

# Отслеживание точечных особенностей в видеопоследовательностях с изменениями резкости

Евгений Лисицин, Антон Конушин, Владимир Вежнев  
Лаборатория Компьютерной Графики и Мультимедиа, Факультет ВМК,  
Московский Государственный Университет им. Ломоносова, Москва, Россия  
{elisitsin, ktosh, vvp}@graphics.cs.msu.ru

## Аннотация

Обнаружение и отслеживание точечных особенностей является одним из ключевых инструментов в области машинного зрения для решения самых разнообразных задач – от калибровки камеры до трехмерной реконструкции. Современные алгоритмы обнаружения и отслеживания точечных особенностей в видеопоследовательностях основываются на предположении, что резкость изображений меняется плавно на протяжении всей последовательности. В то же время в видеопоследовательностях, полученных с помощью ручных видеокамер с системой автоматической подстройки фокусировки, часто присутствуют значительные перепады резкости между соседними кадрами. В таких условиях традиционные методы отслеживания особенностей не способны корректно функционировать. В данной работе предложен оригинальный метод адаптации существующих алгоритмов для работы с входными данными, обладающими описанным выше дефектом.

**Keywords:** Feature Point Tracking, Feature Point Matching, Robust Estimation, Blur Estimation, Rematching, Homography..

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При решении многих задач машинного зрения необходимо установить соответствие между точками различных изображений одной и той же сцены. Однако в общем случае для всех пикселей изображения это невозможно. Поэтому вводится понятие *точечной особенности*  $x'$  изображения, как точки, чья окрестность отличается от окрестностей близлежащих точек по выбранной мере, т.е.

$$\{\forall x : |x' - x| < r \rightarrow \rho(\Omega_x, \Omega_{x'}) > \varepsilon\}, \quad \text{где } \Omega_x -$$

окрестность точки  $x$ , называемая *окном поиска*, а  $\rho(\Omega_x, \Omega_{x'})$  - функция близости окрестностей по некоторой мере. Последовательность положений точечной особенности  $\{x'_i\}, i = \overline{1, n}$ , где  $i$  – номер кадра видеопоследовательности, называется *следом* точечной особенности.

Задача отслеживания точечных особенностей заключается в обнаружении точечных особенностей и построения их следов на видеопоследовательности. Существует два принципиально разных подхода к решению этой задачи. Первый состоит из двух шагов - независимого обнаружения точечных особенностей на каждом кадре, и сопоставления (matching) наборов особенностей для определенных пар кадров (например, для соседних) [3]. Второй подход заключается в обнаружении особенностей на первом кадре

видеопоследовательности и последовательном отслеживании (tracking) изменения положения этих особенностей на всех последующих кадрах [5],[6]

В настоящей работе рассматривается задача отслеживания точечных особенностей в видеопоследовательностях с перепадами резкости. Входные данные этого класса представляют особый интерес по той причине, что перепады резкости часто встречаются на видеопоследовательностях, полученных с помощью ручных видеокамер с автоматической фокусировкой. Существующие методы отслеживания точечных особенностей не справляются с рассмотренным дефектом: происходит разрыв следов точечных особенностей на участке, где меняется резкость изображений.



**Рисунок 1:** Базовое отслеживание точечных особенностей. Изображение справа получено с помощью параллельного переноса и искусственного расфокусирования изображения. Отметим ошибки в определении движения особенностей – они должны быть одинаковыми

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

За последние двадцать лет было разработано множество различных алгоритмов обнаружения точечных особенностей. Самым известным и широко применяемым из них является детектор Харриса [1], обладающий высоким быстродействием и позволяющий находить большое число точечных особенностей. Сопоставление особенностей происходит путем сравнения их окрестностей по выбранной мере, например кросс-корреляции [3]. Зачастую, сразу несколько особенностей на первом изображении оказываются близки по выбранной мере к одной и той же особенности на втором изображении. Поэтому, для определения правильных соответствий применяется робастные методы оценки модели движения точек между изображениями [3],[4]. Те из сопоставлений, которые удовлетворяют модели движения, оставляются, а все признанные выбросами – отбрасываются как ложные. Одним из первых методов отслеживания

перемещения особенностей в видеопоследовательностях стал итеративный алгоритм Lucas-Kanade [5]. В дальнейшем на его основе были созданы методы, позволяющие компенсировать аффинные искажения окрестностей точек (например, при повороте и приближении камеры) [6].

Однако, несмотря на успехи, достигнутые в этой области, проблема определения соответствия точечных особенностей между кадрами со значительно отличающейся резкостью изображения до сих пор не решена. Традиционные методы как сопоставления особенностей между кадрами, так и отслеживания перемещения особенностей не справляются с подобной ситуацией (см. Рис. 1).

### 3. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ

В сопоставлении точечных особенностей между кадрами с различающейся резкостью существуют как минимум две серьезные проблемы:

1. Из-за различия в резкости изображений корректное сопоставление окрестностей особенностей традиционными методами не представляется возможным – меры типа кросс-корреляции [3] или суммы квадратов разностей перестают быть адекватными.
2. Размер окна поиска особенности, обеспечивающий успешную работу алгоритмов обнаружения и сравнения особенностей зависит от степени резкости изображения.

Предлагаемая схема поиска и сопоставления особенностей на кадрах разной резкости решает обе указанные проблемы:

- Для каждого кадра видеопоследовательности производится оценка степени резкости. Чрезмерно размытые кадры исключаются из рассмотрения. В видеопоследовательности выделяются дефектные участки с перепадами резкости.
- Для каждой пары кадров на дефектном участке производится:
  - Предобработка для приведения кадров к одинаковой резкости
  - Обнаружение особенностей с оптимальным для данного уровня резкости размером окна поиска
  - Поиск соответствий между особенностями на предобработанных кадрах
  - Оценка модели движения особенностей между кадрами с применением методов робастной оценки параметров
- На основе оценок моделей движения для каждой пары соседних кадров дефектного участка вычисляются модели движения между кадрами с одинаковой резкостью.
- Производится пересчет соответствий между кадрами с одинаковой резкости, а также между резкими кадрами до и после дефектного участка с учетом ранее полученной оценки модели движения на дефектном участке

В дальнейших разделах более подробно рассматриваются шаги алгоритма.

### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В последние годы было предложено множество различных оценок резкости изображения: на основе частотного анализа [7], вейвлет-анализ [8], анализ отклика функции перепада [9] и др. Исходя из требования вычислительной простоты при достаточном качестве оценки для нашей работы была выбрана методика, описываемая в [10]:

- К изображению применяется фильтр выделения краев. В данной работе используется фильтр Собеля.
- Каждая строка полученного изображения рассматривается как одномерная функция. Находится ее производная и вычисляется среднее расстояние между экстремумами найденной производной.
- Найденное расстояние усредняется для изображения в целом.

Полученное значение является оценкой резкости изображения.

#### 4.1 Зависимость количества найденных особенностей от резкости изображения

Практические исследования показывают, что невозможно применять алгоритмы обнаружения точечных особенностей с одним и тем же размером окна поиска к изображениям с разной резкостью. Необходимо произвести оценку зависимости оптимального размера окна поиска от резкости изображения. В качестве критерия качества обнаружения особенностей используется количество обнаруживаемых особенностей. Этот показатель позволяет дать оценку качества обнаружения в отсутствие априорных данных об изображении.

Для определения оптимального размера окна поиска особенностей было проведено исследование на ряде изображений, суть которого сводится к нахождению зависимости оптимального размера окна от оценки резкости изображения. Было показано наличие существенной зависимости количества находимых особенностей от размера окна поиска для фиксированного изображения (см. рис 2).

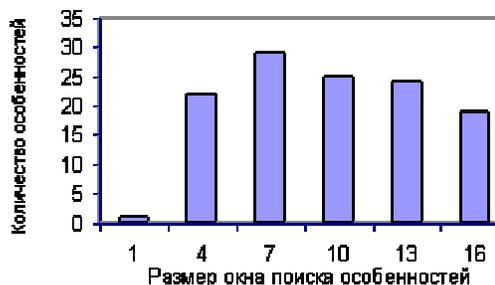


Рисунок 2: Зависимость количества находимых точечных особенностей от размер окна поиска.

Аналогичный эксперимент был проведен для различных значений показателя резкости изображения, в результате чего была выявлена следующая зависимость (см. рис. 4).



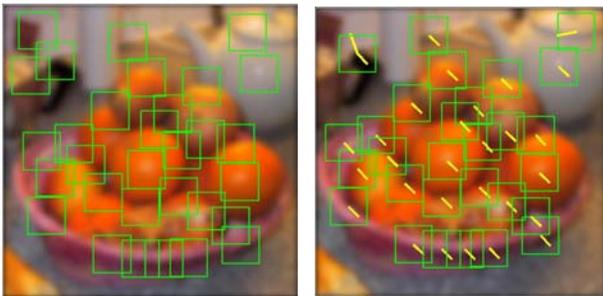
**Рисунок 3:** Зависимость оптимального размера окна поиска от оценки степени нерезкости изображения

Найденная зависимость позволяет сделать два вывода: 1) При большой степени размытости происходит вырождение изображения с точки зрения обнаружения особенностей; 2) зависимость для разумной степени размытости линейная.

#### 4.2 Алгоритм сопоставления особенностей

Как было показано выше, результат применения алгоритмов нахождения точечных особенностей существенно зависит от заданного размера окна поиска. Поэтому при непосредственном применении традиционных методов обнаружения особенностей для изображений с разной резкостью находятся различные наборы точечных особенностей, которые не могут быть корректно сопоставлены. Предлагаемая схема решения указанной проблемы состоит в следующем:

- 1) Производится оценка резкости изображения;
- 2) Более резкое изображение искусственно размывается до уровня менее резкого;
- 3) Исходя из оценки резкости (теперь уже общей для обоих изображений) выбирается оптимальный размер окна для обнаружения и сопоставления особенностей;
- 4) Производится поиск и сопоставление особенностей с выбранным размером окна поиска;



**Рисунок 4:** Модифицированное отслеживание точечных особенностей. Изображение слева подвергается предобработке, находится оптимальный размер окна поиска.

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Все алгоритмы нахождения точечных особенностей в изображениях обладают общим недостатком. Найденные особенности могут не соответствовать ни одной реальной точке сцены, а образовываться, например, из-за наблюдаемого с позиции камеры пересечения двух объектов сцены. Отслеживание таких точек затрудняет или делает невозможным применение любых алгоритмов, использующих отслеживание особенностей в качестве исходных данных, например, определения калибровки камеры или 3-х мерной реконструкции.

Для определения ложных следов на сопоставления особенностей обычно накладывается ограничение, возникающее из условия жесткости сцены при движении камеры. Движение особенностей или сопоставления должны удовлетворять модели движения точек изображения. Если камера перемещается между кадрами, то моделью движения точек является фундаментальная матрица [3], в виде которой записывается эпиполярная геометрия [3]. Если же наблюдается плоская сцена, или камера претерпевает лишь вращательное движение, то моделью движения является перспективное преобразование плоскости – гомография [4]. Как показано, например, в работе [11], если движение камеры от кадра к кадру незначительное по сравнению с расстоянием до наблюдаемых объектов, то для определения ложных соответствий можно использовать гомографию с увеличенным порогом определения выбросов. Поэтому в данной работе в качестве модели движения точек оценивается именно гомография.

#### 5.1 Робастное определение модели движения

Гомография может быть легко вычислена линейным методом из 4 известных соответствий точек, если известно, что все они не являются выбросами. Но в полученных соответствиях выбросы обычно присутствуют, поэтому для оценки моделей движения точек обычно применяют робастные методы оценки, устойчивые к присутствию выбросов. Самым широко известными и применяющимися робастными методами являются RANSAC и его усовершенствования. Как показано в работе [4], M-SAC позволяет получать наилучший результат в отсутствие априорной информации без потери скорости работы.

#### 5.2 Модель движения между произвольной парой изображений в подпоследовательности

Устойчивое сопоставление особенностей возможно только между соседними кадрами. Поэтому установить соответствие между особенностями первого и последнего кадра дефектного участка напрямую невозможно. Однако, если существует оценка модели движения особенностей, то соответствие можно установить с использованием метода пересчета соответствий.

Оценка гомографии в качестве модели движения точек позволяет вычислить модель движения между произвольными кадрами дефектного участка. Если нам известны модели движения точек между соседними кадрами

изображения  $H_{i,i+1} \dots H_{j-1,j}$  то модель движения

$$H_{i,j} = \prod_{k=i}^{j-1} H_{k,k+1}$$

Обычно значительные изменения резкости происходят на коротком участке видеопоследовательности, на котором движение камеры незначительное. Поэтому оценка модели движения с помощью гомографии оказывается достаточно точной.

## 6. ПЕРЕСЧЕТ СООТВЕТСТВИЙ

Задача пересчета соответствий заключается в нахождении соответствий между кадрами с одинаковой резкостью, и соединении следов точечной особенности до и после дефектного участка в единый непрерывный след. Отметим, что при значительных смещениях особенностей внутри дефектного участка корректные соответствия не могут быть установлены традиционным способом, т.к. поиск соответствий производится только в некоторой окрестности вблизи предыдущего положения особенности.

Решить эту проблему можно, используя ранее оцененную модель движения. Для этого, к особенности одного кадра применяется найденная модель и находится оценка положения соответствующей ей особенности на другом кадре. Поиск в окрестности оценки позволяет установить корректные соответствия.



**Рисунок 5:** Обнаружение соответствий между кадрами до и после дефектного участка при вращательном движении камеры. а - игнорируя дефектные кадры, б – используя оценку модели движения внутри дефектного участка.

## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенный алгоритм был реализован на Matlab 6.5 и протестирован на тестовых видеопоследовательностях как синтетических (синтезированных в 3D MAX), так и полученных с обычной видеокамеры. На рис. 4 и в таблице 1 представлены результаты тестирования и сравнения количества правильно найденных соответствий.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен новый алгоритм отслеживания точечных особенностей, позволяющий получить непрерывные следы особенностей в видеопоследовательностях со значительными перепадами резкости. Данное преимущество значительно облегчает применение методов определения положения камеры и реконструкции трехмерной сцены по изображениям. В дальнейшем планируется усовершенствовать алгоритм за счет улучшения метрик оценки резкости изображений и оценки других моделей движения точек между изображениями.

## 9. ССЫЛКИ

- [1] C. Harris, M. Stephens "A Combined Corner and Edge Detector" Proc. 4th Alvey Conference, pp.147-151, 1988
- [2] M.Pollefeys "Obtaining 3D Models With Hand-held Camera", SIGGRAPH Courses, 2001
- [3] Z.Zhang, R.Deriche, O.Faugeras, Q.T.Luong "A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry" AI Journal, vol.78, pp.87-119, 1994
- [4] P.H.S.Torr, A.Zisserman "Robust Computation and Parametrization of Multiple View Relations", ICCV Proc, p.727, 1998
- [5] B.D.Lucas, T.Kanade "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision" International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp 674-679, 1981.
- [6] J.Shi, C.Tomasi "Good Features to Track" CVPR Proc, pp. 593-600, 1994
- [7] P. Vivirito, S. Battiato, S. Curti, M. La Cascia, and R. Pirrone, "Restoration of out of focus images based on circle of confusion estimate", Proceedings of SPIE 47th Annual Meeting. Seattle, WA, USA, 2002
- [8] F.Rooms, A.Pizurica W. Philips "Estimating image blur in the wavelet domain" ACCV Proc. pp.210-215, 2002
- [9] J.Elder, S. Zucker "Local Scale Control for Edge Detection and Blur Estimation" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, no. 7, 699-716, 1998
- [10] S.Zucker, J.Elder "Scale space localization, blur, and contour-based image coding" CVPR Proc. pp.27-34, 1996
- [11] P.H.S.Torr, A.W.Fitzgibbon, A.Zisserman: "Maintaining Multiple Motion Model Hypotheses Through Many Views to Recover Matching and Structure". ICCV Proc, pp. 485-491, 1998

## Об авторах

Евгений Лисицин выпускник ВМК МГУ, аспирант ИПМ им. Келдыша. Его электронный адрес: [elisitsin@graphics.cs.msu.ru](mailto:elisitsin@graphics.cs.msu.ru)  
Антон Конушин выпускник ВМК МГУ, аспирант ИПМ им. Келдыша. Его электронный адрес: [ktosh@graphics.cs.msu.ru](mailto:ktosh@graphics.cs.msu.ru)  
Владимир Вежневцев, к.ф.-м.н. старший научный сотрудник ВМК МГУ. Его электронный адрес: [vvp@graphics.cs.msu.ru](mailto:vvp@graphics.cs.msu.ru)