

УДК 681.513; 004.932

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ СЕРВИСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Г.А. Прокопович (*rprakapovich@robotics.by*)
Объединённый институт проблем информатики
НАН Беларуси, Минск

Аннотация. Приводятся результаты экспериментов по разработке системы технического зрения, предназначенной для корректировки движения автономного мобильного робота по центру коридоров на основе данных от монокулярной камеры. Алгоритм выявления точки линейной перспективы основан на определении центра масс облака точек пересечения диагональных прямых, на которых лежат отрезки, найденные с помощью преобразования Хафа и образуемые краями и линиями цветовых переходов находятся в коридорах различных артефактов. Предложенный алгоритм протестирован на разработанном прототипе автономного мобильного робота с двухуровневой системой управления: нижний реализован на основе микроконтроллерной платы Arduino Mega, а верхний – на основе микрокомпьютера Raspberry Pi, управляющие программы для которых были смоделированы и сгенерированы в среде Simulink.¹

Ключевые слова: автономный мобильный робот, система технического зрения, точка линейной перспективы, преобразование Хафа.

Введение

По положительному примеру роботизации различных отраслей промышленности, одним из главных направлений автоматизации в логистике и социальной сфере является их частичная либо полная роботизация. На данный момент различными коллективами активно ведутся научно-практические работы по роботизации транспортно-складских задач, которые направлены на разработку алгоритмов пространственной ориентации и планирования оптимальных маршрутов автономными мобильными роботами (АМР), выполняющих транспортные и погрузочно-разгрузочные работы.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект №Ф15УК/А-048).

Целью данной работы является разработка надёжных и простых способов распознавания двумерных образов в режиме реального времени, необходимых для управления движением АМР по середине коридоров. Для решения указанной задачи чаще всего используются сканирующие дальнометры в инфракрасном или ультразвуковом диапазонах, системы технического зрения (СТЗ) с одной или несколькими видеокамерами, а также другие сенсоры, позволяющие строить карты внутри помещений [Герасюто и др., 2014]. На основе данных измерения расстояний до близлежащих предметов, а также анализа изображений по характерным точкам приборы данного типа позволяют получить дву- или трёхмерные изображения окружающего пространства перед АМР. Однако они характеризуются большой стоимостью и отрицательным влиянием на здоровье персонала.

1 Программная часть разработанной СТЗ

На рис. 1 изображена функциональная схема разработанной СТЗ, предназначенная для управления движением АМР в стандартных комнатах и коридорах жилых и производственных помещений. Причём, при постановке технического задания разрабатываемой системы управления АМР ставились жёсткие условия: использовать в качестве сенсоров, необходимых для движения АМР вдоль коридоров, исключительно одну монокулярную RGB-видеокамеру. Полученные в блоке принятия решений управляющие сигналы подаются на нижний уровень системы управления АМР. Камера и блок принятия решений более подробно будут рассмотрены ниже. Пунктирной линией выделены этапы предварительной обработки.



Рис. 1. Функциональная схема предложенной СТЗ.

Предварительная обработка сенсорных данных является неотъемлемой частью современных систем управления, так как она позволяет в потоке избыточных данных найти те характерные элементы (реперы), на основе которых построены конкретные алгоритмы принятия решений. Наиболее важным этапом предварительной обработки сенсорных данных является этап сегментации, по результатам которого объём данных значительно сокращается, но зато увеличивается количество полезной информации. Далее рассмотрим этапы предварительной обработки более подробно.

1.1 Предложенная гипотеза для пространственного ориентирования АМР

Все артефакты, созданные человеком, отличаются исключительным свойством наличия прямых линий и углов, что очень редко встречается в живой природе. Поэтому, в качестве одного из способов движения АМР в жилых и производственных помещениях предлагается использовать точку линейной перспективы, состоящей из пересечения диагональных и горизонтальных линий. Так, если рассмотреть, например, коридоры больниц или складские помещения со стеллажами, то все они состоят из прямых плоскостей и горизонтальных линий: между полом и стенами, потолком и стенами, стеллажами и т.д.

Предложенный алгоритм [Прокопович и др., 2014] основан на оптическом явлении линейной перспективы – явлении мнимого искажения пропорций и формы тел при их визуальном наблюдении. В данной работе был использован линейный вид перспективы, рассчитанный на фиксированную точку зрения и предполагающий единую точку схода на линии горизонта, т.е. когда предметы уменьшаются пропорционально по мере удаления их от переднего плана. Поэтому на захваченном видеокамерой графическом изображении можно будет выделить параллельные линии вдоль оптической оси видеокамеры, которые пересекаются в общей точке, расположенной в идеале в центре изображения.

Следовательно, задача ориентирования АМР сводится к выделению на графических изображениях диагональных линий, образуемых краями и линиями цветовых переходов полов, стен, дверей, стеллажей и т.д., с последующим определением точки их линейной перспективы. Определив координаты точки перспективы конкретного помещения на цифровом изображении далее можно вычислять корректирующие коэффициенты для движения АМР. Причём, предложенный способ может использоваться для реализации задачи навигации роботов как внутри, так и вне помещений.

1.2 Предварительная обработка видеоданных

В данной работе представлены результаты экспериментов по разработке алгоритмов сегментирования сенсорных данных на основе преобразования Хафа [Гонсалес и др., 2006]. Преобразование Хафа предназначено для поиска в сенсорных данных различной природы объектов, принадлежащих определённому классу фигур с использованием процедуры голосования. Процедура голосования применяется к пространству параметров, из которого и получают объекты определённого класса фигур по локальному максимуму в, так называемом, накопительном пространстве.

Преобразование Хафа – это преобразование координат всех ненулевых пикселей во входном бинарном изображении в абстрактное пространство параметров. Эти параметры точно задаются аналитическим уравнением необходимой формы (линии, окружности, эллипса и т.д.). В этом результирующем пространстве параметров обнаруживается задаваемое число пиков (глобальных максимумов), а затем соответствующие пространственные координаты преобразуются обратно в плоскость изображения в виде обнаруженного объекта (линии, окружности).

Наиболее распространенным является преобразование Хафа для обнаружения линий и кругов. Оно играет важную роль в решении задач навигации мобильной робототехники и понимании сцены. Например, двоичная версия границ изображения (контуры) [Форсайт и др., 2004] может служить в качестве входного значения для преобразования Хафа при обнаружении прямых линий. Произвольную линию перпендикуляра ρ от начала координат и угла θ наклона нормальной линии от оси x можно представить в параметрической форме, заданной уравнением

$$\rho = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta).$$

В этом случае двумерное пространство координат изображения (X , Y) отображается в новом пространстве параметров линейного уравнения (ρ , θ), также часто называемое Хаф-аккумулятором. X и Y координаты каждого ненулевого пикселя во входном бинарном изображении превращаются в одну пару параметров (ρ , θ). В аккумуляторе соответствующая точка вычисленных координат ρ и θ увеличивается на 1. Такая избирательная система является причиной того, что все пиксели, лежащие в одной прямой линии, создают пики в аккумуляторе с максимальным значением, соответствующим количеству пикселей. Неидеальная форма линии приводит к смазыванию пиков, но все равно она отличается от нижней окрестности.

2 Аппаратная часть разработанной СТЗ

В качестве прототипа АМР, оснащённого разработанной СТЗ и способного самостоятельно двигаться по центру комнат и коридоров, использовался полноприводный четырёхколёсный мобильный робот (рис. 2). Указанный АМР разработан на базе шасси Rover 5, оснащённого четырьмя инкрементными энкодерами и на борту которого были установлены монокулярная камера, отдельные платы нижнего и верхнего уровня, соединённые между собой по интерфейсу RS232, беспроводной канал связи с оператором на базе USB Wi-Fi модуля, дополнительный DC-DC понижающий преобразователь напряжения и 7.4В Li-Po батарея питания.

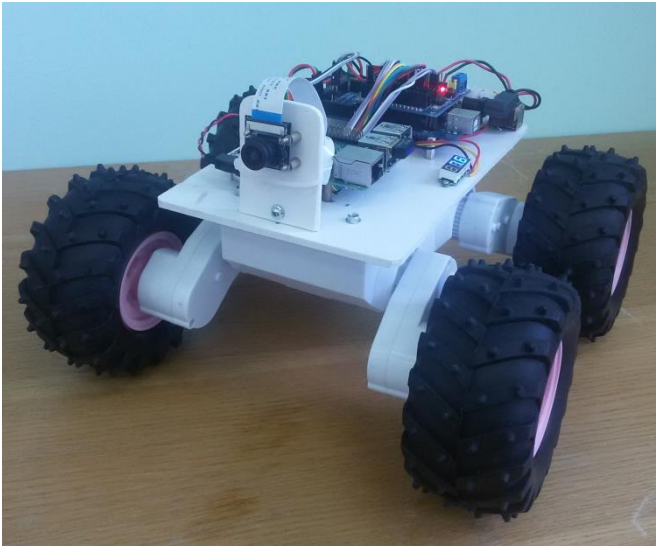


Рис. 2. Внешний вид разработанного АМР с двухуровневой системой управления.

2.1 Состав и структура нижнего уровня управления

Нижний уровень управления разработанной СТЗ, которая сама является основной частью системы управления АМР, представлен двумя вдвоенными мостовыми драйверами двигателей на основе микросхемы L298N и платой Arduino Mega, которая построена на микроконтроллере ATmega2560 и имеет 54 цифровых входа/выходов, 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, USB коннектор и разъем питания. Основной функцией нижнего уровня является управление четырьмя двигателями постоянного тока, которое реализует:

- генерацию ШИМ-сигналов;
- реверсное управление;
- съём данных с инкрементных энкодеров;
- реализацию ПИД регулятора по скорости и углу поворота;
- контроль за электрическими показателями батареи питания.

2.2. Состав и структура и верхнего уровня управления

Верхний уровень управления представлен одноплатным микрокомпьютером Raspberry Pi, первоначально разрабатываемый для образовательных и научных целей. Одно из последних поколений Raspberry Pi 2 (далее RPi2) было выпущено в 2015 году. Второе поколение

основано на системе Broadcom BCM2836 на чипе с четырехъядерным процессором ARM Cortex-A7 и двухъядерным GPU VideoCore IV и с 1 Гб оперативной памяти. Эта небольшая, универсальная и высокопроизводительная платформа отлично подходит для прототипирования систем машинного зрения и решения задач мобильной робототехники.

В качестве монокулярной камеры использовалась плата расширения камеры для Raspberry Pi (RPiCam). RPiCam оснащена 5-Мп CMOS сенсором OmniVision 5647 с максимальным разрешением 2592 на 1944 пикселей и скоростью передачи 1080p / 30 кадров в секунду или 720p / 60 кадров в секунду.

Плата RPiCam имеет размер 25x20x9 мм и напрямую подключается к специализированному видео разъему на RPi2 платформе плоским многожильным кабелем. RPi2 содержит дополнительные интерфейсы HDMI, USB, RJ45, GPIO, аудио-разъем jack 3,5 мм и разъемы для подключения дополнительных устройств RPi.

3 Разработка управляющих программ в среде Simulink

Matlab является мощным инструментом для научных вычислений и моделирования технических систем [Герман-Галкин, 2008]. Он оснащен такими мощными библиотеками для решения задач компьютерного зрения и компьютерной обработки изображений, как Computer Vision Toolbox, Image Processing Toolbox и Image Acquisition Toolbox. Было решено реализовать указанные выше алгоритмы обработки изображений на RPi2, а управление двигателей на Arduino Mega с помощью среды Simulink. Инструменты среды Simulink позволяют проектировать приложения для компьютеров RPi и микроконтроллерных плат семейства Arduino с помощью дополнительных пакетов Simulink Support Packages для Raspberry Pi Hardware и Arduino Hardware.

3.1. Simulink-модель управления верхним уровнем

На рис. 3 изображены основные функциональные блоки Simulink-модели, которая реализует предложенный алгоритм нахождения точки перспективы в кадрах видеопотока на верхнем уровне управления:

- блок Preprocessing соответствует блоку «Фильтрация» (рис. 1б). Этот блок предназначен для преобразования цветового пространства изображения из RGB в градации серого с последующим выделением контуров объектов (рис. 4б), которое в данном случае выполнено с помощью стандартного преобразования с ядром Робертса;

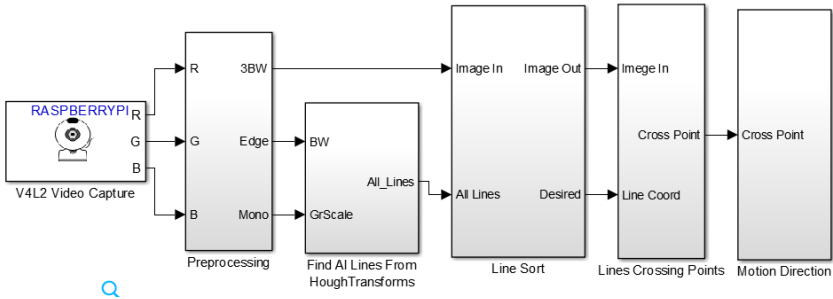


Рис. 3. Основные функциональные блоки системы технического зрения.

- блок Find All Lines From Hough Transforms соответствует блоку «Сегментация» (рис. 1б). Этот блок необходим для перевода контуров монохромного изображения в прямые отрезки и прямые линии с помощью применения стандартного преобразования Хафа (рис. 4е);
- блок Line Sort соответствует блоку «Классификация/кластеризация» (рис. 1з) и предназначен для сортировки всего набора отрезков на 3 класса: вертикальные, горизонтальные и диагональные. С помощью полученных данных были просчитаны реальные координаты найденных отрезков на рассматриваемом изображении (рис. 4з);
- блок Lines Crossing Points соответствует блоку «Принятие решений» (рис. 1д). Он предназначен для обнаружения точки перспективы и дальнейшего принятия решения корректировки движения АМР. Для решения поставленной задачи данный блок был настроен на пропускание только диагональных отрезков, т.к. на анализе их расположения и взаимного пересечения можно определить точку линейной перспективы. Другим словами, в блоке осуществляется сепарация и удаление всех вертикальных (голубых) и горизонтальных (жёлтых) отрезков, чтобы остались только диагональные отрезки (зелёные), с помощью которых можно найти координаты точки линейной перспективы (рис. 4д). Для выявления точки перспективы требуется найти все точки пересечения диагональных отрезков в кадре (синие кружки) и вычислить центр масс облака этих точек (красный крестик);

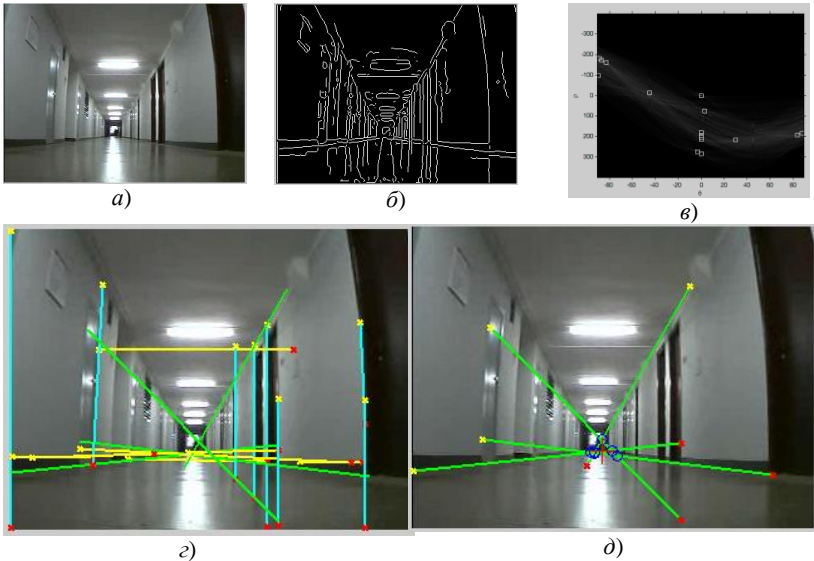


Рис. 4 Иллюстрация этапов выявления точки линейной перспективы

- На основе найденных координат расположения вычисленной точки линейной перспективы в кадре относительно оси Y в блоке Motion Direction, выходные значения которого подаются на нижний уровень системы управления, принимается решение, в какую сторону АМР следует корректировать траекторию своего движения.

3.2. Simulink-модель управления нижним уровнем

На рис. 5 изображены основные функциональные блоки Simulink-модели, реализующей нижний уровень управления.

Блок Communication позволяет обмениваться микрокомпьютеру RPi2 и микроконтроллерной плате Arduino Mega управляющими сигналами и сенсорными данными по протоколу RS232. Для этого используется разработанный ранее командный протокол [Сычѳв и др., 2014].

Блок PID Controller реализует ПИД-регуляторы по двум контурам управления: по скорости движения и углу поворота шасси АМР. Управляющие значения Left Wheel Speed, Right Wheel Speed и Direction, необходимые для функционирования следующего блока, определяются на основе вычисленных и фактических значений инкрементных энкодеров. Коэффициенты ПИД-регуляторов определялись эмпирически.

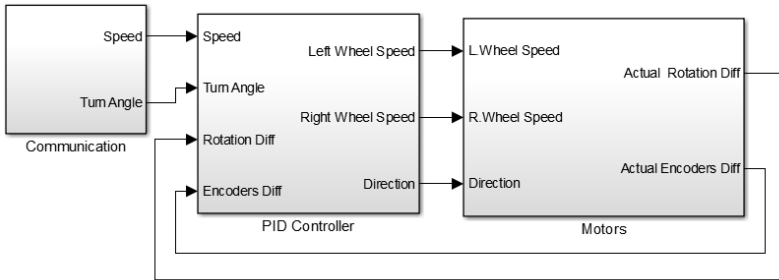


Рис. 5. Основные функциональные блоки системы управления нижнего уровня

Блок Motors реализует управление всеми четырьмя двигателями на основе переданных значений. Подсчёт количества тиков с каждого из энкодеров производится с помощью программных счётчиков.

Заключение

Предложенная СТЗ была протестирована на разработанном прототипе АМР с двухуровневой системой управления в реальных условиях. Разработанные и реализованные алгоритмы управления позволили АМР безошибочно двигаться по середине коридоров трёх различных зданий с максимальной для выбранного шасси скоростью – 54 м/мин.

Таким образом, полученные результаты дают основание полагать, что полученные алгоритмы могут лечь в основу подпрограмм управления сервисными роботами, предназначенных для погрузочно-разгрузочных работ. Это могут быть роботы-санитары, развозящие еду по палатам больницы, либо транспортные роботы для работы на автономных товарных складах.

В дальнейших работах планируется повышать уровень робастности предложенного алгоритма пространственного ориентирования АМР, так как он был испытан в «пустых» коридорах, т.е. без наличия движущихся людей. Также следует уделить внимание алгоритмам поиска точки перспективы, если она будет в процессе движения утеряна либо не будет находиться в момент старта.

Список литературы

- [Герасюто и др., 2014] Герасюто С.Л., Прокопович Г.А., Сычёв В.А. Построение навигационной карты внутри помещений по величине магнитного поля земли MEMS сенсором мобильного робота // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – №3. – С. 53-56.
- [Прокопович и др., 2014] Прокопович Г.А., Шагов Д.Н. Прототип автономного

транспортно-складского робота с развитой сенсорной системой // Автоматизация и роботизация процессов и производств : мат. респ. науч.-практич. семинара / редкол.: Пантелеенко Ф.И. (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2014. – 2014. – С. 98-100.

- [Форсайт и др., 2004]** Форсайт Д.А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. // Вильямс. – 2004 г. – 928 с.
- [Гонсалес и др., 2006]** Гонсалес, Р., Р. Вудс, С. Эддинс. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Гонсалес, Р., Р. Вудс, С. Эддинс // Техносфера. – 2006 г. – С. 410-421.
- [Герман-Галкин, 2008]** Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб. : КОРОНА-Век. – 2008. – 368 с.
- [Сычѳв и др., 2014]** Сычѳв В.А., Герасюто С.Л. Разработка протокола и программно-аппаратного обеспечения системы централизованного управления группой роботов // Автоматизация и роботизация процессов и производств : материалы республиканского научно-практического семинара / редкол.: Пантелеенко Ф.И. (гл. ред.) [и др.] Минск : Бизнесофсет. –2014. С. 101-102.