



УДК 004.932.72'1

Л. В. НОВОТОРЦЕВ, программист-разработчик¹, аспирант²; А. Г. ВОЛОБОЙ²,
д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.

УЛУЧШЕННЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТРЕЗКОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ СТРОЕНИЙ ПО АЭРОФОТОСНИМКАМ

¹ЗАО «Фирма Ракурс»

Россия, 129366, г. Москва, ул. Ярославская, д. 13А, оф. 15. Тел.: (495) 720-51-27; факс: (495) 720-51-28; эл. почта: novotortsev@racurs.ru

²ФГБУН «Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН»

Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Тел.: (499) 250-79-95; факс: (499) 972-07-37; эл. почта: voloboy@gin.keldysh.ru

Ключевые слова: компьютерное зрение, распознавание образов, выделение линий, выделение отрезков, преобразование Хафа.

Рассматривается проблема наиболее точного выделения отрезков на аэрофотоснимках в рамках задачи обнаружения строений, которые в своем большинстве имеют линейные черты, что позволяет значительно упростить расчеты и обработку полученных результатов, а также повысить качество решения общей задачи.

К основным проблемам, решаемым фотограмметрией, можно отнести такие как: создание топографических карт; геологические изыскания; охрана окружающей среды (изучение ледников, наблюдение за изменением растительного покрова, изучение морских течений); проектирование зданий и сооружений; автоматизированное построение пространственных моделей объектов по снимкам. Одним из основных источников обрабатываемых данных в фотограмметрии являются снимки, полученные в результате аэрофотосъемки. Типичными характеристиками таких фотографий являются вертикальность съемки, большое разрешение и высокое качество полученных изображений. При анализе аэрофотоснимков в рамках задач фотограмметрии часто встречается необходимость выделять и реконструировать модели различных строений, для которых в большинстве случаев характерны линейные черты. Эту особенность можно использовать для увеличения качества результата обработки данных.

Необходимость разработки подхода, опирающегося на выделение отрезков, обусловлена тем, что более традиционные подходы имеют те или иные недостатки при применении к задаче, описанной выше. Первый подход опирается на построение плотной модели ЦМР (Цифровая модель рельефа). Далее происходит обработка ЦМР и выделение границ строений [1, 2, 3, 4]. Подобный метод слишком общий и дает недостаточно хорошие результаты. По этой причине применяются методы, использующие априорную информацию о форме зданий, например плоские крыши у зданий [5]. Второй подход, который получил наибольшее распространение в задачах реконструкции строений по набору аэрофотоснимков, опирается на выделение линейных участков на изображении (отрезков) и применении подхода перебора плоскостей [6]. Недостатком этого алгоритма является то, что на изображениях большого размера он может работать неоправданно долго. Это связано с тем, что приходится проводить сопоставление прямых (и их окрестностей) на большом количестве изображений (рекомендуемое количество пересекающихся изображений – 5–6). По этой причине возникает задача сужения размеров областей изображений, на которых применяется этот алгоритм, для уменьшения вычислительных затрат.

**К СТАТЬЕ Л. В. НОВОТОРЦЕВА, А. Г. ВОЛОБОЯ
«УЛУЧШЕННЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТРЕЗКОВ
ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ СТРОЕНИЙ ПО АЭРОФОТОСНИМКАМ»**



Рис. 1. Исходное изображение

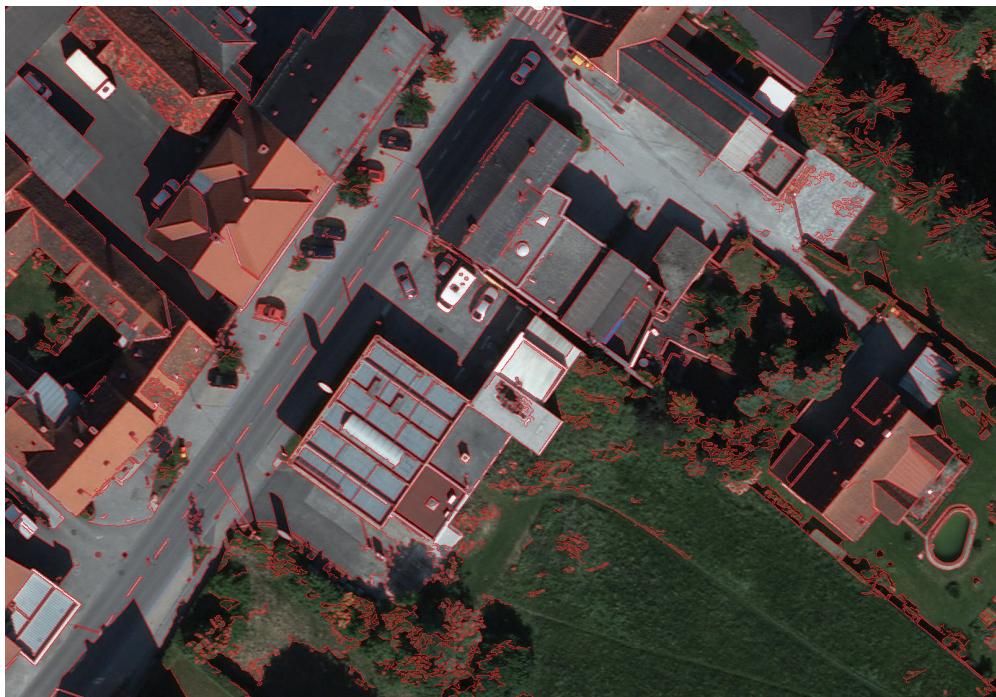


Рис. 2. Изображение, полученное из исходного путем применения фильтра Кэнни

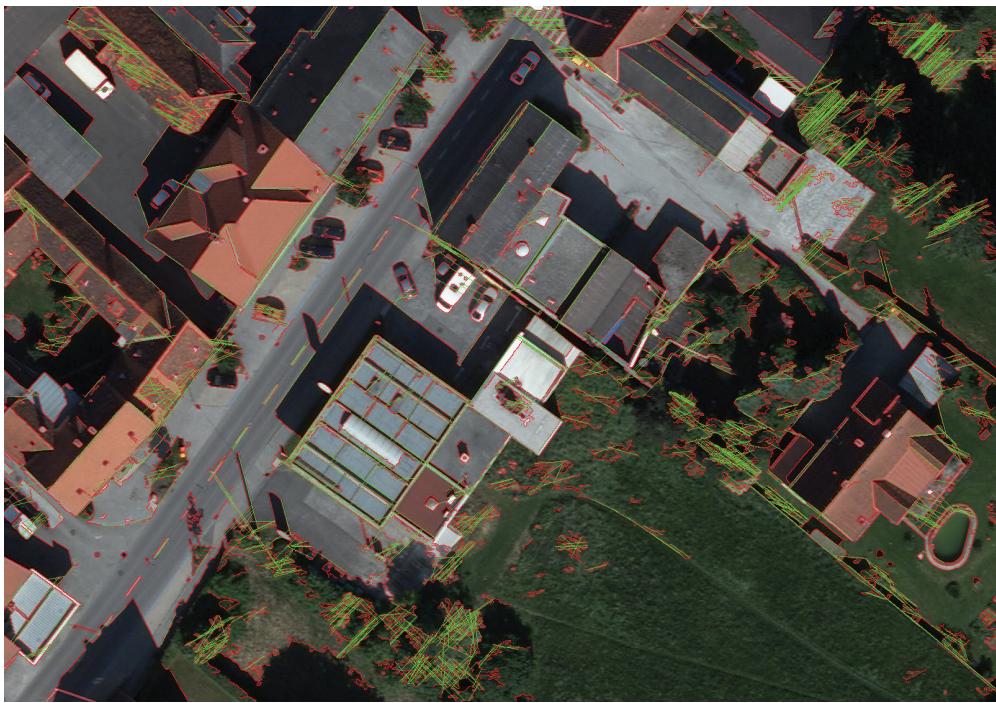


Рис. 3. Результат (зеленые линии), полученный алгоритмом Хафа, реализованным в OpenCV

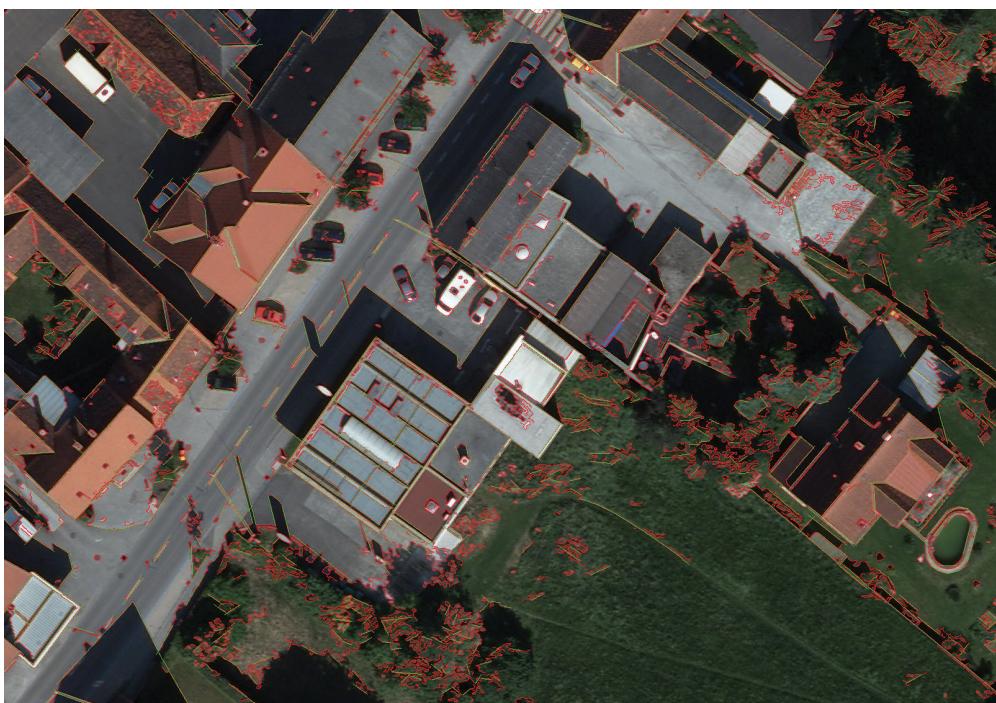


Рис. 4. Результат (зеленые линии), полученный рассматриваемым алгоритмом



Для реализации алгоритма построения модели по аэрофотоснимкам необходимо сначала разработать алгоритм обнаружения прямых линий и отрезков на изображении. Ключевыми характеристиками такого алгоритма являются точность найденных линий и отсутствие сегментации отрезков. Существующие методы выделения прямых и отрезков, такие как метод Хафа и его модификации [7, 8, 9, 10], не гарантируют выполнения приведенных свойств. По этой причине возникает необходимость создания улучшенного алгоритма, который бы удовлетворял заданным требованиям.

Первым шагом решения задачи нахождения прямых является задача обнаружения контуров. Самым распространенным и наиболее эффективным методом решения этой задачи является алгоритм нахождения граней Кэнни [11]. Этот алгоритм решает такие проблемы, как дублирование и утолщение контура. Результатом его работы является двоичное изображение, которое имеет нули во всех точках, где контур не обнаружен, и ненулевые значения в остальных точках.

Описание предлагаемого алгоритма

Основной идеей предложенного алгоритма является использование регулярного разбиения изображения и последующее нахождение прямых и их концов. Алгоритм можно разделить на три стадии:

1. Определение размера одного блока изображения исходя из значения допустимой погрешности угла наклона прямых (отрезков).
2. Нахождение прямых линий в каждом блоке.
3. Нахождение концов найденных прямых.

Рассмотрим каждую стадию подробнее.

Первая задача, которую необходимо решить, – выбрать размер блока. Ввиду дискретности изображения при слишком малых размерах сегментов невозможно будет различить прямые с малой разницей углов наклона. Минимальным требованием для возможности различить прямые, имеющие разницу в угле наклона $\Delta\theta$, является несовпадение их конечных пикселей. Иными словами, необходимо, чтобы $\Delta x \geq 1$ или $\Delta y \geq 1$. Ввиду симметричности синуса и косинуса достаточно рассмотреть область от 0 до 45° . В этом случае $\Delta x \geq \Delta y$ означает, что достаточно удовлетворить только неравенство $\Delta y \geq 1$.

Тогда, учитывая, что

$$y = L \times \sin(\theta), \quad (1)$$

где L – сторона сегмента, получим:

$$1 \leq \Delta y = y_1 - y_2 = L \times \sin(\theta + \Delta\theta) - L \times \sin(\theta); \quad (2)$$

$$1 \leq 2 \times L \times (\sin(\Delta\theta/2) \times \cos(\theta + \Delta\theta/2)). \quad (3)$$

Учитывая, что $\theta \in [0; \pi/4]$, то $\cos(\theta + \Delta\theta/2) \geq \sqrt{2}/2$. Подставляя это в неравенство (3) получим:

$$L \geq 1 / (\sqrt{2} \times \sin(\Delta\theta/2)). \quad (4)$$

В таблице приведены значения L для различных $\Delta\theta$.

Допустимая погрешность $\Delta\theta$ и минимальные размеры сегмента L для ее обеспечения

$\Delta\theta, {}^\circ$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L , пикс	82	41	28	21	17	14	12	11	10	9



Вторая задача – выделение прямых линий в блоках. На данном этапе применяется непосредственно алгоритм Хафа к каждому блоку. Суть его заключается в том, что для каждой точки сегмента перебираются все углы наклона прямой с заданным шагом. Для каждой точки сегмента, помеченной как граница и для каждого предполагаемого угла наклона θ высчитывается длина перпендикуляра r , опущенного на предполагаемую прямую из точки начала координат. Потом в ячейку, соответствующую паре (θ, r) , зачисляется один условный «голос». В результате получается карта голосования. Далее на основе подобного голосования находятся параметры прямых, а именно: те пары (θ, r) , для которых количество голосов превышает заданную планку, считаются параметрами найденной прямой.

В рассматриваемом методе предлагается выделять только одну прямую, набравшую наибольшее количество голосов, превышающее заданную планку. Предполагается, что прямые, не выделенные на этом этапе, будут обнаружены на третьем этапе при построении отрезков.

Выбор только одной прямой обусловлен тем, что при достаточно малых размерах блоков потеря информации минимальна.

Последней стадией алгоритма является окончательное нахождение отрезков по найденным прямым. Основная сложность этого этапа заключается в том, что на предыдущем этапе линии могли быть сегментированы в результате низкого контраста участка изображения или в результате того, что линия в сегменте была слишком короткая.

Для решения этой проблемы предлагается использовать следующий подход. Для найденной прямой рассматриваются сегменты, полученные на первом и втором этапах, через которые она проходит. В зависимости от конкретных целей применения рассматриваемого алгоритма и реализации можно или рассматривать все сегменты, или рассматривать их последовательно, начиная с того, где прямая была найдена. В каждом сегменте, через который проходит прямая, вычисляются пересечения прямой с его границами. Далее вычисляется длина отрезка прямой внутри сегмента и длина перпендикуляра к ней в данном сегменте (угол наклона не изменяется):

$$\begin{cases} r_{new} = \frac{y_0}{\sin(\theta)}, & \theta \neq 90^\circ \\ r_{new} = x_0, & \theta = 90^\circ \end{cases}, \quad (5)$$

где y_0 – точка пересечения с левой стороной сегмента или ее продолжением, x_0 – точка пересечения с нижней стороной сегмента или ее продолжением.

В результате мы получаем параметры θ и r , описывающие прямую в данном сегменте.

После этого рассматриваются результаты голосования в данном сегменте. Здесь достаточно рассмотреть только точки (θ, r) на карте голосования или ее окрестность. При этом окрестность достаточно взять равной единице по каждому из параметров. Это определяется тем, что мы строили сегменты для гарантирования необходимой точности. В этом случае в качестве планки для определения наличия прямой используется ее длина внутри сегмента (возможно, какой-то процент от длины). По аналогии со вторым этапом прямая считается найденной, если количество голосов превышает эту планку.

Если прямая найдена в данном сегменте, то он помечается как сегмент, содержащий эту прямую, и алгоритм повторяется для следующего сегмента, через



который проходит прямая, а ее конец обновляется. Если прямая совпадает с уже найденной в рассматриваемом сегменте, то последняя удаляется или помечается как уже обработанная. В некоторых случаях нужно также требовать не полное совпадение, а малое отличие двух прямых.

Если прямая не найдена, то в зависимости от допустимой длины разрыва алгоритм продолжается для следующего сегмента или останавливается.

Сравнения и результаты

Сравним результаты рассмотренного в данной статье алгоритма с уже существующей реализацией алгоритма нахождения отрезков из библиотеки OpenCV.

На рис. 1 цв. вклейки приведено исходное изображение. На рис. 2 цв. вклейки представлен результат его обработки алгоритмом Кэнни. Красным обозначены найденные грани. На рис. 3 цв. вклейки приведен результат, полученный алгоритмом Хафа, который реализован в OpenCV. На рис. 4 цв. вклейки – результат работы рассматриваемого алгоритма. Красным цветом выделены грани, найденные фильтром Кэнни, зеленым – выделенные отрезки.

Рассматриваемый алгоритм имеет ряд преимуществ и недостатков по сравнению с другими вариантами реализации алгоритма Хафа.

К преимуществам, как показывают результаты (рис. 3 и 4 цв. вклейки), можно отнести то, что рассматриваемый алгоритм более точно выделяет отрезки по сравнению с алгоритмом Хафа, предложенным в OpenCV. На рис. 3 цв. вклейки найдено гораздо меньше отрезков, и присутствует сегментация отрезков, что негативно может сказаться на последующих вычислениях. Рассмотренный в данной статье метод дает намного более приемлемый результат, что значительно облегчает дальнейшее связывание отрезков.

К недостаткам можно отнести то, что скорость работы по сравнению с иерархическим алгоритмом Хафа заметно ниже, а погрешность определения концов отрезков пропорциональна размерам сегментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brunn, A. Extracting buildings from digital surface models / A. Brunn, U. Weidner // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1997. – Т. 32, № 3. – С. 27–34.
2. Cord, M. Dense, reliable and depth discontinuity preserving DEM computation from HRV urban stereopairs / M. Cord, N. Paparoditis, M. Jordan // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1997. – Т. 32. – С. 49–56.
3. Fernandes, L. A. F. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme / L. A. F. Fernandes, M. M. Oliveira // Pattern Recognition. – 2008. – Т. 41, № 1. – С. 299–314.
4. Building detection from high-resolution color images / S. Girard [et al.] // Remote Sensing / International Society for Optics and Photonics, 1998. – С. 278–289.
5. High-resolution stereo for the detection of buildings / M. Berthod [et al.] // Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. – Birkhäuser Basel, 1995. – С. 135–144.
6. Baillard, C. A plane-sweep strategy for the 3D reconstruction of buildings from multiple images / C. Baillard, A. Zisserman // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000. – Т. 33, № B2. – С. 56–62.
7. Duda, R. O. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures / R. O. Duda, P. E. Hart // Communications of the ACM. – 1972. – Т. 15, № 1. – С. 11–15.
8. Hough, P. V. C. Method and means for recognizing complex patterns : пат. 3069654 США / P. V. C. Hough. – 1962.
9. Wang, Z. MSLD: A robust descriptor for line matching // Pattern Recognition / Z. Wang, F. Wu, Z. Hu. – 2009. – Т. 42, № 5. – С. 941–953.



10. Yacoub, S. B. Hierarchical line extraction / S. B. Yacoub, J. M. Jolion // IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing. – 1995. – Т. 142, № 1. – С. 7–14.
11. Canny, J. A computational approach to edge detection / J. Canny // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 1986, № 6. – С. 679–698.

NOVOTORTSEV Leonid Vladimirovich, software developer¹, postgraduate student²; VOLOBOY Aleksey Gennadievich², doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher

IMPROVED ALGORITHM OF SEGMENT EXTRACTION FOR BUILDING RECONSTRUCTION BASED ON AIR PHOTOS

¹JSC «Firma Racurs»

13A, Yaroslavskaya St., off. 15, Moscow, 129366, Russia. Tel.: +7(495) 720-51-27; fax: +7(495) 720-51-28; e-mail: novotortsev@racurs.ru

²Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS

4, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia. Tel.: +7(499) 250-79-95; fax: +7(495) 72-07-37; e-mail: oloboy@gin.keldysh.ru.

Key words: computer vision, pattern recognition, line extraction, segment extraction, Hough transform.

The article describes the problem of precise segment extraction from aerial photographs as part of the building recognition problem. Building shape often has linear segments. Using this feature can greatly simplify calculation and processing of the obtained result, as well as improve the quality of the solution of the general problem.

REFERENCES

1. Brunn A., Weidner U. Extracting buildings from digital surface models /International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1997, V. 32, № 3, SECT 4W2, P. 27–34.
2. Cord M., Paparoditis N., Jordan M. Dense, reliable and depth discontinuity preserving DEM computation from HRV urban stereopairs //International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1997, V. 32, P. 49–56.
3. Fernandes L. A. F., Oliveira M. M. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme //Pattern Recognition. 2008, V. 41, № 1, P. 299–314.
4. Girard S. et al. Building detection from high-resolution color images //Remote Sensing / International Society for Optics and Photonics, 1998, P. 278–289.
5. Berthod M. et al. High-resolution stereo for the detection of buildings //Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhäuser Basel, 1995, P. 135–144.
6. Baillard C., Zisserman A. A plane-sweep strategy for the 3D reconstruction of buildings from multiple images //International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000, V. 33, № B2; PART 2, P. 56–62.
7. Duda R. O., Hart P. E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures //Communications of the ACM. 1972, V. 15, № 1, P. 11–15.
8. Hough P. V. C. Method and means for recognizing complex patterns : Pat. 3069654 USA. 1962.
9. Wang Z., Wu F., Hu Z. MSLD: A robust descriptor for line matching //Pattern Recognition. 2009, V. 42, № 5, P. 941–953.
10. Yacoub S. B., Jolion J. M. Hierarchical line extraction //IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing. 1995, V. 142, № 1, P. 7–14.
11. Canny J. A computational approach to edge detection //Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. 1986, № 6, P. 679–698.

© Л. В. Новоторцев, А. Г. Волобой, 2014

Получено: 18.10.2014 г.