

## Автоматический поиск точек схода на мобильных устройствах

Е.В. Мясников<sup>1,2</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.** Точкой схода называется точка в плоскости перспективного изображения, в которой сходятся проекции взаимно параллельных линий трехмерного пространства. Автоматический поиск точек схода на изображениях является достаточно сложной задачей, решение которой на мобильных устройствах без введения дополнительных ограничений в настоящее время не представляется возможным. В настоящей работе для решения указанной задачи предлагается достаточно простой метод, работающий в условиях двух основных ограничений. Одним из таких ограничений является анализ только Манхэттеновских сцен. Другим – наличие акселерометра на мобильном устройстве. Для оценки характеристик предложенного решения выполнено моделирование с использованием хорошо известного открытого набора данных.

### 1. Введение

Точки схода (англ. vantage points) являются одними из важнейших объектов в трехмерном компьютерном зрении. Точки схода представляют собой точки в плоскости перспективного изображения, в которых сходятся проекции взаимно параллельных линий трехмерного пространства. Определение точек схода может быть одним из этапов решения таких задач, как оценка ориентации и положения камеры [1], реконструкция трехмерных сцен [2], и может применяться во множестве связанных с указанными задачами приложений [3,4].

Для поиска точек схода используются изображения с исправленной дисторсией (устраненными геометрическими искажениями). Автоматический поиск точек схода, как правило, выполняется в несколько этапов. На первом этапе производится выделение сегментов линий на изображениях. На втором – разделение линий, соответствующих различным точкам схода, на группы и расчет положения соответствующих точек.

К сожалению, автоматический поиск точек схода является достаточно сложной задачей, решение которой на мобильных устройствах без введения дополнительных ограничений в настоящее время не представляется возможным. В настоящей работе для решения указанной задачи предлагается достаточно простой метод, работающий в условиях двух основных ограничений. Одним из таких ограничений является анализ только Манхэттеновских сцен. Другим – наличие на устройстве акселерометра, позволяющего оценивать вектор силы тяжести. Поиск точек схода на изображениях Манхэттеновских сцен производится с целью нахождения трех точек схода: точек схода вертикальных линий фасадов, а также горизонтальных линий главных и боковых фасадов. При этом точки схода подбираются таким образом, чтобы вектора,

соответствующие найденным точкам схода, были ортогональны. В целом предложенный метод основывается на идее, описанной в работе [5], согласно которой поиск горизонтальных точек схода можно выполнять вдоль линии горизонта, определяемой плоскостью, ортогональной направлению на вертикальную точку схода. Для оценки характеристик предложенного решения выполнено моделирование с использованием хорошо известного открытого набора данных [6-8].

Работа организована следующим образом. В разделе 2 приводится описание разработанного метода поиска точек схода. В разделе 3 описывается методика моделирования, и с использованием открытого набора данных проводятся экспериментальные исследования. Работа завершается заключением и списком используемой литературы.

## 2. Метод

В целом предлагаемый метод состоит в последовательном определении трех точек схода, начиная с точки, соответствующей вертикальным линиям фасадов.

На подготовительном этапе работы метода осуществляется предварительная обработка изображения, включая устранение геометрических искажений (дисторсии). После чего выполняется поиск на изображении фрагментов линий (отрезков). Для этой цели может использоваться преобразование Хафа, однако в настоящей работе используется достаточно простой подход, основанный на трассировке контуров.

Далее положим, что камера моделируется как обычная камера-обскура (см. рис. 1), а начало системы координат совмещено с камерой, причем оси  $Ox$  и  $Oy$  образуют плоскость, параллельную плоскости изображения, а ось  $Oz$  направлена ортогонально к ней. В этом случае связь между координатами точек  $(X, Y, Z)^T$  в указанной системе координат и  $(x, y)^T$  на плоскости изображения выражается в виде:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim K \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

где  $K$  – матрица внутренних параметров камеры, содержащая информацию о фокусном расстоянии, размерах пикселя, наклоне, сдвиге центра изображения относительно оптической оси.

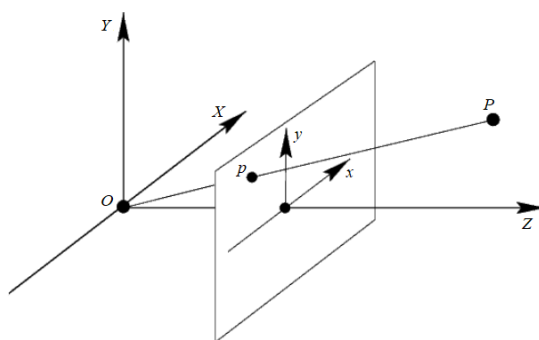


Рисунок 1. Модель камеры и системы координат.

Для нахождения первой точки схода используется информация с датчика силы тяжести мобильного устройства. На этом этапе производится отбор таких сегментов линий, которые хорошо согласуются с вектором силы тяжести. Такой отбор осуществляется путем сравнения угла отклонения каждой линии  $l_i$  от вектора силы тяжести  $g$  с заранее заданным пороговым значением  $t$ :

$$L = \left\{ l_i \mid \arccos \left( \frac{(l_i^2 - l_i^1)^T g}{\|l_i^2 - l_i^1\| \|g\|} \right) < t \right\},$$

где  $l_i^1$  и  $l_i^2$  – координаты концов соответствующего линии  $l_i$  сегмента.

По отобранному множеству линий  $L_l$  определяется положение первой точки схода  $V_l$ , соответствующей вертикальным линиям на изображении. После нахождения первой точки схода все соответствующие ей линии исключаются из дальнейшего рассмотрения:  $L_2=L/L_1$ .

На втором этапе метода производится определение плоскости линии горизонта  $\alpha^h$  в трехмерном пространстве как плоскости, ортогональной к уточненному вектору тяжести (и направлению на первую точку схода) и проходящей через начало координат:

$$V_{11}X + V_{12}Y + V_{13}Z = 0$$

Далее определяется линия горизонта  $\Gamma$  в плоскости изображения как проекция линии, проходящей, например, через точки с координатами:

$$\Gamma^1 = \begin{bmatrix} -1 \\ (V_{11} - V_{13})/V_{12} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \Gamma^2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -(V_{11} + V_{13})/V_{12} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Для поиска второй точки схода  $V_2$  определяются точки пересечения  $p_i$  всех выделенных на изображении линий  $l_i$  из  $L_2$  с линией горизонта  $\Gamma$ :

$$p_i = (x_i, y_i), p_i \in l_i \wedge p_i \in \Gamma,$$

и строится гистограмма  $h$  частот попадания точек пересечения с линией горизонта в сектора, соответствующие различным диапазонам углов в полярной системе координат:

$$h_n = \sum_i I\left(\frac{n-1}{N}\pi \leq \varphi_i < \frac{n}{N}\pi\right), n = 1..N$$

где  $\varphi_i$  - радиальная координата точки пересечения  $p_i$  в плоскости  $\alpha^\Gamma$  (см. рис. 2),  $\varphi_i = \arccos(\tilde{X}_i)$ , а нормализованные координаты  $\tilde{P}_i$  связаны с координатами в плоскости изображения следующим образом:

$$(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i, \tilde{Z}_i) = (X_i, Y_i, Z_i) / \|(X_i, Y_i, Z_i)\|$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \sim K^{-1} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

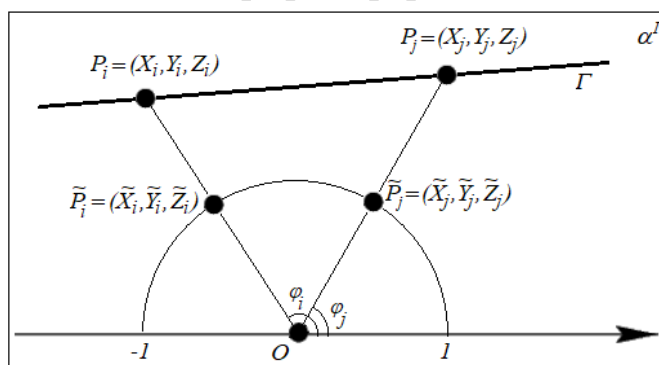
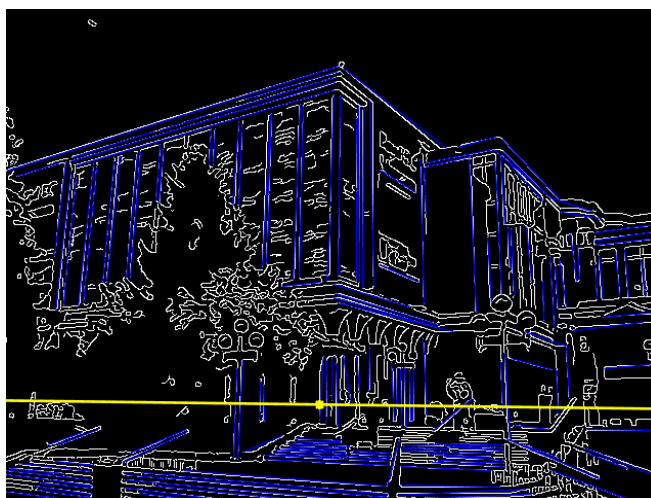


Рисунок 2. Плоскость линии горизонта.

Пример работы подготовительного этапа метода и найденной линии горизонта показан на рис. 3.

За приблизительное положение второй точки схода принимается положение пика гистограммы на линии горизонта. Далее положение второй точки схода уточняется по множеству сегментов линий, относящихся к пику на гистограмме. Множество линий, соответствующих второй точке схода, исключается из дальнейшего рассмотрения.

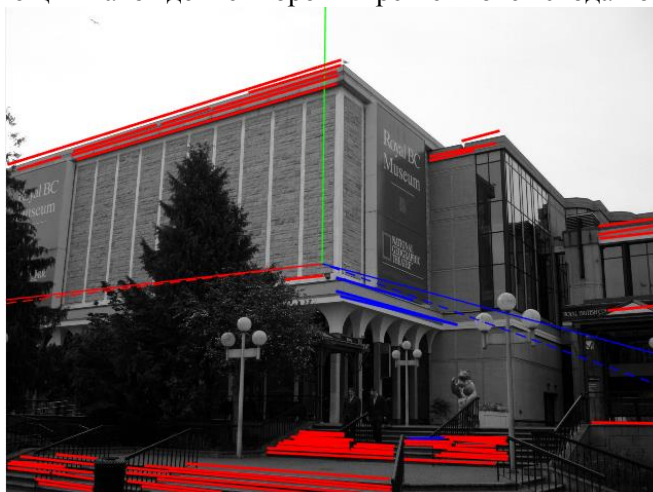


**Рисунок 3.** Пример работы подготовительного этапа: выделенные контуры изображения показаны белым цветом; отобранные сегменты прямых линий показаны синим цветом. Найденная линия горизонта показана желтым цветом.

Положение третьей точки схода может быть определено аналогичным образом, как положение пика на гистограмме частот точек пересечения с линией горизонта. Однако, более быстрый способ, гарантирующий ортогональность векторов, соответствующих найденным точкам схода, состоит в нахождении такого вектора, который будет ортогонален векторам, соответствующим первой и второй точке:

$$V_3 = V_1 \times V_2$$

Пример, демонстрирующий нахождение второй и третьей точек схода показан на рис. 4.



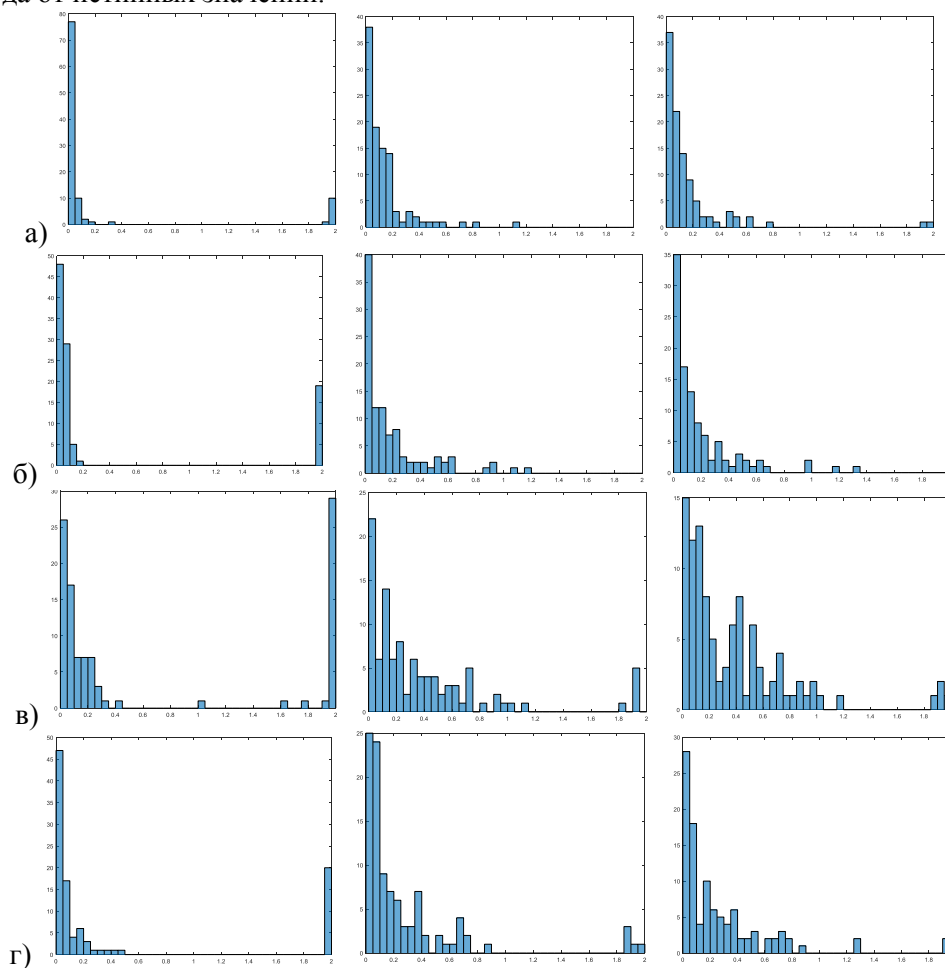
**Рисунок 4.** Пример поиска точек схода: направления на истинные точки из центра показаны тонкими пунктирными линиями; направления на оцененные точки схода - тонкими сплошными линиями; отобранные сегменты для второй и третьей точек схода сегменты показаны жирными красными и синими линиями соответственно.

### 3. Эксперименты

В настоящем разделе описываются результаты экспериментального исследования описанного выше метода. Для проведения экспериментов мы использовали хорошо известный открытый набор данных The York Urban Database [6-8], содержащий как исходные изображения, так и информацию о параметрах калибровки камеры и истинном положении точек схода. Указанный набор данных содержит 102 изображения городских территорий, полученных, главным образом, на территории университета Йорк и в городе Торонто, Канада.

Для оценки оптимальных параметров разработанного метода было выполнено моделирование по следующей схеме:

- для каждого изображения из используемого набора данных с использованием информации об истинном положении точек схода выполнялся расчет истинного вектора тяжести;
- к полученному вектору тяжести добавлялся случайный вектор (шум) с заданными характеристиками (равномерное распределение в диапазоне  $[-r; r]$ , и полученный вектор использовался в качестве вектора силы тяжести, получаемого с датчика мобильного устройства;
- производилась оценка положения точек схода с использованием описанного выше алгоритма;
- для каждой точки схода рассчитывалась ошибка как норма вектора отклонения координат точки схода от истинных значений.



**Рисунок 5.** Гистограмма отклонений положения точек схода. Левый столбец соответствует первой точке схода, средний столбец – второй точке, правый столбец – третьей точке схода. Строки соответствуют различным диапазонам шумовой составляющей:  $r=0$  (а),  $r=0.1$  (б),  $r=0.2$  (в, г). На рис. (а-в) показан результат для более строгих условий отбора сегментов линий  $t=\pi/50$ ,  $N=50$ , на рис. (г) – для более мягких условий  $t=\pi/25$ ,  $N=25$ .

Результаты экспериментов показаны на приведенном ниже рис. 5. Каждая из представленных на рисунке гистограмм показывает распределение нормы вектора отклонения положения оцененной точки схода от истинного положения. В идеальном случае гистограмма будет иметь единственный столбец в левой части (первый), что означает минимальные отклонения точки схода от истинных значений во всех экспериментах. Подобный вид имеет гистограмма, расположенная в левом столбце на рис. 5.а.

Наличие высокого правого столбца гистограмм на рис. 5.б и 5.в (слева) показывает ошибку в ориентации, при которой направление на оцененную точку схода оказывается обратным по отношению к направлению на истинное положение. Такие ошибки могут возникать вследствие того, что при больших случайных отклонениях вектора силы тяжести отбираются линии, сходящиеся в противоположном направлении от истинного.

Как видно из результатов экспериментов, с одной стороны, с ростом шумовой составляющей происходит ожидаемый рост ошибок. С другой стороны, рост становится неприемлемым для достаточно существенных отклонений  $r=0.2$  (см. рис. 5.в). Такой рост может быть частично компенсирован за счет смягчения условий при отборе сегментов линий, что показано на рис. 5.г. Здесь были использованы более мягкие условия фильтрации сегментов линий: возможные отклонения по углу составляли  $t=\pi/25$  по сравнению с ранее использованным  $t=\pi/50$ , а количество разбиений гистограммы составляло  $T=25$  по сравнению с ранее использованным  $N=50$ .

Таким образом, точность работы алгоритма может быть повышена в условиях зашумления показаний вектора тяжести путем подбора параметров. Другим путем повышения точности может быть использование ранее полученных оценок при обработке видеопотока, что является предметом будущих исследований.

#### 4. Заключение

В работе предложен и исследован метод автоматического поиска точек схода. Указанный метод основан на совмещении информации, получаемой с датчиков мобильных устройств и изображений, получаемых с камеры в видимом диапазоне. Выполнено моделирование с использованием открытого набора данных The York Urban Database, позволившее оценить характеристики работы метода в условиях случайных отклонений в значениях вектора силы тяжести. Описанный в работе метод прост в реализации и нетребователен к вычислительным ресурсам, что позволяет использовать его на мобильных устройствах.

В дальнейшем планируется развитие описанного метода для работы с видеопотоком, что позволит выполнить отслеживание и уточнение положения точек схода с целью последующей оценки ориентации и положения камеры.

#### 5. Литература

- [1] Caprile, B. Using vanishing points for camera calibration / B. Caprile, V. Torre // International Journal of Computer Vision. – 1990. – Vol. 4(2). – P. 127-139.
- [2] Lee, D.C. Geometric reasoning for single image structure recovery / D.C. Lee, M. Hebert, T. Kanade // International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) IEEE, 2009. – P. 2136-2143.
- [3] Xu, H. Indoor localization via multi-modal sensing on smartphones / H. Xu, Z. Yang, Z. Zhou, L. Shangguan, K. Yi, Y. Liu // International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing ACM, 2016. – P. 208-219.
- [4] Park, S. Line-based single view 3D reconstruction in Manhattan world for augmented reality / S. Park, H. Lee, S. Lee, H.S. Yang // International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry ACM, 2015. – P. 89-92.
- [5] Angladon, V. The toulouse vanishing points dataset / V. Angladon, S. Gasparini, V. Charvillat // Proceedings of the 6th ACM Multimedia Systems Conference (MMSys '15), Portland, United States, 2015.
- [6] Coughlan, J.M. Manhattan world: Orientation and outlier detection by Bayesian inference / J.M. Coughlan, A.L. Yuille // Neural Computation. – 2003. – Vol. 15(5). – P. 1063-1088.
- [7] Denis, P. Efficient Edge-Based Methods for Estimating Manhattan Frames in Urban Imagery / P. Denis, J.H. Elder, F. Estrada // Proc. European Conference on Computer Vision. – 2008. – Vol. 5303. – P. 197-211.
- [8] Denis, P. Efficient Edge-Based Methods for Estimating Manhattan Frames in Urban Imagery // M.Sc. Thesis, York University, Canada, 2008.

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-29-03190 офи\_м.

## **Automatic search for vanishing points on mobile devices**

**E.V. Myasnikov<sup>1,2</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, 4430011

**Abstract.** The vanishing point is a point in the plane of the perspective image, in which the projections of mutually parallel lines of three-dimensional space converge. Automatic search for vanishing points in images is a rather complicated task, the solution of which on mobile devices is not currently possible without introducing additional restrictions. In this paper, a rather simple method is proposed for solving this problem, which operates under two main constraints. One of these limitations is the analysis of the Manhattan scenes. Another is the fusion of information received from mobile device sensors. To evaluate the characteristics of the proposed solution, modeling was performed using a well-known open data set.