

Ускорение метода перебора плоскостей при трехмерной реконструкции строений по аэроснимкам

Л.В. Новоторцев¹, А.Г. Волобой²

torets13@gmail.com|voloboy@gin.keldysh.ru

¹Институт Прикладной Математики им. Келдыша РАН, Москва, Россия;

²АО "Фирма Ракурс", Москва, Россия;

В фотограмметрии нередко встречается задача трехмерной реконструкции строений по набору аэроснимков. Многие алгоритмы, решающие данную задачу, либо имеют невысокую точность, либо низкую скорость работы. В данной статье предлагается использовать модификацию метода перебора плоскостей для достижения высокой скорости работы при сохранении точности реконструкции.

Ключевые слова: аэроснимки, трехмерная реконструкция, компьютерное зрение.

Plane-sweep strategy acceleration in the task of 3d building reconstruction from aerophoto

L.V. Novotortsev¹, A.G. Voloboy²

torets13@gmail.com|voloboy@gin.keldysh.ru

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia;

²Racurs, Moscow, Russia;

One of the common tasks of photogrammetry is three-dimensional building reconstruction. Most of methods which solve that problem are either unaccurate or slow. In this paper we propose to use modification of plane-sweep strategy method in order to achieve high computation speed without losing accuracy.

Keywords: aerophoto, 3d reconstruction, computer vision.

1. Введение

Задача распознавания и реконструкции строений на снимках, полученных при помощи аэро- или космосъемки, является распространенной в рамках фотограмметрии.

Данная задача часто решается в рамках автоматического создания или обновления электронных карт, где наличие трехмерных моделей значительно увеличивает наглядность продукта и упрощает чтение карты.

Другая сфера, где рассматриваемая задача активно используется, — анализ застройки. К примеру, это необходимо для поиска выгодных мест для новой застройки и дальнейшей ее продажи. Также анализ застройки может использоваться в природоохранных целях: обнаружение нелегальной или опасной застройки

Характерной особенностью рассматриваемой задачи является большой объем исходных данных. В некоторых случаях размер изображений достигает нескольких гигабайтов. Ручная обработка данных такого размера представляет из себя дорогую, а в некоторых случаях невыполнимую задачу. Более того, развитие способов съемки (БПЛА), скорости передачи данных при быстрой потере их актуальности, приводит к острой необходимости использовать автоматические методы построения. Однако точность автоматических методов уступает ручному сопоставлению, что вызывает необходимость совершенствования, модификации и разработки новых алгоритмов. Исследованию этой задачи посвящена данная работа.

2. Обзор существующих методов

Основные распространенные методы трехмерной реконструкции можно разделить на следующие группы:

1. построение на основе данных лидар'а;
2. построение на основе набора растровых снимков
 - (a) по облаку точек;
 - (b) по отрезкам.

Построение на основе данных лидар'а. Лидар (LIDAR англ. Light Identification Detection and Ranging — обнаружение, идентификация и определение дальности с помощью света) — технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах [8, 13].

Реконструкция сцены с использованием этих данных значительно облегчена, поскольку сами данные уже содержат информацию о высоте в каждой точке. Недостатком использования данного типа данных для реконструкции строений является большая стоимость оборудования и полета. Несмотря на большую вариативность методов опирающихся на использование данных лидар'а [10] (в том числе и построение облака точек), их общий недостаток - стоимость, сильно ограничивает их применение. По этой причине их более подробное рассмотрение выходит за рамки представленной работы.

Построение по облаку точек. Создание облака точек является довольно затратной задачей, требующей больших вычислительных затрат, которые значительно увеличиваются при отсутствии хорошей калибровки изображений. Результат, получаемый этим методом представляет собой высокоточную реконструкцию сцены [5, 7].

К недостаткам представленного метода можно отнести очень медленную скорость работы и необходимость дополнительного анализа полученной трехмерной сцены для выделения из нее строений, что еще больше увеличивает вычислительные затраты методов, основанных на подобном подходе.

Сочетание представленных недостатков с тем фактом, что задача выделения строений по уже построенной трехмерной модели является нетривиальной, делает данный подход не оптимальным в рамках рассматриваемой задачи, несмотря на высокую распространенность и эффективность решения задач, связанных с реконструкцией сцен по нескольким снимкам.

Построение по выделенным отрезкам. Данный метод подразумевает предварительный анализ каждого из снимков, выделение отрезков и последующее их сопоставление [3]. Этот подход обладает большой гибкостью и скоростью. Более того, поскольку строения в своем большинстве имеют линейные черты, то объекты, выделенные данным подходом, в основном будут являться строениями. Дополнительный фильтр с использованием таких простых метрик, как размер объектов, почти полностью исключает ложные срабатывания. Это существенно облегчает одну из частей поставленной задачи: обнаружение строений.

Также стоит отметить, что в большинстве случаев аэроснимки поставляются с данными элементов внешнего ориентирования (ЭВО), которые используются построения первого приближения сопоставления снимков. Далее по тексту предполагается, что ЭВО есть и используется.

Методы, основанные на данном подходе, уступают по точности реконструкции тем, что основываются на построении облака точек, но выигрывают по скорости работы (до 30 раз быстрее) [4]. Переставленные преимущества являются крайне важными в рамках задачи реконструкции и обнаружения строений по аэроснимкам.

Одним из наиболее распространенных подходов, относящихся к представленной группе, является метод перебора плоскостей [3] и его модификация [12]. Данный алгоритм дает высокую точность обнаружения, но работает значительно медленнее подобных алгоритмов. Представленная работа посвящена разработке метода ускорения рассматриваемого подхода без значительной потери точности.

3. Описание метода

Как уже упоминалось выше данный подход состоит из следующих этапов:

1. выделение отрезков на каждом изображении;
2. связывание соседних отрезков;
3. сопоставление отрезков;
4. предварительное построение плоскостей;
5. валидация и уточнение плоскостей;
6. построение результата.

Из приведенных этапов, пункты 3 и 5 являются новыми шагами, представленными рассматриваемым методом, этап 4 является существенно модифицированным шагом алгоритма перебора плоскостей. Остальные этапы либо являются темой отдельного исследования (пункты 1 и 2), либо существенно не отличаются от аналогичных этапов метода перебора плоскостей (пункт 6).

3.1. Выделение отрезков

Рассматриваемый алгоритм сильно зависит от результата, полученного в результате операции выделения отрезков. Несмотря на то, что в рамках представленного метода пропущенные и разорванные отрезки частично компенсируются при реконструкции, пропуск слишком большого числа отрезков может привести к существенному ухудшению результата. По этой причине предлагается использовать алгоритм LSD [6] или алгоритмы, основанные на нем.

3.2. Связывание соседних отрезков

После того, как были выделены отрезки со снимков, в данной работе предлагается выполнить связывание соседних отрезков. Иными словами - соединить отрезки в ломанные на каждом из снимков (Рис. 1).

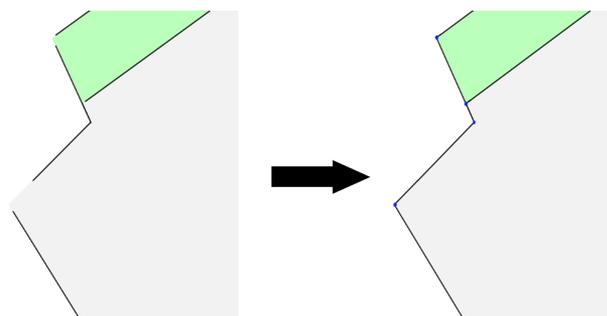


Рис. 1. Объединение отрезков в ломаную.

Для выполнения этой операции предлагается продолжить проверяемые отрезки прямыми и вычислить точку пересечения прямых. Далее выполняется проверка расстояния, на которое необходимо продолжить отрезки до пересечения. Для этого определяются входные параметры: нижний и верхний порог для отбраковки. Величина этих параметров определяется масштабом и качеством снимков, а также характером объектов на снимках (плотность и размер строений). Если расстояние от концов отрезков до точки пересечения меньше нижнего порога, то отрезки продлеваются без дополнительных проверок, если больше верхнего порога,

то никаких операций не требуется. В противном случае, если расстояние больше нижнего порога, но меньше верхнего, то выполняется дополнительный анализ поля градиентов в той области, в которой должно проходить продление отрезка до точки пересечения [1].

Также важно отметить, что в случае, если точка пересечения продленных отрезков находится на одном из них, то отрезок разбивается на два и в дальнейших вычислениях воспринимается как два отрезка.

3.3. Сопоставление отрезков

После того, как отрезки были выделены на каждом из изображений, необходимо выполнить их сопоставления: связывание отрезков на разных снимках, соответствующих одним и тем же граням объектов на сцене. Данный этап оказывает существенное влияние на итоговый результат. По этой причине необходимо использовать алгоритмы, обеспечивающие высокую точность сопоставления, к примеру SIFT [11] или ORB [9].

Данные о связывании соседних отрезков, полученные на предыдущем этапе, также могут использоваться для ускорения сопоставления. Связи между отрезками можно использовать в качестве подсказок: связанные (пересекающиеся) отрезки имеет смысл сопоставлять со связанными отрезками на другом снимке [2].

3.4. Предварительное построение плоскостей

На данном этапе в методе перебора плоскостей предлагается для каждого отрезка перебирать все плоскости, образуемые им (все углы поворота вокруг отрезка). Далее, на проекции плоскости на снимок выбираются точки интереса, и сопоставляются с соответствующими точками на других снимках (соответствующие точки находятся за счет преобразования проекции плоскости с одного снимка на другой при использовании информации об ориентировании снимков) [3].

Данная операция дает точные результаты, но полный перебор плоскостей занимает слишком много времени (минуты), особенно если использовать маленький шаг дискретизации угла [3] и является самым длительным этапом алгоритма (до 50% вычислительного времени). Далее считаем, что отрезки перебираются от самого длинного в порядке убывания.

В данной работе предлагается решать эту проблему при помощи информации о связанных отрезках из раздела 3.2. Далее для определенности будем называть отрезок, относительно которого вращаем полуплоскость, — отрезком-осью. Связанный с ним — отрезком-предположением. Используя данные о связи сопоставленных отрезков можно сделать оценку угла наклона полуплоскости относительно отрезка-оси и применять метод перебора плоскостей в окрестности угла, определяемым связанным отрезком (два отрезка однозначно определяют полуплоскость, но из-за

погрешностей и ошибок сопоставления исключительно на это полагаться нельзя). Диапазон перебора углов относительно предположительного угла и шаг перебора являются входными параметрами алгоритма и определяются качеством снимков и характером объектов изображенных на них.

Если брать отрезок-подсказку как есть, то велика вероятность, что из-за ошибок сопоставления и 3d-реконструкции полуплоскость на рассматриваемом отрезке-оси и отрезке-подсказки не будет найдена. По этой причине для нахождения начального приближения полуплоскости используются трехмерные координаты точки пересечения отрезков и дальнего конца отрезка-подсказки. Также стоит учитывать, что подсказка оказалась ложной и искомой полуплоскости не существует. Это определяется слабой корреляцией точек интереса при использовании алгоритма перебора плоскостей.

Если у рассматриваемого отрезка есть несколько связанных с ним отрезков, то описанная выше процедура применяется для каждого из них.

3.5. Валидация и уточнение плоскостей

На предыдущем этапе были получены полуплоскости с большой точностью, однако есть возможность ее увеличить, если есть такая необходимость. Для этого рассматриваются отрезки, находящиеся на проекции плоскости на изображения. Из этих отрезков отфильтровываются короткие для исключения шума и деталей крыши (обычно достаточно фильтровать все отрезки короче трех метров в трехмерном пространстве, но конкретная величина зависит от качества и вида снимков). Далее отфильтровываются отрезки, расстояние концов которых до плоскости превышает погрешность при построении. Данная величина высчитывается на основе шага угла при переборе плоскостей и размера рассматриваемого отрезка: расстояние от одного из концов отрезка до плоскости при его отклонении от нее на угол, равный шагу перебора. Также не рассматриваются отрезки, находящиеся дальше удвоенного размера отрезка-оси.

Из оставшихся отрезков выбираются не более десяти имеющих наименьшее отклонения. И по трехмерным координатам концов отрезков проводится линейная регрессия для уточнения плоскости. Данная операция сходится быстро благодаря точному начальному приближению, полученному на предыдущем этапе.

3.6. Построение результата

На данном этапе предлагается использовать аналогичный этап метода перебора плоскостей без существенных изменений.

Суть этого этапа заключается в ограничении полуплоскостей отрезками, лежащими на них, и выделении новых граней за счет пересечения полуплоскостей.

4. Результаты и выводы

На рис. 2 представлен пример результата работы представленного метода.

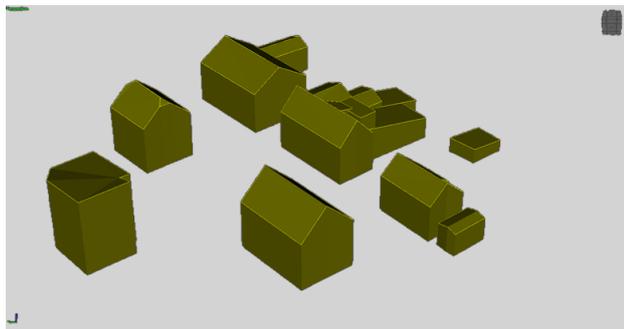


Рис. 2. Объединение отрезков в ломаную.

В таблице 1 приведены данные сравнения представленного метода с методом перебора плоскостей и с методом [5], основанном на использовании облака точек. Представленные методы также были реализованы автором данной работы. Данные приведены для набора из 6 фрагментов снимков размером 1028x891x24. Сцена, представленная на изображениях содержит 8 строений.

Метрика	Метод Baillard'00	Метод Dahlke'15	Данный метод
Точность по плану (пикс)	0.89	0.68	0.81
Точность по высоте (пикс)	2.98	2.01	2.76
Время (сек)	68	236	26

Таблица 1. Таблица 1. Сравнение методов реконструкции

Из результатов, приведенных в таблице 1, следует что представленный метод работает быстрее, чем метод перебора плоскостей и предоставляет точность, не уступающую этому методу. Однако описанный алгоритм уступает более точному алгоритму, использующему облако точек. Данная разница объясняется компромиссом между точностью и скоростью работы.

5. Литература

- [1] Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Автоматическое распознавание зданий на аэрофотоснимках // Труды 16-ой международной конференции САД/CAM/PDM-2016 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта". — 2016. — С. 68-72.
- [2] Волобой А. Г., Новоторцев Л. В. Сопоставление областей на аэрофотоснимках в задаче распознавания строений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. Материалы

двадцать первого научно-практического семинара. — 2018. — С. 17-23.

- [3] 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. — Vol. 33(B2). — P. 56-62.
- [4] Dahlke D., Linkiewicz M. Comparison between two generic 3d building reconstruction approaches — point cloud based vs. image processing based // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2016. — Vol. 41(B3) — P. 599-604.
- [5] Dahlke D., Linkiewicz M., Meissner H. True 3D building reconstruction: façade, roof and overhang modelling from oblique and vertical aerial imagery // International Journal of Image and Data Fusion. — 2015. — Vol. 6(4). — P. 314-329.
- [6] von Gioi R. G. et al. LSD: A fast line segment detector with a false detection control // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2010. — Vol. 32(4). — P. 722-732.
- [7] Malihi S. et al. 3D Building Reconstruction Using Dense Photogrammetric Point Cloud // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, Czech Republic. — 2016. — Vol. 3. — P. 71-74.
- [8] Middleton W. E. K., Spilhaus A. F., Meteorological instruments, University of Toronto, 3rd ed. 1953.
- [9] Rublee E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // 2011 IEEE international conference on Computer Vision (ICCV). — 2011. — P. 2564-2571.
- [10] Wang R., Peethambaran J., Chen D. LiDAR Point Clouds to 3-D Urban Models : A Review // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2018. — Vol. 11(2). — P. 606-627.
- [11] Wang X., Fu W. Optimized SIFT image matching algorithm // IEEE International Conference on Automation and Logistics. — 2008. — P. 843-847.
- [12] Wang Y. C. et al. 3D Reconstruction of Piecewise Planar Models from Multiple Views Utilizing Coplanar and Region Constraints // Journal of Information Science and Engineering. — 2013. — Vol. 29(2). — P. 361-378.
- [13] Wu B. et al. A graph-based approach for 3D building model reconstruction from airborne LiDAR point clouds // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9(1). — P. 92.

Об авторах

Новоторцев Леонид Владимирович, Программист-разработчик АО "Фирма Ракурс". Его e-mail torets13@gmail.com.

Волобой Алексей Геннадьевич, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Его e-mail voloboy@gin.keldysh.ru.