Impact Factor:					
	ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
	ISI (Dubai, UAE) = 0.829	РИНЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
	GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.997	IBI (India) = 4.260
	JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

SOI: 1.1/TAS DOI: 10.15863/TAS
International Scientific Journal
Theoretical & Applied Science
p-ISSN: 2308-4944 (print) **e-ISSN:** 2409-0085 (online)
Year: 2020 **Issue:** 12 **Volume:** 92
Published: 28.12.2020 **http://T-Science.org**

QR – Issue QR – Article

Vyacheslav Alexandrovich Shein
Russian Technological University – MIREA
Master student, Moscow, Russia
slav1195@yandex.ru

Alexander Olegovich Pak
Russian Technological University – MIREA
Master student, Moscow, Russia
Endemia@yandex.ru

ROAD LANE LINE DETECTION WITH HOUGH TRANSFORM

Abstract: *This article discusses the Hough transform and its mathematical description. Also, an algorithm for software implementation using various computer vision methods for recognizing road marking lines with additional integration into vehicle control systems is considered.*

Key words: *Hough transform, computer vision, recognition, mathematical description, road markings, vehicle navigation, edge detection, gradient.*

Language: *Russian*

Citation: Shein, V. A., & Pak, A. O. (2020). Road lane line detection with hough transform. *ISJ Theoretical & Applied Science, 12 (92),* 401-408.

Soi: http://s-o-i.org/1.1/TAS-12-92-77 ***Doi***: https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.12.92.77

Scopus ASCC: *1707.*

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИНИЙ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ С ПОМОЩЬЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАФА

Аннотация: *В данной статье рассматривается преобразование Хафа и его математическое описание. Также, рассмотрен алгоритм программной реализации с использованием различных методов компьютерного зрения для распознавания линий дорожной разметки с целью дальнейшей интеграцией в различные системы управления транспортными средствами.*

Ключевые слова: *преобразование Хафа, компьютерное зрение, распознавание, математическое описание, дорожная разметка, навигация транспортного средства, обнаружение краев, градиент.*

Введение

Преобразование Хафа — алгоритм, численный метод, применяемый для извлечения элементов из изображения. Используется в анализе изображений, цифровой обработке изображений и компьютерном зрении. Предназначен для поиска объектов, принадлежащих определённому классу фигур, с использованием процедуры голосования. Процедура голосования применяется к пространству параметров, из которого и получаются объекты определённого класса фигур по локальному максимуму в так называемом накопительном пространстве, которое строится при вычислении трансформации Хафа.

При автоматизированном анализе цифровых изображений очень часто возникает проблема идентификации простых фигур, таких как прямые, круги или эллипсы. Во многих случаях используется алгоритм поиска границ в качестве предобработки для получения точек, находящихся на кривой в изображении. Однако, либо из-за зашумлённости изображения, либо из-

за несовершенства алгоритма обнаружения границ, могут появиться «потерянные» точки на кривой, также, как и небольшие отклонения от идеальной формы прямой, круга или эллипса. По этим причинам часто довольно сложно приписать найденные границы соответствующим прямым, кругам и эллипсам в изображении. Назначение преобразования Хафа — разрешить проблему группировки граничных точек путём применения определённой процедуры голосования к набору параметризованных объектов изображения.

Математическое описание

В простейшем случае преобразование Хафа является линейным преобразованием для обнаружения прямых. Прямая может быть задана уравнением прямой (1) и может быть вычислена по любой паре точек (x, y) на изображении.

$$y = mx + b \qquad (1)$$

Главная идея преобразования Хафа — учесть характеристики прямой не как уравнение, построенное по паре точек изображения, а в терминах её параметров, то есть m — углового коэффициента и b — точки пересечения с осью ординат. Исходя из этого, прямая, заданная уравнением (1), может быть представлена в виде точки с координатами (b, m) в пространстве параметров.

Однако прямые, параллельные оси ординат, имеют бесконечные значения для параметра m. Поэтому удобней представить прямую с помощью других параметров, известных как r и θ [rho, theta]. Параметр r — это длина радиус-вектора ближайшей к началу координат точки на прямой (т.е. нормали к прямой, проведенной из начала координат), а θ — это угол между этим вектором и осью абсцисс. При таком описании прямых не возникают бесконечные параметры.

Таким образом, уравнение прямой можно записать как

$$y = \left(-\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\right)x + \left(\frac{r}{sin\theta}\right), \qquad (2)$$

А после преобразования

$$r = xcos\theta + ysin\theta. \qquad (3)$$

Поэтому возможно связать с каждой прямой на исходном изображении (в плоскости X-Y) точку с координатами r, θ в плоскости параметров, которая является уникальной при условии, что $\theta \in [0, \pi]$ и $r \in \boldsymbol{R}$, или что $\theta \in [0,2\pi]$ и $r > 0$.

Плоскость (r,θ) иногда называется Пространством Хафа для множества прямых в 2-мерном случае. Преобразование Хафа концептуально очень близко к 2-мерному преобразованию Радона и может рассматриваться как его дискретное представление.

Через каждую точку плоскости может проходить бесконечно много прямых. Если эта точка имеет координаты (x_0, y_0), то все прямые, проходящие через неё, соответствуют уравнению:

$$r(\theta) = x_0 cos\theta + y_0 sin\theta. \qquad (4)$$

Это соответствует синусоидальной линии в пространстве Хафа (r, θ), которая, в свою очередь, уникальна для данной точки и однозначно её определяет. Если эти линии (кривые), соответствующие двум точкам, накладываются друг на друга, то точка (в пространстве Хафа), где они пересекаются, соответствует прямым (в оригинальном месте изображения), которые проходят через обе точки. В общем случае, ряд точек, которые формируют прямую линию, определяют синусоиды, которые пересекаются в точке параметров для той линии. Таким образом, проблема обнаружения коллинеарных точек может быть сведена к проблеме обнаружения пересекающихся кривых.

Реализация

Алгоритм преобразования Хафа использует массив, называемый аккумулятором, для определения присутствия прямой (1). Размерность аккумулятора равна количеству неизвестных параметров пространства Хафа. Например, для линейной трансформации нужно использовать двумерный массив, так как имеются два неизвестных параметра: m и b. Два измерения аккумулятора соответствуют квантованным значениям параметров m и b. Для каждой точки и её соседей алгоритм определяет, достаточен ли вес границы в этой точке. Если да, то алгоритм вычисляет параметры прямой и увеличивает значение в ячейке аккумулятора, соответствующей данным параметрам.

Потом, найдя ячейки аккумулятора с максимальными значениями, обычно поиском локального максимума в пространстве аккумулятора, могут быть определены наиболее подходящие прямые. Самый простой способ — это пороговая фильтрация. Однако в разных ситуациях разные методы могут давать разные результаты. Так как полученные прямые не содержат информацию о длине, следующим шагом является нахождение частей изображения, соответствующих найденным прямым. Более того, из-за ошибок на этапе определения границ фигур в пространстве аккумулятора также будут содержаться ошибки. Это делает поиск подходящих линий нетривиальным.

Для начала необходимо решить более простую задачу. Прежде всего, один очевидный способ облегчить проблему – это разработать наше решение для одного изображения. В конце концов, видео – это просто серия изображений. Затем можно перейти к запуску программы по кадрам входного видео в качестве окончательного решения исходной проблемы обработки всего видео для обнаружения полосы.

Рисунок 1 - Пример входного изображения

На рисунке 1 полосы движения очевидны для любого человека-наблюдателя. Выполняя обработку этого изображения интуитивно, и после обучения вождению человек может определить полосу движения, по которой движется транспортное средство. Люди также без труда идентифицируют многие другие объекты на сцене, такие как другие транспортные средства, насыпь возле правой стороны дороги, некоторые дорожные знаки вдоль дороги и даже горы, видимые на горизонте. Хотя многие из этих объектов имеют сложную визуальную структуру, можно сказать, что маркеры полос на самом деле являются одними из самых простых структур на изображении.

Предварительные знания о вождении дают нам определенные предположения о свойствах и структуре полосы движения, что еще больше упрощает проблему. Одно очевидное предположение состоит в том, что полоса ориентирована параллельно направлению движения. В этом случае линии, обозначающие полосу, будут иметь тенденцию проходить от переднего плана изображения к фону вдоль путей, которые слегка наклонены внутрь. Также, можно предположить, что линии никогда не дойдут до горизонта, либо исчезнув с расстояния, либо скрывшись на пути каким-либо другим элементом изображения.

Одним очень простым фильтром на изображении может быть обрезка всех областей, которые, по нашему мнению, никогда не будут содержать информацию о маркерах полосы движения. В данной работе потребуется использовать следующие инструменты: выбор цвета, выбор области интереса, масштабирование в оттенках серого, сглаживание по Гауссу, обнаружение краев и обнаружение линии преобразованием Хафа.

В первую очередь хотелось бы отметить, что помимо дорожной разметки на изображение находятся и другие объекты. Поэтому необходимо выбрать область интересов. Далее, определим набор точек, которые описывают область интереса, которую хотим вырезать из оригинала. Необходимо учитывать, что начало координат, точка (0,0), находится в верхнем левом углу.

Необходимо получить область интереса, которая полностью содержит линии полосы движения. Одной простой формой, которая позволит достичь этой цели, является треугольник, который начинается в нижнем левом углу изображения, продолжается до центра изображения на горизонте, а затем

следует за другим краем в нижнем правом углу изображения.

Чтобы определить грани, давайте внимательно посмотрим на разметку полосы, которую надо обнаружить.

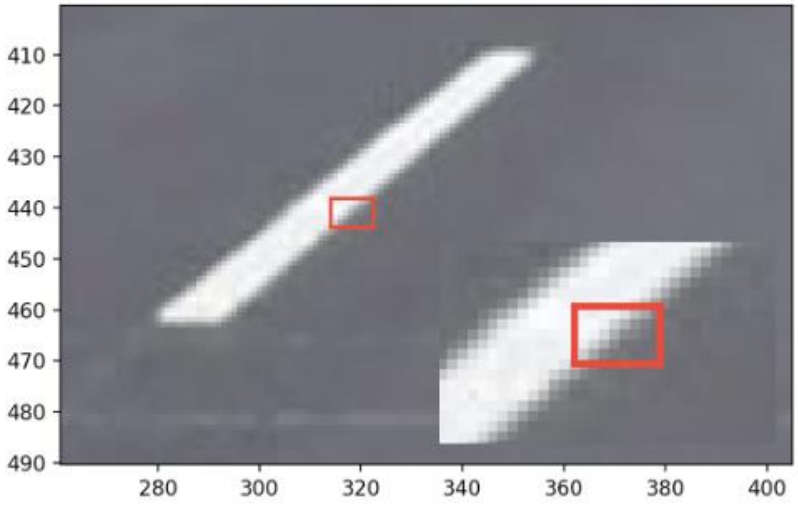

Рисунок 2 - Разметка полосы с выделенным участком, иллюстрирующая градиент кромки

Если рассмотреть рисунок 2, на котором изображена разметка, то довольно интуитивно заметим то, что края – это просто области изображения, где значения цвета меняются очень быстро. Следовательно, обнаружение краев в изображении становится математической проблемой обнаружения любой области, где пиксель имеет несоответствие цвета всем его соседям.

Ученый Джон Ф. Кэнни изобрел алгоритм, чтобы сделать это, используя вариационное исчисление, чтобы достигнуть его решения. Алгоритм заключается в том, что обнаруживает области изображения, которые имеют сильный градиент в цветовой функции изображения, а также добавляет пару пороговых параметров интенсивности, которые в целом указывают, насколько сильным должен быть обнаружен край.

На самом деле нам не интересны цвета картинки, только разница между их значениями интенсивности. Чтобы упростить процесс обнаружения краев, можно преобразовать изображение в оттенки серого. Это удалит информацию о цвете и заменит ее одним значением интенсивности для каждого пикселя изображения. Теперь наше решение заключается в использовании «Canny Edge Detection» для нахождения областей изображения, которые быстро меняются по значению интенсивности.

Теперь, когда обработали изображение до набора пикселей, представляющих края, нужно связать эти пиксели вместе, чтобы сформировать список линий. Это еще одна проблема, которая может быть решена с помощью довольно сложной математической теории.

У нас есть изображение, состоящее в основном из пустых пикселей и нескольких рассеянных «краевых пикселей», которые не имеют известной структуры, но могут быть легко распознаны как линия для человеческого наблюдателя. Чтобы решить это, давайте еще раз посмотрим на ту же разметку полосы на примере обнаружения края (рис. 3).

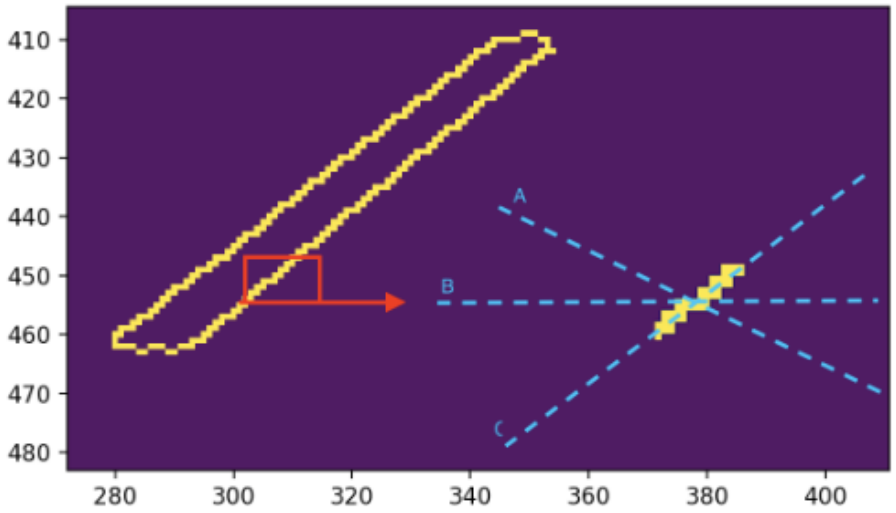

Рисунок 3 – Пример полосы движения, определение краев

Если обратить пристальное внимание на область, которая выглядит как линия, можно обнаружить, что у краевых пикселей есть что-то общее. Следует представить все возможные линии, которые проходят через каждый пиксель, но точки имеют только несколько общих линий. Эти общие линии можно рассматривать как кандидатов на действительную линию (если она существует), которая проходит через все близлежащие краевые пиксели.

Мы изменили сложную задачу интерпретации многих линий из всей матрицы изображения краевых пикселей и нулей в гораздо более простую задачу обнаружения линий, которые пересекают несколько краевых пикселей одновременно. Есть бесконечно много линий, которые проходят через каждый из краевых пикселей, поэтому нельзя просто проверить все линии, чтобы увидеть, соответствуют ли они многим пикселям вокруг выбранного пикселя. Однако можно использовать математический трюк для преобразования входных данных таким образом, что для каждой строки, которую необходимо обнаружить, существует единственное решение.

Основная концепция, применяема здесь, называется преобразованием Хафа. Применяя преобразование Хафа, преобразуем все наши краевые пиксели в другую математическую форму. После завершения преобразования каждый краевой пиксель в «Пространстве изображения» станет линией или кривой в «Пространстве Хафа». В пространстве Хафа каждая линия представляет точку из пространства изображения, а каждая точка представляет линию из пространства изображения (рис. 4).

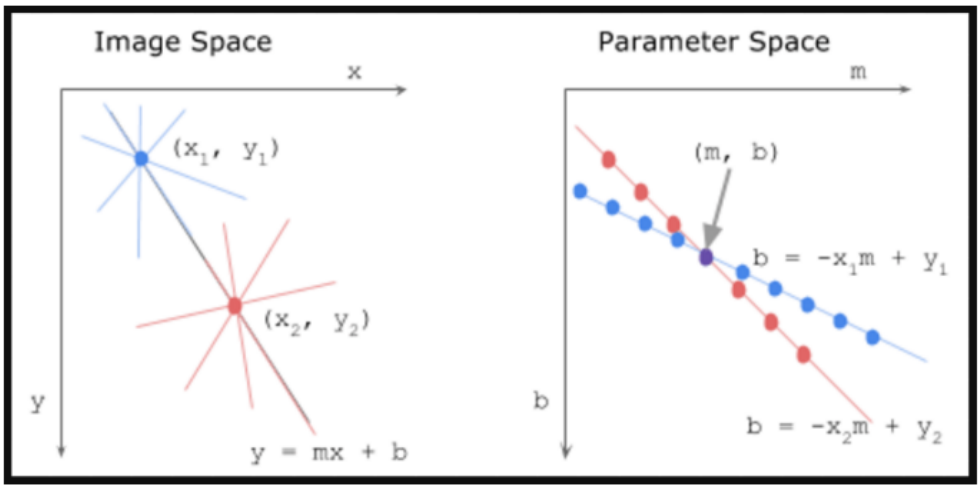

Рисунок 4 - Иллюстрация пространства изображения и его соответствие пространство Хафа

Теперь не нужно искать линию, которая пересекает все соседние краевые пиксели. Вместо этого можно просто найти пересечения между линиями в Пространстве Хафа и преобразовать эту точку пересечения обратно в Пространство изображений, чтобы получить линию, которая пересекает достаточное количество краевых пикселей. Входные данные для преобразования Хафа можно варьировать, чтобы изменить, какие линии считаются реальной особенностью сцены, а какие - просто беспорядочными.

В пакете OpenCV есть функция генерации линий Хафа из изображения, содержащего краевые пиксели. Запустим этот алгоритм на изображении с некоторыми разумными параметрами. Это сгенерирует список всех линий, которые, как полагает «Hough Transform», являются частью сцены, а не беспорядком из предыдущего шага обнаружения краев.

Последним шагом в нашей программе будет создание только одной стороны для каждой из групп линий, которые нашли в последнем шаге. Это может быть сделано путем подгонки простой линейной модели к различным конечным точкам отрезков в каждой группе, а затем визуализации единственной линии наложения на этой линейной модели.

Однако сначала нужно определить, какие строки находятся в левой группе, а какие – в правой. Очевидное различие между двумя группами отрезков – это направление их наклона. Направление наклона линии описывает, движется ли линия вверх или вниз. Принято, что линия с отрицательным наклоном движется вниз, а линия с положительным наклоном - вверх. Так работает направление наклона в нормальных системах координат, где начало координат находится в нижнем левом углу. В нашей системе координат, однако, начало координат находится в верхнем левом углу, и поэтому наши направления наклона будут изменены на противоположные, причем отрицательные наклоны будут двигаться вверх, а положительные наклоны будут идти вниз.

На изображениях все отметки левой полосы имеют отрицательный наклон, что означает, что линии движутся вверх к горизонту, когда движемся слева направо по линиям. С другой стороны, все отметки на правой полосе имеют положительный наклон и движутся вниз к нижней части изображения, когда мы движемся вдоль них слева направо. Это будет различие, которое используем для группировки левой и правой линий. Кроме того, разметка полосы выглядит экстремально на склоне, поэтому не будем рассматривать линии с абсолютным значением наклона меньше, чем 0,5. Это означает, что отклоним любую линию, которая не движется быстро к горизонту или нижней части изображения, оставляя только линии, которые ближе к вертикали, чем к горизонтали.

Вторая проблема в нашей задаче создания одной линии состоит в том, чтобы усреднить строки в каждой группе в одну линию, которая очень точно соответствует ориентации и местоположению на изображении.

Двумя известными значениями являются *y* значения для верхней и нижней конечных точек сегментов, которые обе линии будут содержать совместно. Необходимо, чтобы линии начинались в нижней части изображения и двигались вдоль разметок полос к горизонту, заканчиваясь чуть ниже горизонта. Тогда проблема становится упражнением в поиске правильных *x* значений для каждой точки двух отрезков. Чтобы найти правильные *x* значения для верхней и нижней точек каждой линии, можем разработать две функции, которые определяют левую и правую линии. Затем можем подать два общих «y» значения в функции, чтобы найти *x* значения, которые завершают наши координаты конечной точки.

В результате проделанной работы получаем обработанное изображение, на котором выделена дорожная разметка (рис. 5).

Рисунок 5 - Обработанное изображение

Можно заметить, что на изначальное изображение были наложены красные линии. Данная программа продемонстрировала отличный результат по распознаванию дорожной разметке и на основе этого можно построить систему ориентации транспортного средства.

Вывод

Вышеприведенные результаты являются важным инструментом для реализации планирования траектории, что и позволит управлять мобильным роботом. Поскольку, обладая координатами дорожной разметки, необходимо управлять роботом таким образом, чтобы удерживать его в центре полосы движения. Тем самым, необходимо вычислить угол поворота робота. Нужно реализовать центральную линию обладающая требуемым углом наклона. Это легко реализовать путем усреднения дальних конечных точек выделенных линий. А поскольку, камера установлена в центре мобильного робота и направлен прямо вперед, начало этой линии будет всегда находиться в центре нижней части изображения. В результате, соединяя нижнюю и конечную точку можно получить вектор направления движения мобильного робота. Осуществив простейшие тригонометрические преобразования, вычисляется требуемый угол поворота мобильного робота. Необходимую скорость движения можно пропорционально сопоставить с длинной данной центральной линии. Обладая значениями скорости и угла поворота, возможно осуществить планирование траектории для системы управления мобильным колесным роботом.

References:

1. Chollet, F. (2018). *Deep learning with Python*. (Series «Programmer's library»). (p.400). St.P.: Peter.
2. Wan, Y.F., Cabestaing, F., & Burie, J.-C. (2010). *"A new edge detector for Obstacle Detection with a Linear Stereo Vision System"*, IEEE Proceedings, (pp. 130 – 135).
3. Chen, L., Li, Q., & Zou, Q. (2010). *"Block-Constraint Line Scanning Method for Lane Detection"*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium.
4. Jung, C. R., & Kelber, C. R. (2004). *"A robust linear parabolic model for lane following,"* Proceedings of XVII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, Oct. 2004, pp. 7279.
5. Ko, N. Y., Simmons, R., & Kim, K. (2010). "A Lane based obstacle avoidance Method for

Mobile Robot Navigation", *KSME International Journal*, Vo. 17, No. 11, pp. 1693-1703.

6. Haralick, R. M., & Shapiro, L. G. (1992). *"Computer and Robot Vision,"* Vol.1, Addison Wesley Publishing Company Inc.
7. Simon, J.D. (n.d.). *Computer Vision: Models, Learning, and Inference.* Jan Erik Solem, Programming Computer Vision with Python.
8. Satzoda, R.K., Sathyanarayana, S., & Srikanthan, T. (2010). Hierarchical Additive Hough Transform for Lane Detection. *J. IEEE Embedded Systems Lett*. 2, 23–26 (2010).
9. Aly, M. (2008). *Real Time Detection of Lane Markers in Urban Streets*. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 7–12. IEEE Press, New York (2008)
10. (n.d.). *DeepPiCar — Part 4: Autonomous Lane Navigation via OpenCV* // towards data science (Data of access: 04.04.2020). Retrieved from https://towardsdatascience.com/deeppicar-part-4-lane-following-via-opencv-737dd9e47c96