

Адаптивный алгоритм согласованного сопоставления изображений

В.А. Фурсов^{1,2}, Е.В. Гошин^{1,2}, К.Г. Пугачев¹

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

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В данной работе представлен адаптивный алгоритм согласованного сопоставления изображений, построенный на основе принципа согласованного оценивания. Алгоритм включает в себя несколько основных этапов. На первом этапе определяются соответствующие точки с использованием в качестве меры близости минимального значения функции согласованности. Функция согласованности определяется как сумма квадратов разностей отсчетов на сравниваемых фрагментах во всех возможных парных сочетаниях. Далее реализуется адаптивный алгоритм устранения сбойных точек с подстройкой к текущему значению градиента функции распределения яркости. Важной особенностью алгоритма является определение сбойных точек по критерию максимального значения функции согласованности отсчетов на каждом фрагменте карты диспарантности. Приведены результаты экспериментов, полученные на тестовых изображениях «Cones».

1. Введение

Сопоставление изображений является наиболее важным и сложным этапом в приложениях компьютерного зрения, таких как сшивка изображений, создание трехмерных моделей объектов или сцены по последовательности кадров и т.д. Известны, по крайней мере, три подхода к решению задач сопоставления изображений: площадное (1) сопоставление, признаковое (2) и символьное (3) сопоставление. В рамках площадного подхода [1], который используется в настоящей работе, для фрагментов первого изображения ищут максимально похожий на него фрагмент на втором изображении.

При использовании площадного подхода важную роль играет выбор меры близости сопоставляемых фрагментов. Известно большое число критериев принятия решений близости фрагментов. Наиболее часто используются абсолютные разности, квадраты разностей, сумма абсолютных разностей, сумма квадратов разностей, коэффициент нормализованной перекрестной корреляции, ранговое преобразование и др. Использовались также различные комбинации указанных методов. Краткий обзор по данной теме был приведен в работе [2]. В работе [3] был представлен метод сопоставления изображений, в котором одновременно использовалось несколько мер близости.

При площадном подходе возможно появление большого числа сбойных точек на участках изображений с малым градиентом. В предыдущих наших работах мы предприняли попытку преодолеть эту проблему путем использования нового критерия близости. В частности, в

работах [4, 5] был представлен новый метод сопоставления изображений на основе принципа согласованности отсчетов его фрагментов. Хотя мы получили результаты, сопоставимые, а в некоторых случаях, превышающие, например, метод полуглобального сопоставления, однако в полной мере преодолеть эту проблему не удалось.

Традиционный путь борьбы с шумами – сглаживающая фильтрация изображения, представляющего карту диспаратности. Этот способ позволяет получить внешне привлекательное изображение, однако процедура сглаживания вносит неизбежные искажения также в точки карты диспаратности, которые не подвержены ошибкам. Как следствие, вычисляемые по этим точкам трехмерные координаты сцены также могут содержать ошибки. Поэтому актуальна задача построения процедуры фильтрации карты диспаратности, которая осуществляет «изъятие» сбойных точек и замену их более правдоподобными, не затрагивая точки, верность определения которых не вызывает сомнений.

2. Постановка задачи

В настоящей работе мы развиваем подход, основанный на принципе согласованности отсчетов. Приведем краткое описание этого метода, следуя работам [4, 5]. Пусть F_1 и F_2 – два изображения, полученные при съемке одной сцены с разных ракурсов. Поставим в соответствие каждой точке на первом изображении фрагмент в окрестности этой точки, имеющий размер $K \times L$, K, L – нечетные. В общем случае $K \neq L$.

Фрагмент можно представить в виде вектора \mathbf{f}_1 , полученного путем развертки по строкам или столбцам. Для каждой точки первого изображения на втором изображении зададим область поиска размером $N \times M$, в которой может содержаться фрагмент \mathbf{f}_2 того же размера. Требуется для каждой точки (фрагмента \mathbf{f}_1) первого изображения найти соответствующую ей точку (координаты фрагмента \mathbf{f}_2 , наиболее близкого к \mathbf{f}_1 в смысле заданной меры) на втором изображении в заданной области поиска. Для определенности будем полагать, что размеры сторон фрагментов нечетные, а под областью поиска будем понимать множество точек, в которые могут быть «установлены» центры фрагментов.

Для определения меры близости фрагментов при различных положениях фрагмента \mathbf{f}_2 для каждой точки первого изображения с координатами (k, l) в области поиска размером $N \times M$ на втором изображении вычисляется множество векторов разностей:

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

где N и M – количество строк и столбцов области поиска соответственно. Далее вычисляется так называемая функция близости фрагментов:

$$W(n, m) = \sum_{\substack{i, j=1, \\ i < j}}^S (\Delta f_i(n, m) - \Delta f_j(n, m))^2, \quad (2)$$

где Δf_i – i -я компонента вектора (1), а $S = K \times L$ число компонентов $S \times 1$ -векторов $\Delta \mathbf{f}(n, m)$, $n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}$. Точка (n^*, m^*) на втором изображении, для которой

$$W(n^*, m^*) = \min_{\forall n, m} W(n, m) \quad (3)$$

считается соответствующей для точки (k, l) на первом изображении.

Этот критерий принятия решений мы использовали в работах [4, 5] где показали, что его использование дает существенное повышение качества сопоставления. Важной особенностью данного критерия является то, что используются все возможные комбинации разностей отсчетов фрагментов. Это дает богатую информацию о функции распределения яркости на фрагменте, кроме того, значительное увеличение количества слагаемых, обеспечивает высокую надежность метода. Тем не менее, как уже упоминалось выше, на участках изображений с малыми значениями градиента функции распределения яркости возможно появление сбоев в определении соответствий.

Для устранения сбойных точек на изображении, представляющем карту диспарантности, в работах [4, 5] мы применяли медианный фильтр, с помощью которого удавалось в значительной степени «сгладить» изображение. Однако при использовании этого фильтра, все-таки, искажаются и соседние со сбойными точками отсчеты изображения. Поскольку эти отсчеты содержат в себе информацию об относительных высотах, это приводит к ошибкам определения трехмерных координат сцены.

Предлагаемый фильтр, который позволяет преодолеть этот недостаток, строится также на основе принципа согласованности отсчетов. Идея метода состоит в том, чтобы с использованием функции согласованности типа (2) определить координаты сбойной точки и заменить ее значениями ближайших отсчетов. При этом значения отсчетов в соответствующих точках, не подверженных ошибкам, остаются неизменными. Это позволяет избежать ошибок в определении трехмерных координат на участках сопоставляемых изображений с малыми значениями градиента функции яркости.

3. Метод устранения сбойных точек на участках изображений с малым градиентом

Будем строить алгоритм устранения сбойных точек на участках карты диспарантности, соответствующих областям на разноракурсных изображениях с малыми значениями градиента функции распределения яркости. Пусть F_d – изображение, представляющее карту диспарантности. На этом изображении выделим фрагмент с размерами $P \times Q$, P, Q – нечетные, в общем случае $P \neq Q$. Введем в рассмотрение функцию согласованности отсчета в точке (p, q) со всеми остальными отсчетами на этом фрагменте

$$W(p, q) = \sum_{\substack{i=1, P, \\ j=1, Q \\ i \neq p, j \neq q}}^{S-1} (f(p, q) - f(i, j))^2, \quad (4)$$

где $f(p, q)$, $f(i, j)$ – значения отсчетов в точках (p, q) , (i, j) соответственно, а $S = P * Q$.

Пусть теперь определены S функций согласованности (для всех точек фрагмента). Будем искать точку (p^*, q^*) , для которой

$$W(p^*, q^*) = \max_{\forall p, q} W(p, q). \quad (5)$$

Значение отсчета в точке (p^*, q^*) на этом фрагменте мы будем полагать сбойным.

Последнее утверждение опирается на сделанное выше предположение о том, что все точки фрагмента соответствуют областям на исходных изображениях с малыми значениями градиентов. Это предположение опирается на тот факт, что трехмерные координаты элементов, принадлежащих одному объекту, не могут иметь больших различий в соседних точках, т.к. реальные объекты не имеют разрывов в элементах поверхности.

Для устранения сбойного значения отсчета на карте диспарантности отсчет в точке (p^*, q^*) заменяется средним значением вариационного ряда, составленного из всех значений отсчетов на фрагменте. В случае, когда число ошибок на карте диспарантности мало, целесообразно перед заменой отсчета осуществлять проверку степени отличия отсчета в точке (p^*, q^*) от среднего значения вариационного ряда. Если различие невелико и сравнимо с возможными различиями координат поверхности объекта в соседних точках, такая замена может быть нецелесообразной. Ясно, что в любом случае все остальные точки фрагмента останутся неизменными. Следовательно, координаты поверхности объекта могут быть вычислены по отсчетам карты диспарантности точно.

Ясно, что на фрагментах, включающих границы между различными объектами сцены эта процедура работать не будет, т.к. большие значения функции согласованности (4) будут связаны с различиями отсчетов, соответствующих различным объектам. Поэтому перед применением описанного фильтра эти участки изображений должны быть исключены из рассмотрения. Кроме того, описанный фильтр является эффективным, когда число исключаемых сбойных точек невелико.

С учетом сказанного в следующем разделе предлагается многоэтапная технология с адаптацией к особенностям различных участков карты диспарантности, обеспечивающая эффективное устранение сбойных точек.

4. Общая технология формирования карты диспарантности

Технология включает следующие основные этапы.

1. Формирование исходной карты диспарантности методом согласованных оценок.
2. Предварительная обработка, устранение одиночных сбойных точек.
3. Построение бинарного шаблона с выделенными участками границ между объектами.
4. Устранение сбойных точек на участках изображения, соответствующих малым значениям градиентов (на элементах поверхности объекта).

Приведем краткое описание указанных этапов технологии.

Формирование исходной карты диспарантности осуществляется с использованием метода и алгоритма, описанного в работах [4, 5]. Идея этого метода изложена в постановке задачи настоящей статьи.

Предварительная обработка осуществляется с целью устранения одиночных сбойных точек на карте диспарантности. Это необходимо для того, чтобы, по возможности, минимизировать число сбойных точек, что крайне важно для обеспечения эффективности реализации этапа 4. Алгоритм этого этапа реализуется путем двух проходов (по строкам и столбцам) на изображении. В каждой точке изображения проверяется близость значений отсчетов в двух соседних точках и степень их отличия от значения центрального (текущего) отсчета. Если эта степень отличия превышает допустимое значение различий, а различия значений соседних отсчетов меньше заданного порогового, центральный отсчет заменяется полусуммой соседних. Если число сбойных точек остается достаточно большим, описанный алгоритм можно повторить для точек, отстоящих друг от друга на три отсчета (пикселя).

Для построения бинарного шаблона с выделенными участками границ между объектами можно применять различные приемы, которые используют при определении отличий, сходства [6] и сегментации изображений [7]. В настоящей работе мы используем простейший, часто используемый подход, заключающийся в размытии изображения и последующем вычислении поля градиентов. Для размытия используется стандартный медианный фильтр из библиотеки OpenCV, а поле градиентов формируется применением оператора Собеля и последующим контрастированием и бинаризацией.

Завершающий этап устранения сбойных точек на участках изображения, соответствующих малым значениям градиентов реализуется путем обхода всего изображения $P \times Q$ -фрагментами без пересечений. На фрагментах, попавших на выделенные участки поля градиентов, которые соответствуют границам между объектами сцены, описанная в разделе 3 процедура устранения сбойных точек не реализуется. После реализации этапа 4 некоторые скопления сбойных точек могут «превращаться» в одиночные сбойные точки. Поэтому без опасности потери точности можно повторить алгоритм обработки этапа 2.

5. Экспериментальное исследование алгоритма

Описанная технология применялась для формирования карты диспарантности на тестовых изображениях «Cones» [8]. Тестовые изображения представлены на рисунке 1, а) (левое) и б) (правое). Для указанных тестовых изображений с использованием метода и алгоритма, описанного в работе [5], была построена показанная на рисунке 2а карта диспарантности, с использованием размера окна поиска 5×7 и размера области поиска 1×65 соответственно. Средняя яркость карты диспарантности была сделана равной 128. Нетрудно заметить, что на ней содержится большое количество сбойных точек. Большую часть этих сбойных точек, как и следовало ожидать, содержат участки, соответствующие элементам объектов типа плоскость, на которых отсутствуют какие-либо локальные особенности (текстура, рисунки и др.).

На рисунке 2б) приведена та же карта диспарантности после нескольких этапов проходной обработки с целью устранения одиночных сбойных точек, а также двойных и тройных

ошибочных ошибок (этап 2). Также была выполнена обработка больших ошибочных областей. Нетрудно заметить, что на этой карте пока еще сохранилось еще значительное количество сбойных точек. Притом большая часть этих точек содержится на участках, соответствующих малым значениям градиента функции распределения яркости исходных изображений.



Рисунок 1. Тестовые изображения.



Рисунок 2. Полученные карты диспаратности.



Рисунок 3. Итоговые карты диспаратности.

На рисунке 3а приведена карта диспарантности, полученная после устранения сбойных точек алгоритмом, построенным с использованием метода, описанного в разделе 3. Рядом, на рисунке 3б для сравнения приведена карта диспарантности той же сцены, полученная с использованием метода полуглобального сопоставления [9] с использованием алгоритма из открытой библиотеки OpenCV [10], а также эталонная карта диспарантности. Нетрудно заметить, что метод полуглобального сопоставления сглаживает ошибки определения соответствующих точек, однако при этом также сглаживаются границы между различными объектами. Было проведено сравнение точности с помощью сопоставления методом полуглобального сопоставления и предлагаемой технологии. Для обоих методов вычислено среднее квадратичное отклонение по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i,j=1}^{N,M} (I_{i,j}^1 - I_{i,j}^2)^2}$$

по точкам, в которых известно значение диспарантности. Так, значение ошибки для предложенного метода до обработки составило 5.22, после обработки она уменьшилась до 3.98. В то же время для метода полуглобального сопоставления ошибка была равна 4.00. Таким образом, предложенный метод обработки позволяет значительно сократить количество ошибок в карте диспарантности.

6. Заключение

Предложен новый метод и алгоритм устранения сбойных точек на участках изображений с малыми значениями градиента функции распределения яркости. Важной особенностью алгоритма является то, что при обработке заменяется только сбойная точка, а остальные отсчеты не подвергаются изменениям. Это свойство оказывается весьма полезным при формировании карты диспарантности, от точности отсчетов которой напрямую зависит точность определения трехмерных координат сцены. Построена, включающая этот алгоритм, технология формирования карты диспарантности, обеспечивающая высокую точность сопоставления.

7. Литература

- [1] Гук, А. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэроснимках лесных массивов / А.П. Гук, М.А. Алтынцев // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). – 2017. – Т. 22, № 4.
- [2] Rostam, A.H. Literature Survey on Stereo Vision Disparity Map Algorithms / A.H Rostam, I. Haidi // Journal of Sensors. – 2016. – Vol. 2016. – P. 8742920.
- [3] Pérez-Patricio, M. A Fuzzy Logic Approach for Stereo Matching Suited for Real-Time / M. Pérez-Patricio, A. Aguilar-González, J.-L. Camas-Anzueto, M. Arias-Estrada // Proc. Int. J. Comp. App. – 2015. – Vol. 113. – P. 9.
- [4] Фурсов, В.А. Технология сопоставления изображений по критерию согласованности отсчетов фрагментов изображений / В.А. Фурсов, А.В. Гаврилов, Е.В. Гошин, К.Г. Пугачев // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ). – Самара, 2018. – С. 2298-2305.
- [5] Fursov, V.A. The technology of image matching by the criterion of conformity of image fragments samples / V.A. Fursov, A.V. Gavrillov, Ye.V. Goshin, K.G. Pugachev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. – P.10.
- [6] Плотников, Д.Е. Выделение сезонно-однородных областей на основе анализа временных серий спутниковых изображений / Д.Е. Плотников, П.А. Колбудаев, С.А. Барталёв // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 447-456. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-447-456.
- [7] Лебедев, М.А. Выделение отличий на изображениях с помощью референтных EMD-фильтров / М.А. Лебедев, А.Ю. Рубис, Ю.В. Визильтер, О.В. Выголов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 291-296. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-291-296.

- [8] Middlebury Stereo Datasets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/> (15.09.2018).
- [9] Hirschmüller, H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information // CVPR. – 2008. – Vol. 30(2). – P. 328-341.
- [10] Библиотека обработки изображений OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://opencv.org> (15.09.2018).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (проект № 2.891.2017) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-29-03112 офи-м).

Adaptive algorithm of conforming image matching

К.Г. Pugachev¹, Ye.V. Goshin^{1,2}, V.A. Fursov^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

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

Abstract. This paper presents an adaptive image matching algorithm based on the principle of estimations conformity. The algorithm consists of several basic steps. At the first stage, the corresponding points are determined using the minimum value of the conformity function as a measure of similarity. The conformity function is defined as the sum of the squares of sample differences for all possible pair combinations on the compared fragments. Next, an adaptive algorithm for wrong estimated points elimination is implemented with considering of the current value of the brightness distribution function gradient. An important feature of the algorithm is the determination of wrong points by the criterion of the maximum value of the sample conformity function on each fragment of the disparity map. The results of experiments obtained on the test images "Cones" are given.