и  $F_2$ . На первом изображении задан фрагмент, а на втором – область поиска соответствующего фрагмента. Фрагментам на первом и втором изображениях поставлены в соответствие векторы  $\mathbf{f}_1$  и  $\mathbf{f}_2(m,n)$  так как описано выше. Задача состоит в том, чтобы найти центральную точку  $(m,n)$  фрагмента  $J \times K$  в выделенной области поиска  $M \times N$ , соответствующую центральной точке фрагмента тех же размеров на первом изображении.

Для каждого из  $P = M \times N$  векторов  $\mathbf{f}_2(m,n)$  соответствующих различным положениям фрагмента в окне поиска может быть вычислена разность:

$$\Delta \mathbf{f}(m,n) = \mathbf{f}_2(m,n) - \mathbf{f}_1, \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}, \quad L = M \times N \quad (3)$$

Введем в рассмотрение критерий соответствия фрагментов в положении  $(m,n)$ :

$$W(m,n) = \sum_{\substack{i,j=1, \\ i \neq j}}^L \left\| \Delta f_i - \Delta f_j(m,n) \right\|. \quad (4)$$

где  $\Delta f_i$  –  $i$ -я компонента вектора (1), а  $L = J \times K$  число компонент векторов  $\mathbf{f}_1$  и  $\mathbf{f}_2$ . Точка в области поиска, в которой критерий (4) принимает минимальное значение, принимается в качестве соответствующей для точки на первом изображении, в которой был задан фрагмент  $J \times K$ .

$$(\hat{m}, \hat{n}): W(\hat{m}, \hat{n}) = \min_{\forall m,n} W(m,n). \quad (5)$$

Если известны или предварительно определены характеристики ориентирования камер, области поиска могут быть ограничены одним измерением, т.е. непосредственно на эпиполярной линии.

Идея критерия (4) состоит в следующем. Суммирование квадратов разностей компонент сравниваемых векторов во всех возможных парных сочетаниях приводит к существенному увеличению числа слагаемых. Поэтому даже при весьма малых размерах сравниваемых фрагментов, надежность результата оказывается выше. Например, при использовании фрагментов  $5 \times 5$  при обычном попиксельном сравнении выборка состоит из 25 отсчетов. Такая выборка считается малой. При использовании критерия (4) число слагаемых в сравниваемых выборках 300, при этом надежность результата существенно выше, т.к. выполняются требования закона больших чисел [4].

#### 3.2 Алгоритм сопоставления

Опишем более подробно алгоритм сопоставления фрагментов для двух разноразмерных изображений. Алгоритм состоит из трех основных этапов:

- 1) задание параметров алгоритма и подготовка изображений;
- 2) определение соответственных точек по критерию соответствия;
- 3) формирование карты диспарантности (поля относительных сдвигов точек первого и второго изображений).

На первом этапе алгоритма задаются параметры алгоритма: размеры фрагмента  $J \times K$  и области поиска  $M \times N$ . В данном случае мы использовали квадратные фрагменты ( $J = K$ ). При задании параметра  $N$ , характеризующего длину области поиска, учитывается максимально возможная диспарантность пикселей первого и второго изображений. В ситуации, когда в

качестве исходных данных используются ректифицированные изображения, параметр высоты области поиска –  $M$ , обычно, задают равным единице.

На втором этапе алгоритма в окрестности точек первого изображения, для которых будет выполнен поиск соответственных точек на втором изображении, формируется фрагмент. На втором изображении формируется область поиска, в окрестности каждой предполагаемой соответственной точки. В области поиска на втором изображении для каждой точки области формируются фрагменты таких же размеров, как и на первом изображении. В каждом положении окна поиска вычисляется вектор разностей  $\Delta f(m, n)$ . Затем вычисляются критерии соответствия  $W(m, n)$ . Точка с наименьшим значением критерия считается найденной соответственной точкой.

На третьем этапе алгоритма для найденных соответственных точек вычисляются значения относительных смещений координат точек на первом и втором изображениях, из которых и формируется карта диспарантности. Для удобства карта диспарантности представляется в виде функции распределения яркостей по полю изображения, в которой большим относительным сдвигам соответствует большие яркости.

#### 4. Результаты экспериментов

Для проверки эффективности предложенного критерия соответствия использовались тестовые изображения «Tsukuba» из базы [5]. Пара стереоизображений «Tsukuba» и карта диспарантности для рассматриваемой части изображения представлены на рисунке 1. По приведенным изображениям строились карты диспарантности.

В таблице 1 приведены полученные в эксперименте сравнительные характеристики качества построения карт диспарантности, полученных с использованием предложенного метода и с использованием алгоритма Block-Matching библиотеки OpenCV[6], по сравнению с эталонной. Для характеристики качества использовалось значение среднего квадратичного отклонения, которое рассчитывалось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i,j} (I_{i,j}^1 - I_{i,j}^2)^2}, \tag{6}$$

где  $I_{i,j}^1$  – значения яркости пикселей эталонной карты диспарантности,  $I_{i,j}^2$  – соответствующие им значения яркости пикселей вычисленной карты диспарантности,  $i$  и  $j$  – индексы пикселей карты диспарантностей.

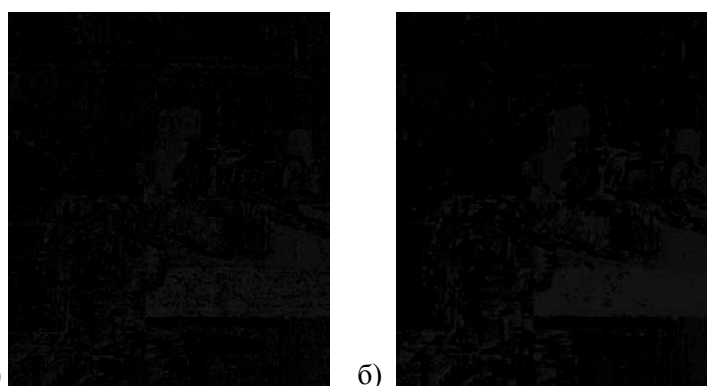
**Таблица 1.** Среднее квадратичное отклонение метода согласованного оценивания.

Размер области поиска	Размер фрагментов	Погрешность
1×51	3×3	34,123468
	5×5	34,048611
1×75	3×3	31,357194
	5×5	31,106150
1×101	3×3	27,349846
	5×5	23,551007
	7×7	22,676893
	9×9	22,432240

По результатам эксперимента видно, что метод согласованного оценивания дает более хорошие результаты. В частности, для метода Block-Matching среднее квадратичное отклонение составило 27,81. На рисунках 2-5 для иллюстрации приведены карты диспарантности, соответствующие параметрам алгоритма указанным в таблице.



**Рисунок 1.** Стереозображения Tsukuba.



а)

б)

**Рисунок 2.** Карты диспаратности при размере области поиска  $1 \times 51$ : а) размер окна поиска  $3 \times 3$ ; б) размер окна поиска  $5 \times 5$ .

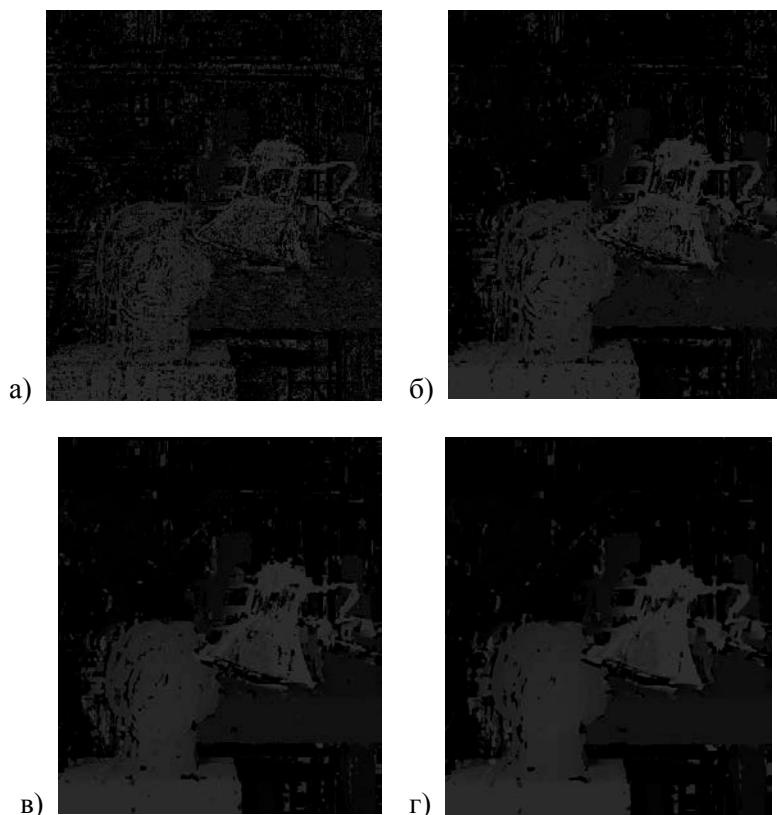


а)

б)

**Рисунок 3.** Карты диспаратности при размере области поиска  $1 \times 75$ : а) размер окна поиска  $3 \times 3$ ; б) размер окна поиска  $5 \times 5$ .

Приведенные результаты показывают, что слишком малый размер области поиска приводит к тому, что алгоритм не может корректно найти соответственные точки для всех точек первого изображения. При увеличении размера области поиска точность алгоритма повышается. Также показано, что слишком маленький размер фрагмента в окрестности искомой точки поиска приводит к большому количеству артефактов. При увеличении размера фрагмента уровень шумов на карте диспаратности снижается, однако наблюдается искажение границ объектов на полученных картах диспаратности.



**Рисунок 4.** Карты диспаратности при размере области поиска  $1 \times 101$ : а) размер окна поиска  $3 \times 3$ ; б) размер окна поиска  $5 \times 5$ ; в) размер окна поиска  $7 \times 7$ ; г) размер окна поиска  $9 \times 9$ .



**Рисунок 5.** Результат вычисления по алгоритму Block-Matching.

### 5. Заключение

Предложен новый критерий подобия фрагментов, основанный на идее согласованного оценивания. Показано, что этот критерий обеспечивает более высокую точность и надежность сопоставления изображений. В частности, минимальное среднее квадратичное отклонение для карт диспаратности, полученных для метода согласованного оценивания составляет 22,43, в то время как для метода Block-Matching среднее квадратичное отклонение равно 27,81. С увеличением размера области поиска точность алгоритма повышается, так как алгоритм может охватить точки, находящиеся на большом расстоянии. Маленький размер фрагмента в окрестности искомой точки поиска приводит к большому количеству артефактов, однако позволяет более точно выделять границы объектов.

## 6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-07-00729 а и 17-29-03112 офи-м).

## 7. Литература

1. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
2. Fursov, V.A. Conforming identification of the fundamental matrix in the image matching problem / V.A. Fursov, A.V. Gavrilov, Ye.V. Goshin, K.G. Pugachev // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 559-563. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-559-563.
3. Гаврилов, А.В. Параллельный алгоритм согласованного оценивания фундаментальной матрицы в задаче сопоставления изображений / А.В. Гаврилов, Е.В. Гошин, К.Г. Пугачев // Труды международной научной конференции «Суперкомпьютерные дни в России 2017». – Москва, 2017 – С. 683-691.
4. Прохоров, Ю.В. Лекции по теории вероятностей и математической статистике: учебник / Ю.В. Прохоров, Л.С. Пономаренко. – М.: Издательство Московского университета, 2012. – 256 с.
5. University of Tsukuba Computer Vision Laboratory Site [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cvlab.cs.tsukuba.ac.jp/dataset/tsukubastereo.php> (11.10.2017).
6. Библиотека обработки изображений OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://opencv.org> (01.10.2017).

# The technology of image matching by the criterion of conformity of image fragments samples

V.A. Fursov<sup>1,2</sup>, A.V. Gavrilov<sup>1</sup>, Ye.V. Goshin<sup>1</sup>, K.G. Pugachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** In this article the problem of finding the corresponding points on different images is considered. The problem is solved in the framework of an area approach, based on the comparison of image fragments in the neighborhood of the points being compared. A new criterion for the correspondence of image fragments is proposed, based on the principle of estimates conformity. An important advantage of the method is the possibility of comparing very small fragments of the image. The results of experiments on the "Tsukuba" test image shows the high reliability of the comparison method.

**Keywords:** image processing, corresponding points, area approach, correspondence criterion, conformity of image fragments.