

Метод построения навигационной системы мобильного робота на основе использования бортовой веб-камеры

Дмитрий Юхимец, Александр Новицкий
Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, Россия
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
{undim, alexzander}@dvo.ru

Аннотация

В данной работе предлагается метод построения навигационной системы мобильного робота (МР) на основе использования информации с бортовой камеры. При этом в качестве устройства получения видеоданных выступает веб-камера, которая имеет низкую стоимость, что приводит к удешевлению системы в целом.

Ключевые слова: Мобильный робот, Навигация, Веб-камера, Видеопоток, Обработка изображения, Формирование траектории.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных факторов, определяющих эффективность функционирования МР, является точность работы их навигационной системы. При этом одним из наиболее эффективных способов повышения указанной точности является использование видеоданных, поступающих с бортовой веб-камеры МР. Одним из наиболее распространенных методов использования видеоданных для навигации является применение стереокамер. Стереокамеры позволяют помимо графического представления окружения МР получать и карту глубин, по которым, в свою очередь, можно определить расстояние до объекта на кадре.

Пример такой системы описан в работе [3] на примере камеры MSVM-III. Указанная система основана на тринокулярной стерео машине, которая выдает карту глубины разрешением 320x240 пикселей. Однако в силу высокой стоимости указанное решение не является общедоступным.

Другой подход описан в работе [2], где навигационная система МР использует всенаправленную камеру и инфракрасные датчики. Указанный метод обладает высокой эффективностью, однако недостатком его является дороговизна и низкая распространенность всенаправленных камер, а также необходимость использования специфических и сложных алгоритмов обработки видеoinформации.

Еще одним примером использования веб-камеры является МР X80 [4]. Указанное решение отличается не высокой ценой, однако это обуславливается отсутствием бортового компьютера, так как все расчеты проводятся на внешних системах, на которые данные передаются посредством Wi-Fi. Основным недостатком такого подхода является низкая автономность получаемой системы.

Таким образом, в настоящее время существует потребность в создании методов построения навигационных систем МР на основе использования видеоданных, которые строились бы на

недорогих стандартных аппаратных и программных средствах.

2. НАВИГАЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОРТОВОЙ ВЕБ-КАМЕРЫ

Основной задачей, которая решается в данной работе, является формирование траектории движения МР и сигналов обратных связей для его системы управления на основе данных, получаемых с бортовой веб-камеры. При этом указанная задача рассматривается для двух режимов движения: движение по целевым точкам, обозначенным маркерами, и движение по траектории, задаваемой цветной линией.

2.1 Алгоритм работы системы

В общем виде алгоритм работы навигационной системы на основе использования данных, получаемых с бортовой веб-камеры, состоит из следующих этапов.

1. Получение кадра с бортовой камеры.
2. Устранение перспективных искажений.
3. Вычисление соотношения между пиксельными координатами и координатами в системе координат (СК) МР.
4. Для режима движения по целевым точкам:
 - a. выделение маркеров;
 - b. классификация выделенных маркеров.
5. Для режима движения по криволинейной траектории:
 - a. выделение криволинейной траектории;
 - b. расстановка контрольных точек на выделенной криволинейной траектории;
 - c. построение кубического сплайна по полученным контрольным точкам.
6. Использование полученной информации для управления МР.

Таким образом, результатом работы алгоритма, в зависимости от режима движения МР, будет являться массив кубических сплайн-функций или классифицированных маркеров с их координатами относительно МР. При этом для реализации алгоритма используются функции из свободной библиотеки с открытым исходным кодом *OpenCV*.

2.2 Устранение перспективных искажений

На изображении, полученном с веб-камеры, всегда присутствуют перспективные искажения, пример которых показан на рис. 2.1. На этом рисунке (а) красным контуром

отмечена область, которую охватывает камера при съемке. Как видно, эта область имеет трапециевидную форму, в то время как конечный кадр является прямоугольником.

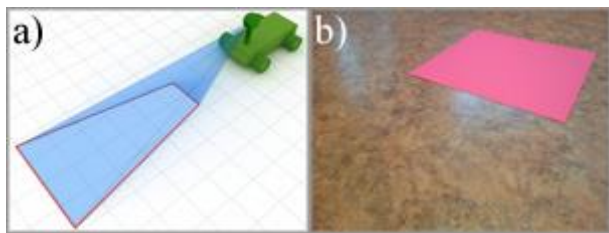


Рис 2.1: Схематичное изображение области, которую охватывает камера (а); пример кадра, полученного с бортовой камеры (б)

Процесс устранения перспективных искажений заключается в нахождении такого преобразования, которое позволит перейти от прямоугольного кадра, получаемого с видеокамеры, к форме области, охватываемой камерой. Для нахождения указанного преобразования используется эталонный маркер, а сам алгоритм состоит из следующих шагов.

На первом шаге происходит выделение калибровочного маркера из общего фона на основе информации о его цвете. Для этого последовательно используются следующие функции:

- *cvSplit* разбивает изображение на три цветовых составляющих RGB пространства;
- *cvInRangeS* отсеивает в изображении все, что выходит за рамки заданных пороговых значений;
- *cvAnd* суммирует слои, полученные на предыдущем этапе.

В результате формируется бинарное изображение, которое содержит только изображение калибровочного маркера. Пример работы указанной функции показан на рисунке 2.2 (а).

На втором шаге проводится выделение границ эталонного маркера на изображении, полученном на предыдущем шаге. Для этого используется фильтр Кенни, реализованный в функции *cvCanny*. Результат ее работы показан на рис. 2.2 (б).

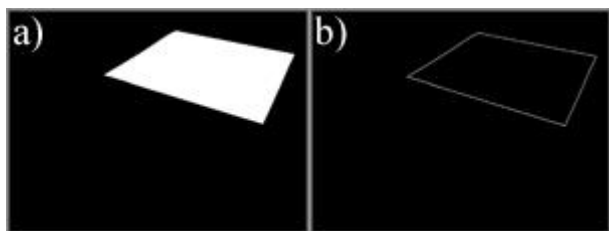


Рис 2.2: Результаты отсеивания по пороговым значениям (а) и работы функции *cvCanny* (б)

На третьем шаге происходит выделение прямых линий на полученном изображении и нахождение такого преобразования, которое переводит полученную на изображении форму маркера в форму, соответствующую эталону. Для этого сначала с помощью преобразований Хафа, реализованных в функции *cvHoughLines2*, проводится выделение прямых линий (см. рис. 2.3 (а)). Далее на основе информации о геометрической форме эталонного маркера с помощью функции *cvWarpPerspective* происходит изменение

угла между линиями, проходящими через точки 1,3 и 2,4 (см. рис. 2.3 (б)).

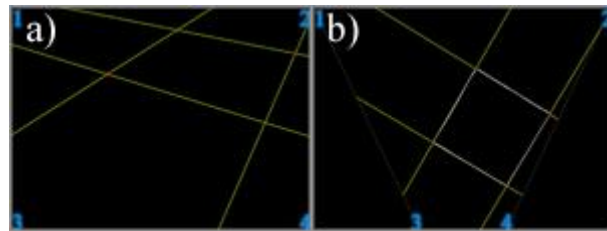


Рис 2.3: Результаты работ функций *cvHoughLines2* (а) и *cvWarpPerspective* (б)

Например, в случае, когда эталонный маркер имеет форму квадрата, изменение угла между указанными линиями можно прекратить тогда, когда угол между двумя любыми линиями, составляющими контур эталонного маркера и имеющими точку пересечения, станет равным 90°.

2.3 Вычисление коэффициента масштабирования между пиксельными координатами на кадре и координатами в системе мобильного робота

После устранения перспективных искажений необходимо определить соответствие между пиксельными координатами на изображении и координатами в СК МР. Для этого используется бинарное изображение, содержащее выделенный эталонный маркер (см. рис. 2.2(а)). Это изображение можно рассматривать как матрицу, каждому элементу которой в соответствие ставится цвет пикселя, в данном случае 0 – черный, 1 – белый. Сложив все элементы матрицы, мы получаем количество белых пикселей, которыми представлен калибровочный маркер. Эта величина *S* соответствует площади, занимаемой маркером, при этом, если маркер имеет квадратную форму, $S^{1/2}$ будет соответствовать длине его стороны в пикселах. Таким образом, масштабирующий коэффициент между пиксельными координатами и координатами в СК МР можно вычислить по следующей формуле:

$$K = \frac{\sqrt{S}}{A},$$

где *A* – размер стороны эталонного маркера в мм, а пиксельные координаты некоторой точки на изображении можно пересчитать в координаты в СК МР по следующим формулам:

$$x_c = (x_n - \frac{W}{2}) \cdot K, y_c = (H - y_n) \cdot K,$$

где x_n и y_n – пиксельные координаты, а *W* и *H* – ширина и высота кадра соответственно.

2.4 Режим движения по целевым точкам

В режиме движения по целевым точкам навигационная система МР должна определить нужный маркер, который задает целевую точку и его положение в системе координат МР. Следует отметить, что в данной работе рассматривается ситуация, когда маркеры расположены на плоскости движения мобильного робота и отличаются от общего фона достаточно ярким, контрастным цветом (см. рис. 2.4).

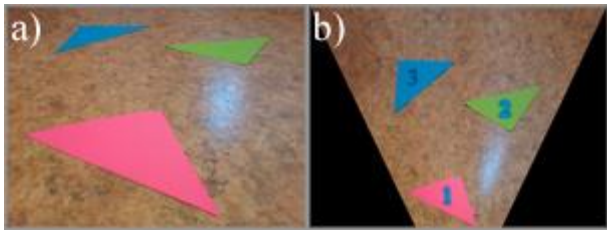


Рис 2.4: Кадр с маркерами до (а) и после (б) устранения перспективных искажений

Процесс выделения маркеров из изображения, полученного с бортовой видеокамеры, аналогичен процессу выделения эталонного маркера, описанному выше. При этом одновременно происходит разделение маркеров по цветам. Результат выделения маркеров из изображения на рис. 2.4 (б) показан на рис. 2.5.



Рис 2.5: Набор бинарных изображений, полученный после выделения маркеров

Каждое из этих изображений уже классифицировано относительно цвета и дальше будет рассматриваться только в своем классе.

После начального разбиения по цветовым классам необходимо классифицировать маркеры по форме, так как предполагается, что изначально известны все эталонные геометрические формы маркеров, которые передаются алгоритму в виде бинарных изображений.

Задача классификации выделенных маркеров по геометрической форме сводится к выделению контуров этих маркеров и их сравнению с эталонами.

Выделение контуров маркеров на изображении происходит в два этапа. На первом этапе с помощью функции *cvCanny* происходит выделение линий (результат показан на рис. 2.6), а на втором этапе с помощью функции *cvFindContours* происходит выделение всех замкнутых контуров на изображении, сформированном функцией *cvCanny*.

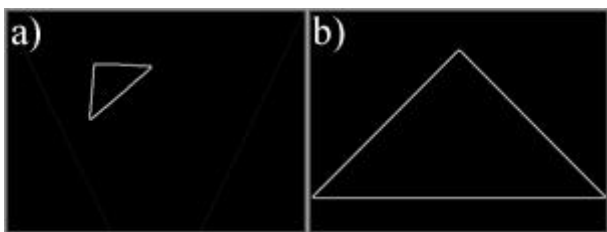


Рис 2.6: Результат выполнения функции *cvCanny*

В результате прохода в цикле всех замкнутых контуров, найденных на кадре, полученном с бортовой камеры, будет найден контур, который имеет наименьшую ошибку, выдаваемую функцией *cvMatchShapes*, отвечающей за сравнение моментов [1] – суммарных характеристик контуров, рассчитанных интегрированием всех пикселей контура. Найденный маркер обведен зеленой рамкой на рис. 2.7

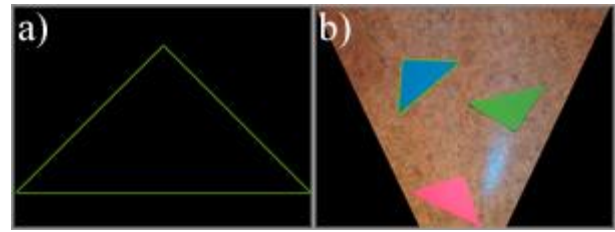


Рис 2.7: Результат выполнения функции *cvMatchShapes*

При этом в качестве координат маркера принимается среднее арифметическое координат последовательности точек контура:

$$x_c = \frac{(\sum_{i=0}^N x_i)}{N}, y_c = \frac{(\sum_{i=0}^N y_i)}{N},$$

где N – количество контрольных точек контура, а x_i и y_i – координаты одной точки контура.

После определения координат маркера эти координаты передаются в СУ МР для формирования сигналов управления его исполнительными устройствами.

2.5 Режим движения по криволинейной траектории

Криволинейной траекторией МР в данной работе является линия, нанесенная в плоскости перемещения МР. Также, как и в случае движения по целевым точкам, в данном режиме необходимо выделить указанную линию. Для этого, как было описано ранее, выполняется коррекция перспективных искажений и цветовая фильтрация. Результат выполнения этих операций представлен на рисунке 2.8.



Рис 2.8: Пример криволинейной траектории

После получения бинарного изображения необходимо сформировать аналитическое описание траектории, для чего целесообразно использовать описание в виде кубического сплайна.

Для построения кубического сплайна необходимо получить набор опорных точек, через которые будет проходить указанный сплайн. Для этого на бинарном изображении траектории с заданным шагом по вертикальной координате изображения (рис. 2.9 (а), зеленые горизонтальные линии) расставляются опорные точки (рис. 2.9 (а), синие точки), которые лежат на средней линии выделенной траектории.

Координаты сформированных опорных точек используются для определения коэффициентов сплайнов, описывающих траекторию на каждом отрезке между двумя соседними опорными точками. На рисунке 2.9 (б) белым цветом изображена криволинейная траектория, полученная с бортовой камеры, синим – отмечены опорные точки, а красным – показан интерполирующий кубический сплайн, проходящий через эти опорные точки.

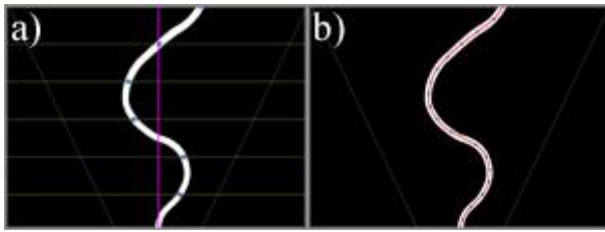


Рис 2.9: Расстановка опорных точек сплайна (а), сравнение кривой на плоскости и сплайна, построенного по опорным точкам (б)

Далее полученное аналитическое описание траектории параметризуется в функции времени, а пиксельные координаты траектории пересчитываются в координаты СК МР и передаются в его систему управления. После достижения предпоследней опорной точки цикл формирования траектории повторяется.

3. АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА

В качестве платформы, на которой проводилось тестирование разработанного алгоритма навигации, выступал мобильный робот, оснащенный бортовым компьютером на базе смартфона Efika MX и бортовой веб-камерой Logitech HD Webcam C270 (рис. 3.1). В процессе тестирования указанный мобильный робот перемещался в закрытом помещении со стационарным освещением, не оснащенном специальным навигационным оборудованием.



Рис 3.1: Мобильный робот на базе смартфона Efika MX

Для оценки вычислительной эффективности разработанного алгоритма была исследована производительность и точность работы указанного алгоритма в зависимости от разрешения исходного изображения.

Результаты исследований показали, что зависимость производительности алгоритма от разрешения изображения – линейная. При этом при разрешении 320x240 пикселей алгоритм на бортовом компьютере МР позволяет формировать навигационную информацию 10-15 раз в сек., что достаточно для эффективного управления движением МР.

В таблице 3.1 приведена зависимость погрешности в вычислении линейных размеров маркера от разрешения полученного кадра. Максимальная погрешность отмечена на разрешении 320x240 пикселей и составляет всего около двух миллиметров, что допустимо в задачах управления движением МР. Также было проведено тестирование работы СУ МР на основе данных, формируемых разработанным алгоритмом, которое показало, что МР точно проходит по заданной последовательности маркеров. Это подтверждает вычислительную эффективность и точность работы алгоритма.

Разрешение	Размер в пикселях	Вычисленный размер, мм	Погрешность, мм
1280 X 960	508,84	296,8252	0,159622
1024 X 768	407,71	296,2707	0,714161
800 X 600	318,94	298,0269	1,042024
640 X 480	253,21	295,1834	1,801406
320 X 230	126,61	294,8458	2,139078

Табл 3.1: Зависимость погрешности от разрешения исходного кадра

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был разработан метод построения навигационной системы МР на основе бортовой веб-камеры. Основное достоинство предложенного подхода заключается в использовании стандартных аппаратных средств и свободного программного обеспечения, что позволяет существенно снизить стоимость всей системы в целом. Разработанный алгоритм позволяет организовать движение МР в двух режимах: движение по целевым точкам, обозначенным маркерами, и движение по криволинейной траектории. Тестирование алгоритма на реальном МР показало, что он обладает высокой вычислительной эффективностью, что обеспечивает его работоспособность на бортовом компьютере МР, а также высокой точностью определения координат маркеров и заданной траектории.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант №11-07-98502).

6. ССЫЛКИ

- [1] Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV / O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472. 2008. С. 251 - 255.
- [2] Hsieh. C., Wang M., Kao L., Lin H. Mobile Robot Localization and Path Planning Using an Omnidirectional Camera and Infrared Sensors / Proc. of Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics, San Antonio, 2009, pp. 1947 – 1952.
- [3] Jia Y., Li M., An L., Zhang X. Autonomous navigation of a miniature mobile robot using real-time trinocular stereo machine/ Proc. of Int. Conf. Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, 2003, vol. 1, pp. 417 - 421.
- [4] Popa A. S., Popa M., Silea I., Varlan A. Indoor Navigation of a Wheeled Mobile Robot / Proc. of Intl. Conf. Human System Interactions, Krakow, 2008, pp. 1009 – 1014.

Об авторах

Дмитрий Юхимец – к.т.н, ИАПУ ДВО РАН. Его адрес: undim@iacp.dvo.ru.

Александр Новицкий – аспирант ИАПУ ДВО РАН. Его адрес: alexzander@dvo.ru.