

Аделов Рамиль Мясутевич, аспирант,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск

Щербаков Иван Юрьевич, студент,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск

ИСПРАВЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГОМОГРАФНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Аннотация: Рассмотрена возможность применения гомографных преобразований для исправления проективных искажений изображений.

Ключевые слова: искажения, матрица гомографии, проективные преобразования, панорама, ключевые точки.

Введение

Из-за особенностей оптики, угла съёмки и дестабилизирующих факторов на фотографиях часто возникают геометрические искажения, в том числе проективные. Они приводят к изменению формы объектов, нарушению пропорций и искривлению линий, которые в реальности остаются параллельными [1]. Одним из наиболее заметных проявлений таких искажений являются перспективные искажения. Они возникают, когда плоские объекты фотографируются под углом или с разной высоты относительно камеры, из-за чего параллельные линии объекта на снимке перестают быть параллельными, а объекты приобретают искажённый вид [2]. Это особенно заметно при съёмке архитектуры, документов или предметов с чёткой геометрией. Для исправления таких искажений рассмотрим метод гомографной фильтрации. Этот метод позволяет "перенести" изображение в новую плоскость, корректируя перспективу таким образом, чтобы линии выравнивались, а объекты принимали более естественные пропорции [3, 4].

1. Преобразование гомографии

В контексте компьютерного зрения и обработки изображений термин стал активно использоваться в середине XX века с развитием математических методов компьютерной графики и проектирования. Существенный вклад в практическое использование гомографий в изображениях внесли работы в области компьютерного зрения, такие как исследования Ричарда Хартли и Эндрю Зиссермана, которые описаны в их книге "Multiple View Geometry in Computer Vision" [5].

Гомография представляет собой проективное преобразование, выражающее взаимосвязь между двумя изображениями одной и той же плоскости, снятой под разными углами. Когда делается снимок под углом, отличным от 90°, из-за перспективы удалённые объекты кажутся меньше, а ближние больше. Гомография компенсирует это, «выпрямляя» изображение, как если бы это было снято строго перпендикулярно поверхности [6].

Математически это описывается уравнением:

$$p' = H \cdot p, \quad (1)$$

где: $p = (x, y, 1)$ – координаты точки на исходном изображении; $p' = (x', y', 1)$ – координаты точки на преобразованном изображении; H – матрица гомографии (3x3), описывающая проективное преобразование.



Матрица H включает в себя сдвиг, масштабирование, поворот и сдвиг перспективы. Поскольку гомография является матрицей 3×3 , мы можем записать ее как:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Далее гомография H отображается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} = H \times \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для вычисления элементов матрицы H требуется минимум 4 пары сопряженных точек на изображениях. Чаще всего используется метод наименьших квадратов или алгоритм RANSAC для повышения устойчивости к шуму. Они находят соответствующие точки на двух изображениях (например, с помощью детекторов вроде SIFT или ORB), а затем вычисляют матрицу гомографии [7, 8].

2. Реализации панорамы с помощью гомографии

Рассмотрим пример реализации панорамы. Для решения поставленной задачи использовался язык программирования Python включающий:

OpenCV – библиотека для работы с алгоритмами компьютерного зрения, обработками изображений и численными алгоритмами общего назначения [9];

SIFT (Scale – Invariant Feature Transform) – алгоритм компьютерного зрения для обнаружения ключевых точек и их описания. Он используется для поиска особенностей на изображениях, которые сохраняются при изменении масштаба, поворотах и частично при изменениях освещения;

RANSAC (Random Sample Consensus) – алгоритм нахождения модели в данных с шумом. Он помогает отделить ключевые точки от выбросов и найти наиболее подходящую модель.

Последовательность решения поставленной задачи:

1. Находим ключевые точки на двух изображениях.
2. Отбираем правильные соответствия из найденных точек.
3. Вычисляем матрицу гомографии.
4. Преобразуем изображения для выравнивания.

В качестве примера исходных изображений взяты два перекрывающихся изображения горной местности (рис. 1), снятых под разным углом, используя которые нужно создать панораму.



а б
Рисунок 1. Исходные изображения а и б



Используем алгоритма SIFT, которой включает операции: определяются ключевые точки независимо от масштаба, удаляются ошибочные точки, для каждой точки вычисляется направление градиента, чтобы сохранить ориентацию при преобразованиях. Для каждой ключевой точки создаётся вектор признаков, описывающий её окрестности [10]. Результат приведен на рисунке 2.

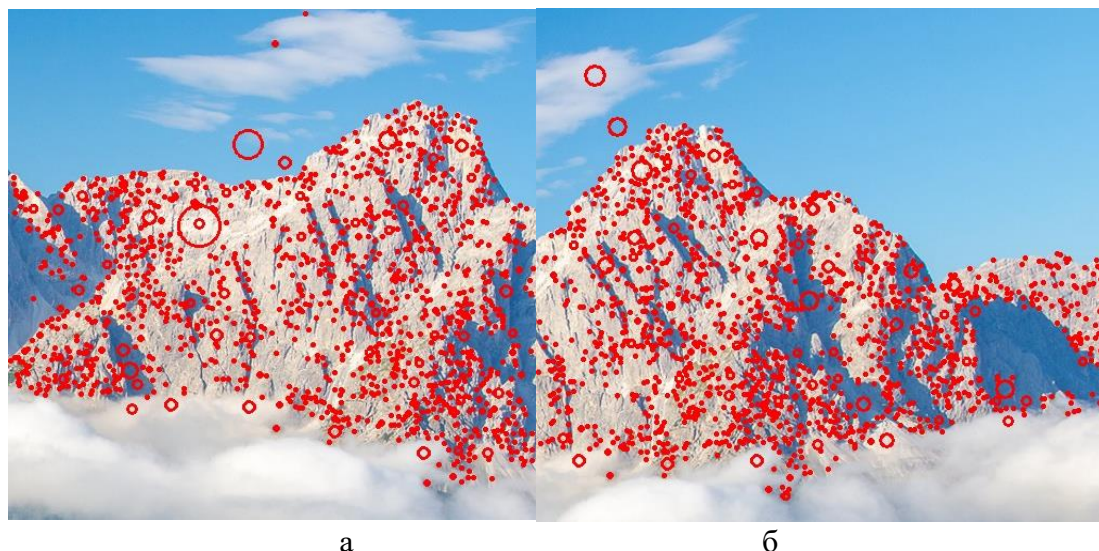


Рисунок 2. Изображения а и б с выделенными ключевыми точками

Потенциальные сопряженные точки ищутся алгоритмом RANSAC. При этом случайным образом выбираются несколько пар точек, на их основе строится модель (матрица гомографии). Проверяется, сколько остальных точек «вписываются» в эту модель. Если модель хороша, она принимается, если нет, то процесс повторяется до удовлетворительного результата. В итоге отображаются только те пары точек, которые согласуются с перспективным преобразованием (показаны на рис. 3) [11, 12].

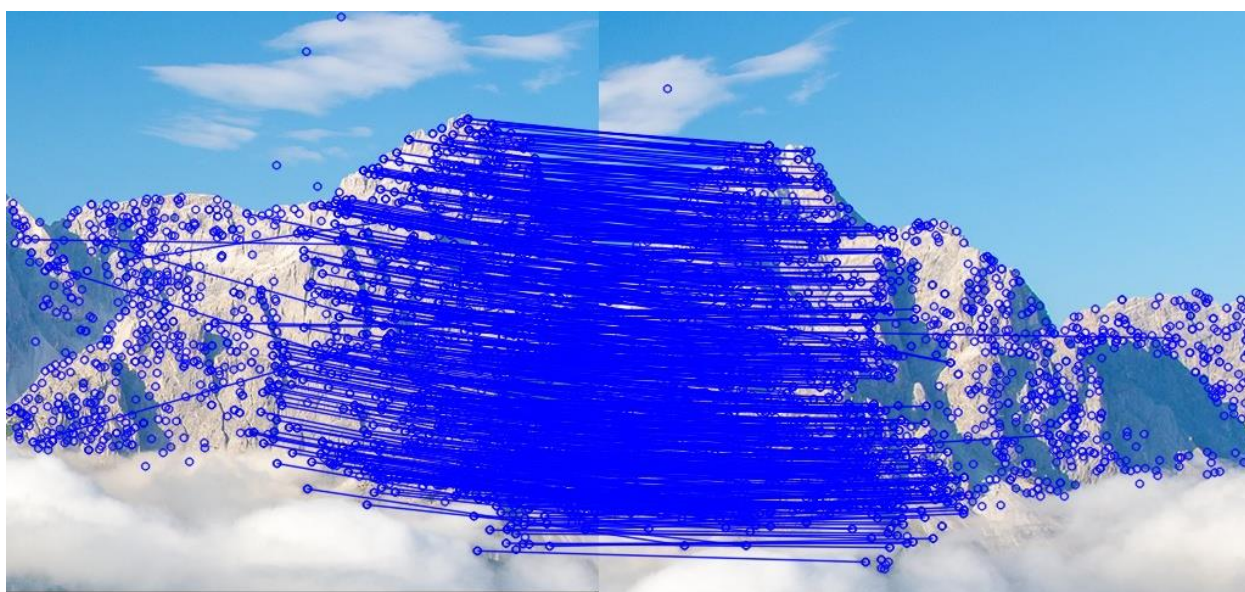


Рисунок 3. Сопоставление ключевых точек



Для наглядности, на рисунке 4 выделены 13 случайных пар совпадений между двумя изображениями.



Рисунок 4. Отображение 13 случайных совпадений

В результате остается набор пар точек, которые соответствуют друг другу на двух изображениях, по которым и находится матрица гомографии H [13]. С помощью найденной матрицы одно изображение «натягивается» на перспективу другого [14]. В рассматриваемом примере, полученное изображение панорамы приведено на рисунке 5. При этом вычисленная матрица гомографии H имеет вид:

$$H = \begin{pmatrix} 0,9665 & 0,2577 & -269,9623 \\ -0,2573 & 0,9665 & 123,3558 \\ 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 \end{pmatrix} \quad (4)$$



Рисунок 5. Деформация первого изображения относительно второго с помощью матрицы гомографии H



Заключение

Исправление перспективных искажений на основе гомографной фильтрации – это эффективный метод, позволяющий восстанавливать геометрию объектов на изображении. Методы коррекции проективных искажений позволяют значительно повысить точность и информативность аэрофотоснимков. Ключевым преимуществом метода является его устойчивость к изменениям масштаба, вращения и освещения, что делает его надежным даже при наличии шумов или неточностей в данных. Данный метод имеет широкий спектр применения в фотографии, где требуется создание панорамных снимков для пейзажной фотографии, с широким углом обзора, в географических информационных системах: сшивание аэрофотоснимков или спутниковых изображений для создания карт и 3D-моделей местности, в виртуальной и дополненной реальности например формирование 360-градусных сцен для VR/AR-приложений, также в робототехнике, где используются панорамы для навигации роботов, беспилотных дронов и требуется построение полной картины окружающей среды. Современные алгоритмы и программное обеспечение упрощают этот процесс, делая его доступным даже для непрофессионалов. С использованием OpenCV этот процесс можно автоматизировать и интегрировать в различные системы компьютерного зрения.

Список литературы:

1. Lindeberg T. Scale-space theory in computer vision. Dordrecht, Netherlands: Springer, Kluwer academic publishers, 1994. 415 p.
2. Пахирка, А.И. Создание панорамных аэрофотоснимков с использованием квадрокоптера /А.И. Пахирка, А.Г. Зотин, В.В. Буряченко // Программные продукты и системы. 2018. С. 362-367.
3. Ефимов А.И., Новиков А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 258-265.
4. Багиров, М.Б., Соколова Э.С. Метод автоматизированной калибровки камер и сшивки видеоизображений в многокамерных системах видеонаблюдения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 7-19.
5. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge: Cambridge University Press 2000. 607 pp., ISBN: 0-521-62304-9.
6. Ефимов А.И., Логинов А.А., Никифоров М.Б., Новиков А.И. Построение матрицы гомографии на основе произвольного количества пар ключевых точек // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Горячая-линия Телеком, 2015. С. 137-139.
7. Mikolajczyk K., Schmid C. Scale and affine invariant interest point detectors // Int. J. of computer vision. 2004. № 1. P. 63–86.
8. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений //Учебное пособие – ИТМО, 2008.
9. Кручинин А. Распознавание образов с использованием OpenCV // Документ 1.0, 2011.
10. Vincent E., Laganier R. Detecting planar homographies in an image pair. Image and Signal Processing and Analysis, 2001. ISPA 2001. Proceedings of the 2nd International Symposium on.
11. Lee J. J., Kim G. Y. Robust estimation of camera homography using fuzzy RANSAC // Int. conf. on computational science and its applications (ICCSA '07), Kuala Lumpur, Malaysia, 26–29 August 2007. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 992–1003.



12. Wu F., Fang X. An improved RANSAC homography algorithm for feature based image mosaic Proc. 7th WSEAS Intern. Conf. on Signal Processing, Computational Geometry & Artificial Vision. World Scientific and Engineering Academy and Society, 2013, pp. 202–207.
13. Chojnacki W, Szpak ZL, Wadenbäck M. The equivalence of two definitions of compatible homography matrices. Patt Recogn Lett 2020; 135: 38-43.
14. Жуковская, А.Н. Алгоритм соединения двух изображений при создании панорамного изображения / А.Н. Жуковская, М.Н. Фаворская // Решетневские чтения. 2018. С. 264-266.

