

# ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕГМЕНТАЦИИ РАЗНОРАКУРСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАФА

Е.В. Гошин<sup>1,2</sup>, Г.Е. Лошкарева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Разработана технология сегментации разноракурсных изображений с использованием трёхмерного преобразования Хафа. Первым этапом технологии является формирование трёхмерной модели сцены в виде облака точек при отсутствии информации о параметрах съёмки. На втором этапе с помощью пространства Хафа ищется множество наиболее подходящих плоскостей, на основе которых производится сегментация сформированной сцены. Проведены экспериментальные исследования на модельных сценах.

**Ключевые слова:** обработка изображений, реконструкция трёхмерных сцен, сегментация, преобразование Хафа.

## Введение

Задача анализа изображений и, в частности, задача сегментации изображений является крайне востребованной в различных приложениях. Однако, часто в отдельных изображениях недостаточно полезной информации для достоверной сегментации. Такое может происходить, например, в случаях, когда текстура объектов сцены состоит из крупных областей разных цветов. При наличии в этих случаях более одного изображения имеет смысл анализировать не яркостную характеристику отдельных изображений, а трёхмерную структуру сцены.

Для формирования трёхмерной модели сцены по разноракурсным изображениям существует большое число методов и алгоритмов [1, 2]. Как правило, в случае изображений, полученных с произвольных ракурсов, параметры съёмки неизвестны и возникает необходимость определения этих параметров. Задаче сопоставления разноракурсных изображений в этих условиях посвящен ряд статей [3, 4].

Одним из подходов к сегментации трёхмерных сцен является выделение на этой сцене объектов определённого характера [5, 6]. Например, в работе [7] рассматривается сегментация сцены на основе выделения плоскостей по облаку точек, полученному путём сканирования поверхности лазерным дальномером (лидаром). Для выделения плоскостей используется трёхмерное преобразование Хафа [8].

Целью настоящей работы является исследование технологии сегментации трёхмерной сцены с использованием двухэтапной процедуры. Первым этапом является формирование трёхмерной модели сцены в виде облака точек при отсутствии информации о параметрах съёмки. На втором этапе с помощью пространства Хафа ищется множество наиболее подходящих плоскостей, на основе которых производится сегментация сформированной сцены.

Ключевым отличием предлагаемой технологии от изложенной в работе [7] является использование разноракурсных изображений. Отдельно следует отметить тот факт, что эти изображения используются не только как исходные данные для формирования трёхмерной модели в виде облака точек, но и выступают в роли значимого результата, поскольку сегментация трёхмерного облака точек может быть перенесена на исходные изображения.

В общем случае предложенная технология может быть использована для сегментации сцены и изображений на несколько объектов, представляющих собой плоскости в трёхмерном пространстве, как это сделано в работе [7]. Однако в данной работе решается узкая задача сегментации: разделение изображения и восстановленной трёхмерной модели на области двух классов: фон и объекты.

Приводятся результаты экспериментальных исследований, иллюстрирующие результат сегментации на смоделированной сцене.

### **Технология сегментации**

Общая схема основных этапов рассматриваемой технологии сегментации разноракурсных изображений с использованием трёхмерного преобразования Хафа приведена на рис. 1.

В соответствии со схемой, по двум изображениям строится трёхмерная модель сцены. Затем проводится преобразование Хафа над всеми точками получившейся трёхмерной сцены. Среди всех найденных плоскостей ищется максимум, посредством чего выбирается «базовая» плоскость. Посредством расчёта расстояния от точек до выбранной плоскости модель разделяется на точки фона и точки объектов. По полученной (сегментированной) сцене может быть сегментировано исходное изображение.

Далее будут рассмотрены ключевые этапы технологии.

#### *Определение параметров съёмки*

В данной работе используется алгоритм определения параметров съёмки, описанный в работе [9]. Предполагается, что матрицы первой и второй камер одинаковы и известны, глобальная система координат совпадает с системой координат первой камеры, т. е. направление съёмки совпадает с направлением оси OZ, и на паре изображений задано множество соответствующих точек  $\{\mathbf{m}_i \mid i = \overline{1, N}\}$  и  $\{\mathbf{m}'_i \mid i = \overline{1, N}\}$ , где точки  $\mathbf{m}_i = (x \ y)^T$  и  $\mathbf{m}'_i = (x' \ y')^T$  каждой пары являются проекциями одной точки в трёхмерном пространстве.

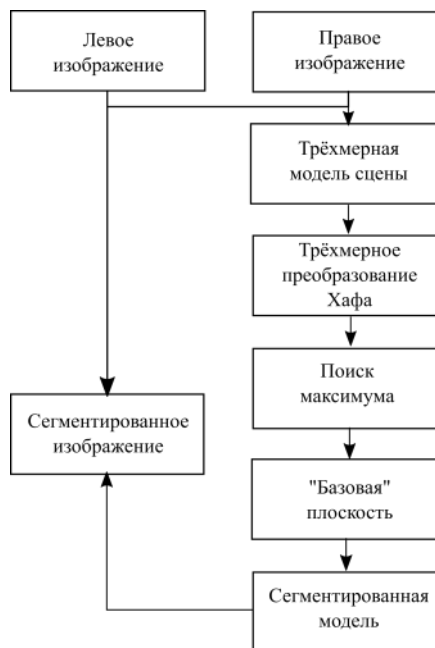


Рис. 1. Схема этапов технологии

Вводятся обозначения для элементов матриц сдвига  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{R}'$  и поворота  $\mathbf{t}$ ,  $\mathbf{t}'$  первой и второй камер соответственно.

Для этих начальных данных выражение, связывающее соответствующие точки на двух изображениях через параметры матрицы поворота и вектора сдвига с точностью до неизвестного параметра  $Z$ , приобретает вид:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (r'_{11}x + r'_{12}y + r'_{11} + t'_x/Z)(r'_{31}x + r'_{32}y + r'_{31} + t'_z/Z)^{-1} \\ (r'_{21}x + r'_{22}y + r'_{21} + t'_y/Z)(r'_{31}x + r'_{32}y + r'_{31} + t'_z/Z)^{-1} \end{pmatrix}$$

Полученное выражение может быть представлено в виде последовательности преобразований поворота и сдвига:

$$\mathbf{m}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) = \mathbf{R}'\mathbf{m}(x, y),$$

$$\begin{cases} x'(\tilde{z} + t'_z/Z) = \tilde{x} + t'_x/Z, \\ y'(\tilde{z} + t'_z/Z) = \tilde{x} + t'_y/Z, \end{cases}$$

где  $Z$  – координата исходной точки в трёхмерном пространстве.

Данная декомпозиция позволяет реализовать итеративную процедуру определения параметров съёмки, состоящую из двух этапов: процедура определения поворота, в ходе которой определяется матрица поворота  $\mathbf{R}'$  и процедура определения сдвига, в ходе которой определяется вектор сдвига  $\mathbf{t}' = (t'_x \quad t'_y \quad t'_z)$ .

С использованием алгоритма Лукаса-Канаде [10] формируется оптический поток, устанавливающий соответствие между точками первого и второго изображений. Посредством пространственной триангуляции [11] на основе полученных соответствий формируется облако точек.

*Сегментация трёхмерной модели сцены*

Целью этого этапа является отделение объектов от фона на сцене.

Для выделения плоскостей используется трёхмерное преобразование Хафа. Преобразование Хафа - это способ обнаружения параметрических объектов, который, как правило, используется для поиска линий и кругов. Например, в статье [12] описано детектирование различных двумерных объектов по эталонному контуру при помощи обобщенного метода Хафа. Статья [13] описывает применение модификации метода Хафа для трёхмерного облака точек.

В данной работе набор точек из пространства  $\mathbb{R}^3$  используется в качестве входного и выходного значений параметризованной плоскости. Плоскость представляется через расстояние от начала координат до плоскости и вектор нормали к этой плоскости. Пусть дана точка  $\mathbf{p}$  на плоскости, вектор нормали  $\mathbf{n}$ , который перпендикулярен плоскости и расстояние  $\rho$

$$\rho = \mathbf{p} \cdot \mathbf{n} = p_x n_x + p_y n_y + p_z n_z$$

После подстановки углов между вектором нормали и выбранной системой координат уравнение плоскости приобретает вид:

$$p_x \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi + p_y \cdot \sin \phi \cdot \sin \theta + p_z \cdot \cos \phi = \rho, \quad (1)$$

где  $\theta$  - угол наклона вектора нормали на плоскость  $xy$ ,  $\phi$  - угол между плоскостью  $xy$  и нормальным вектором в направлении оси  $z$ . Координаты  $\phi$ ,  $\theta$  и  $\rho$  определяют такое трёхмерное пространство Хафа, что каждой его точке соответствует одна плоскость в  $\mathbb{R}^3$ . В свою очередь каждой точке  $(x_0, y_0, z_0)$  пространства  $\mathbb{R}^3$  соответствует некоторая поверхность в пространстве Хафа, при этом каждая точка этой поверхности  $(\phi, \theta, \rho)$  характеризует некоторую плоскость, проходящую через искомую точку  $(x_0, y_0, z_0)$ .

В настоящей работе решается задача нахождения «базовой» плоскости, содержащей наибольшее число точек из сформированного облака точек. После определения параметров  $(\hat{\phi}, \hat{\theta}, \hat{\rho})$  «базовой» плоскости для всех точек из исходного облака определяется, принадлежит ли эта точка плоскости. Для этого координаты точки подставляются в уравнение плоскости, и полученное значение сравнивается с некоторым порогом:

$$p_x \cdot \cos \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\phi} + p_y \cdot \sin \hat{\phi} \cdot \sin \hat{\theta} + p_z \cdot \cos \hat{\phi} - \hat{\rho} < \Delta.$$

Все точки, удовлетворяющие этому неравенству, относятся к плоскости, остальные – считаются объектами сцены.

Поскольку существует взаимно однозначное соответствие между восстановленными точками трёхмерной модели и пикселями изображений, результаты сегментации модели могут быть использованы для сегментации исходных изображений.

## Реализация алгоритма трёхмерного преобразования Хафа

Для реализации трёхмерного преобразования Хафа используется следующий алгоритм. В качестве аккумуляторного пространства Хафа используется трёхмерный массив целочисленных значений, где каждой ячейке массива соответствует некоторая плоскость с параметрами, заданными координатами этой ячейки.

Каждая точка из сформированного на предыдущем этапе облака точек увеличивает на единицу значение тех ячеек аккумуляторного массива, которые соответствуют плоскостям, проходящим через данную точку или вблизи её, поскольку точное соответствие невозможно вследствие дискретности отсчётов массива.

С использованием псевдокода алгоритм может быть записан следующим образом:

Для всех точек из облака точек:

- Для всех значений координаты угла  $\theta$  :
- Для всех значений координаты угла  $\phi$  :
- Вычислить  $\rho$  по формуле (1)
- Увеличить  $A(\theta, \phi, \rho)$  на единицу

В результате выполнения данного алгоритма каждой ячейке массива будет поставлено в соответствие число, определяемое как количество точек из исходного облака точек, лежащих вблизи плоскости, задаваемой этой ячейкой. Ячейка массива, содержащая максимальное значение, задаёт искомую «базовую» плоскость.

## Результаты экспериментов

Ниже приводится пример экспериментального исследования разработанной технологии. Для этого была сформирована модельная сцена и получены два изображения при различных ракурсах (рис. 2, 3).

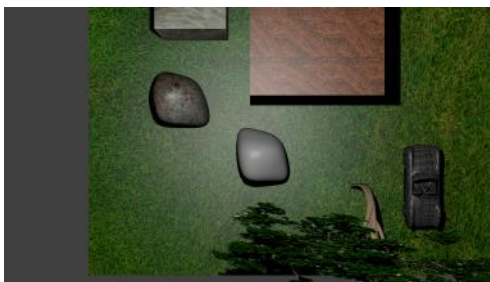


Рис. 2. Первое изображение сцены



Рис. 3. Второе изображение сцены

На рис. 4 приведена восстановленная трёхмерная модель смоделированной сцены в виде облака точек.

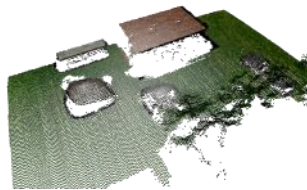


Рис. 4. Восстановленная модель сцены

Для формирования пространства Хафа были выбраны следующие параметры:

$$\begin{aligned}\theta &= k^\circ, \quad k = \overline{0,179}, \\ \phi &= k^\circ, \quad k = \overline{0,359}, \\ \rho &= 0.001k, \quad k = \overline{0,1000}.\end{aligned}$$

С использованием данных параметров и сформированного облака точек была выделена «базовая» плоскость, а все точки из облака были разделены на принадлежащие (рис. 5) и не принадлежащие (рис. 6) этой плоскости.

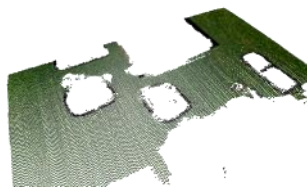


Рис. 5. «Базовая» плоскость сцены

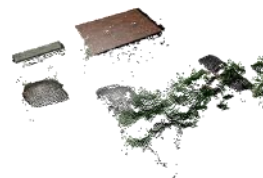


Рис. 6. Объекты сцены

В соответствии с проведённой сегментацией трёхмерной модели были сегментированы исходные изображения. Первое сегментированное изображение сцены приведено на рис. 7 и 8.



Рис. 7. Фон первого изображения



Рис. 8. Объекты первого изображения

Из иллюстраций видно, что в результате работы алгоритма объекты, не относящиеся к «базовой» поверхности были успешно (хотя и не безошибочно) отделены от этой поверхности.

## Заключение

Показано, что предложенная информационная технология сегментации разноразмерных изображений, основанная на применении трёхмерного преобразования Хафа к сформированному облаку точек, обеспечивает хорошее качество сегментации. Экспериментальные исследования на смоделированной сцене позволили качественно выделить фон изображения.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-07-00729а.

Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору Фурсову В.А. за помощь при подготовке настоящей работы, постановке задачи и ряд важных замечаний.

## Литература

1. Pollefeys M. Detailed real-time urban 3d reconstruction from video / M. Pollefeys, D. Nistér, J.M. Frahm, A. Akbarzadeh // *International Journal of Computer Vision*. – 2008. – Vol. 78(2-3) – P. 143-167.
2. Baillard C. 3-D reconstruction of urban scenes from aerial stereo imagery: a focusing strategy / C. Baillard, H. Maitre // *Computer Vision and Image Understanding*. – 1999. – Vol. 76(3). – P. 244-258.
3. Pollefeys M. Self-calibration and metric reconstruction inspite of varying and unknown intrinsic camera parameters / Pollefeys M., Koch R., Van Gool L. // *International Journal of Computer Vision*. – 1999. – Vol. 32(1). – P. 7-25.
4. Eisert P. Automatic reconstruction of stationary 3-D objects from multiple uncalibrated camera views / Eisert P., Steinbach E., Girod B. // *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*. – 2000. – Vol. 10(2). – P. 261-277.
5. Reitberger J. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data / J. Reitberger, C. Schnörr, P. Krzystek, U. Stilla // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 64(6). – P. 561-574.
6. Tarsha-Kurdi F. Hough-transform and extended ransac algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from lidar data / F. Tarsha-Kurdi, T. Landes, P. Grussenmeyer // *Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning*. – 2007. – Vol. 36. – P. 407-412.
7. Zhang J. SVM-based classification of segmented airborne LiDAR point clouds in urban areas / Zhang J., Lin X., Ning X. // *Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 5(8). – P. 3749-3775.

8. Borrmann D. The 3D Hough Transform for plane detection in point clouds: A review and a new accumulator design / D. Borrmann, J. Elseberg, K. Lingemann, A. Nüchter // 3D Research. – 2011. – Vol. 2(2). – P. 1-13.
9. Гошин, Е.В. Реконструкция 3D-сцен по разноракурсным изображениям при неизвестных внешних параметрах съёмки / Е.В. Гошин, В.А. Фурсов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 770-775.
10. Lucas B. D. An iterative image registration technique with an application to stereo vision / B.D. Lucas, T. Kanade // IJCAI. – 1981. – Vol. 81. – P. 674-679.
11. Hartley R.I. Triangulation / Hartley R. I., Sturm P. // Computer vision and image understanding. – 1997. – Vol. 68(2). – P. 146-157.
12. Якимов, П.Ю. Локализация контуров объектов на изображениях при вариациях масштаба с использованием преобразования Хафа / Фурсов В.А., Бибииков С.А., Якимов П.Ю. // журнал Компьютерная оптика. – 37(4). – 2013. – С. 496-502.
13. Разлацкий, С.А. Исследование методов распознавания объектов в трехмерной сцене / Разлацкий С.А., Якимов П.Ю. // труды международной научно-технической конференции ПИТ 2015. – 2015. – С. 197-201.