

Обработка полусферических изображений: идентификация вертикальных линий

Александр ОВЧИННИКОВ,
к. т. н.
Фан Чан Данг ХОА
(Phan Tran Dang KHOA)
admin_telex@mail.ru

В статье рассматривается метод идентификации вертикальных линий на последовательности изображений, формируемых полусферическими камерами прикладных телевизионных систем. Приведены результаты расчетного моделирования и практические рекомендации по организации и усовершенствованию вычислений согласно данному методу.

Введение

В работе [1] рассмотрен алгоритм выделения вертикальных линий на полусферических изображениях. Очевидно, что вертикальные линии, выделенные на одном изображении, несут мало информации о пространственном положении подвижного объекта, на котором размещена полусферическая камера. Типичными примерами подвижных объектов являются мобильные промышленные и бытовые роботы, транспортные средства для внутрицеховых перевозок и т. п. Для решения задачи навигации подобных объектов необходима обработка последовательности кадров окружающего пространства с выделением на них вертикальных линий и анализом их «перемещения» по изображениям.

Так, используя достаточное количество пар соответствующих вертикальных линий на нескольких кадрах (≥ 3) окружающего пространства, можно составить систему уравнений, в которой угловые координаты вертикальных линий между двумя кадрами связаны параметрами движения (смещение и поворот). В результате решения системы уравнений мы получаем параметры движения, которые могут быть пересчитаны в перемещение самого подвижного объекта.

Поэтому цель авторов статьи — решение задачи идентификации или сопоставления выделенных вертикальных линий на различных кадрах.

Дескриптор вертикальных линий и требования к нему

Наиболее популярным подходом для решения задачи идентификации линий на последовательности изображений является сравнение окрестностей вертикальных линий. Существует несколько методов сравнения окрестностей линий на основе различных признаков. Но эти методы ориентированы

на работу с традиционными изображениями, характеризуемыми линейным разрешением по каждой из осей, и при работе с полусферическими изображениями показывают низкую эффективность.

Для устранения этого недостатка авторы предлагают при работе с полусферическими изображениями использовать метод сравнения окрестностей на основе дескрипторов: при сопоставлении объектов для принятия решения об их идентичности сравниваются дескрипторы этих объектов. По сравнению с другими методами идентификация на основе дескрипторов позволяет выбрать эффективные признаки объекта и методы их вычисления. Таким образом, обеспечивается меньшая чувствительность к параметрам самого изображения.

В общем случае дескриптором является числовая форма, удобная для последующей компьютерной обработки и используемая для описания признаков объекта. Например, для объекта в виде кривой линии признаками могут быть длина и параметры кривизны определенных участков, а также точки изменения кривизны. Дескриптор в этом случае будет составлен из числовых значений признаков.

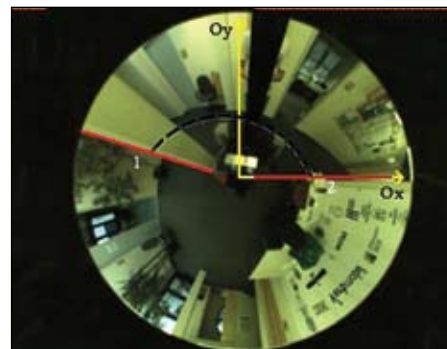


Рис. 1. Поворот вертикальной линии и области интереса к горизонтальной оси OX:
1 — исходное положение линии;
2 — новое положение линии

Дескриптор, предназначенный для сопоставления линий на полусферических изображениях, должен обеспечивать инвариантность к изменению освещенности (яркости изображения) и повороту. Последнее условие связано с тем, что при перемещении полусферической видеокамеры изображения вертикальных линий в виде радиальных прямых поворачиваются вокруг центра изображения.

Инвариантность дескриптора к изменению яркости изображения обеспечивается нормированием яркости областей интереса [2]:

$$I_{\text{норм}}(x, y) = \frac{I(x, y) - \bar{I}}{\sigma},$$

где $I(x, y)$ — яркость пикселя (x, y) ; \bar{I} , σ — среднее значение и среднеквадратичное отклонение яркости пикселей области интереса.

Инвариантность дескриптора к повороту авторы предлагают обеспечить вращением всех выделенных линий и их областей интереса в определенное фиксированное положение, совпадающее, например, с осью OX (рис. 1). Операция поворота реализуется на основе уравнения:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

где α — угол наклона прямой линии; (x, y) и (u, v) — соответственно старые и новые координаты точки изображения.

Оформление дескриптора вертикальной линии на полусферическом изображении начинается с выделения области интереса, которая представляет собой прямоугольную область изображения, содержащую вертикальную линию и ее окрестность. Длина области равна длине линии, а ширина может изменяться в зависимости от разрешения изображений и сцены.

Для более детального описания вертикальной линии авторы предлагают разбивать об-

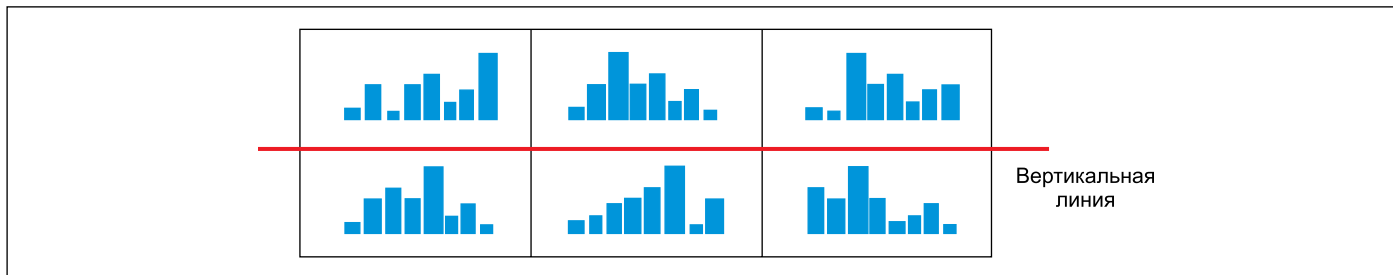


Рис. 2. Структура дескриптора вертикальной линии

ласть интереса на две части по ширине и каждой части присваивать свой дескриптор. Такой подход позволит дополнительно отличать левую и правую части вертикальной линии и с высокой вероятностью идентифицировать линии, области интереса которых отличаются незначительно.

В свою очередь, каждая часть области интереса для более детального описания разбивается на секторы, которые описываются своими дескрипторами. Совокупность дескрипторов всех секторов составляет дескриптор каждой части области интереса, а дескрипторы частей области интереса образуют дескриптор вертикальной линии (рис. 2).

Рассмотрим подробнее процесс вычисления признаков дескриптора вертикальных линий полусферического изображения.

Существует несколько основных признаков для описания областей изображения, например яркость, текстура, спектр и т. д. Но ограничения на использование этих признаков и неустойчивость к ряду искажений полусферических изображений [3] не позволяют применить данные признаки для решения поставленной задачи. Авторы предлагают применить более эффективный признак — гистограмму направлений градиента (ГНГ) [4].

Градиент — это векторная величина, показывающая направление наискорейшего возрастания яркости. Гистограмма направлений

градиента является распределением направлений вектора градиента точек, принадлежащих области интереса.

Вычисление ГНГ проводится по следующему алгоритму:

1. Вычисляются модуль и фаза вектора градиента точек области интереса по выражениям:

$$G_x(x, y) = \frac{\delta I(x, y)}{\delta x} = [I(x-1, y+1) + I(x, y+1) + I(x+1, y+1)] - [I(x-1, y-1) + I(x, y-1) + I(x+1, y-1)];$$

$$G_y(x, y) = \frac{\delta I(x, y)}{\delta y} = [I(x+1, y-1) + I(x+1, y) + I(x+1, y+1)] - [I(x-1, y-1) + I(x-1, y) + I(x-1, y+1)];$$

$$|G(x, y)| = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)};$$

$$\Phi(x, y) = \arctg \left[\frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \right],$$

где $I(x, y)$ — яркость точки изображения с координатами (x, y) ; $G_x(x, y)$ и $G_y(x, y)$ — проекции градиента на горизонтальную и вертикальную оси соответственно.

2. Для снижения влияния на результат точек изображения, находящихся далеко от линии в области интереса, каждой точке области присваивается весовой коэффициент, который выбирают из значения функции Гаусса с дисперсией, равной $1/2$ ширины области интереса. Модуль градиента точки с учетом весового коэффициента определяется выражением:

$$|G'(x, y)| = f(x, y) \times |G(x, y)|,$$

где $f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ — функция Гаусса.

3. Диапазон изменения направления градиента ($0-360^\circ$) разбивается на равные поддиапазоны. Каждому из поддиапазонов ставится в соответствие ячейка в ГНГ.
 4. Для всех точек области находятся соответствующие ячейки гистограммы.
 5. Вычисляется значение гистограммы в каждом поддиапазоне суммированием амплитуд градиентов точек изображения, соответствующих данному поддиапазону.
- На рис. 3 показано тестовое изображение и соответствующая ему гистограмма направлений градиента.

Дескриптор в виде численного вектора на основе ГНГ вычисляют для каждого сектора. Упорядоченный набор дескрипторов всех секторов является окончательным дескриптором области интереса вертикальной линии.

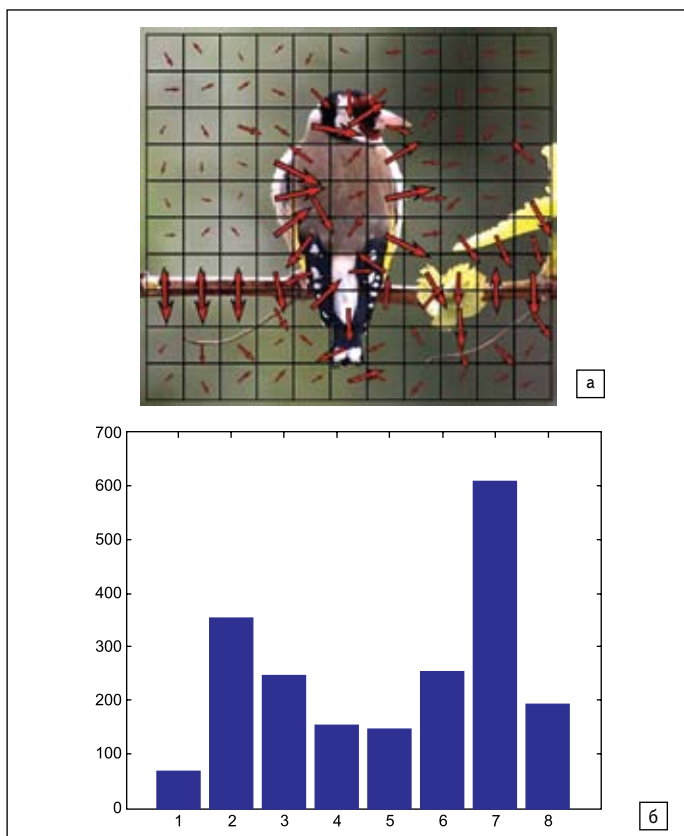


Рис. 3. Изображение (а) и соответствующая ему гистограмма направлений градиента (б)

Сравнение дескрипторов вертикальных линий

Рассмотрим метод идентификации вертикальных линий между двумя последовательными кадрами на основе сравнения дескрипторов.

Как было показано выше, каждая вертикальная линия на полусферическом изображении характеризуется дескриптором. Это сводит задачу идентификации вертикальных линий на изображениях двух последовательных кадров к сравнению дескрипторов линий этих кадров друг с другом и определению парных.

Наибольшее распространение для сравнения объектов классификации получил метод, основанный на вычислении евклидова расстояния.

Евклидово расстояние между двумя произвольными векторами $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, где x_i и y_i — параметры классификатора, определяется выражением:

$$d(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}.$$

Пара векторов, которая имеет евклидово расстояние меньше заданного порога, считается соответствующей.

Экспериментальные исследования показали, что использование евклидова расстояния в качестве критерия сравнения дескрипторов вертикальных линий полусферических изображений характеризуется высокой вероятностью ложной идентификации.

Для увеличения точности идентификации вертикальных линий метод сравнения на основе вычисления евклидова расстояния был модифицирован: первый кандидат, соответствующий наименьшему расстоянию, считается верным соответствием только тогда, когда он отстоит от следующего кандидата на достаточное уверенное (большое) расстояние. Это обеспечивается выполнением условия $K > K_{\text{пор}}$, где $K = d_1/d_2$; $K_{\text{пор}}$ — пороговый коэффициент; d_1, d_2 — евклидовы расстояния до первого и второго кандидатов соответственно.

Исследование зависимости эффективности метода идентификации вертикальных линий от параметров дескриптора

Идентификация линий — это задача проверки статистических гипотез, имеющая бинарное решение (соответствуют или нет две вертикальные линии) принимающееся на основе некоторого критерия. При этом решение с некоторой вероятностью может давать ложный результат.

Пусть количество вертикальных линий первого изображения, для которых выпол-

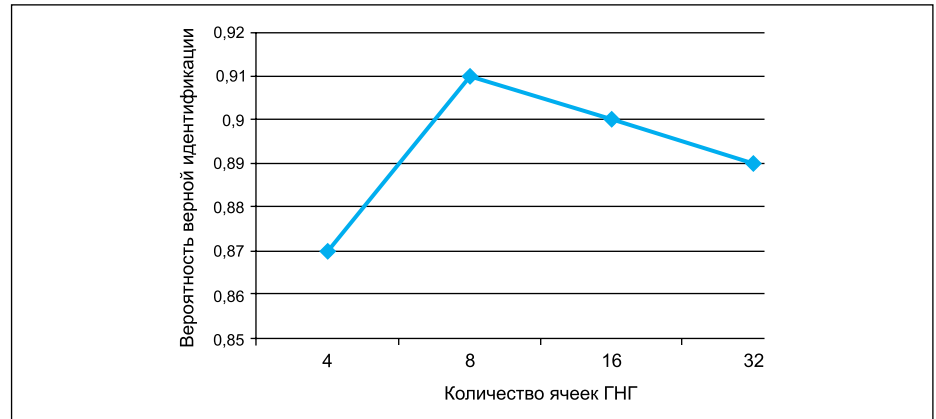


Рис. 4. Усредненная зависимость вероятности верной идентификации от количества ячеек ГНГ

нен процесс сопоставления с вертикальными линиями второго изображения, равно N . Из них N_n — количество «положительных» вертикальных линий, имеющих соответствующие линии на втором изображении, а N_o — количество «отрицательных» вертикальных линий, не имеющих соответствующих линий на втором изображении. При этом выполняется условие $N = N_n + N_o$.

Верной идентификацией является случай, при котором исходная положительная вертикальная линия после проверки гипотез принимается положительной.

Вероятность верной идентификации линий определяется выражением:

$$TPR = (TP/N_n) \times 100\%,$$

где TP — количество верно сопоставленных вертикальных линий; N_n — количество соответствующих линий на изображениях.

Ложной идентификацией является случай, при котором исходная отрицательная вертикальная линия после проверки гипотез принимается положительной.

Вероятность ложной идентификации определяется выражением:

$$FPR = (FP/N_o) \times 100\%,$$

где FP — количество отрицательных вертикальных линий, принятых как положитель-

ные; N_o — количество отрицательных вертикальных линий, не имеющих соответствующих на втором изображении.

Метод идентификации вертикальных линий, предложенный авторами, основан на дескрипторе, характеризующемся четырьмя параметрами: количество ячеек гистограммы направлений градиента, ширина и количество секторов, коэффициент порога $K_{\text{пор}}$. Изменение любого из этих параметров влияет на конечный результат. Ниже приведены результаты исследования влияния каждого из параметров дескриптора на вероятность верной идентификации. Исследования выполнялись на 30 парах полусферических изображений различных сцен.

Влияние количества ячеек гистограммы направлений градиента на вероятность верной идентификации

Усредненная зависимость вероятности верной идентификации от количества ячеек ГНГ представлена на рис. 4.

Анализ полученной графической зависимости (рис. 4) показывает, что изменение количества ячеек, используемых для построения гистограммы, не сильно влияет на результат верной идентификации линий. Оптимальным количеством ячеек ГНГ является восемь, при этом обеспечивается не только максимум вероятности верной идентификации, но и небольшой размер дескриптора.

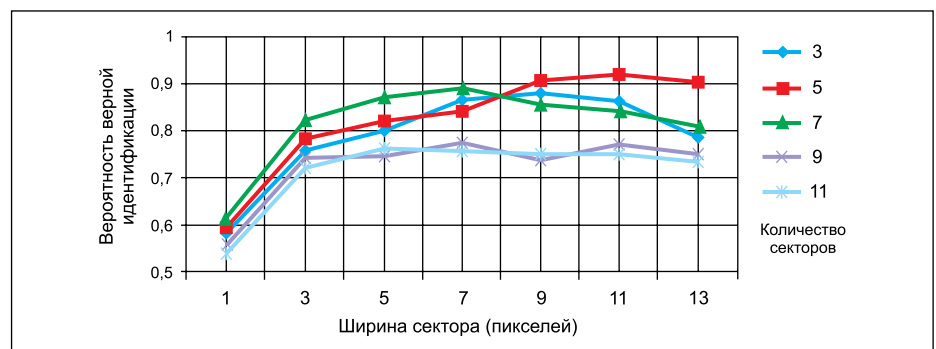


Рис. 5. Усредненная зависимость вероятности верной идентификации от ширины сектора для разных значений количества секторов

Влияние количества и ширины секторов на вероятность верной идентификации

Усредненная зависимость вероятности верной идентификации от ширины сектора для разных значений количества секторов показана на рис. 5.

Как видно на рис. 5, увеличение количества секторов и их ширины приводит к росту чувствительности дескриптора к окружающей сцене и постепенному снижению вероятности верной идентификации линий. Максимальная вероятность верной идентификации соответствует пяти секторам шириной в 11 пикселей.

Влияние коэффициента порога $K_{пор}$ на вероятности верной и ложной идентификации

На рис. 6 показан график типа ROC-кривой (от англ. receiver operating characteristic) [5], который описывает зависимость вероятности верной идентификации от вероятности ложной идентификации при варьировании коэффициента порога $K_{пор}$ в диапазоне от 0 до 1.

Расчетные данные и графическая зависимость (рис. 6) показывают, что увеличение коэффициента порога $K_{пор}$ приводит к одновременному росту вероятностей верной и ложной идентификации.

Значение порога $K_{пор} = 0,55$ обеспечивает компромисс: вероятности верной и ложной идентификации соответственно равны 0,92 и 0,12.

Результаты идентификации вертикальных линий на двух полусферических изображениях

На основе предложенного в этой статье метода был разработан и реализован в среде MATLAB алгоритм идентификации вертикальных линий на полусферических изображениях. Результаты работы программы на примере обработки двух последовательных полусферических изображений приведены на рис. 7. Представленные на рисунке изображения были получены в светлое время суток внутри помещения с искусственным освещением. Второе изображение получено после поворота камеры на 22° по часовой стрелке и смещения на 0,813 м вперед.

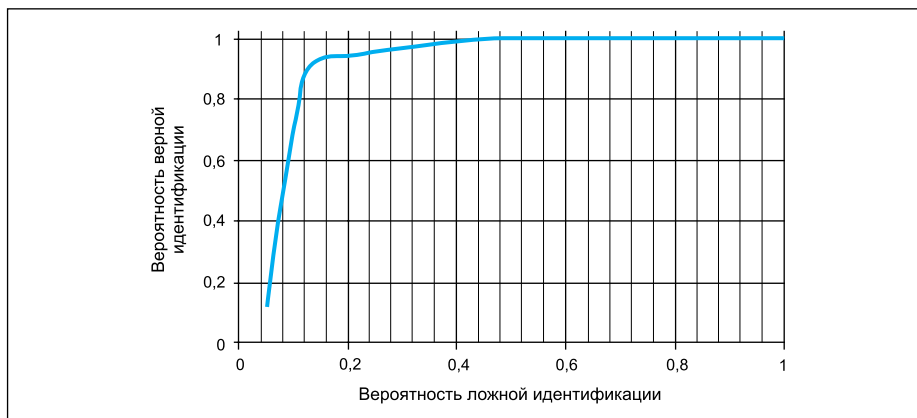


Рис. 6. Усредненная зависимость вероятности верной идентификации (TPR) от вероятности ложной идентификации (FPR)

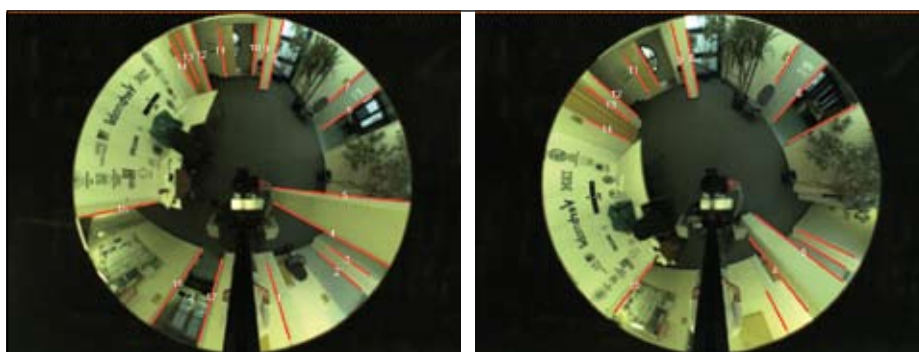


Рис. 7. Результаты идентификации вертикальных линий между двумя кадрами

На первом и втором кадре (рис. 7) первоначально было выделено 17 и 16 вертикальных линий соответственно. Идентификация линий двух кадров позволила поставить в соответствие 11 вертикальных линий: соответствующие линии имеют одинаковые номера на первом и втором кадрах. Таким образом, предложенный метод обеспечил сопоставление 68% вертикальных линий.

Этот результат достаточно высок с учетом того, что даже незначительные смещения и повороты объекта, на котором установлена полусферическая камера, приводят к сильным различиям изображений и трансформации линий (слияние и перекрытие другими объектами).

Заключение

Разработанные и описанные авторами в работе [1] и настоящей статье методы и алгоритмы позволяют вплотную приблизиться к решению задачи получения информации об угловых перемещениях объектов-носителей полусферических камер.

Литература

1. Овчинников А. В., Фан Ч. Д. Х. Обработка полусферических изображений: определение центра изображения и выделение вертикальных линий // Компоненты и технологии. 2011. № 12.
2. Гаганов В. Инвариантные алгоритмы сопоставления точечных особенностей на изображениях // Компьютерная графика и мультимедиа. 2009. Вып. № 7 (1) — http://cgm.computergraphics.ru/issues/issue17/invariant_features
3. Макарецкий Е. А., Овчинников А. В., Фан Ч. Д. Х. Полусферические камеры прикладных телевизионных систем: получение и преобразование полусферических изображений // Компоненты и технологии. 2010. № 9.
4. Lowe D. G. Object recognition from local scale-invariant features/Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 1999.
5. Вежнев В. Оценка качества работы классификаторов // Компьютерная графика и мультимедиа. 2006. Вып. № 4 (1) — <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/106>