

# Уточнение сеточной модели трехмерной сцены, предварительно восстановленной по малому количеству характеристических точек

Н.В. Свешникова

Московский физико-технический институт, Москва, Россия

sveshnikova\_n@list.ru

## Аннотация

Предлагается подход, ориентированный на поиск характеристических точек, позволяющий уточнить результаты предварительного восстановления сцены. Дополнительные точки на одном изображении обнаруживаются с помощью детектора Харриса, положение соответствующих им точек на втором кадре, оценивается на основе небольшого известного набора соответствий и уточняется с помощью трекера Канаде-Лукаса.

**Ключевые слова:** Детектор Харриса, трекер Канаде-Лукаса, восстановление трехмерных сцен, стерео с широкой базой.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи восстановления трехмерных сцен можно подразделить на методы, дающие плотное восстановление, например, стандартное стерео [1, 2], и методы, восстанавливающие сцену в виде сетки характеристических точек [3-7]. Последнее более характерно для задач восстановления формы и движения (shape from motion) и стерео с широкой базой. В задачах стандартного стерео обычно предполагается, что оптические оси двух камер и их горизонталь строго параллельны, а их смещение относительно друг друга невелико. Необходимо также задать диапазон для поиска соответствующей точки на втором изображении, причем заниженное значение приводит к неверным результатам, а завышенное существенно замедляет работу алгоритма и также может приводить к неверным результатам за счет ложных соответствий. Для алгоритмов стерео с широкой базой [7] и восстановления формы и движения, например методов факторизации [3-6] требуются характеристические точки и соответствия между ними. Эти подходы в практическом смысле более перспективны, чем классическое стерео, так как большая база съемки и/или значительное количество кадров обеспечивают существенно более высокую точность восстановления и проводят к адекватному восстановлению формы. Кроме того, исходные изображения для этих алгоритмов могут быть получены с помощью типовых, широко распространенных цифровых фотоаппаратов. Первичный результат восстановления может быть получен даже при небольшом количестве точек, однако построенный по ним меш не будет адекватно представлять форму даже для простых сцен.

Тем не менее, первичное восстановление даже малого количества точек предоставляет грубую оценку формы сцены, которая может быть использована для дальнейшего уточнения. Имеющиеся достоверные соответствия становятся своеобразными вехами, вблизи которых можно строить гипотезы о форме сцены.

В [8] предложен инкрементальный алгоритм ограниченного поиска соответствий. Его основная идея состоит в том, чтобы максимально ограничить диапазон поиска соответствующей точки по плоскости изображения. Входными данными алгоритма являются пара изображений, найденные на обоих характеристические точки и небольшое количество установленных соответствий, достаточное для восстановления эпиполярной геометрии. По этим соответствиям вычисляется фундаментальная матрица и выполняется триангуляция Делоне на одном из изображений и переносится на второе. Таким образом, на двух изображениях построены соответствующие треугольники. Далее для каждой характеристической точки одного изображения, соответствие ищется на втором в пределах границ соответствующего треугольника и эпиполярной прямой. Результатом работы алгоритма является большее количество найденных соответствий.

В представленной работе предложен подход, также использующий триангуляцию набора соответствий для ограничения диапазона поиска, но предлагает другую методику поиска соответствующей точки на втором кадре.

## 2. ОПИСАНИЕ ПОДХОДА

Пусть имеется  $F$  цифровых изображений неподвижной сцены ( $F > 5$ ), полученных с обычного фотоаппарата. Пусть также на всей последовательности найдено и прослежено небольшое количество ( $P \sim 10 \div 20$ ) характеристических точек. В простейшем случае точки могут быть определены вручную. Этих исходных данных достаточно для восстановления трехмерных координат характеристических точек сцены  $\mathbf{S} = \{\vec{s}_p\}$  алгоритмами факторизации [5], которые также вычисляют все положения  $\mathbf{t} = \{\vec{t}_f\}$  и ориентации камеры  $\mathbf{R} = \{\vec{t}_f, \vec{j}_f, \vec{k}_f\}$ , ее фокусное расстояние  $g$  и предоставляют оценку точности результата [6]. Выполнив триангуляцию Делоне, получаем первичный результат восстановления, в котором поверхность сцены между известными точками моделируется крупными плоскими участками в соответствии с разбиением на треугольники. Чтобы уточнить модель необходимо найти дополнительные соответствия.

Будем считать, что сцена представляет собой кусочно-гладкую поверхность. Поэтому не зависимо от того, насколько точно триангуляция соответствует реальным поверхностям сцены, в окрестности вершин треугольника ее можно считать достаточно достоверной аппроксимацией поверхности сцены.

Выберем из исходной последовательности изображений кадр  $L$  и найдем на нем характеристические точки с помощью

детектора Харриса [9]. Среди них выберем те, которые удалены от достоверных точек не более чем на пороговое значение  $\mathcal{E}$ .

Для каждой новой выбранной точки строится одна или несколько гипотез ее положения на втором кадре  $R$ . Более подробное описание принципов построения гипотез приведено в следующей секции. Поиск соответствующих точек на кадре  $R$  исходной последовательности производится трекером Канаде-Лукаса [10].

Результаты работы трекера должны удовлетворять ограничениям эпиполярной геометрии, которая вычисляется по известным из результатов факторизации параметрам съемки. Найденная точка  $\vec{x}_R$  на втором кадре не должна быть удалена от эпиполярной прямой

$$\vec{x}_L^T \mathbf{F} \vec{x} = 0$$

более чем на величину погрешности эпиполярной прямой, оценка которой приведена в [11]. Здесь  $\mathbf{F}$  - фундаментальная матрица,  $\vec{x}_L$  положение точки на первом кадре.

Новые достоверные соответствия добавляются к исходному множеству, триангуляция переопределяется. Используя положения и ориентации камер, полученные из алгоритмов факторизации, можно вычислить трехмерные координаты новых точек и дополнить ими исходную трехмерную модель. Или может быть повторен цикл выбора характеристических точек и поиска новых соответствий. Схематично алгоритм изображен на рис. 1.

### 3. ПОСТРОЕНИЕ ГИПОТЕЗ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧКИ НА ВТОРОМ КАДРЕ

В результате триангуляции Делоне изображения сцены разбиваются на множество треугольников, каждому из которых соответствует плоский участок грубой трехмерной модели сцены. Рассмотрим один из участков модели, ограниченный вершинами  $\{\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3\}$ . Предположим, что соответствующий ему участок реальной сцены действительно является плоскостью. Тогда проекции  $\{\vec{u}_{L1}, \vec{u}_{L2}, \vec{u}_{L3}\}$  и  $\{\vec{u}_{R1}, \vec{u}_{R2}, \vec{u}_{R3}\}$  этих точек на плоскости изображений  $L$  и  $R$  соответственно определяют аффинное преобразование, переводящее каждую точку, принадлежащую треугольнику  $\{\vec{u}_{L1}, \vec{u}_{L2}, \vec{u}_{L3}\}$  на кадре  $L$ , в соответствующую ей точку на кадре  $R$ . Строго говоря, преобразование является перспективным, но в предположении не слишком большого треугольника сетки и имея ввиду дальнейшее уточнение трекером Канаде-Лукаса его можно считать аффинным.

Если предположение не верно, и выбранный участок реальной сцены не является плоским, то соответствующие ему точки на паре изображений не будут связаны аффинным преобразованием, однако им можно пользоваться как аппроксимацией в окрестности вершин треугольника.

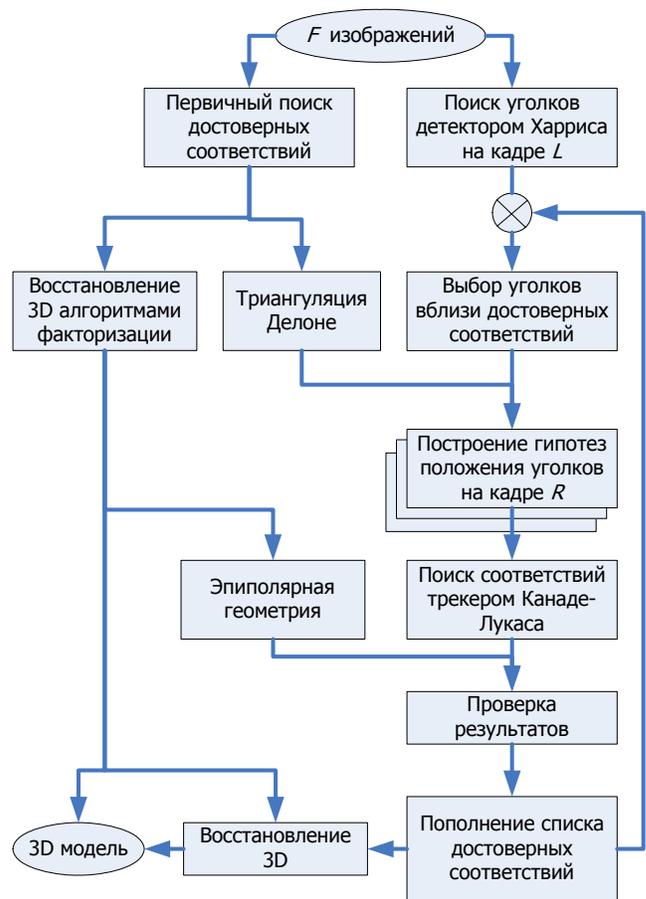


Рисунок 1: Схема системы восстановления 3D.

Таким образом, если на кадре  $L$  выбрана точка  $\vec{x}_L$ , расположенная вблизи достоверной точки  $\vec{u}_{L1}$  и принадлежащая треугольнику  $\{\vec{u}_{L1}, \vec{u}_{L2}, \vec{u}_{L3}\}$ , то положение соответствующей ей точки  $\vec{x}_R$  на кадре  $R$  оценивается выражением  $\mathbf{A}\vec{x}_L$ , где  $\mathbf{A}$  - аффинное преобразование, сопоставляющее вершины треугольников  $\{\vec{u}_{L1}, \vec{u}_{L2}, \vec{u}_{L3}\}$  и  $\{\vec{u}_{R1}, \vec{u}_{R2}, \vec{u}_{R3}\}$ .

Аналогичным образом для той же точки  $\vec{x}_L$  могут быть построены гипотезы, на основе любого треугольника, содержащего точку  $\vec{u}_{L1}$ .

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенный подход тестировался на реальных данных. Результаты проиллюстрированы на примере сцены «Кабинка». На последовательности, состоящей из 9 кадров, вручную выделены 14 характеристических точек (рис. 2, слева). Сцена восстанавливалась итерационным алгоритмом факторизации в перспективной проекции [5, 6]. Для построения сеточной модели по одному из кадров выполнялась триангуляция Делоне, полученные треугольники переносились на трехмерную модель. Не

смотря на простоту формы и расположение точек на углах кабинки, автоматическая процедура триангуляция искажает форму восстановленной сцены. Это хорошо видно на примере вертикального ребра кабинки (рис. 2, справа).

Для уточнения сетки характеристических точек были выбраны два кадра, изображенные на рис. 3. На данном этапе разработки кадры выбирались вручную. Левый кадр использовался для поиска уголков детектором Харриса [9]. Результаты работы алгоритма изображены на рис. 4.

Внутри каждого треугольника (рис. 2) выбирались уголки, удаленные от его вершин на величину не превышающую  $\varepsilon \sim a/3$ , где  $a$  - длина меньшей стороны треугольника, прилегающей к соответствующей вершине. Для каждого уголка, расположенного близи вершины  $\vec{u}_L$ , вычислялись аффинные преобразования, сопоставляющие вершины каждого из треугольников, в которые входит  $\vec{u}_L$ , и на основе них строились гипотезы его положения на правом кадре.

Каждая гипотеза уточнялась трекером Канаде-Лукаса [10].

Результаты работы трекера проверялись с помощью ограничений, накладываемых эпиполярной геометрией. В конечном итоге для выбранных на левом кадре уголков, устанавливались соответствия на правом кадре (рис. 5, слева). Всего было добавлено 22 новых достоверных соответствий.



**Рисунок 2:** Слева: исходные характеристические точки и триангуляция. Справа: первичная трехмерная модель. Вертикальное ребро кабинки в текущей модели потеряно.



**Рисунок 3:** Выбранная пара изображений.

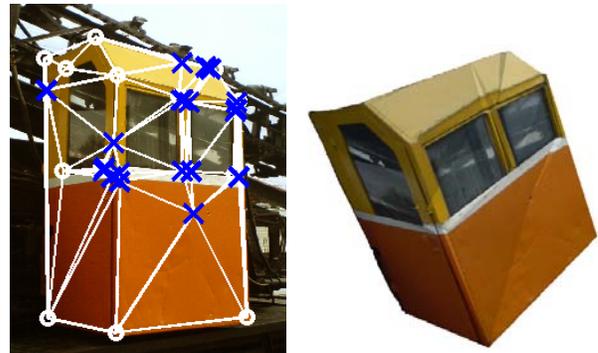
Уточненная трехмерная модель кабинки изображена на рис. 5, справа. Вертикальное ребро теперь восстановлено верно.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе предложен подход, позволяющий уточнить результат восстановления трехмерной сцены по небольшому количеству характеристических точек, прослеженных на последовательности цифровых изображений. Подход основан на обнаружении характеристических точек, моделирующих сцену, и уточняет модель, увеличивая их количество. Не считая предположения, что форма сцены не деформируется за время получения ее изображений, подход не требует специфических условий съемки и априорных знаний о сцене.



**Рисунок 4:** Результат поиска уголков детектором Харриса.



**Рисунок 5:** Слева: Новые уголки (X), успешно прослеженные трекером Канаде-Лукаса, и исходные точки (O). Справа: Уточненная трехмерная модель сцены.

Новые точки на одном из кадров выделяются детектором Харриса, а соответствия на втором кадре ищутся с помощью трекера Канаде-Лукаса. Важной особенностью подхода является отсутствие требования малого смещения кадров относительно друг друга, что позволяет использовать пару кадров с широкой базой и повышает точность восстановления 3D. Требование устранено благодаря использованию модели сцены, полученной при первичном восстановлении, для оценки положения соответствующих точек на втором кадре.

В отличие от [8], предлагаемый подход применяется для уже частично восстановленной сцены, что позволяет задавать на втором кадре не область (полосу) где следует искать вероятные соответствия, а несколько гипотез о точном положении соответствующей точки. В случае сцены имеющей кусочно-гладкую поверхность, одна из этих гипотез может оказаться верной и без уточнения, в этом

случае малая величина найденного смещения будет сигнализировать о вероятном наличии плоскости в сцене и служить дополнительной оценкой точности восстановления.

Подход тестировался на реальных сценах и показал свою работоспособность, однако ряд аспектов требуют дополнительного анализа. В их числе выявление и устранение ложных результатов трекера, удовлетворяющих ограничениям эпиполярной геометрии, альтернативные способы построения гипотез.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 06-01-00789-а, 05-07-90345-в, 05-07-90390-в. Автор выражает благодарность зав. кафедрой СИМ МФТИ д.ф.-м.н., проф. Клименко С.В. и научному руководителю к.ф.-м.н Юрину Д.В. за проявленное к работе внимание и поддержку.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. Kolmogorov and R. Zabih. *Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts*. In *International Conference on Computer Vision, Vancouver, Canada, July 2001*. <http://www.cs.cornell.edu/rdz/Papers/KZ-ICCV01-tr.pdf>.
- [2] Michael H. Lin, Carlo Tomasi. *Surfaces with Occlusions from Layered Stereo*. // *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003*.
- [3] C.J. Poelman, T. Kanade. *A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery*. // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997. –V. 19. –No. 3. –P. 206–218*.
- [4] Peter Sturm, Bill Triggs. *A Factorization Based Algorithm for Multi-Image Projective Structure and Motion: //4th European Conference on Computer Vision, Cambridge, England, April 1996, pp 709-720*.
- [5] Н. В. Свешникова, Д. В. Юрин. *Априорный и апостериорный расчет погрешностей восстановления трехмерных сцен алгоритмами факторизации*. // *Программирование 2004, Т.30, № 5, С. 48-68*.
- [6] N.V. Sveshnikova, D.V. Yurin *The Factorization Algorithms: Results Reliability and Application for the Epipolar Geometry Recovery*. // *In Conference Proceedings. 16-th International Conference on Computer Graphics and Application GraphiCon'2006 July 1–5, 2006 Novosibirsk Akademgorodok, Russia*.
- [7] P. Pritchett, A. Zisserman. *Wide Baseline Stereo Matching*. // *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, Bombay, India, Jan. 1998. –P. 754–760*. <http://www.robots.ox.ac.uk/~7evgg/publications/html/index.html>
- [8] V. Gouet, P. Montesinos and D. Pele. *A fast matching method for color uncalibrated images using differential invariants*. // *In Proceedings of the British Machine Vision Conference, Southampton, 1998*.
- [9] C. G. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector," *In Proc. 4th Alvey Vision Conf., Manchester, pages 147-151, 1988*.
- [10] Carlo Tomasi, Takeo Kanade. *Shape and Motion from Image Streams: a Factorization Method, Part 3, Detection and Tracking of Point Features* // *Technical Report CMU-CS-91-132 / School of*

*Computer Science, Carnegie Mellon University. — April 1991.* [http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub\\_2543.html](http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub_2543.html)

[11] V.A. Kalinichenko, N.V. Sveshnikova, D.V. Yurin *The Epipolar Geometry and its Accuracy from the Results of the Factorization Recovery*. // *In Conference Proceedings. 16-th International Conference on Computer Graphics and Application GraphiCon'2006 July 1–5, 2006 Novosibirsk Akademgorodok, Russia*.

## Об авторах

Свешникова Наталья Владимировна – аспирантка ФФКЭ Московского физико-технического института, кафедра СИМ. E-mail: [sveshnikova\\_n@list.ru](mailto:sveshnikova_n@list.ru)

## Mesh refinement for real 3D scene recovered from small set of feature points

### Abstract

The paper introduces the feature-based method that improves the results of preliminary recovery. Using the Harris corner detector we find additional features at the first image and estimate the corresponding feature positions at the second image using the small set of reliable correspondences. Finally we compute the position of new correspondences more accurately by means of Kanade-Lucas Tracker.

**Keywords:** *Harris corner detector, Kanade-Lucas Tracker, 3D recovery, wide-based stereo.*

### About the authors

Natalya V. Sveshnikova is a Ph.D. student at Moscow Institute of Physics and Technology, Department of Physical and Quantum Electronics, sub-faculty of SIM. Her contact email is [sveshnikova\\_n@list.ru](mailto:sveshnikova_n@list.ru).