

# Алгоритм поиска областей резкости на стереоизображениях

А. Афанасьева, А. Игнатенко

Факультет вычислительной математики и кибернетики

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

{afedorova, ignatenko}@graphics.cs.msu.ru

## Аннотация

Ряд современных исследований в области человеко-машинного интерфейса посвящен улучшению восприятия оператором информации в стереопотоке. Для повышения удобства работы со стереоданными разрабатываются системы дополненной реальности, позволяющие получать дополнительную информацию о рассматриваемых объектах в реальном времени и в удобном для них виде. Подобные системы предполагают разработку человеко-машинного интерфейса как системы инструментов, работающих со стереоданными и экспортирующими в систему набор некоторой информации, полезной для восприятия. Для получения информации данные инструменты, как правило, нуждаются в специальных алгоритмах, заточенных под работу со стереоизображениями. В работе рассматривается один из возможных алгоритмов для инструмента поиска областей резкости в стереоизображении. Цель работы – разработка надежного алгоритма поиска областей резкости на стереоизображении, учитывающего особенности восприятия человеком стереоданных, обладающего высокой скоростью, потенциально пригодного для работы в режиме реального времени. Предложенный алгоритм использует ранее изученные методы для измерения резкости моноизображений, а также, в отличие от многих других работ на эту тему, учитывает особенности человеческого восприятия стереоданных для поиска областей резкости на обоих изображениях стереопары. Разработанный алгоритм может применяться к ряду стереоизображений, обладающих относительной детализированностью и определенной степенью сходства. Реализация алгоритма позволяет использовать его для разработки инструмента для работы в дополненной реальности и дальнейшей интеграции его в систему человеко-машинного интерфейса.

**Ключевые слова:** дополненная реальность, стереопоток, стереоизображение, области резкости, метрика резкости, стереосоответствие, диспаратитет.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ввиду сложности восприятия человеческим глазом некоторых объектов для более детального изучения их подвергают съемке со стереокамер, поскольку стерео облегчает восприятие глубины данных объектов. В настоящее время активно развиваются технологии работы со стереоданными в дополненной реальности. Оператор, работающий со стерео, получает стереоизображение в совокупности с некоторой информацией, облегчающей восприятие объекта и навигацию по нему. Для работы со стереоданными в режиме дополненного стереопотока требуется особый интерфейс, улучшающий качество восприятия оператором стереоданных. Среди набора инструментов, образующих данный интерфейс, особое место

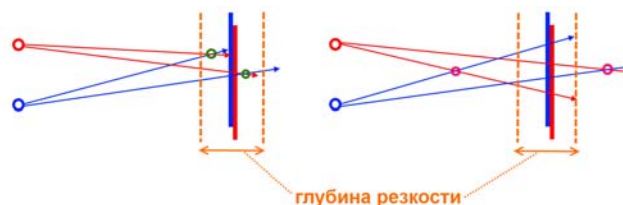
занимает инструмент выделения областей резкости на стереоизображении. Обладая данным инструментом, оператор может контролировать текущее состояние фокуса, рассматривая объект с разных сторон. Инструмент нахождения областей резкости облегчил бы работу оператора по взаимодействию с аппаратным обеспечением, поскольку результаты алгоритма нахождения областей резкости можно интерпретировать соответствующим образом для указаний по фокусировке (установке) для подвижки камер, с которых рассматривается объект.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ТРЕБОВАНИЯ К АЛГОРИТМУ

Алгоритм нахождения областей резкости предполагается использовать в системе человеко-машинного интерфейса для работы со стереопотоком в режиме реального времени. Поэтому важным требованием к алгоритму является высокая скорость работы. Первостепенным требованием также является достаточная точность результатов. Главным критерием качества будет считаться соответствие полученного результата восприятию человеческого глаза. На вход алгоритму подается стереопара, на выходе необходимо выделить пиксели на каждом изображении, которые оператор, работающий с объектом в стерео, воспримет в резкости.

## 3. ВОСПРИЯТИЕ РЕЗКОСТИ В СТЕРЕО

Главная проблема восприятия стереоизображения заключается в том, что, в отличие от моноизображения, человек воспринимает объект сразу с двух изображений. Предположим, объект визуально расположен в плоскости экрана. При рассмотрении схемы восприятия объекта со стереомонитора можно убедиться в том, что наиболее комфортно для глаза будут восприниматься пиксели изображения с относительно небольшим диспаратитетом.



**Рис. 1.** Слева – допустимые для резкости соответствия, справа – соответствия, некомфортные для глаза (красным и синим – показаны левое и правое изображения)

В дальнейшем будем отталкиваться от того предположения, что точка объект воспринимается в стерео наилучшим образом, если выполняются два условия:

- 1) соответствующий пиксель находится в резкости на каждом изображении стереопары;
- 2) соответствующий пиксель обладает относительно небольшим диспаратитом, приемлимым для восприятия человеческим глазом.

Только в совокупности оба этих условия обеспечат резкость области и комфортное ее восприятие на стереоизображении. Алгоритм, реализующий нахождение областей резкости на изображении, обязан выдавать области, пиксели которых удовлетворяют обоим поставленным условиям.

#### 4. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Для поиска диспаратита пикселей изображения требуется решать задачу поиска стереосоответствий. Методы поиска стереосоответствий условно подразделяются на две категории: *локальные*, рассматривающие некоторую окрестность пикселя, и *глобальные*. К локальным методам относятся корреляционные методы, при которых соответствия ищутся при помощи корреляционных окон, а также методы, основанные на использовании локальных особенностей изображения (так называемых ключевых точек). В статье [5] представлен метод классической корреляции, усовершенствованный для качественной работы с границами внутри изображения. Авторы [12] используют так называемые двунаправленные стереосопоставления для более точного результата. Итеративные методы вычисления диспаратита на основе использования корреляционного окна представлены в статьях [9] и [15]. Авторы [16] используют для нахождения соответствий на изображениях ключевые особенности изображения, инвариантные к аффинным преобразованиям.

Глобальные методы предполагают расчет стереосоответствия для всех пикселей изображения с последующей постобработкой полученной карты диспаратитом с целью уменьшить выбросы диспаратита а также получить более качественные стереосоответствия на границах объектов. Примеры таких методов можно обнаружить, например, в работах [17] и [6]. Некоторые алгоритмы стереосопоставления основаны на использовании алгоритма распространения доверия [18], [14], [10], а также на сегментации изображения для улучшения результатов классической корреляции [7], [10]. К сожалению, применять подобные алгоритмы к решению поставленной задачи неприемлемо ввиду их низкой скорости работы.

Помимо нахождения диспаратита в точках изображения, необходимо также решать задачу поиска областей резкости на отдельных изображениях стереопары. В настоящий момент существует целый ряд методов поиска резкости на моноизображении. Возможно несколько подходов к измерению резкости изображения. Простейший подход основан на использовании общепринятых метрик резкости: оператор Лапласиана [8], [11], [13], модифицированный Лапласиан [11], [8], Тененград [8], абсолютное значение градиента [13], [4]. Данные метрики основаны на измерении отклика границ в каждом пикселе изображения. Некоторые методы используют информацию о границах на изображении, измеряя их толщину и основываясь на ней в выводах о резкости соответствующей области изображения (данные алгоритмы представлены в статьях [17], [18]). Отдельного

рассмотрения заслуживает группа методов, основанных на частотных разложениях изображения и его частей. В работе [1] для измерения резкости изображение разбивается на блоки, и для каждого блока, содержащего количество граничных пикселей выше заданного порога, происходит Двумерное дискретное преобразование Фурье. Более резкие области изображения характеризуются большими коэффициентами при высоких частотах. Основываясь на некоторой метрике, отдающей предпочтение высоким частотам, можно сделать выводы о резкости изображения. Подобный подход ввиду своей простоты и надежности был применен также и в данной работе.

#### 5. ОПИСАНИЕ РЕАЛИЗОВАННОГО АЛГОРИТМА

Разработанный алгоритм состоит из двух этапов, которые будут рассмотрены последовательно:

1. Построение маски резкости для левого изображения стереопары.
2. Поиск областей с низким диспаратитом среди областей резкости, найденных на первом этапе.

##### 5.1. Построение маски резкости

На данном этапе всё изображение разбивается на блоки фиксированного размера. Для каждого блока применяется Быстрое двумерное дискретное преобразование Фурье. Затем из спектра по некоторому порогу также выбрасываются все низкие частоты. Для полученного спектра вычисляется сумма коэффициентов при оставшихся частотах.



Рис. 2. Схема работы с блоком изображения (коэффициенты Фурье-преобразования)

В том случае, если рассчитанное значение полученной величины выше некоторого заданного порога, блок причисляется к фокусному, в противном случае пиксели блока исключаются из дальнейшего рассмотрения. С целью убрать из рассмотрения частоты с низкими значениями коэффициентов также возможна пороговая бинаризация полученного спектра. Таким образом, характеристика блока, используемая для вычисления резкости блока по Фурье-коэффициентам, может быть основана также и на суммировании коэффициентов частот в разложении выше некоторого заданного порога.

Размер области должен быть достаточным для того, чтобы высокие частоты отобразились в разложении именно как высокие. Из этого соображения (а также для уменьшения времени работы) в текущей реализации выбран достаточно большой размер блока.

Описанная процедура используется в качестве предобработки исходных изображений стереопары для отсеивания из рассмотрения размытых областей. Отбор резких блоков позволяет достаточно быстро убрать из рассмотрения области изображений, некомфортные для восприятия оператором.

## 5.2. Поиск областей с низким диспаратетом

### 5.2.1. Базовый алгоритм поиска областей с низким диспаратетом

#### с низким диспаратетом

Для нахождения области изображения с низким диспаратетом расчет диспаратетов пикселей изображения осуществляется на некоторой сетке. Среди точек, для которых был произведен расчет, ищутся точки с диспаратетом по модулю ниже некоторого порога. Среди них выделяются граничные точки, и рассчитывается граница области резкости на левом изображении. Область резкости на правом изображении будет, соответственно, состоять из точек, являющихся стереосоответствиями к точкам на левом изображении, принадлежащем его области резкости.

Для расчета диспаратета в заданной точке применяется классический метод поиска соответствия на основе корреляционного окна с L2-метрикой.

### 5.2.2. Ускоренный алгоритм поиска областей с низким диспаратетом

Для получения более точного результата, т.е. для получения более четких контуров областей резкости, требуется увеличивать размер сетки, что приводит к большому числу вычислений и, соответственно, большому времени работы алгоритма. С целью ускорения расчет производился итеративно на сетках разного размера. Первоначально расчет диспаратета проводится по точкам на крупной сетке (с достаточно большим – 50 - 100 пикселей, в зависимости от размера изображения, шагом). На следующей итерации шаг сетки уменьшался в два раза и производился расчет диспаратета в точках, соседствующих тем, которые обнаружили небольшой (меньше заданного порога) диспаратет на предыдущем шаге. Подобный подход позволил уменьшить количество вычислений. Подобную оптимизацию можно применять лишь в том случае, если надежность вычисления диспаратета достаточно высока. В случае если при расчете диспаратета на грубой сетке будет допущена существенная ошибка, данная ошибка повлечет за собой потерю из рассмотрения области на изображении, или же наоборот, будет рассмотрен ряд лишних точек сетки на следующей итерации.



Рис. 3. Схема работы алгоритма

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Ввиду того, что алгоритм предназначен для работы со стереоизображениями, часть которых находится в резкости, результаты работы целесообразно демонстрировать на стереоизображениях, обладающих низкой диспаратетностью. Пример результата приведен на рисунке ниже. Зеленым выделены точки, ограничивающие область резкости на стереоизображении, синим – непосредственно точки, находящиеся в резкости.

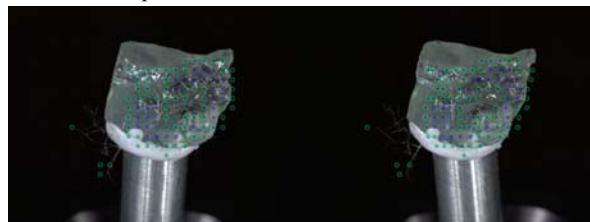


Рис. 4. Результат работы базового алгоритма (шаг сетки 21 пиксель, допустимый диспаратет 7, время работы ~350 мс)

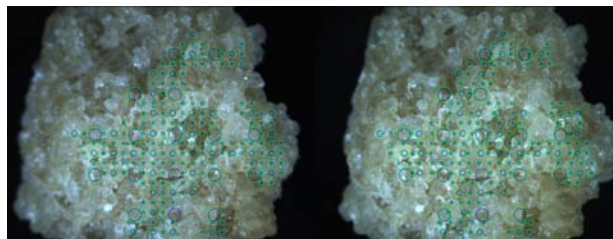


Рис. 5. Результат работы ускоренного варианта алгоритма для 3-х итераций (начальный шаг сетки 80, допустимый диспаратет 7, время работы ~340 мс, время работы базового алгоритма с теми же параметрами – 660 мс)

## 7. ВЕРИФИКАЦИЯ

В процессе тестирования алгоритма на различных стереоизображениях был установлена приблизительная величина диспаратета, при которой человеческий глаз воспринимает стереоизображение (или его область) в резкости. Для изображений разрешения порядка 2500x800 допустимое отклонение диспаратета от нулевого для рассматриваемых изображений составило около 15 – 20. На основе этого вывода была проведена верификация алгоритма. Вначале некоторый набор стереоизображений был размечен вручную (разметка осуществлялась оператором на левом изображении). Затем разработанный алгоритм поиска областей резкости запускался для нескольких значений параметра, задающего максимальный диспаратет.

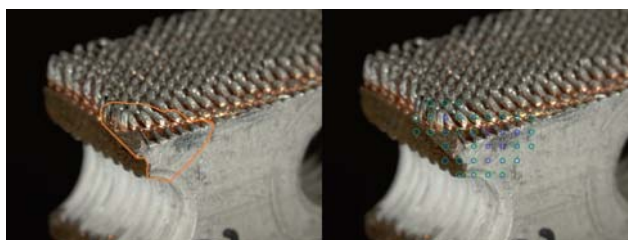


Рис. 6. Ручная разметка резкой области на изображении стереопары (слева) и результат работы алгоритма (справа)

## 8. ВЫВОДЫ

В процессе тестирования алгоритма на различных стереоизображениях были получены устойчивые результаты с хорошо структурированными, равномерно освещенными объектами, обладающими небольшой диспаратностью. Одним из важных требований, определяющих стабильность работы алгоритма, является сходство изображений, которое определяет применимость классического метода корреляционного окна для поиска стереосоответствия.

## 9. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЛАНЫ

Алгоритм выдает неточные результаты в том случае, если левое и правое изображения стереопары обладают большой диспаратностью. Однако увеличение максимального разброса диспаратности может привести к нестабильному результату на стереоизображениях с низкой диспаратностью, поэтому для улучшения качества работы алгоритма на подобных данных потребуются, вероятно, применять другие подходы. В дальнейшей планируется устранить указанные недостатки при помощи использования алгоритма нарастающего окна. Алгоритм также дает крайне нестабильный результат, если левое и правое изображения стереопары по-разному освещены, а также в том случае, если они обладают небольшим количеством деталей. Для подобного рода изображений планируется разработка отдельных алгоритмов поиска соответствий, основанных на учете локальных особенностей изображения. Результирующая маска резкости часто получается достаточно грубой, из-за чего в область резкости могут попасть размытые пиксели с низким диспаратетом. Для устранения этого недостатка планируется улучшение поиска областей резкости на моноизображениях (на первом этапе алгоритма).

## 10. ССЫЛКИ

- [1] Ferzli R., Karam L. J., Caviedes J. A robust image sharpness metric based on kurtosis measurement of wavelet coefficients //Proc. of Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics. – 2005.
- [2] Ferzli R., Karam L.J. A no-reference objective image sharpness metric based on just-noticeable blur and probability summation //Image Processing, 2007. ICIP 2007. IEEE International Conference on. – IEEE, 2007. – Т. 3. – P. III-445-III-448.
- [3] Ferzli R., Karam L.J. A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of just noticeable blur (JNB) //Image Processing, IEEE Transactions on. – 2009. – Т. 18. – №. 4. – P. 717 - 728.
- [4] Groen F. C. A., Young I. T., Ligthart G. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms //Cytometry. – 1985. – Т. 6. – №. 2. – P. 81 - 91.
- [5] Hirschmüller H., Innocent P.R., Garibaldi J. Real-time correlation-based stereo vision with reduced border errors //International Journal of Computer Vision. – 2002. – Т. 47. – № 1 - 3. – P. 229 - 246.
- [6] Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information //Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on. – IEEE, 2005. – Т. 2. – P. 807 - 814.

- [7] Hong L., Chen G. Segment-based stereo matching using graph cuts //Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on. – IEEE, 2004. – Т. 1. – P. I-74-I-81 Vol. 1.
- [8] Huang W., Jing Z. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion //Pattern Recognition Letters. – 2007. – Т. 28. – №. 4. – P. 493 - 500.
- [9] Kanade T., Okutomi M. A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment //Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 1994. – Т. 16. – №. 9. – P. 920 - 932.
- [10] Klaus A., Sormann M., Karner K. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure //Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on. – IEEE, 2006. – Т. 3. – P. 15 - 18.
- [11] Nayar S. K., Nakagawa Y. Shape from focus //Pattern analysis and machine intelligence, IEEE Transactions on. – 1994. – Т. 16. – №. 8. – P. 824 - 831.
- [12] Stefano L. D., Marchionni M., Mattoccia S. A fast area-based stereo matching algorithm //Image and vision computing. – 2004. – Т. 22. – №. 12. – P. 983 - 1005.
- [13] Subbarao M., Choi T. S., Nikzad A. Focusing techniques //Optical Engineering. – 1993. – Т. 32. – №. 11. – P. 2824 - 2836.
- [14] Sun J., Zheng N. N., Shum H. Y. Stereo matching using belief propagation //Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 2003. – Т. 25. – №. 7. – P. 787 - 800.
- [15] Sun J. et al. Symmetric stereo matching for occlusion handling //Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on. – IEEE, 2005. – Т. 2. – P. 399 - 406.
- [16] Tuytelaars T., Van Gool L. J. Wide Baseline Stereo Matching based on Local, Affinely Invariant Regions //BMVC. – 2000. – Т. 412.
- [17] Wang Z.F., Zheng Z.G. A region based stereo matching algorithm using cooperative optimization //Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on. – IEEE, 2008. – P. 1 - 8.
- [18] Yang Q. et al. Stereo matching with color-weighted correlation, hierarchical belief propagation, and occlusion handling //Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 2009. – Т. 31. – № 3. – P. 492 - 504.